



**Universidade de Brasília - UnB**  
**Instituto de Geociências - IG**  
**Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica**

**TESE DE DOUTORADO N° 78**

**DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS SUSTENTÁVEIS PARA OUTORGA DE  
RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS: APLICAÇÃO PARA O  
ESTADO DA BAHIA**

**VAGNEY APARECIDO AUGUSTO**

**Área de Concentração:** Hidrogeologia e Meio Ambiente.

Brasília - DF  
2022

**VAGNEY APARECIDO AUGUSTO**

**DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS SUSTENTÁVEIS PARA OUTORGA DE  
RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS: APLICAÇÃO PARA O  
ESTADO DA BAHIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Área de concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> José Eloi Guimarães Campos (IG/UnB)

Brasília - DF  
2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

AA923d Augusto, Vagney Aparecido  
DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS SUSTENTÁVEIS PARA OUTORGA DE  
RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS: APLICAÇÃO PARA O ESTADO DA  
BAHIA / Vagney Aparecido Augusto; orientador José Eloi  
Guimarães Campos. -- Brasília, 2022.  
123 p.

Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) -- Universidade  
de Brasília, 2022.

1. Hidrogeologia. 2. vazões outorgáveis. 3. aquíferos. 4.  
critérios técnicos de outorgas. 5. hidrogeoclimático. I.  
Guimarães Campos, José Eloi, orient. II. Título.

**Referência bibliográfica**

AUGUSTO, V.A. **Definição de critérios sustentáveis para outorgas de recursos hídricos subterrâneos: aplicação para o Estado da Bahia.** 2022. 123p. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2022.

**Cessão de direitos**

NOME DO AUTOR: Vagney Aparecido Augusto

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Definição de critérios sustentáveis para outorgas de recursos hídricos subterrâneos: aplicação para o Estado da Bahia.

Autorizo a Universidade de Brasília a reprodução parcial ou total desta tese de doutorado por meio eletrônico, impressão e/ou download, para fins de pesquisa e produção científica brasileira. Com obrigatoriedade de citação da obra.

Grau: Doutor Ano: 2022.

**VAGNEY APARECIDO AUGUSTO**

**DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS SUSTENTÁVEIS PARA OUTORGA DE  
RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS: APLICAÇÃO PARA O  
ESTADO DA BAHIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Área de concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente.

APROVADA EM 21 DE DEZEMBRO DE 2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos (Orientador) - Presidente da Banca  
Instituto de Geociências/ Universidade de Brasília (IG/UnB)

Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal - Examinador Externo  
Instituto de Geociências/Universidade Federal da Bahia - IG/UFBA

Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva - Examinador Externo  
Instituto de Geociências/Universidade Federal do Rio de Janeiro - IG/UFRJ

Prof. Dr. Detlef Hans-Gert Walde - Examinador Interno  
Instituto de Geociências/ Universidade de Brasília (IG/UnB)

**BRASÍLIA - DF, 21 DE DEZEMBRO DE 2022.**

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a um ser incrível e indescritível. Alguém que é sempre presente mesmo distante. Um ser que mesmo diante de tanto sofrimento foi inabalável no seu amor, humor, alegria, cuidado, disposição, abdicção, companheirismo e resiliência. Para mim, uma das maiores referências de vida, na humildade, simplicidade, realização, doação, solidariedade, empatia, e felicidade. Um ser que parece ser impossível ser. Um ser que viveu pelos outros e muito ensinou sem ter recebido instrução formal. Para mim, uma fonte de paz, equilíbrio, perseverança e amor incondicional. Ou seja, alguém que pela vida, incansavelmente, fez muito além do necessário.

*Mãe fica aqui um singelo reconhecimento de sua importância na minha vida!*

*In Memoriam Conceição Justino Camargo.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeira mão ao Prof. Eloi, que desde início ofereceu apoio, instrução, disposição, atenção e cuidados em todas as etapas do trabalho. Mais que do isso, foi um companheiro, conselheiro, amigo, um ser compreensível e sensível em todos os momentos necessários. É preciso reconhecer, elogiar, ressaltar e agradecer seu papel durante todo o trabalho, nos aspectos humanos e técnicos. Prof. Eloi fica aqui, em poucas palavras, meu sincero reconhecimento e agradecimento. MUITÍSSIMO OBRIGADO!

Também agradeço em nome do Prof. Welitom Rodrigues Borges a todos os demais professores(as) do Instituto de Geociências que de uma forma ou de outra contribuíram para meu aprendizado, evolução e amadurecimento. O que somos é uma soma, produto da contribuição de muitos. Quero reconhecer o importante papel de todos os professores nessa jornada, incluindo os coordenadores(as) da pós-graduação e todos os demais servidores da UnB. Muito obrigado!

Aos meus colegas e amigos da pós-graduação, agradeço por toda companhia e ajuda. Em nome do Boi (“vulgo” Lucas Teles), Walczuk, Julio, Tassiane, Eduardo “B2”, Diogo, Karina externo a todos os demais. Especial agradecimento aos geólogos(as) Mizuno, Victória, Joyce, pela ajuda em atividades de campo e todas as contribuições.

Um especial agradecimento a toda minha família, a qual representa minha base, minha motivação e todo suporte para realização. Em nome de meus filhos (Eric e Lais), e da excelentíssima parceira de vida e de todas as jornadas (Kelliane) fica minha eterna gratidão. MUITÍSSIMO OBRIGADO!

Por fim, agradeço à UnB pelo que representa e oferece diretamente as inúmeras pessoas (professores, alunos, servidores) e a sociedade em geral. A universidade sempre teve importante papel no mundo, principalmente na melhoria da qualidade de vida das pessoas e da sociedade. Espero ser parte deste mundo transformador de ideias, práticas, experimentações, evolução e de melhorias.

Muito obrigado a todos que contribuíram!

*Conforme a Portaria 206 de 4 de setembro de 2018, que dispõe de obrigatoriedade de citação da CAPES. Firmo aqui que: “o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.*

## RESUMO

AUGUSTO, V.A. **Definição de critérios sustentáveis para outorgas de recursos hídricos subterrâneos: aplicação para o Estado da Bahia.** 2022. 123p. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2022.

A Política Nacional de Recursos Hídricos instituída pela Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, prevê a outorga do direito de uso sobre a água como um instrumento de gestão e de controle administrativo. A legislação determina que a bacia hidrográfica seja a unidade básica de gestão territorial para a implantação da política, via comitês de bacias e, instituiu que as águas subterrâneas são de responsabilidade dos Estados, enquanto as águas superficiais são de responsabilidade da União e dos Estados. Os recursos hídricos subterrâneos ocorrem em aquíferos que podem ser maiores que as bacias hidrográficas e, muitas vezes, ultrapassam os limites geográficos dos Estados, ocasionando potenciais conflitos entre gestores de bacias e/ou entre os Estados e a União, caso o processo de gestão das águas subterrâneas, via outorga, não seja embasado em critérios técnicos e científicos sustentáveis. A Política Nacional de Recursos Hídricos foi estabelecida há mais de 20 anos, contudo grande parte dos Estados brasileiros não praticam critérios sustentáveis para emissão de outorga de águas provenientes dos aquíferos. De forma geral, os critérios praticados se baseiam em limites mínimos de disponibilidade de água, considerando basicamente as águas superficiais. Em se tratando dos aquíferos, critérios subjetivos geralmente são a base para emissão de outorga de direito de uso. O Estado da Bahia é composto em parte por clima semiárido, seus lagos/rios e reservatórios superficiais tem forte dependência dos aquíferos para manter seus recursos superficiais, em períodos secos. Além disso, o estado apresenta grande variabilidade de condições geológicas, hidrogeológicas, climáticas e ambientais, e não utiliza critérios técnicos sustentáveis para emissão de outorga para águas subterrâneas. O uso dos recursos subterrâneos sem controle adequado põe em risco não só sua disponibilidade, mas também a perenidade de rios, lagos e reservatórios de geração de energia elétrica, fontes do Operador Nacional Sistema Elétrico. A solução para esses problemas pode ser complexa e pode envolver diversas esferas técnicas e políticas, contudo os critérios técnicos e científicos são considerados fundamentais neste contexto. Por isto, este trabalho de pesquisa teve a pretensão de contribuir tecnicamente para melhoria da gestão dos recursos hídricos subterrâneos por meio da proposição de critérios técnicos sustentáveis, de simples aplicação às condições hidrogeológicas do estado da Bahia. Os critérios propostos seguem a premissa de representar e respeitar a gama de variabilidades e características hidrogeológicas dos aquíferos, das condições ambientais e climáticas, da disponibilidade hídrica e dos efeitos no uso e na gestão dos recursos hídricos para todo o estado. Dentre os principais critérios aplicados aos diferentes compartimentos hidrogeoclimáticos destacam-se: um percentual das vazões dos poços, capacidades específicas dos poços e tempo de recuperação do nível d'água no teste de bombeamento. Os critérios foram propostos de forma diferenciadas nos diferentes aquíferos (intergranulares, confinados etc.). Com isso, esse trabalho apresenta pontos técnicos relevantes que embasam a gestão sustentável das águas subterrâneas.

**Palavras-chaves:** vazões outorgáveis, aquíferos, critérios técnicos, hidrogeoclimático.

## ABSTRACT

AUGUSTO, V.A. **Definição de critérios sustentáveis para outorgas de recursos hídricos subterrâneos: aplicação para o Estado da Bahia.** 2022. 123p. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2022.

The Brazilian National Water Resources Policy 1997 (Federal Law nº 9,433 from January 8<sup>th</sup>) provides the directory of water users' rights as a tool to water resources management and control. These laws determine that the watershed is the basic unit of territorial management for the implementation of Water Resources National Planning. Also established that groundwater is the state domain, while surface waters are the federal government and state domain. These configurations can result in some problems because groundwater resources occur in larger aquifer areas that straddle watersheds and state boundaries. This leads to potential conflicts between watershed managers, and/or between the state and the federal government if the processes of management of groundwater occur without sustainable technical criteria. The Water Resources National Planning was established more than 20 years ago, but many of the Brazilian states do not practice sustainable criteria for groundwater management. In general, the applied criteria are based on minimum levels of availability, applying primarily to surface water, while groundwater often uses subjective criteria. Bahia State in Brazil is composed partly of semiarid; lakes/rivers and surface reservoirs have a strong dependence on groundwater to keep the resources in dry periods. Additionally, Bahia has a great variability of geological/hydrogeological, climatic, and environmental conditions, and does not apply sustainable technical criteria for the management of groundwater. The use of groundwater without proper control endangers not only availability but also the permanency of rivers, lakes, and reservoirs of electricity generation sources, part of the National Electric System Operator. The solution to these problems can be complex and can involve several technical and political spheres, but technical and scientific criteria are considered fundamental in this context. For this reason, this research work intended to contribute technically to the improvement of groundwater resources management through the proposition of the necessary technical criteria, simple to be applied to the hydrogeological conditions of the Bahia state. The proposed criteria follow the premise of representing and following the range of variability and hydrogeological characteristics of aquifers, environmental and climatic conditions, water availability, and effects on the use and management of water resources for the entire state. The main criteria applied to the different hydrogeoclimatic compartments include a percentage of well yield, specific capacities, and water level recovery time in the yield test. The criteria were proposed differently in different aquifers (intergranular, confined, etc.). Thus, this work presents relevant technical points that support the sustainable management of groundwater.

**Keywords:** Sustainable yields, aquifers, technical criteria, hydrogeoclimatic.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1.** Mapa com as 25 Regiões de Planejamento e Gestão das Águas - RPGA. As 16 áreas de RPGAs em cor laranja são as unidades que já tem comitê de bacias definidos, conforme se prevê a Lei das Águas (9.433/1997). As demais RPGAs em cinza estão com seus comitês de bacias pendentes de organização. Fonte: <http://progestao.ana.gov.br>. 20
- Figura 2.2.** Consolidação dos critérios de outorgas para águas subterrâneas praticados nas 27 unidades federativas do Brasil. Foram identificados 7 critérios objetivos e 9 subjetivos totalizando 16, e mais 5 exigências requeridas a todos estados de forma diferenciadas entre eles. Alguns critérios (D) considerados subjetivos são usados no DF de forma objetiva e numericamente definidos, e aplicados com valores diferenciados por aquíferos. 21
- Figura 3.1.** Fluxograma simplificado com as principais etapas de trabalho desenvolvidas. 30
- Figura 3.2.** 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). 33
- Figura 3.3.** Mapa de densidade de lineamentos estruturais ( $n^{\circ}$  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. 35
- Figura 3.4.** 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 potencimetria 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). 37
- Figura 3.5.** 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*, azimute de 265° e ângulo de 60°). 43
- Figura 3.6.** 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 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10). 45
- Figura 3.7.** Bloco-diagrama representando os sistemas de aquíferos do Domínio Cristalino Semiárido. Sua localização é mostrada pelo ponto A na Figura 3.6. 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 em profundidades. Foram usados dados SRTM para modelagem do relevo e interpretação dos lineamentos. 46
- Figura 3.8.** 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 4.6. Em subsuperfície, observam-se os acamamentos dobrados conectados ao intenso sistema de fraturas verticais que atingem a superfície. Essas áreas têm raras ocorrências solos, permitindo percolação e infiltração direta das águas de chuvas. 47
- Figura 3.9.** Bloco-diagrama representando os sistemas de aquíferos do Domínio Cárstico Semiárido. A localização do bloco é mostrada pelo ponto C da Figura 4.6. 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. 48
- Figura 3.10.** Bloco-diagrama representando os sistemas de aquíferos do Domínio Sedimentar Subúmido. A localização do bloco é mostrada pela letra D na Figura 4.6. Em subsuperfície observam-se dois

sistemas de aquíferos, o sedimentar-intergranular arenosos interconectado ao metassedimentar-fissural. O recorte está sobre um afluente do rio Paraguaçu, mostrando relevo semiplano e vales encaixados nos lineamentos regionais. 49

**Figura 4.1.** Mapa de localização do estado da Bahia, mostrando a variabilidade do relevo e as condições climáticas representadas pelas isoietas indicando ampla variabilidade de variações pluviométricas. A direita sobre o relevo, estão as linhas de drenagens indicando grande variabilidade na disponibilidade hídrica dos cursos d'água superficiais indicadas pelas vazões mínimas (vazão  $Q_{95}$ ), fonte: <https://dadosabertos.ana.gov.br>. **Erro! Indicador não definido.**

**Figura 4.2.** Fluxograma simplificado com as principais etapas de desenvolvimento do trabalho. **Erro! Indicador não definido.**

**Figura 4.3.** Mapa das unidades hidrolitológicas da Bahia com suas respectivas percentagens de ocorrência, elaborado com base em Diniz *et al.* (2014) e Dalton de Souza *et al.* (2003). **Erro! Indicador não definido.**

**Figura 4.4.** Mapa da delimitação de Domínios Hidrogeoclimáticos, unidade base para definição dos critérios de usos das águas subterrâneas no Estado da Bahia. **Erro! Indicador não definido.**

**Figura 4.5.** Mapa da distribuição dos poços tubulares profundos no Estado da Bahia. **Erro! Indicador não definido.**

**Figura 4.6.** Os pontos representam os valores das flutuações anuais dos níveis d'água de 9 poços de monitoramento (RIMAS/CPRM) sobre o Sistema Aquífero Urucuia. A linha azul representa a média anual da flutuação dos poços. A linha vermelha a média geral (0,92 m/ano) da flutuação em todos os poços no período de 2011-2022. **Erro! Indicador não definido.**

**Figura 4.7.** Proposição dos critérios aplicáveis para emissão de outorga de direito de uso para águas subterrâneas para o Estado da Bahia. **Erro! Indicador não definido.**

**Figura 4.8.** Modelo conceitual do Sistema Aquífero Urucuia, mostrando os aquíferos suspenso e regional profundo. Incluindo dados de poços, e a posição de nascentes na zona de descarga da borda oeste do sistema na divisa com o Estado de Goiás. **Erro! Indicador não definido.**

**Figura 4.9.** Desenho esquemático mostrando fórmula de prevenção da intrusão salina, a relação de equilíbrio das descargas de água doce sobre as águas salinas na zona de costa, e a zona de transição (adaptada de Fetter 2004, Dogan & Fares 2008). **Erro! Indicador não definido.**

**Figure 5.1.** Location of the study area, in the Brazil and Bahia state, including the geological units (modified form Dalton *et al.*, 2003); the reference cities; the limits of the semiarid climate region, among other geographic aspects. **Erro! Indicador não definido.**

**Figure 5.2.** Simplified flowchart of the steps and activities prepared to carry out this work. **Erro! Indicador não definido.**

**Figure 5.3.** On the left there is a topographic image (ALOS) of the region with the study area delimitation. On the right, there is a geological map indicating the occurrences of sandy sedimentary types within the São Francisco Paleodunes Aquifer system. The black arrows (A-J) indicate the direction and position of the GPR radargrams presented in Figures. 5.4, 5.5, and 5.6. **Erro! Indicador não definido.**

**Figure 5.4.** Radargrams (2D) indicating the separation between stratified sediments and the basement (black line), and the water table identification (blue line). White lines indicate stratifications/radarfacies. Radargram **A** was obtained in the region with fluvio-eolian sediments with paleochannel filled above the basement. Radargrams **B** and **C** were obtained over the eolian deposits near the Estreito range. Radargram **C** is an eastward linear continuity disconnected (by 1 km) from **B**. In radargram **C** a well was used as a parameter controlling the water table. **Erro! Indicador não definido.**

**Figure 5.5.** Radargrams (2D) indicate the separation between stratified eolian sediments and the basement (black line), and the water table identification (blue line). White lines indicate stratifications/radarfacies. These radargrams were obtained in the regions of large dunes, one in the Umburana stream valley **D** and the others (**E** and **F**) bordering the Boa Vista stream. In both, thick sandy strata/radarfacies were observed, around 20-30 m. In radargram **D** the unconsolidated sedimentary package exceeds 120 m in depth. **Erro! Indicador não definido.**

- Figure 5.6.** Radargrams (2D) indicate the separation between stratified aeolian sediments and the basement (black line), and the water table identification (blue line). The yellow (**G**) and white (**H**, **I**, and **J**) lines indicate the stratifications/radarfacies. Radargrams **G** and **H** were obtained near the São Francisco River, **G** in the Paulista community, from the dunes to the Paulista well on the São Francisco Riverbank, and the **H** parallel to the São Francisco River crossing the eolian sediments and basement outcrops. Radargram **I** was obtained in a line perpendicular to the migration of the stretched “V” dunes. Radargram **J** is in the northwest region of the dune field, where the aeolian sediments are thin (<30m) and dry. The water levels obtained in wells in the northwest region are at depths >40 m, in the fractured basement. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.7.** Schematic depositional geological model of the São Francisco Paleodunes Aquifer, showing the different mixed eolian sedimentary types and the interfingering fluvial sediments. Eolian-colluvial sediments are restricted to the foothills of the Estreito range, and fluvio-turfs sediments occur in wetlands. The fluvio-eolian-lacustrine occurs on the banks of the rivers, reflecting the dynamics in their floodplain (Figure 6.3). Eolian deposits are predominant and occur as dunes of various types and sizes, mostly vegetated with sparse Caatinga vegetation, which migrate westward in dry periods. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.8.** Chart with the monthly projection of maximum and minimum temperatures, potential evapotranspiration, and average rainfall, considering the historical data, period 1977-2019 (43 years), for the Barra station. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.9.** Chart with annual rainfall values for the 1977-2019 period (43 years), and several trend lines considering different scenarios. In all of them, there is a volumetric reduction of rainfall over time, with a strong reduction in the last 10 years. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.10.** Hydrographic map showing the dry and water-flowing drainages, including the points with their respective discharges obtained in July 2019. In detail, squares A and B, are areas affected by the reduction of rainfall, recorded on the field, and reported by residents. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 5.11.** Basement relief map obtained by interpolation (Kriging by ArcMap 10.3), based on data from the following sources: outcrops, wells, GPR radargrams, Vertical Electrical Surveys - VES (Barreto, 1996), and geological interpretations. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.12.** Potentiometric surface map obtained by interpolation (Kriging by ArcMap 10.3) considering water table data (wells, GPR, field data, interpretation), and water levels in the drainages. The white arrows indicate the main direction of groundwater flow. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.13.** São Francisco Paleodunes Aquifer hydrogeological domains and hydrography, including the Sobradinho Dam, overlaid on relief shading (Hillshade DEM/ALOS/PALSAR). **Erro! Indicador não definido.**

## LISTAS DE SIGLAS

ADI - Ação de Inconstitucionalidade  
ALOS - Advanced Land Observing Satellite  
ANA - Agência Nacional de Águas  
ANM - Agência Nacional de Mineração  
APSF - Aquífero Paleodunas do São Francisco  
ART - Anotação de Responsabilidade Técnica  
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil  
CBPM - Companhia Baiana de Pesquisa Mineral  
CERB - Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia  
CHESF - Companhia Hidrelétrica do São Francisco  
CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos  
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
CONERH - Conselho Estadual de Recursos Hídricos  
CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais  
CRH - Conselho Estadual Recursos Hídricos - PE  
CTAS - Câmara Técnica de Águas Subterrâneas do CNRH  
DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo  
DGPS - Differential Global Positioning System  
DHGC - Domínios Hidrogeoclimáticos  
DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral  
DOI - Digital Object Identifier  
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
ESRI - Environmental Systems Research Institute  
GIS - Geographic Information System  
GPR - Ground Penetrating Radar  
GWR - Groundwater Resources  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IG - Instituto de Geociências

INEMA - Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia

INGA - Instituto de Gestão das Águas e Clima da Bahia

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

ONS - Operador Nacional Sistema Elétrico

## LISTAS DE TABELAS

**Tabela 4.1.** Valores médios calculados para os dados dos poços em cada Domínio Hidrogeoclimático e unidades hidrolíticas. **Erro! Indicador não definido.**

**Tabela 4.2.** Consolidado de valores médios calculados de reservas hídricas subterrâneas e as taxas de recargas para os domínios hidrogeoclimáticos do estado da Bahia. **Erro! Indicador não definido.**

# SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 APRESENTAÇÃO .....	1
1.2 HIPÓTESE .....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 METODOLOGIA .....	3
1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 ASPECTOS LEGAIS SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL .....	8
2.2 CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS E SUAS CONTRIBUIÇÕES.....	16
2.3 ASPECTOS LEGAIS SOBRE OUTORGA NO ÂMBITO DOS ESTADOS .....	18
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OUTORGA DE DIREITO DE USO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	25
CAPÍTULO 3 - RESULTADOS - ARTIGO PUBLICADO .....	26
DOMÍNIOS HIDROGEOCLIMÁTICOS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, ESTADO DA BAHIA: UNIDADES-BASE PARA GESTÃO SUSTENTÁVEL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	26
RESUMO .....	26
ABSTRACT .....	26
3.1 INTRODUÇÃO .....	26
3.2 ÁREA DE ESTUDO .....	28
3.3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	29
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
3.4.1 Definição de Domínios Hidrogeoclimáticos .....	31
3.4.2 Delimitação dos Domínios Hidrogeoclimáticos.....	31
3.4.3 Geologia da Área de Estudo.....	33
3.4.4 Caracterização Hidrolitológica.....	36
3.4.5 Fluxos Regionais e Interconectividade das Águas .....	39
3.4.6 Aspectos Climáticos .....	41
3.4.7 Aspectos de Hidrologia Superficial.....	42
3.4.8 Domínios Hidrogeoclimáticos.....	45
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	49
AGRADECIMENTOS.....	51
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS - MANUSCRITO I.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA EMISSÃO DE OUTORGA DE USO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS: APLICAÇÃO AO ESTADO DA BAHIA ...	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
RESUMO .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

4.1 INTRODUÇÃO .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.2 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA NA DEFINIÇÃO DE CONCEITOS E CRITÉRIOS SUSTENTÁVEIS NA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.3 ÁREA DE ESTUDO .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.5.1 Reservas Hídricas Subterrâneas do Estado da Bahia.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.5.2 Proposição de critérios técnicos aplicáveis aos aquíferos do Estado da Bahia ..	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.5.3 Disponibilidades hídricas subterrâneas e sustentabilidade .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS - MANUSCRITO II .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
THE SÃO FRANCISCO PALEODUNES AQUIFER: CHARACTERIZATION, HIDROGEOCLIMATIC ANALYSIS, AND ESTIMATES OF GROUNDWATER RESOURCES.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
ABSTRACT .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.1 INTRODUCTION.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.2 STUDY AREA.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.3 MATERIALS, METHODS, AND DATA ACQUISITION .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.4 RESULTS, INTERPRETATIONS, AND DISCUSSIONS .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.4.1 Geophysical characterization.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.4.2 Geological characterization.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.4.3 Hydroclimatic aspects .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.4.4 Hydrogeological characterization.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.5 CONCLUSIONS .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
ACKNOWLEDGMENTS .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
CAPÍTULO 6 - DISCUSSÕES INTEGRADAS .....	53
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 APRESENTAÇÃO**

A outorga do direito de uso sobre os recursos hídricos é um instrumento legal, de controle administrativo, previsto na Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que foi instituída pela Lei Federal nº 9.433, em 08 de janeiro de 1997. Esta Lei define que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implantação da PNRH. Entretanto, em muitos casos os limites entre bacias hidrográficas e bacias hidrogeológicas não coincidem (Arraes, 2008).

O grande problema desta definição é que os recursos hídricos subterrâneos estão disponíveis em aquíferos muitas vezes regionais que ultrapassam os limites de bacias hidrográficas e dos limites políticos dos estados (Arraes & Campos 2007). A legislação também estabelece que as águas subterrâneas são de domínio dos Estados e do Distrito Federal, enquanto as águas superficiais têm domínio compartilhado entre a União, os Estados e o Distrito Federal. Assim, é natural a possibilidade de conflitos nos múltiplos usos das águas em suas diferentes formas de ocorrência (Rebouças, 2002). Em muitos casos, as águas superficiais e subterrâneas são interdependentes, com variações sazonais da recarga subterrânea que mantém as descargas superficiais em períodos não chuvosos. Por isso se faz necessário, em todos os estados, a definição de critérios técnicos sustentáveis para determinação de vazões outorgáveis em mananciais superficiais e subterrâneos, uma vez que suas características de armazenamento, circulação e disponibilidade ocorrem de modos distintos e têm impacto mútuo entre estes recursos hídricos.

O gerenciamento dos recursos hídricos a partir do uso de critérios técnicos, inclusive com bases científicas, permitirá que as ações de outorga aconteçam de modo sustentável. Tornando viável e garantindo o uso equilibrado, levando a preservação dos recursos hídricos. Apesar da Política Nacional dos Recursos Hídricos ter sido promulgada há mais de 20 anos, a maioria dos estados brasileiros ainda não estabeleceu regulamentações específicas para gestão e uso das águas subterrâneas (Pontes, 2007). Os critérios técnicos usados para emissão de outorgas de direito de uso se baseiam em limites mínimos de disponibilidade, consideram vazões históricas e se aplicam basicamente para águas superficiais.

No estado da Bahia, unidade da federação com grande parte do território em clima semiárido, os rios, lagos e reservatórios superficiais dependem fortemente das águas oriundas dos aquíferos para manter seus cursos e recursos superficiais no período de recessão das chuvas. Além disso, o estado apresenta grande variabilidade de condições geológicas (CBPM, 2015), geomorfológicas, climáticas e, conseqüentemente, hidrogeológicas, não tendo sido estabelecidos os critérios técnicos para emissão de outorga para uso de águas subterrâneas que permitam a gestão sustentável dos seus recursos hídricos (INEMA, 2018).

O uso indiscriminado e sem controle adequado dos recursos subterrâneos põe em risco não só a disponibilidade hídrica subterrânea, mas também a perenidade de rios, lagos e dos reservatórios de geração de energia elétrica, que compõem as fontes do Operador Nacional Sistema Elétrico (ONS).

A solução para o problema descrito é complexa e passa por diferentes dimensões técnicas, políticas e jurídicas, sendo que a instância técnica é fundamental para minimizar ou resolver o problema. Este estudo tem como objetivo contribuir na identificação das condicionantes técnicas, minimamente necessárias, para embasar a gestão dos recursos subterrâneos de maneira sustentável. Para isso, propõe-se a definição de critérios técnicos com base nas características hidrogeológicas dos aquíferos, nas condições ambientais climáticas, na disponibilidade hídrica e nos efeitos no uso e ocupação das terras para a gestão dos recursos hídricos no estado da Bahia.

## 1.2 HIPÓTESE

Diante das questões descritas pode-se inferir que causas de origens diversas levaram à negligência na gestão das águas subterrâneas até o momento, incluindo: desempenho insatisfatório por parte dos órgãos gestores (talvez motivados pela falta de regulamentação legal mais específica sobre o tema água subterrânea); ausência de dados, informações e conhecimentos sobre os sistemas aquíferos existentes; questões de origem política e/ou social; e/ou, a soma dessas possibilidades que não favorecem a gestão adequada das águas subterrâneas. Neste sentido, de forma simples, a hipótese a ser testada neste estudo é: *a gestão sustentável de recursos hídricos subterrâneos deve ter como premissa o uso de critérios técnicos com bases científicas que favoreçam o controle da disponibilidade e da qualidade dessas águas no espaço e no tempo*. Ou seja, para gerir água subterrânea de forma sustentável, é preciso também considerar algumas condicionantes, como os aspectos de hidrogeologia, clima e hidrologia superficial, todos variando no tempo e de forma integrada (interdependentes). Assim, de outro modo, a principal hipótese a ser testada pode complementada assim:

*“Os aspectos técnicos hidrogeológicos, climáticos e hidrológicos superficiais representam as condicionantes naturais que favorecem a disponibilidade e a qualidade hídrica subterrânea no ambiente. Portanto, para viabilizar a gestão sustentável das águas subterrâneas, necessariamente, devem-se aplicar critérios técnicos fundamentados nestas condicionantes ambientais de forma integrada e interdependente. Considerando suas variabilidades no tempo e no espaço, associadas ainda aos aspectos de escala local e/ou regional dos aquíferos e seus sistemas produtivos”.*

Diante desta hipótese, a busca por critérios técnicos multidisciplinares pode levar a obtenção de inúmeras variáveis ambientais simples e/ou complexas que, indiretamente, podem dificultar a gestão, ou mesmo não serem aplicáveis. Assim, este estudo terá também como premissa, a busca por uma solução simples, aplicável, e que não traga prejuízos ao processo de gestão e ao uso sustentável das águas subterrâneas.

### **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo principal deste trabalho é a proposição de critérios técnicos para emissão de outorgas que visem o uso sustentável das águas subterrâneas no Estado da Bahia. Incluindo necessariamente neste contexto, como base, um estudo hidrogeológico regional para caracterização das condições ambientais como geologia dos aquíferos, condições de recarga, tipos de aquíferos e demais características, assim como as condições de usos dos recursos hídricos. Seguindo ainda a presunção de que sejam critérios simples e aplicáveis a diferentes realidades ambientais e geológicas do Estado da Bahia, como nas regiões litorâneas, semiárida, e ainda considerando a presença de aquíferos cársticos, intergranulares e fraturados.

Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- i)** Caracterização e regionalização dos sistemas aquíferos para o Estado da Bahia;
- ii)** Definir domínios de sistemas aquíferos com diferentes propriedades de armazenagem, recarga, disponibilização hídrica;
- iii)** Estimar as reservas hídricas para cada domínio proposto a partir de critérios clássicos aplicados sobre dados médios de parâmetros dimensionais e hidrodinâmicos de poços/aquíferos;
- iv)** Propor critérios técnicos que visam à gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos para o estado da Bahia;
- v)** Aplicar a metodologia proposta em áreas hidrogeologicamente representativas do estado, visando à viabilização dos critérios em todos os tipos aquíferos do estado da Bahia.

### **1.4 METODOLOGIA**

A metodologia geral empregada segue os seguintes passos:

- i)** Levantamento bibliográfico sobre critérios de outorga de recursos hídricos subterrâneos no Brasil. Considerando dados governamentais e informações de manuais técnicos e publicações acadêmicas sobre o tema, assim como, implicações e reflexos do tema águas subterrâneas em relação aos recursos hídricos superficiais.

Nesta etapa foi composto um banco de dados incluindo as seguintes bases cartográficas em escala 1:1.000.000 ou maior: geologia, pedologia, isoietas, declividade (ou compartimentação geomorfológica), pontos d'água, hidrogeologia (ou zoneamento hidrogeológico) e favorabilidade à exploração dos aquíferos.

Para a composição das bases de dados foram utilizadas informações obtidas em trabalhos de campo regionais por todo o estado da Bahia. A geodiversidade foi integrada, com a obtenção de informações geológicas, pedológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas de forma simultânea.

Além destes dados, foram obtidos dados de poços existentes em todo o Estado da Bahia. Esses dados permitiram avaliar a potencialidade dos aquíferos, sua capacidade de recarga e condições envolvidas na sua exploração.

**ii)** Avaliação, discussão e proposição de critérios técnicos visando à viabilidade na emissão de outorgas para águas subterrâneas no Estado da Bahia.

Nesta etapa foram executadas as análises de proposição de critérios objetivos para outorga em diferentes sistemas aquíferos em ambientes continentais e costeiros. A distinção dos critérios para diferentes aquíferos em distintas condições de ocorrência foi necessária, pois, cada conjunto de aquífero apresenta um particular funcionamento hídrico, e conseqüentes particularidades na sua gestão. Também foi considerado aplicar diferentes critérios num mesmo sistema aquífero. Reflexo da variabilidade interna de subsistemas (aquíferos) que o compõe, como por exemplo, distintos critérios para sua porção livre, semiconfinada e/ou totalmente confinada.

Os critérios apresentados foram fundamentados em termos teóricos e em função de sua aplicabilidade para determinação de vazões de outorga dos poços, se baseando também em valores médios por sistemas de aquíferos. Os critérios também seguem a premissa de serem otimistas com relação aos sistemas naturais (capacidade de suportar e regenerar mesmo diante de muitas interferências), e pessimistas com relação aos projetos humanos que sempre buscam extrair o máximo que puderem dos recursos naturais. Assim, os critérios pensados considera esses fatores de resiliência ambiental e sociais extremos, de forma a se preservar os reservatórios subterrâneos de eventual sobreexploração sem impedir o uso, buscando o equilíbrio.

**iii)** Atividades de campo para caracterização hidrogeológica *in situ* visando contribuir para confirmação de modelos, teses e metodologia que embasam a proposta técnica do projeto.

**iv)** Utilização de ferramentas computacionais, programas/sistemas (Arcgis, Google Earth, Microsoft Office, Reflexw) que permitissem o tratamento dos dados para integração, análises e obtenção de resultados esperados. Confecção de mapas ou de outros recursos gráficos necessários para representação e demonstração dos dados e resultados obtidos.

**v)** Aplicação da proposta para o estado da Bahia de forma que os resultados técnicos sejam suficientes para a prática de outorga de direito de uso de águas subterrâneas, considerando embasamentos técnicos. Verificação da aderência entre as condições geológicas e a viabilidade técnica dos critérios aplicados ao Estado da Bahia.

vi) Aplicação de sistemas de informação geográfica na determinação e delimitação das unidades base para concepção de critérios e consequente gestão. As unidades base foram definidas pela associação de tipos de aquíferos com os aspectos climáticos e hidrológicos, conforme se mostra no capítulo 3.

vii) Em seguida as reservas exploráveis ou disponibilidades dos aquíferos foram calculadas para se estabelecer os limites de recursos que poderão ser outorgados em cada unidade. Para os cálculos das reservas foram aplicadas metodologias convencionais para os sistemas intergranulares e adaptações para os sistemas fraturados e cársticos (conforme Gaspar & Campos 2007, Campos 2010).

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O texto da tese foi estruturado de forma não convencional, em um formato misto, mas segue em linhas gerais as mesmas premissas de uma tese tradicional. Seguindo os tradicionais tópicos gerais: introdução, referencial teórico, metodologia, resultados, discussões, conclusões e referências. Contudo, dentro dessa mesma premissa geral a mudança ocorreu no capítulo de resultados. Este especificamente foi subdividido em três capítulos dispostos sequencialmente, e todos formatados individualmente na estrutura de artigo/manuscritos. Com isso, para cada capítulo de resultados há estruturação própria e completa, com: resumo, introdução, área de estudo, matérias e métodos, resultados, discussões e conclusões. As referências dos artigos/manuscritos foram todas separadas e integradas ao capítulo final de referências geral, no final da tese.

Essa estruturação mista de tese segue uma nova prática dos programas de pós-graduação, e visa essencialmente buscar sinergia com outras exigências dos programas de pós-graduação quanto a obrigatoriedade de publicações dos resultados das teses em periódicos. Assim, se pretende ganhar tempo, traz oportunidade de síntese, foco nos pontos mais relevantes, e oportunamente já permitem uma prévia revisão por pares (pela banca) dos manuscritos a serem submetidos.

Assim, os capítulos estão dispostos com os seguintes conteúdos:

**Capítulo 1** - Introdução, onde se apresenta o problema, a hipótese, os objetivos e o contexto geral da tese. Neste capítulo ainda é apresentada metodologia geral da tese de forma resumida, indicando os pontos centrais envolvidos na construção do trabalho e procedimentos para se alcançar os resultados. Importante lembrar que cada artigo/manuscritos apresentam seus próprios subitens de materiais e métodos devidamente contextualizados.

**Capítulo 2** - Revisão bibliográfica, apresentado uma revisão dos principais temas que envolvem o problema tese, suas soluções e potenciais direcionamentos.

**Capítulo 3** - Representa o corpo dos primeiros resultados relacionados aos objetivos, é composto pelo artigo publicado intitulado de “*Domínios Hidrogeoclimáticos no Semiárido Brasileiro, Estado da Bahia: Unidades-Base para Gestão Sustentável das Águas Subterrâneas*”.

**Capítulo 4** - Trata de um manuscrito completo para submissão intitulado “*Proposição de Critérios Técnicos para Emissão de Outorga de Uso dos Recursos Hídricos Subterrâneos: aplicação ao Estado da Bahia*”.

**Capítulo 5** - Último capítulo de resultados, onde se apresenta manuscrito intitulado “*The São Francisco Paleodunes Aquifer: characterization, hydrogeoclimatic analysis, and estimates of groundwater resources*”. Este manuscrito é trazido adicionalmente ao contexto da tese, visando essencialmente mostrar a importância de um sistema aquífero específico (coberturas intergranulares rasas) no contexto do Estado da Bahia, e de sua relevância na gestão das águas subterrâneas. No decorrer da leitura da tese este capítulo pode parecer desconectado com os demais resultados da tese. Contudo, sua existência refletiu a evolução natural das pesquisas no âmbito da tese. Onde se foi constatando que na literatura não havia estudos relevantes sobre este tipo aquífero, e também não havia atenção necessária por parte dos gestores de recursos hídricos. Considerando a grande relevância técnica destes aquíferos no contexto semiárido, e sua relação dos recursos hídricos superficiais, fez-se necessário a existência complementar deste capítulo. A soma destes fatos justifica sua incorporação na tese, trazendo foco para um aquífero desconhecido, e extremamente relevante para gestão das águas subterrâneas na região semiárida.

**Capítulo 6** - Discussões gerais e integração dos resultados de forma sintética, implicações e recomendações.

**Capítulo 7** - Conclusões e considerações finais.

**Referências Bibliográficas**, contendo a lista completa de citações na tese, incluindo as referências dos capítulos apresentados na forma de artigo e de manuscritos. As referências do artigo publicado, capítulo 3, foram transferidas e integradas as demais referências para simplificar a organização da tese. Contudo, abaixo do título do capítulo está a referência com link desta publicação para acesso ao seu conteúdo na íntegra.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Considerando o contexto propositivo do projeto de pesquisa, que tem como meta principal a proposição de critérios técnicos, simples e aplicáveis aos processos de outorga para águas subterrâneas para o estado da Bahia, foram definidas as estratégias a serem seguidas para a revisão bibliográfica.

Tendo em vista que a outorga de água subterrânea é um ato administrativo legal, cabe, como ponto de partida da revisão, um resgate da evolução dos aspectos legais relacionados ao tema água subterrânea no Brasil. Isso permite o entendimento das dificuldades e o *status* atual dos aspectos legais que podem favorecer ou dificultar a proposição de critérios técnicos aplicáveis para emissão de outorga. Este conteúdo foi elaborado em separado, conforme a seguir, devido a sua distinção temática legal e particularidades técnicas.

Após descrição dos aspectos legais sobre águas subterrâneas, cabe então, realizar uma revisão dos aspectos técnicos inerentes ao contexto hidrogeológico regional do estado da Bahia. Assim será possível, especificar quais são as características e as limitações naturais dos aquíferos e propor critérios técnicos aplicados a realidade inerente dos diferentes reservatórios subterrâneos do estado. A partir do conhecimento do arcabouço hidrogeológico e climático e de suas características naturais na área de estudo, propõe-se revisar os aspectos que interferem nessas condições naturais, sejam elas, uso e ocupação do solo, áreas de captação de águas subterrâneas, riscos de contaminação ou exploração dos aquíferos e/ou todos os aspectos preponderantes que interferem ou que de alguma forma dificultam ou inviabilizam a aplicação dos critérios propostos para emissão de outorga de direito de uso. Diante da grande dimensão dos aspectos técnicos a serem revisados, estes serão tratados e considerados no âmbito dos artigos científicos que estão no corpo da tese na forma de capítulos, de forma que a revisão bibliográfica também fique contextualizada. Com isso, optou-se por não disponibilizar nesta fase inicial do trabalho todos os conteúdos.

Assim, por meio do conhecimento técnico base sobre os aquíferos é possível criar critérios específicos ao contexto hidrogeológico da área. Além disso, se associando ao conhecimento dos aspectos legais vinculados no uso dos recursos hídricos criam-se as condições necessárias para concepção e proposição dos critérios, de forma coerente à realidade do estado da Bahia.

Conforme estratégia apresentada segue revisão bibliográfica sobre os aspectos legais que envolvem o tema águas subterrâneas no Brasil.

## 2.1 ASPECTOS LEGAIS SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL

Vários são os aspectos legais que tratam das águas subterrâneas desde o final do século XIX no Brasil. Os temas serão abordados a seguir ressaltando as linhas mais importantes que ilustram as argumentações e implicações referentes ao presente estudo. O conteúdo deste capítulo segue uma narrativa resumida e cita os pontos observados na legislação brasileira que de alguma forma interfere ou faz referência ao tema água subterrânea e suas implicações de gestão e uso. A história compreende um período de 133 anos, que se inicia em 1889, fim do Brasil Imperial, até o presente. O período de análise pode ser definido como reflexo da própria tratativa histórica sobre o tema água no Brasil, diretamente ou indiretamente relacionado. É importante ressaltar que antes desse período não foram observadas citações ou legislações aplicadas às águas subterrâneas no âmbito nacional.

A primeira Constituição do Brasil, conhecida como Constituição do Império do Brasil de 1824, foi construída devido ao reflexo da Proclamação da Independência do Brasil por Dom Pedro I em 1822. A Constituição de 1824 abordava apenas a organização dos poderes e os entes envolvidos na estruturação e no funcionamento do império. Neste momento, o tema água não foi tratado de nenhuma forma.

Em seguida, a primeira Constituição Republicana de 1891 também não legislava diretamente sobre a água em nenhum de seus artigos. Porém, indiretamente, o Art. 72, § 17, estabelecia que os proprietários de solo (das terras) eram donos em sua plenitude das minas neles existentes. Isso incluía todos os recursos minerais existentes, jazidas minerais, solos e água. A única exceção foi colocada no Art. 64 que determinava que as minas e as terras devolutas pertenciam aos Estados.

*Art. 64 - Pertencem aos Estados as minas e terras devolutas situadas nos seus respectivos territórios, cabendo à União somente a porção do território que for indispensável para a defesa das fronteiras, fortificações, construções militares e estradas de ferro federais.*

O artigo 526 do Código Civil de 1916 estipulou que o proprietário do imóvel poderia utilizar o espaço aéreo do imóvel e o seu subsolo até onde conseguisse atuar.

*Art. 526. A propriedade do sobre e do subsolo abrange a do que lhe está superior e inferior em toda altura e em toda a profundidade, úteis ao seu exercício, ....*

Vale ressaltar que o referido artigo do Código Civil de 1916 só foi revogado em 2002 na revisão do Código Civil, ou seja, 86 anos depois de sua criação e após a publicação, em 1997, da vigente Lei das Águas (Lei nº 9.433). Em 2002, assim como segue, este artigo foi reescrito e acrescido outro artigo dando entendimento de que a propriedade do solo não abrange as jazidas, minas e demais recursos minerais, entre outros bens regidos por leis especiais.

*Art. 1.229. A propriedade do solo abrange a do espaço aéreo e subsolo correspondentes, em altura e profundidade úteis ao seu exercício, ...*

*Art. 1.230. A propriedade do solo não abrange as jazidas, minas e demais recursos minerais, os potenciais de energia hidráulica, os monumentos arqueológicos e outros bens referidos por leis especiais.*

Em 1929, o texto do Art. 72, § 17 da Constituição de 1891 foi reescrito via Emenda Constitucional como reflexo da preocupação com a segurança nacional pós-primeira Guerra Mundial. Foram incluídas algumas exceções sobre as terras que continham minas e/ou jazidas necessárias a segurança nacional e determinado que essas não poderiam mais pertencer aos estrangeiros. Até este momento, observa-se que o tema água não tinha sido citado diretamente e nem tratado como recurso natural, seja para uso ou gestão. Água era tratada como um bem dos proprietários da superfície (terra) e podia ser usada com base nos critérios individuais destes proprietários.

A Constituição de 1934 desassociou a propriedade dos solos (terra) da propriedade dos bens minerais neles contidos; dissociou também a propriedade dos lagos, ilhas fluviais e lacustres em áreas de fronteiras, e em separado as quedas d'água que tinha fins para aproveitamento econômico; e definiu que cabia privativamente a União legislar sobre os temas relacionados a recursos minerais e águas para fins hidrelétricos, conforme pode ser observado pelas transcrições a seguir.

*Art. 5º - Compete privativamente à União:*

*XIX - legislar sobre:*

*j) bens do domínio federal, riquezas do subsolo, mineração, metalurgia, águas, energia hidrelétrica, florestas, caça e pesca e a sua exploração;*

*Art. 118 - As minas e demais riquezas do subsolo, bem como as quedas d'água, constituem propriedade distinta da do solo para o efeito de exploração ou aproveitamento industrial.*

*Art. 119 - O aproveitamento industrial das minas e das jazidas minerais, bem como das águas e da energia hidráulica, ainda que de propriedade privada, depende de autorização ou concessão federal, na forma da lei.*

Em 10 de julho de 1934, o Governo Getúlio Vargas decretou a Lei nº 24.642, criando o primeiro Código de Minas do Brasil e regulamentando os aspectos de extração mineral, incluindo as águas de fontes minerais, termais e gasosas. Publicado junto ao primeiro Código das Águas, o Código de Minas visava tratar as águas exclusivamente para fins de exploração econômica e comercialização. Cabe ressaltar que o Código de Minas de 1934 trata pela primeira vez no Brasil do tema água subterrânea de forma objetiva.

O Código das Águas (Decreto nº 24.643/1934, art. 29), publicado junto com o Código de Minas, decretou que o tema água seria de competência do Ministério da Agricultura e definiu que as águas podiam ser públicas, comuns e privadas. Assim, as águas públicas poderiam pertencer a União, Estados e Municípios, incluindo sua dominialidade e competência administrativa.

*Art. 29. As águas públicas de uso comum, bem como o seu álveo, pertencem:*

***I – A União:***

- a) quando marítimas;*
- b) quando situadas no Território do Acre, ou em qualquer outro território que a União venha a adquirir, enquanto o mesmo não se constituir em Estado, ou for incorporado a algum Estado;*
- c) quando servem de limites da República com as nações vizinhas ou se estendam a território estrangeiro;*
- d) quando situadas na zona de 100 kilometros contígua aos limites da República com estas nações;*
- e) quando sirvam de limites entre dois ou mais Estados;*
- f) quando percorram parte dos territórios de dois ou mais Estados.*

***I – Aos Estados:***

- a) quando sirvam de limites a dois ou mais Municípios;*
- b) quando percorram parte dos territórios de dois ou mais Municípios.*

***III – Aos Municípios:***

- a) quando, exclusivamente, situados em seus territórios, respeitadas as restrições que possam ser impostas pela legislação dos Estados ....*

Observa-se que todos os pontos estabelecidos em termos de dominialidade e de competência administrativa sobre águas da União, Estados ou Municípios não incluíam as águas subterrâneas explicitamente.

O Art. 8 do Código das Águas de 1934 define que as águas dentro das propriedades particulares pertencem ao proprietário da terra, possibilitando o entendimento de que as águas subterrâneas e suas nascentes são particulares, quando em propriedades privadas.

*Art. 8º São particulares as nascentes e todas as águas situadas em terrenos que também o sejam, quando as mesmas não estiverem classificadas entre as águas comuns de todos, as águas públicas ou as águas comuns.*

Os únicos pontos estabelecidos no Código das Águas de 1934 e que se referem especificamente às águas subterrâneas são os artigos 96, 97, 98 e 101, a seguir.

*Art. 96. O dono de qualquer terreno poderá apropriar-se por meio de poços, galerias, etc.,*

*das águas que existam debaixo da superfície de seu prédio contanto que não prejudique aproveitamentos existentes nem derive ou desvie de seu curso natural águas públicas dominicais, públicas de uso comum ou particulares.*

*Parágrafo único. Se o aproveitamento das águas subterrâneas de que trata este artigo prejudicar ou diminuir as águas públicas dominicais ou públicas de uso comum ou particulares, a administração competente poderá suspender as ditas obras e aproveitamentos.*

*Art. 97. Não poderá o dono do prédio abrir poço junto ao prédio do vizinho, sem guardar as distâncias necessárias ou tomar as precisas precauções para que ele não sofra prejuízo.*

*Art. 98. São expressamente proibidas construções capazes de poluir ou inutilizar para o uso ordinário a água do poço ou nascente alheia, a elas preexistentes.*

....

*Art. 101. Depende de concessão administrativa a abertura de poços em terrenos do domínio público.*

Os artigos supracitados evidenciam que as águas subterrâneas são de propriedade do dono da terra e que sua extração e seu uso não demandam nenhum tipo de outorga (ou autorização), exceto em áreas de terras públicas. Importante ressaltar que desde 1934, existia a preocupação ambiental na proteção da qualidade e da disponibilidade das águas subterrâneas, conforme artigos 97 e 98. A legislação também estipulou restrição de usos em casos de impactos a outros usuários vizinhos, seja privado ou público.

Em 1937, a nova Constituição delega aos Estados a competência de legislar sobre os bens minerais (incluindo as águas), quando as leis federais não forem suficientes ou incompletas na sua aplicação. Com isso, a União e os Estados passaram a legislar sobre o tema água, sendo o uso livre de outorgas em terras privadas e exigente de autorizações em terras de propriedade dos municípios, estados e da União.

O Código das Águas de 1934 sofreu várias alterações, incluindo revisão via Decreto de Lei n. 852/1938 que tratou basicamente de aspectos das águas de domínio da União e regulamentou aspectos do setor hidrelétrico como tema de competência exclusiva da União. Via Decreto 3.763/1941, o Código das Águas sofreu novas alterações que consolidou as disposições gerais sobre águas e energia hidroelétrica. O foco destas duas alterações do Código das Águas foi exclusivamente o setor hidrelétrico e não sobre as águas subterrâneas.

Em janeiro de 1940, foi estabelecido, via Lei nº1.985, o segundo Código de Minas, sob competência de execução do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, criado em 1934) e até então vinculado ao Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio. Após o Código das Águas de 1934, o segundo Código de Minas de 1940 voltou a tratar do tema água

subterrânea, porém, exclusivamente, para fins de exploração mineral e beneficiamento das águas minerais, termais e água de mesa. Assim, no segundo Código de Minas, as águas subterrâneas foram classificadas genericamente como jazidas (recurso mineral para fins comerciais) de forma diferente das águas minerais (águas subterrâneas com ação medicamentosa).

Em 1945 foi decretada a Lei nº 7.841, do então novo Código de Águas Minerais, que definiu o conceito da água mineral (águas com ação medicamentosa) e seus parâmetros químicos, e, estabeleceu normas em concordância ao Código de Minas para sua exploração, pesquisa, lavra e comercialização.

A Constituição de 1946 trouxe mudança significativa na dominialidade e na legislação sobre as águas, passando a tutela somente para União e para os Estados, e, excluiu os Municípios e entes privados, o que contrariou o Código das Águas de 1934 e o Código Civil de 1916, vigentes. Em nenhum momento, a nova Constituição cita as águas subterrâneas expressamente, tratando apenas das águas de maneira genérica, lagos, rios, quedas d'água e quaisquer correntes de água. O único texto que remete a águas subterrâneas refere-se indiretamente no Art. 153 § 4º, como águas termominerais, concordantes às tratativas no segundo Código de Minas de 1940.

*Art.153, § 4º - A União, nos casos de interesse geral indicados em lei, auxiliará os Estados nos estudos referentes às águas termominerais de aplicação medicinal e no aparelhamento das estâncias destinadas ao uso delas.*

A Constituição de 1967 manteve as definições anteriores sobre o tema água, incluindo as áreas da plataforma submarina como bens da União. Assim, a premissa de dominialidade e usos seguiram com as mesmas definições até uma nova grande mudança legal com a Constituição de 1988, vigente atualmente.

Em outubro de 1988 foi promulgada a atual Constituição Federal, considerada inovadora em relação aos aspectos ambientais, visto que foi criado um capítulo para o tema meio ambiente e incluiu a água como parte do meio ambiente pertencente a todos (*bens de uso comum do povo*). Apesar de sua inovação ou modernização legal, parâmetros específicos às águas subterrâneas foram inseridos apenas nos artigos 20, 21, 22, 23 e 26 e estes causaram entendimentos contraditórios ou geraram interpretações confusas, em termos de dominialidade.

*Art. 20. São bens da União:*

*III - os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais;*

*V - os recursos naturais da plataforma continental e da zona econômica exclusiva;*

*VI - o mar territorial;*

*VIII - os potenciais de energia hidráulica;*

*IX - os recursos minerais, inclusive os do subsolo;*

*X - as cavidades naturais subterrâneas e os sítios arqueológicos e pré-históricos.*

O Art. 20 desta constituição pode dar entendimento que as águas subterrâneas fazem parte dos recursos minerais do subsolo e, portanto, são bens da União, cabendo à União a sua gestão, conforme já havia sido definido no Código de Águas Minerais de 1945. Este entendimento é confirmado quando se lê os Art. 21 e 22 da constituição, a seguir:

*Art. 21. Compete à União*

*XV - organizar e manter os serviços oficiais de estatística, geografia, geologia e cartografia de âmbito nacional;*

*XIX - instituir sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios de outorga de direitos de seu uso*

*Art. 22. Compete privativamente à União legislar sobre:*

*IV - águas, energia, informática, telecomunicações e radiodifusão;*

*XII - jazidas, minas, outros recursos minerais e metalurgia;*

*XVIII - sistema estatístico, sistema cartográfico e de geologia nacionais.*

O Art. 23 da Constituição Federal de 1988 define que todas as esferas do poder executivo têm competência de proteger, zelar, promover, cuidar, preservar os recursos hídricos, meio ambiente etc., e delega a todos os poderes executivos a mesma competência.

*Art. 23. É competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios:*

*VI - proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas;*

*VII - preservar as florestas, a fauna e a flora;*

*XI - registrar, acompanhar e fiscalizar as concessões de direitos de pesquisa e exploração de recursos hídricos e minerais em seus territórios;*

Até aqui, a constituição de 1988 induz o entendimento de que a União tem o domínio e o papel exclusivo de legislar sobre as águas, cabendo a todos proteger, preservar, cuidar e fiscalizar. Enquanto na sequência, o Art. 26 da mesma constituição define que parte das águas superficiais e as águas subterrâneas pertencem aos Estados.

*Art. 26. Incluem-se entre os bens dos Estados:*

*I - as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União;*

*II - as áreas, nas ilhas oceânicas e costeiras, que estiverem no seu domínio, excluídas aquelas sob domínio da União, Municípios ou terceiros;*

*III - as ilhas fluviais e lacustres não pertencentes à União;*

*IV - as terras devolutas não compreendidas entre as da União.*

Neste contexto, considera-se que a constituição em 1988, deu possibilidades para os Estados criarem suas políticas e seus meios de gestão das águas sobre seus domínios. Ao mesmo tempo, gerou interpretações confusas sobre a dominialidade das águas subterrâneas. Após 1988, no âmbito federal, praticamente não ocorreram alterações legais significativas sobre as águas até 1997, com a criação da Lei das Águas (nº 9.433/1997). Antes da Lei das Águas somente ocorreram alterações menores como nos aspectos de compensação financeiras para os recursos hídricos e águas minerais, em 1989 (Lei nº 8.001) e 1990 (Lei nº 7.990).

Em janeiro de 1997, foi então promulgada a Lei das Águas nº 9.433/1997 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos. Criou-se com essa lei o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, visando também regulamentar o inciso XIX do art. 21 da constituição de 1988, citado anteriormente.

A Lei das Águas estabeleceu instrumentos de gestão, criou o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), definiu os usos prioritários dos recursos hídricos, confirmou que a água é um bem de domínio público e um recurso natural limitado e reafirmou o entendimento constitucional de que não existem águas particulares ou municipais, contudo, sobre águas subterrâneas, pouco foi estabelecido de forma objetiva.

Em termos de outorga, o Art. 11, da Lei das Águas, informa que o regime de outorgas tem como objetivo assegurar o controle quali/quantitativo dos usos da água, indicando que para se fazer outorga é necessário ter controle quantitativo e qualitativo das águas. O Art. 12 informa que as águas subterrâneas estão sujeitas a outorga, mas não indica quem as farão, conforme abaixo:

*Art. 11. O regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água.*

*Art. 12. Estão sujeitos a outorga pelo Poder Público os direitos dos seguintes usos de recursos hídricos:*

*II - extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo.*

Outro ponto importante com implicações diversas sobre as águas subterrâneas, é que na Lei das Águas, em seus fundamentos, foi colocada a bacia hidrográfica como unidade territorial para gestão do Sistema Nacional de Recursos Hídricos e para implementação das Políticas Nacionais de Recursos Hídricos. As implicações nesse caso se aplicam como dificuldades adicionais para gerir águas subterrâneas em aquíferos que ultrapassam os limites geográficos das bacias hidrográficas, ou mesmo dos Estados (considerando que as águas subterrâneas são de domínio estadual).

Apesar da Lei das Águas ser considerada um marco legal histórico no tema gestão dos recursos hídricos no Brasil, na qual foram detalhados muitos pontos antes nunca regulamentados, corroborando as linhas gerais da Constituição Federal de 1988, as águas subterrâneas não foram devidamente tratadas. As dúvidas e/ou ambíguas interpretações sobre dominialidade das águas subterrâneas presentes na CF 1988 não foram sanadas, tratadas ou esclarecidas. Diante desse fato, em 1997, várias tentativas ocorreram no Congresso Nacional visando redefinir o texto sobre dominialidade das águas subterrâneas. O último esforço sobre esta tratativa foi a Proposta de Emenda à Constituição – PEC, nº 43/2000, iniciada no Senado Federal, na qual foi proposta alteração do texto do Art. 20 da constituição de 1988 incluindo os aquíferos como dominialidade da União, conforme texto propositivo:

*Conforme a proposição, o inciso III do art. 20 da Carta Magna - que hoje considera bens da União os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limite com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias pluviais - é alterado para dispor que constituem bens da União os lagos, rios e quaisquer correntes de água superficiais ou subterrâneas, inclusive os aquíferos, em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limite com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias pluviais.*

*É também promovida alteração no inciso I do art. 26, que dispõe sobre os bens dos Estados, para aduzir, após as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, a expressão **circunscrita ao seu território**.*

Apesar da proposição de modificação constitucional via PEC n. 43/2000 no Senado Federal ser iniciada dois dias após a criação da ANA (Agência Nacional de Águas) no ano 2000, a PEC foi rejeitada somente em agosto de 2010. A rejeição foi fundamentada tecnicamente também pela própria Agência Nacional de Águas, alegando que o CNRH já detinha das competências legais necessárias para resolução dos conflitos sobre o tema entre os Estados, em casos de aquíferos que ultrapassam seus limites geográficos. Cabe aqui ressaltar que a própria ANA, em suas conclusões perante Comissão de Meio Ambiente e Defesa do Consumidor do Senado Federal, em 23 de março de 2010, afirmou à seguinte conclusão:

*Faz-se necessário, alguns **ajustes e aperfeiçoamentos** na abordagem da gestão **transfronteiriça e interestadual**, de forma a conferir um papel mais definido à União. Tais modificações podem ocorrer por normativo infralegal, como Resolução CNRH ou mesmo emenda à Lei 9433/97.*

Com a rejeição da PEC n. 43/2000 em 2010, ficaram sanadas as dúvidas sobre a

dominialidade das águas subterrâneas, deixando sob responsabilidade dos estados a gestão e a aplicação da política de recursos hídricos, com o uso do instrumento de outorga das águas subterrâneas. Com isso, cabe aos estados gerir as águas subterrâneas e ao CNRH deliberar sobre eventuais conflitos existentes entre os estados e em regiões de fronteiras com outros países.

Apesar dessa deliberação, o relator do projeto de Lei das Águas, ex-deputado Fabio Feldmann, reafirmou publicamente (oralmente) que as águas subterrâneas foram literalmente esquecidas durante a criação da Lei n. 9.433/1997 e que foi um erro deixar as águas subterrâneas sobre o domínio dos estados, e reafirmou que *“a gestão das águas subterrâneas,... infelizmente foram deixadas sob a responsabilidade dos estados pela Constituição Federal de 1988”* (Brasil Econômico, 2014).

Conforme deliberação citada acima, o então CNRH, previsto na Lei das Águas (1997), iniciou suas atividades em junho de 1998, mas sua regulamentação só foi possível via Decreto nº 4.613/2003, que estabeleceu no Art.1, incisos I e X, que é competência do CNRH articular o planejamento de recursos hídricos a nível nacional e estadual, e, estabelecer critérios gerais de outorgas. Antes de sua regulamentação em 2003, várias tratativas já estavam em andamento e várias resoluções foram publicadas com diretrizes específicas para águas subterrâneas e gestão integrada.

Após traçados os aspectos legais sobre as águas subterrâneas no Brasil, o próximo capítulo apresenta uma revisão dos tratos em nível de CNRH, suas Câmaras Técnicas e suas resoluções, abordando os avanços sobre gestão das águas subterrâneas no Brasil.

## **2.2 CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS E SUAS CONTRIBUIÇÕES**

Se observado o contexto legislativo histórico brasileiro até o momento, constata-se que as tratativas, em sua maioria, foram para as águas superficiais, desconsiderando a importância das águas subterrâneas e a forte dependência que as águas superficiais têm das águas subterrâneas. Nesse contexto, a Câmara Técnica de Águas Subterrâneas (CTAS/CNRH) foi criada em 2000, visando entre outros objetivos, discutir e propor a inserção da gestão das águas subterrâneas na Política Nacional de Recursos Hídricos.

A Resolução nº15/2001 estabeleceu as diretrizes gerais para gestão de águas subterrâneas, reforçando a interdependência entre águas superficiais, subterrâneas e meteóricas. Isso já visa garantir que os recursos hídricos e suas outorgas devem ser direcionados com a visão do todo (conforme ciclo hidrológico), e não com a visão anterior dissociada dos recursos superficiais. Essa resolução citou as possibilidades de conflitos em aquíferos que não coincidem com as bacias hidrográficas e que podem ainda condicionar gestão inadequada para questões sobre quantidade e qualidades das águas.

Em 2002, a Resolução CNRH n° 22, especificou que precisam ser realizados estudos mais detalhados sobre aquíferos, deixando claro que a exploração de águas subterrâneas demanda conhecimento das capacidades dos aquíferos e de suas vulnerabilidades. Tratou ainda dos aspectos de monitoramentos e de proteção dos aquíferos e inseriu as águas subterrâneas pela primeira vez nos Planos de Recursos Hídricos, determinando as informações mínimas para gestão.

A Resolução n° 29/2002 do CNRH, tratou das águas subterrâneas com foco nas águas minerais e nas diretrizes para a outorga de usos no aproveitamento dos recursos minerais, enquanto a Resolução n. 55/2003 direcionou os planos de utilização das águas subterrâneas na mineração e suas implicações junto à gestão de recursos hídricos. De maneira complementar, a Resolução n° 76/2007, estabeleceu diretrizes e orientações para necessidade de integração de gestão dos recursos hídricos com gestão das águas minerais, nas atuações institucionais e seus desdobramentos. Apesar dessas diretrizes e orientações, na prática essa integração de gestão dos recursos hídricos e das águas minerais é voluntária e não tem obrigatoriedade entre as instituições, o que acarreta descumprimento da legislação vigente.

Ainda via CNRH, a Resolução n. 91/2008 dispôs sobre procedimentos gerais para enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos e do foco na qualidade das águas e seus usos. Já a Resolução n. 92/2008, estabeleceu critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas, considerando definições de áreas de proteção dos aquíferos e perímetros de proteção de poços (concordante a Resolução CONAMA n° 396/2008).

O CNRH, por meio da Resolução n°107/2010, visou dar condições aos processos de enquadramento e de gestão integrada dos recursos hídricos. Estabeleceu ainda diretrizes e critérios a serem adotados para o planejamento, implantação, operação e manutenção de Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas Subterrâneas. A coordenação da rede ficou sob responsabilidade da ANA e sua implantação e operação ficaram sob responsabilidade da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), em articulação com os estados. Interessante observar nesta Resolução que, apesar das águas subterrâneas terem sua gestão sob responsabilidade dos Estados, a rede de monitoramento (essencial para gestão) está sob responsabilidade da União (ANA e CPRM), o que reflete um contrassenso ao entendimento da constituição de 1988. Também, de certa forma, indica incapacidade dos Estados de tratar do tema.

Em 2011, dentro dos aspectos de critérios técnicos de sustentabilidade, o CNRH via Resolução n° 129 estabeleceu diretrizes gerais para a definição de vazões mínimas remanescentes. Porém, esta Resolução só é aplicável a reservatórios superficiais, e nenhuma Resolução cita vazões máximas ou qualquer outro critério técnico para fins de exploração em

poços ou águas subterrâneas. Apesar de que a Resolução nº 92 de 2009 já estabelecia para os órgãos gestores dos Estados, a obrigatoriedade de promover estudos hidrogeológicos para caracterização dos aquíferos e a definição de critérios sustentáveis.

Na continuidade, o CNRH, via Resolução nº 153/2013, estabeleceu critérios e diretrizes para implantação de recarga artificial de aquíferos a nível nacional. Além dos aspectos sobre a finalidade da recarga, o Artigo 5º, definiu que a recarga artificial de aquíferos dependerá de autorização da entidade ou do órgão gestor estadual de recursos hídricos ao empreendedor e estará condicionada à realização de estudos que comprovem sua viabilidade técnica, econômica, sanitária e ambiental.

Por fim, a última tratativa sobre águas subterrâneas no CNRH começou em 2015 e foi publicada em 2018, Resolução 202 de 28 junho de 2018, no colegiado da CTAS/CNRH (Câmara Técnica de Águas Subterrâneas). A tratativa *“Estabelece diretrizes para a gestão integrada de recursos hídricos superficiais subterrâneos que contemplem a articulação entre a União, os Estados e o Distrito Federal com vistas ao fortalecimento dessa gestão.”* A ideia é estabelecer dispositivos gerais que orientem e garantam a gestão das águas de forma interdependentes. A proposta é de que a gestão dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos passe a considerar a existência da conectividade entre as águas superficiais e subterrâneas, e os agentes reguladores atuem em conjunto. Esta resolução se aplica aos aquíferos livres e rios perenes onde exista conectividade direta entre águas superficiais e subterrâneas. O objetivo é evitar danos ou gestão inadequada onde as interconectividades das águas subterrâneas e superficiais existam e assim, sejam consideradas como corpo hídrico contínuo para gestão e suas outorgas.

### **2.3 ASPECTOS LEGAIS SOBRE OUTORGA NO ÂMBITO DOS ESTADOS**

No âmbito dos Estados, incluindo o Distrito Federal como ente da Federação observa-se que muitos Estados têm leis específicas aplicadas as águas subterrâneas. É possível encontrar exemplos com leis criadas até mesmo antes da Lei das Águas (1997). De forma natural, com aparente reflexo das práticas de gestão de recursos hídricos no âmbito Federal, ocorre também em âmbito estadual, um evidente privilégio dos legisladores e órgãos gestores com tratativas para com as águas superficiais em detrimento das águas subterrâneas.

Na linha temporal, a evolução dos aspectos legais estaduais sobre águas subterrâneas mostra que o Estado de São Paulo foi pioneiro. A Lei Estadual n. 6.134/1988 foi publicada em de 2 de junho, antes mesmo da publicação da constituição de 1988 em 5 de outubro e naturalmente antes da Lei das Águas (n. 9.433, 1997). Nesta Lei Estadual trata-se especificamente sobre preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas e define que para uso das águas subterrâneas no Estado, deve-se fazer um cadastramento estadual. Isso

condiciona um processo de permissão legal para o uso das águas subterrâneas quase 9 anos antes da criação da Lei das Águas, onde se instituiu a outorga como instrumento de gestão. São Paulo, via nova Lei Estadual n. 7.663/1991, instituiu a política estadual de recursos hídricos, e em 1996, via decreto n. 41.258 regulamentou a outorga de direito de uso dos recursos hídricos. O DAAE (Departamento de Águas e Energia Elétrica de SP) órgão responsável pela gestão das águas no Estado, em abril de 2018, atualizou suas normas e diretrizes para outorgas das águas subterrâneas. Apesar de recentes, não acrescentou critérios que busquem ou garantam a sustentabilidade das águas subterrâneas (Instruções Técnicas Diretoria de Procedimentos de Outorgas, DPO de números 08 e 10).

Na sequência, o Ceará foi o segundo Estado a criar legislação aplicada às águas subterrâneas no Brasil via Lei nº 11.996 de 1992, onde instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH), considerou a outorga como instrumento de gestão e incluiu as águas subterrâneas no Plano Estadual. A aplicação da PERH teve atrasos e só foi regulamentada via Decreto nº 23.067 em 1994. Santa Catarina também instituiu sua política de recursos hídricos em 1994, via Lei Estadual n. 9.748, também incluindo as águas subterrâneas nos aspectos de gestão e outorgas. O atraso na regulamentação da PERH em Santa Catarina foi ainda maior, só ocorreu em 2006 via Decreto Estadual n. 4.778. O Rio Grande Norte, de forma muito similar ao Ceará, instituiu a PERH em 1996 via Lei Estadual nº 6.908 e incluiu as águas subterrâneas no Plano Estadual. Mas só a regulamentou via Decreto nº 13.383 em 22 de março de 1997, dois meses após a criação da Lei das Águas (9.433 de 08 de janeiro de 1997) sem considerá-la.

O estado da Bahia via Lei nº 6.855 de 1995 aborda sobre a Política, Gerenciamento, Plano Estadual e entre outras providências instituiu o processo de outorga, regulamentando via Decreto nº 6.296 de 1997. Apesar dos prévios avanços legais estaduais, com promulgação da Lei das Águas (Federal) a Lei Estadual nº 6.855 de 1995 foi revisada várias vezes e acabou sendo substituída pela atual Lei Estadual nº 11.612 de 2009. A Bahia, em especial, descentralizou a gestão das águas estaduais criando 25 RPGA (Região de Planejamento e Gestão das Águas) via as Resoluções 43 e 88 do CONERH (Conselho Estadual de Recursos Hídricos). Essas RPGAs têm como objetivo fazer o mesmo papel do Estado, porém, como unidades regionais para facilitar a gestão. Dentre as 25 RPGAs, 16 têm Comitês de Bacias organizados e aprovados pelo CONERH (Conselho Estadual de Recursos Hídricos) (Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Mapa com as 25 Regiões de Planejamento e Gestão das Águas - RPGA. As 16 áreas de RPGAs em cor laranja são as unidades que já tem comitê de bacias definidos, conforme se prevê a Lei das Águas (9.433/1997). As demais RPGAs em cinza estão com seus comitês de bacias pendentes de organização. Fonte: <http://progestao.ana.gov.br>.

Os critérios de outorgas referentes às águas subterrâneas para o estado da Bahia estão dispostos no Decreto Estadual nº 6.296/1997 e em mais detalhes via instruções normativas do órgão gestor estadual (INEMA), instruções nº 1, 10, 15 (revogada e substituída pela Instrução Normativa 003/2022). Na Bahia, um ponto merece atenção sobre a nova lei estadual que atualizou a política de recursos hídricos em 2009 (Lei n. 11.612), em especial o artigo 18, parágrafo 5º. A redação dada gera um dispositivo que possibilita a dispensa de outorga de direito de uso de recursos hídricos ou de manifestação prévia do Poder Público em casos de perfuração de poços tubulares. Isso fez com que a Procuradoria Geral da República - PGR, em 2013, considerasse este item como inconstitucional e levou uma Ação de Inconstitucionalidade - ADI ao Supremo Tribunal Federal que suspendeu (em abril de 2018, via ADI 5016) a eficácia desse item. Na prática, pode ter havido um hiato ou prejuízos nos processos de outorgas nesse período de 2009 até abril de 2018.

O Estado da Paraíba instituiu sua política de recursos hídricos, via Lei 6.308 em 1996, outro estado que também considerou as águas subterrâneas como foco. Incluindo a destinação de parte da arrecadação relativa à compensação financeira pela exploração de recursos minerais para a aplicação exclusiva em levantamentos, estudos e programas de interesse para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos. A regulamentação da política de recursos hídricos ocorreu via Decreto 19.260 em 1997, também após a promulgação da Lei das Águas.

Como se observa, os estados de São Paulo, Ceará, Santa Catarina, Bahia e Rio Grande do Norte e Paraíba foram os Estados que instituíram políticas de recursos hídricos antes mesmo da Lei das Águas e já consideravam as águas subterrâneas como foco de atuação. A partir da Lei das Águas em 1997, os demais Estados se mobilizaram para atender as novas diretrizes e aos poucos foram criando as políticas estaduais, seus meios de gestão e definindo os critérios de outorgas. Os avanços legais, institucionais e organizacionais para fins de gestão dos recursos hídricos no Brasil são lentos, e muitos estados ainda não elaboraram os Planos Estaduais de Recursos Hídricos definidos como instrumento de gestão há mais de 21 anos pela Lei das Águas.

Visando resumir o entendimento dos critérios de outorgas praticados nas 27 unidades da federação, a Figura 2.2 a seguir, que sintetiza os itens considerados critérios para emissão de outorga de direito de uso das águas subterrâneas no Brasil, veja seus detalhes a seguir.

UF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	UF2
AC	5,0	100	-	-	-	35	-	-	-	-	SD	-	-	-	-	-	PB
AL	48,0	100	-	-	-	10	-	-	-	-	SD	SD	-	-	-	-	PR
AM	5,0	100	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	PE
AP	5,0	100	-	-	-	35	-	SD	-	-	SD	-	-	-	-	-	PI
BA	43,2	D	-	D	-	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	RJ
CE	48,0	100	-	-	-	10	-	-	-	-	SD	-	-	-	-	-	RN
DF	5,0	75	20	-	-	10	D	SD	-	SD	-	D	-	D	-	-	RS
ES	2,0	100	-	-	-	10	-	-	SD	SD	-	-	-	-	-	SD	RO
GO	46,8	100	-	-	-	12	-	SD	-	-	-	-	-	-	-	SD	RR
MA	86,4	100	-	-	-	5	-	SD	SD	SD	-	-	-	-	-	-	SC
MT	86,4	100	-	-	-	12	-	-	-	-	SD	-	SD	-	-	SD	SP
MS	15,0	100	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	SD	SD	SE
MG	60,0	100	-	-	-	35	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	TO
PA	10,0	80	-	-	-	35	-	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	
	15,0	100	-	-	-	10	-	SD	SD	SD	-	-	-	-	-	-	
	10,0	100	20	200	-	10	-	-	-	SD	-	-	-	-	-	-	
	60,0	100	-	-	-	35	SD	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	
	10,0	100	-	200	-	35	-	SD	-	-	SD	-	-	-	-	SD	
	21,6	100	-	-	-	35	-	SD	-	-	-	-	-	-	-	SD	
	5,0	80	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

(D) – Critérios com várias definições
(-) Critérios não usados
(SD) - Critérios usados sem definição

**Critérios Objetivos**

- 1 Usos insignificantes (m<sup>3</sup>/dia)
- 2 Vazão nominal do poço (%)
- 3 Tempo max. de bombeamento (h)
- 4 Distância entre poços (m)
- 5 Vazão de surgências (%)
- 6 Prazos max. de outorgas (anos)
- 7 Reserva explotável (m<sup>3</sup>/ano)

**Critérios Subjetivos**

- 8 Estudos hidrogeológicos
- 9 Análises por finalidade de uso
- 10 Análises de fontes de contaminação
- 11 Análises de interferências de poços
- 12 Capacidade de recarga do aquífero
- 13 Vazão média do aquífero
- 14 Vazão de segurança dos aquíferos
- 15 Vazão sustentável do poço
- 16 Fatores econômicos e sociais

**Exigências Legais**

- Análises físico-química e bacteriológica
- Testes de bombeamento
- Dados construtivo do poço e litoestratigráfico
- Plano de uso da água
- Estudos e relatórios (ocasionais)

**Figura 2.2.** Consolidação dos critérios de outorgas para águas subterrâneas praticados nas 27 unidades federativas do Brasil. Foram identificados 7 critérios objetivos e 9 subjetivos totalizando 16, e mais 5 exigências requeridas a todos estados de forma diferenciadas entre eles. Alguns critérios (D) considerados subjetivos são usados no DF de forma objetiva e numericamente definidos, e aplicados com valores diferenciados por aquíferos.

Diante da natureza diversificada dos critérios, optou-se por agrupar os critérios em dois tipos: critérios objetivos e subjetivos. Os objetivos são critérios claros, diretos, e que não remetem a entendimentos ambíguos ou interpretações. Os subjetivos são critérios não muito claros, geralmente usam termos genéricos e causam entendimentos diversos sobre o que são ou a que se pretendem, podem ser interpretativos e suas aplicações podem ser variadas. Além desses critérios, foram observados exigências ou requisitos de informações, que necessariamente devem ser apresentados ao órgão gestor estadual como condição para obtenção da outorga. Porém, essas exigências ou requisitos não são necessariamente critérios que condicionam a definição da parcela outorgável ou mesmo do volume d'água outorgável. Contudo, os requisitos serão usados para análises dos pedidos de outorgas e representam a documentação técnica obrigatória para a formulação do pedido de outorga.

A seguir estão listados todos os critérios de outorgas de águas subterrâneas identificados nas legislações estaduais vigentes:

#### **Critérios Objetivos:**

- Usos insignificantes: vazões mínimas que não exigem outorgas ( $m^3/\text{dia}$ );
- Vazão nominal do poço: as quais são obtidas no teste de bombeamento (% ou  $m^3/\text{h}$ );
- Tempo máximo de bombeamento: duração diária de bombeamento nos poços (horas);
- Distância entre poços: distância mínima tolerável para perfuração de poços (m);
- Vazão de surgências: vazão definida para extração de águas em nascentes (% ou  $m^3/\text{h}$ );
- Prazos máximos de outorgas: duração de vigência até sua renovação (anos);
- Reserva explotável por aquíferos: estimativas de volumes disponíveis ( $m^3/\text{ano}$ ).

#### **Critérios Subjetivos:**

- Estudos hidrogeológicos;
- Análises por tipo ou finalidade de usos;
- Análises de fontes de contaminação, existência de possíveis fontes contaminantes próximas dos poços;
- Análises de interferência entre poços, em caso de poços próximos exigem teste de interferência visando identificar rebaixamento em poços vizinhos;
- Capacidade de recarga dos aquíferos;
- Vazão média do aquífero, calculado com base em dados de todos os poços existentes;
- Vazão de segurança do aquífero;
- Vazão sustentável do poço;
- Fatores econômicos e sociais, critério geral em aberto, podendo considerar densidade populacional, grau de ocupação da área, consumo per capita ou mesmo conveniências

técnicas associadas com aspectos econômicos e sanitários.

Dois outros critérios subjetivos foram observados entre os critérios para emissão de outorga dos estados de São Paulo e Roraima, “o grau de favorabilidade de exploração” e “a potencialidade hídrica do aquífero”. Ambos os casos estão focados nas condições naturais de disponibilidade das águas subterrâneas e nas condições de extração. Mas em nenhum ponto dentro da legislação vigente se qualifica ou quantifica o que é uma adequada favorabilidade ou potencial hídrico do aquífero, deixando ao requerente da outorga a indicação e definição. Esses tipos de critérios essencialmente não alcançam a sustentabilidade dos aquíferos.

Alguns critérios subjetivos citados podem remeter ao entendimento de serem critérios objetivos, pois poderiam ser mensurados e definidos de forma clara (numericamente), exemplos: a vazão outorgável, vazão de segurança, e vazão sustentável do poço. Porém, em alguns Estados esses critérios são colocados nas regulamentações de forma livre e sem definição clara no que se referem. São dispostos como condicionantes para as outorgas, onde se devem considerar as vazões de segurança ou sustentáveis para deliberação de outorgas. Mas em nenhum momento, foi feito um estudo prévio para identificar essas condições que sustentariam as análises de outorgas. Deixando a critério do avaliador o julgamento se é sustentável ou se está dentro de uma suposta margem de segurança.

No estado da Bahia, o Instituto de Gestão das Águas e Clima (INGA, já extinto, era o órgão estadual gestor de recursos hídricos) criou critérios específicos para outorgas de águas subterrâneas do aquífero Urucuia (no oeste baiano), Instrução normativa nº 15/2010 (revogada em 2022). São critérios que visavam evitar interferências de fluxos entre os poços tubulares e entre os corpos hídricos superficiais com poços tubulares vizinhos. Assim, foram definidas condicionantes de distâncias mínimas entre poços tubulares em função de suas vazões (ex. poços com vazão menor que 30 m<sup>3</sup>/h: distância mínima é de 600 m), também foi definido entre os corpos hídricos superficiais e poços tubulares (ex. poços com vazão menor que 20 m<sup>3</sup>/h: distância mínima de 500 m do corpo hídrico superficial). São exemplos de critérios objetivos criados para fins específicos.

A Instrução Normativa nº 15/2010 foi substituída pela Instrução normativa nº 03/2022, na qual impõe novos valores limitantes para outorgas de poços e usos insignificantes (0,5 L/s e 1,5 L/s em ambiente rural).

### **Exigências ou Requisitos Legais:**

- Teste de bombeamento, de produção ou de aquífero;
- Análises físico-químicas e bacteriológicas da água;
- Dados litológicos e construtivos do poço;

- Objetivos de uso da água e plano de uso.

As quatro exigências ou requisitos técnicos necessários e entregues como documentação para solicitação de outorgas são aplicados por todos estados, porém de forma muito variável. Cada estado solicita de forma distinta os testes de bombeamento, o conteúdo de relatório, formulário de poço, análise físico-química etc. Em princípio, os dados solicitados se adquiridos adequadamente poderiam ser uma importante base para análise criteriosa de outorgas, considerando que o órgão gestor estadual já teria um banco de dados de usuários e conhecimento prévio dos aquíferos existentes. Mas na prática, em grande parte dos estados, essas exigências documentais são tratadas como simples requisitos legais, averiguados em termos de conformidade legal e não como base técnica de análise para definição das outorgas. Esse fato é agravado em muitos estados, onde seus órgãos gestores de recursos hídricos não são constituídos com equipe técnica qualificada para a análise técnica da documentação. Assim, mesmo que se exijam estudos hidrogeológicos aprofundados ao requerente de outorga, torna-se improvável uma gestão sustentável das águas subterrâneas neste cenário.

Constata-se também, com exceção do Distrito Federal, em grande parte dos estados brasileiros não há uso de critérios de outorga que favoreçam a sustentabilidade das águas subterrâneas. De forma geral, as leis que instituem as políticas de recursos hídricos são similares entre os estados e descrevem claramente seus objetivos, dentre eles está o uso sustentável das águas subterrâneas. Entretanto, nos processos de regulamentação e nas definições de instruções normativas dos órgãos gestores estaduais, geralmente não se delineiam critérios técnicos. Aparentemente os estados não fazem estudos prévios para planejamento e definição de critérios de outorgas que visem à sustentabilidade do uso das águas, e não fornecem as condições técnicas aos órgãos gestores para viabilização da gestão sustentável das águas subterrâneas.

Outro ponto observado que, apesar do Brasil ter mais de 9.000 km de litoral percorrendo 17 estados brasileiros, onde vive a maior parte da poluição do país, em nenhum desses estados existem critérios de outorgas específicos para gerir águas subterrâneas em ambientes costeiros. A costa é onde se deveria ter um cuidado especial, já que as águas subterrâneas salinizadas do mar podem avançar para o continente e contaminar os aquíferos de água doce, em casos de sobreexploração ou mal uso. A única exceção a essa constatação está no Estado de Pernambuco, numa área degradada (Praia de Boa Viagem) pelo intenso uso descontrolado das águas subterrâneas no passado e o conseqüente avanço e intrusão da cunha salina. O órgão gestor estadual, após constatar o dano, criou uma zona de proibição para novas outorgas e definiu redução do volume de outorgas em áreas próximas visando evitar o agravamento do dano. Ainda assim, são critérios que se aplicam numa área muito restrita (em dois bairros da cidade de Recife), conforme resolução do CRH N° 04/2003.

## **2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OUTORGA DE DIREITO DE USO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA**

No Brasil, na maioria dos estados, não se pratica o uso de critérios técnicos em outorgas como ferramenta de gestão de recursos hídricos subterrâneos. Atualmente no Brasil, critérios técnicos são aplicáveis a outorgas para recursos hídricos superficiais, com base em vazões históricas ou vazões mínimas. O único local no Brasil que se prevê o uso de critérios técnicos para deliberação de outorgas para águas subterrâneas é o Distrito Federal. Nos demais estados, se usa critérios construtivos de poços, vazão nominais do poço, ou não há emissão de outorgas. Muitos estados fazem emissão de outorgas desconsiderando características dos aquíferos, reservas renováveis, variações anuais do nível freático, variação climática, condicionantes de recargas etc. Em sua maioria os estados brasileiros só concedem ou autorizam o uso e não praticam outorga apropriadamente conforme previsto na legislação (como instrumento de gestão).

Em outros países, o entendimento sobre outorgas é muito variado. Alguns países tratam as águas subterrâneas como propriedade do dono da terra (Costa Rica, EUA e Inglaterra), outros permitem que as vazões outorgadas sejam revendidas (Chile e Austrália) e controladas pelo mercado, outros usam regras mais robustas/complexas considerando os impactos gerados nas águas superficiais (Alemanha e Holanda) e alguns países não têm legislação específica para regular uso e gestão das águas como na Índia (Corrêa, 2011).

O grande desafio a ser superado neste trabalho é a proposição de critérios técnicos aplicáveis diante da grande variabilidade hidrogeológica, climática, e das demais condições ambientais que se encontra no estado da Bahia. Ao contrário do Distrito Federal, onde se observa clima único e condições hidrológicas bem definidas, o estado da Bahia tem áreas semiáridas, mata atlântica, cerrados, dunas, estuários etc. (CBPM, 2015). Ocorrem também todos os tipos de aquíferos (fraturados, cársticos, intergranulares e mistos), associados ainda a várias condições geológicas, climáticas e de uso e ocupação (CBPM, 2015). No estado da Bahia são encontrados aquíferos regionais, locais, costeiros com diferentes regimes pluviométricos, diferentes coberturas de solos e usos distintos (urbano, industrial, agrícola etc.). Essa grande variabilidade hidrológica/hidrogeológica talvez represente quase a totalidade das condições observadas no Brasil, em termos hidrológicos/hidrogeológicos.

Vários critérios que podem ser considerados para a proposição de outorga são citados na literatura (Corrêa, 2011). Dentre estes podem ser enumerados o percentual da vazão média do aquífero, percentual da vazão média dos poços do aquífero, vazão de base da drenagem superficial, análise dos dados de ensaio de bombeamento, rebaixamento disponível, vazão de segurança com base na reserva renovável, avaliação do tempo máximo diário de bombeamento, volumes totais de reservas renováveis dentre outros.

## CAPÍTULO 3 - RESULTADOS - ARTIGO PUBLICADO

### DOMÍNIOS HIDROGEOCLIMÁTICOS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, ESTADO DA BAHIA: UNIDADES-BASE PARA GESTÃO SUSTENTÁVEL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Vagney Aparecido Augusto  
José Eloi Guimarães Campos

**Publicado:** 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 - UFRJ**, 44: 36253. DOI: [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_2021\\_44\\_36253](https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_36253)

#### 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

#### 3.1 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 à 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 4.1) 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.

### **3.2 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. 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.

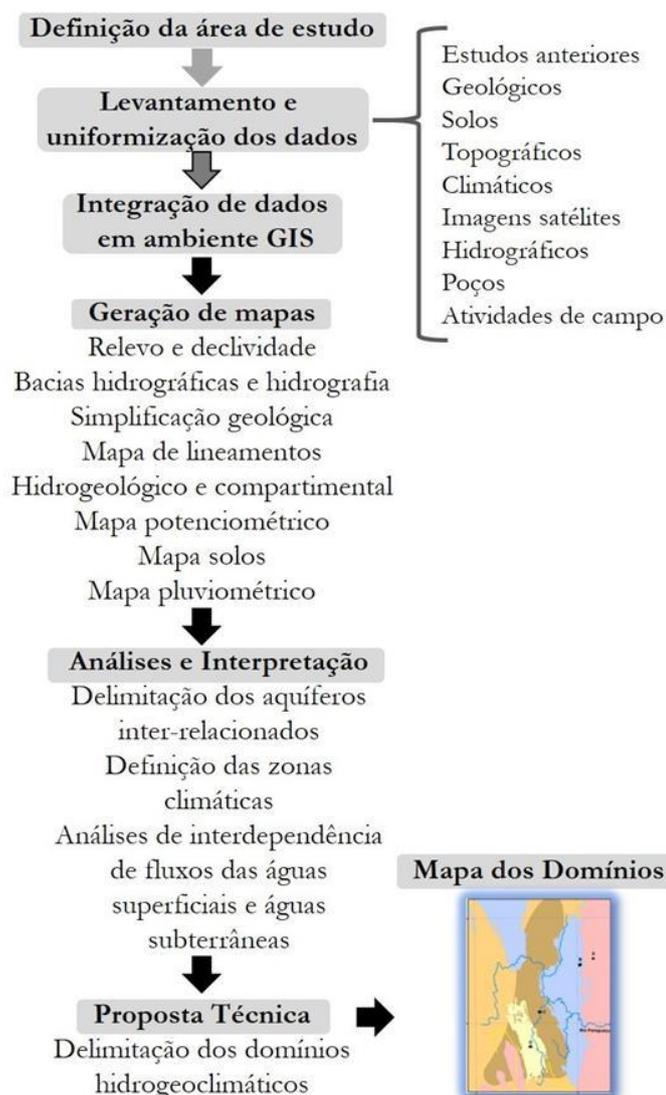
A seleção da área foi embasada em critérios de variabilidade geológica, climática, relevo e em relevância social. Consiste na cabeceira da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, que abastece mais de 3,2 milhões de pessoas, incluindo 60% da capital Salvador (população 2,85 milhões em 2018, IBGE, 2018). 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 buscar soluções para gestão sustentável desses recursos.

### 3.3 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/SIAGAS, 2019), 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 3.1) 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 espacial, disponível no programa Google Earth Pro (GOOGLE EARTH, 2018);
- 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).



**Figura 3.1.** Fluxograma simplificado com as principais etapas de trabalho desenvolvidas.

### 3.4 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.

### **3.4.1 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 dos recursos hídricos subterrâneos, 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 recursos hídricos subterrâneos, que depende de múltiplos e variáveis aspectos ambientais. Com isso, é possível criar critérios técnicos para emissão de outorga de direito de uso específicos para os diferentes domínios hidrogeoclimáticos, evitando usar parâmetros pontuais (propriedades de poços etc.).

### **3.4.2 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 recursos hídricos em termos de quantidade/qualidade no espaço e no tempo.

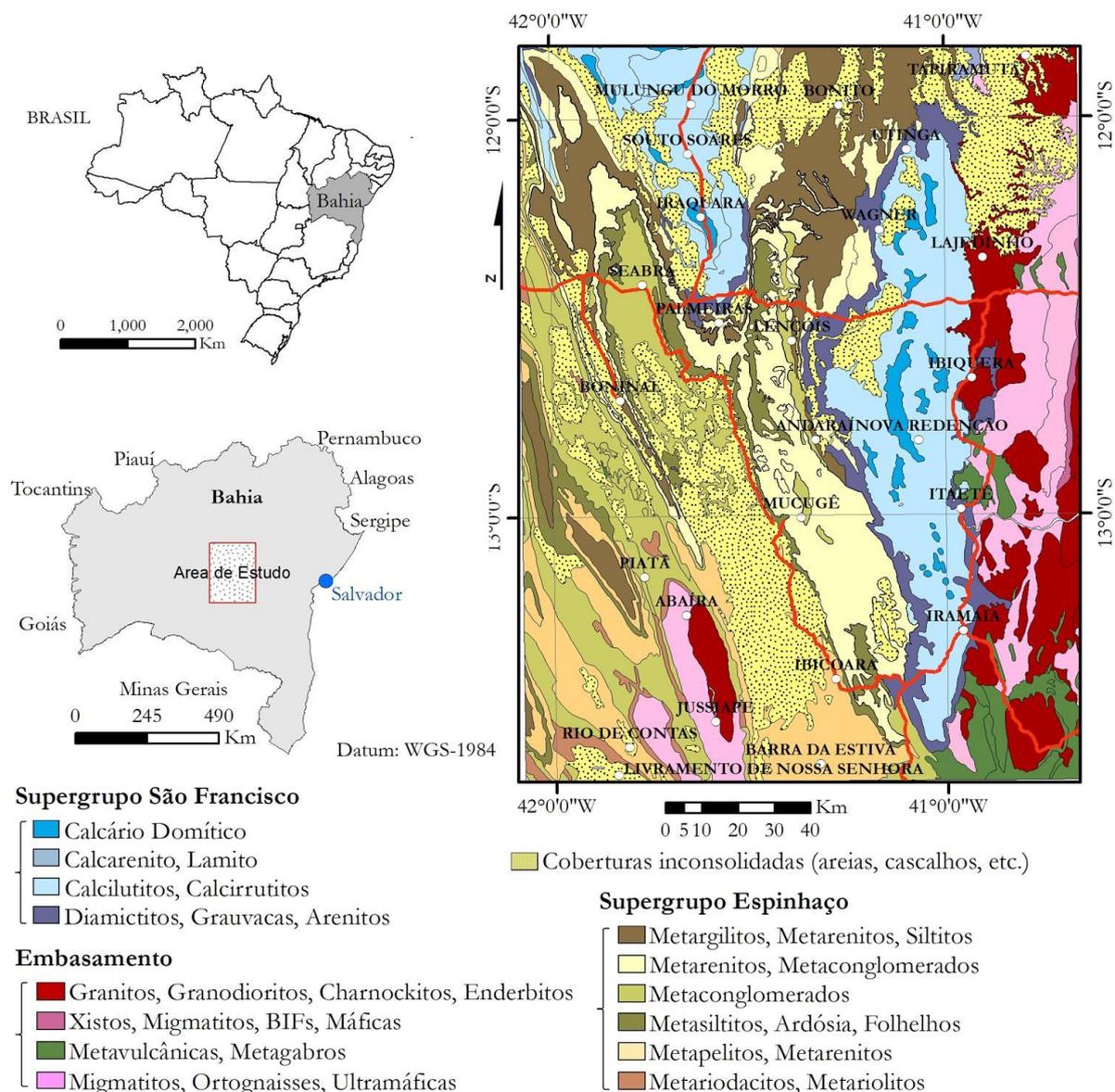
Na delimitação dos DHGC, o primeiro aspecto a ser considerado são características dos reservatórios (dos aquíferos), ou seja, devem ser desenvolvidos estudos hidrogeológicos/geológicos regionais para caracterização e definição das condições de armazenamento e fluxos subterrâneos, assim como os demais 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 inter-relação das águas superficiais/subterrâneas. Visando simplificação no processo de gestão, devem-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 recursos hídricos subterrâneos e sua gestão, enquanto os aspectos climáticos e hidrológicos superficiais indicam as disponibilidades hídricas e o uso desses recursos no tempo.

### 3.4.3 Geologia da Área de Estudo

A área de estudo (Figura 3.2) 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 3.2.** 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 3.2).

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.

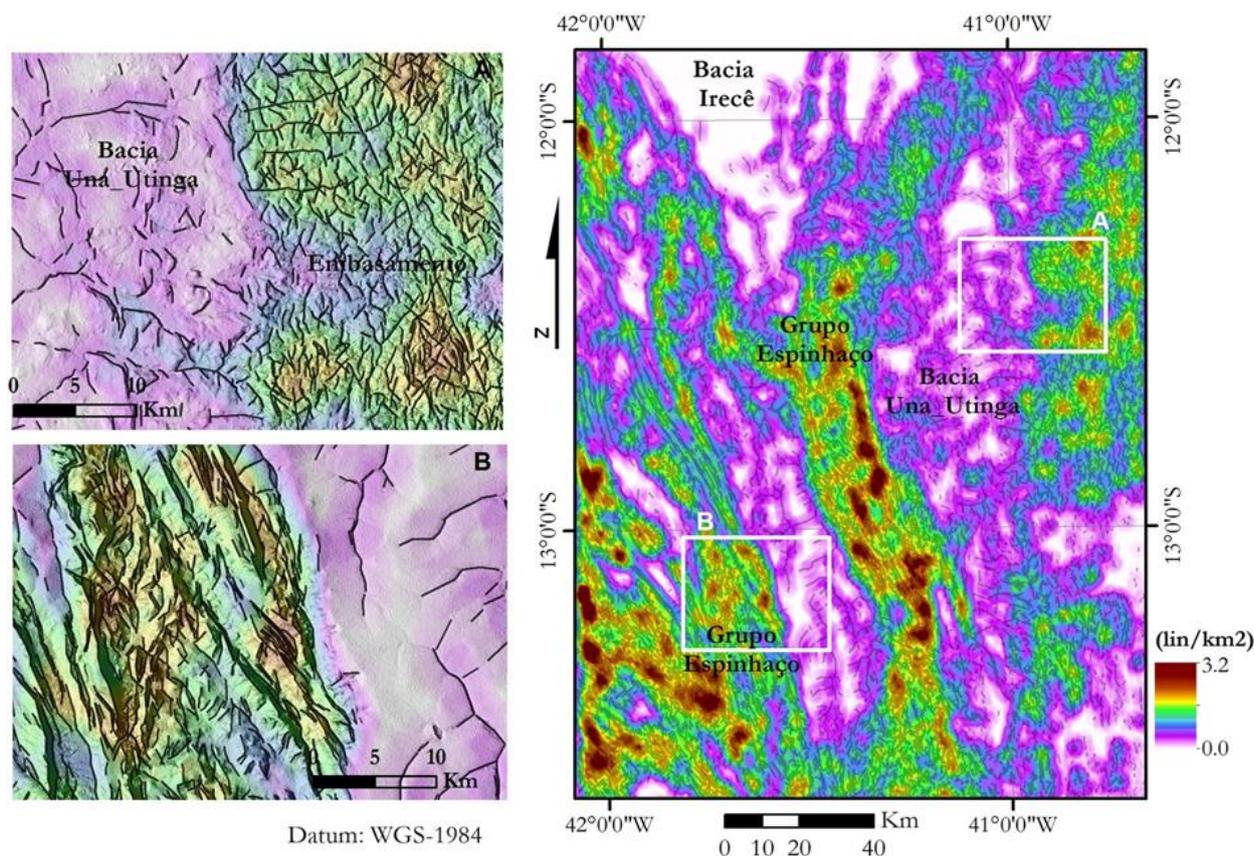
Em termos estruturais/deformacionais, de uma maneira geral, todas as rochas na área de estudo estão significativamente deformadas, apresentando dobramentos, falhas e fraturas de diversas intensidades. O embasamento apresenta a maior sobreposição de registros deformacionais e, conseqüentemente, maior 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 faturamentos 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 3.3).



**Figura 3.3.** Mapa de densidade de lineamentos estruturais ( $n^{\circ}$  de lineamentos/ $km^2$ ). 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.

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.

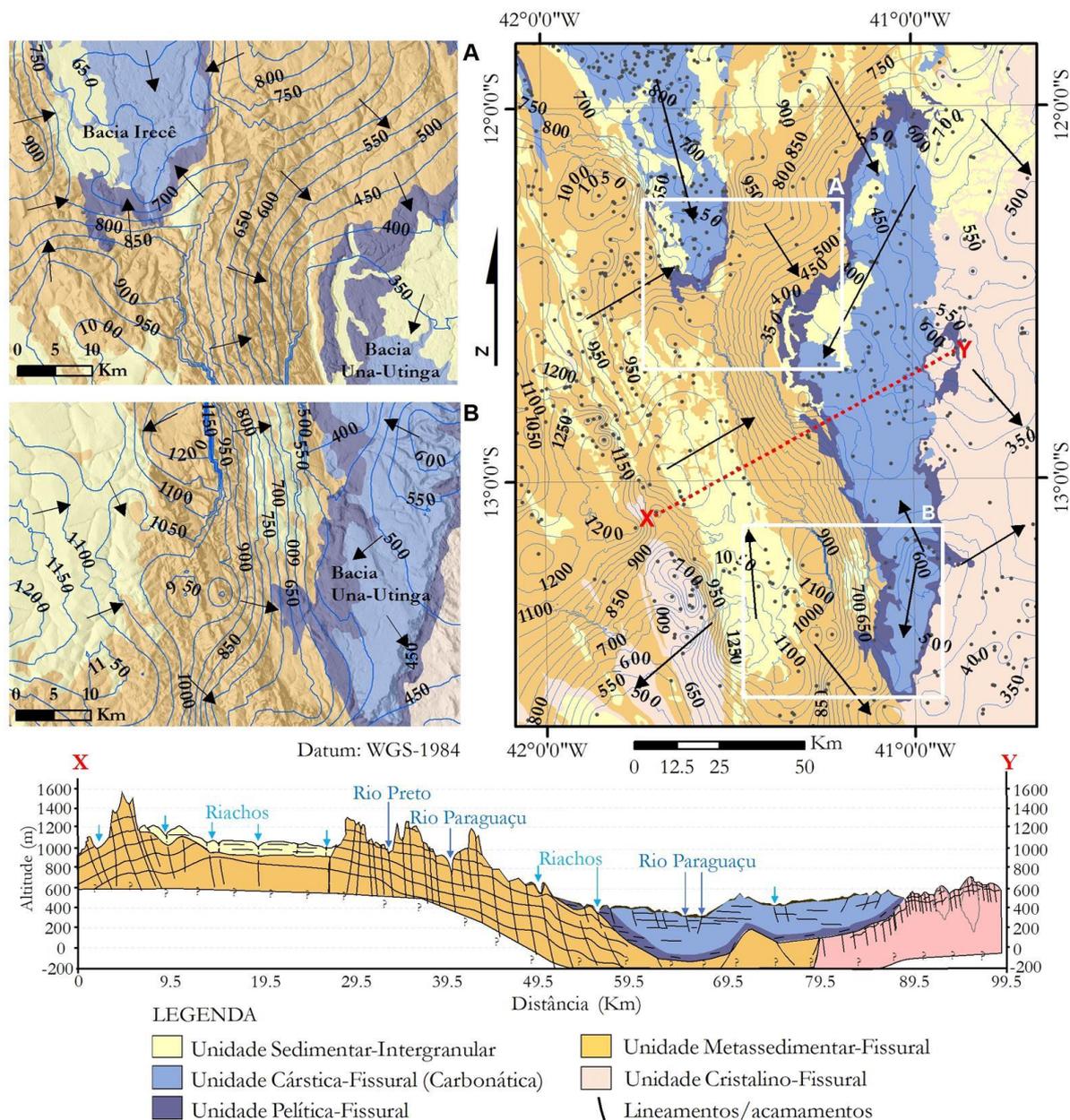
#### **3.4.4 Caracterização Hidrolitológica**

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 3.4). 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 3.4.** 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 potentiometria 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 físsuro-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 3.2), 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 3.2). Nessa região, essa unidade possui

espessura de dezenas de metros, com significativa capacidade de reservação de água, boa transmissividade e condutividade hidráulica (Figura 3.3, recorte B).

### **3.4.5 Fluxos Regionais e Interconectividade 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 de 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 hidraulicamente desconectas entre si. Ao 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 3.4). 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 3.3). 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 3.5). 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 3.4). 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 sobrejacentes.

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 hidrolíticos. Em termos de recargas, essa unidade tem pouca favorabilidade devido à restrita ocorrência, contudo, essa unidade sustenta as principais drenagens perenes da região que podem favorecer as recargas locais.

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 3.4, recorte B).

### **3.4.6 Aspectos Climáticos**

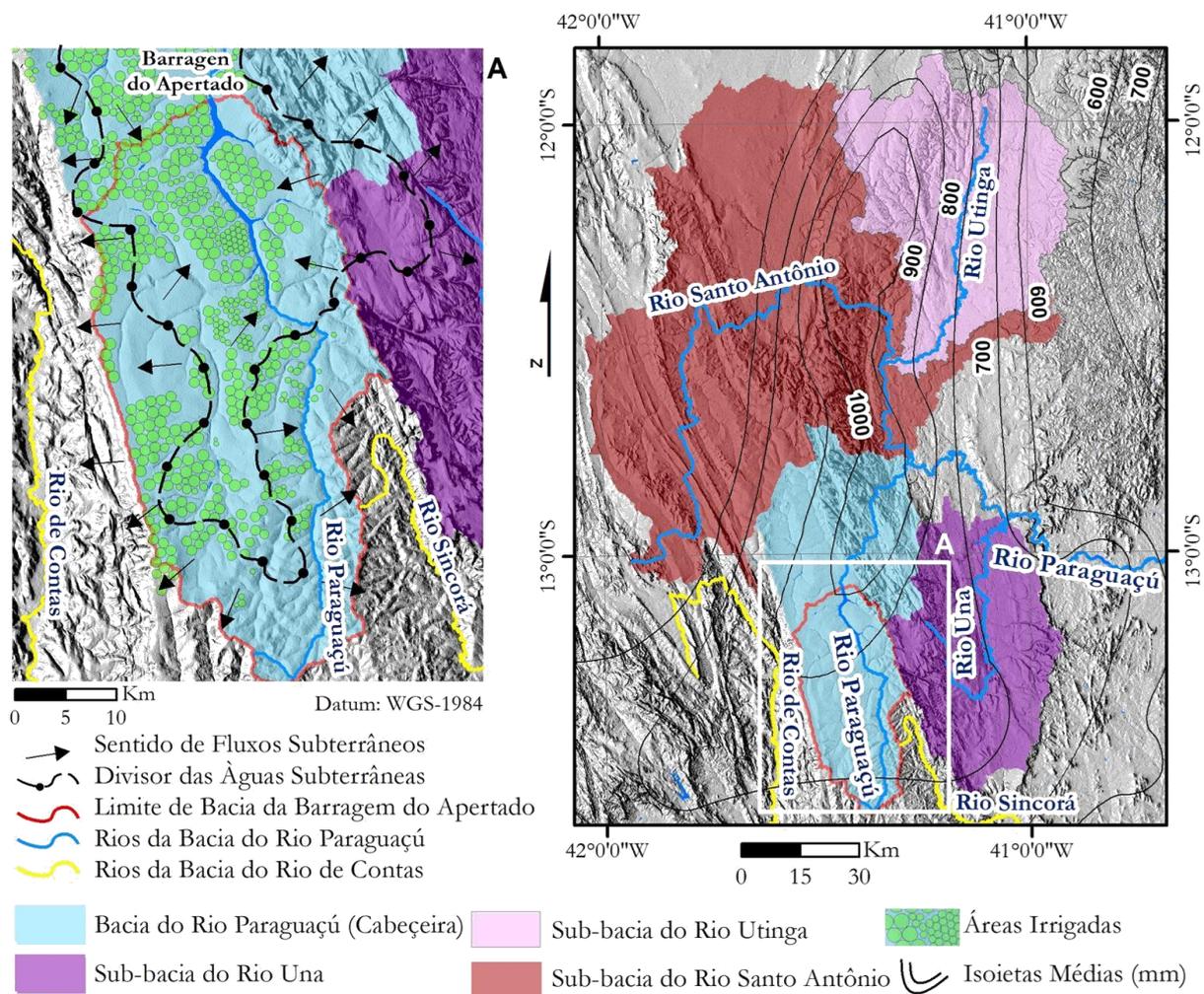
Em termos de clima, a região de estudo está situada integralmente dentro do contexto legal do semiárido brasileiro. Conforme Resoluções do Conselho Deliberativo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) de nº 107, de 27 de julho de 2017, e de nº 115, de 23 de novembro de 2017, o semiárido se define por três critérios: precipitação pluviométrica média anual  $< 800$  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 e 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 3.5), 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.

#### **3.4.7 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 3.5). 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 às diferenças do regime pluviométrico médio anual entre os lados, oeste (> 800 mm) e leste (< 800 mm). Segundo, devido às 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 mantém 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 pelítico-fissurais locais.



**Figura 3. 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°).

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

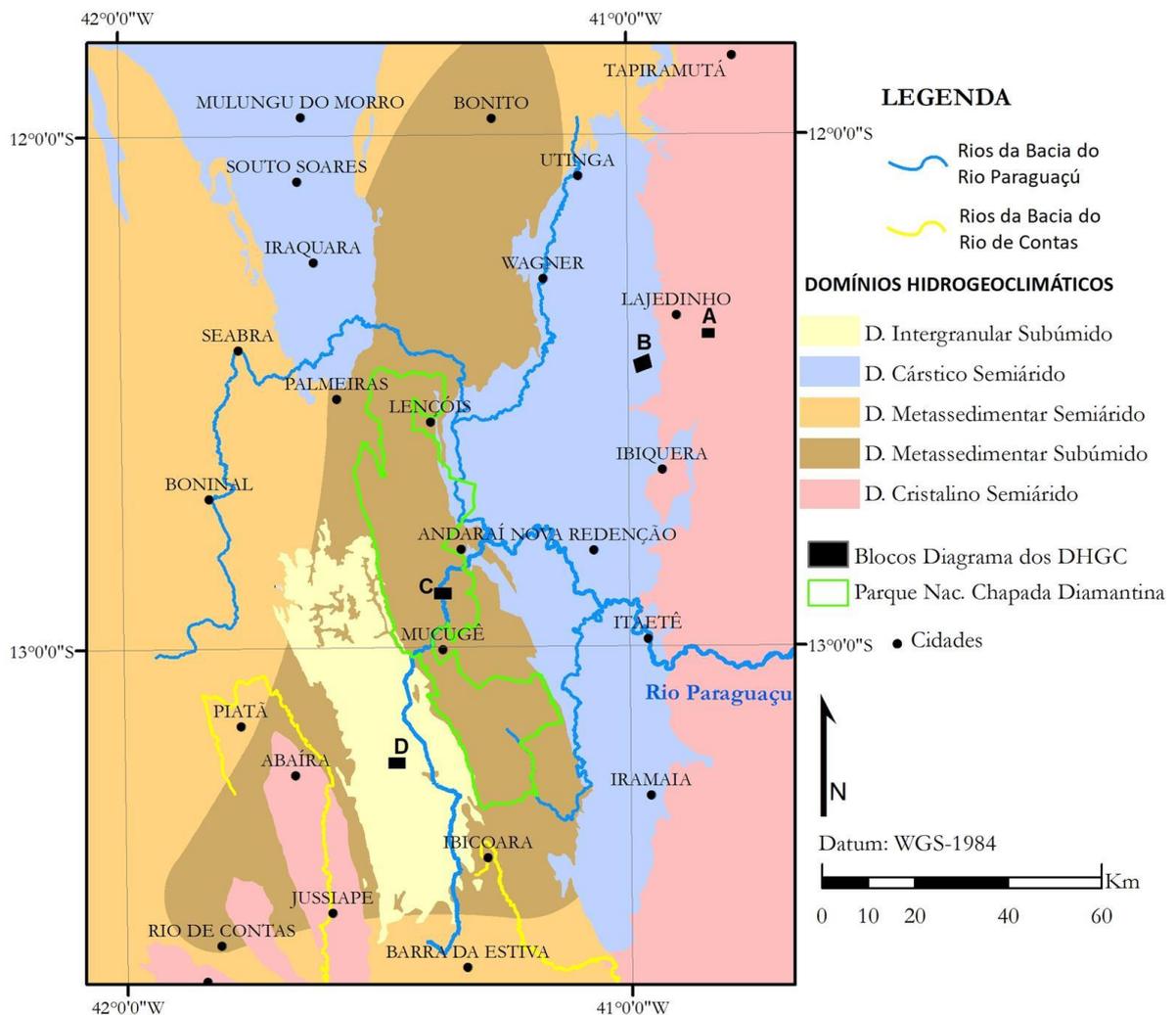
parte da bacia do Irecê, onde pode receber e/ou fornecer águas para os aquíferos locais. Logo após, o rio percorre novamente a unidade metassedimentar-fissural, recebe novos tributários, e, em seguida, percorre à unidade pelítica-fissural recebendo outros afluentes, incluindo o rio Utinga. Essa sub-bacia hidrográfica envolve vários aspectos hidrogeoclimáticos, uma vez que o rio percorre várias unidades hidrolitológicas 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 são comuns em rios de grande curso, trazem 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.

O rio Paraguaçu tem sua nascente sobre a unidade sedimentar-intergranular, onde também está instalada a barragem do Apertado (Figura 3.5). 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 hidrológica 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 recursos hídricos subterrâneos. O intenso uso local destes recursos poderá afetar a disponibilidade hídrica de outras bacias, vizinhas ou distantes, porém conexas, trazendo diversas consequências negativas à jusante.

### 3.4.8 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 3.6) são descritas a seguir.

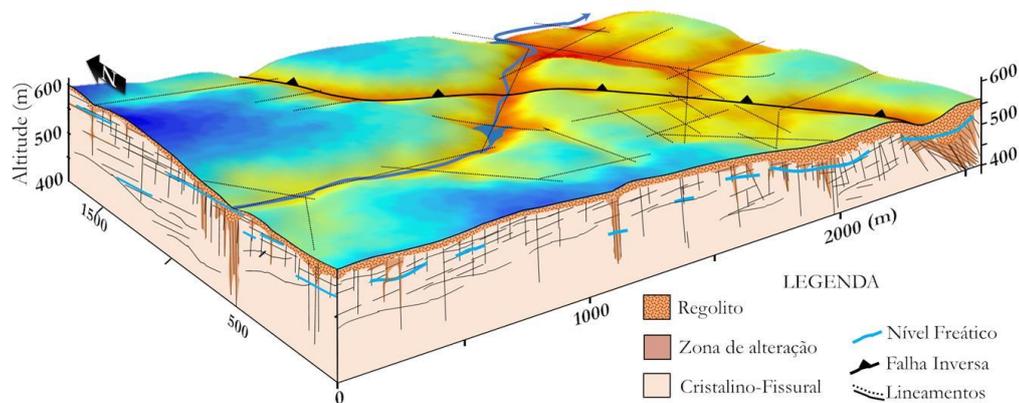


**Figura 3.6.** Mapa de DHGC. Em destaque com letras A, B, C e D estão os quatro blocos-diagramas 3D que representam, em figura esquemática, os principais sistemas de aquíferos dos cinco domínios (ver nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10).

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 3.7). 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.

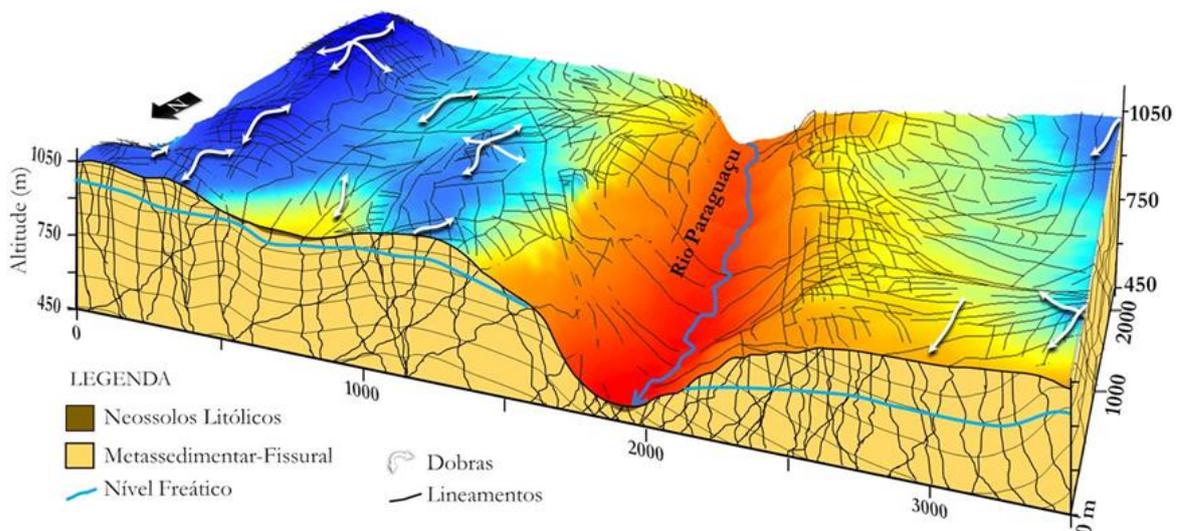


**Figura 3.7.** Bloco-diagrama representando os sistemas de aquíferos do Domínio Cristalino Semiárido. Sua localização é mostrada pelo ponto A na Figura 3.6. Em subsuperfície, observam-se as fissuras multidirecionais com zonas conectadas/desconectas que permitem os fluxos e o armazenamento dos RHS. O sistema fissural é complexo e propicia diferentes profundidades dos níveis d'água em profundidades. Foram usados dados SRTM para modelagem do relevo e interpretação dos lineamentos.

**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 3.8). Em termos de solos ocorrem os Neossolos flúvicos e litólicos. Na vegetação

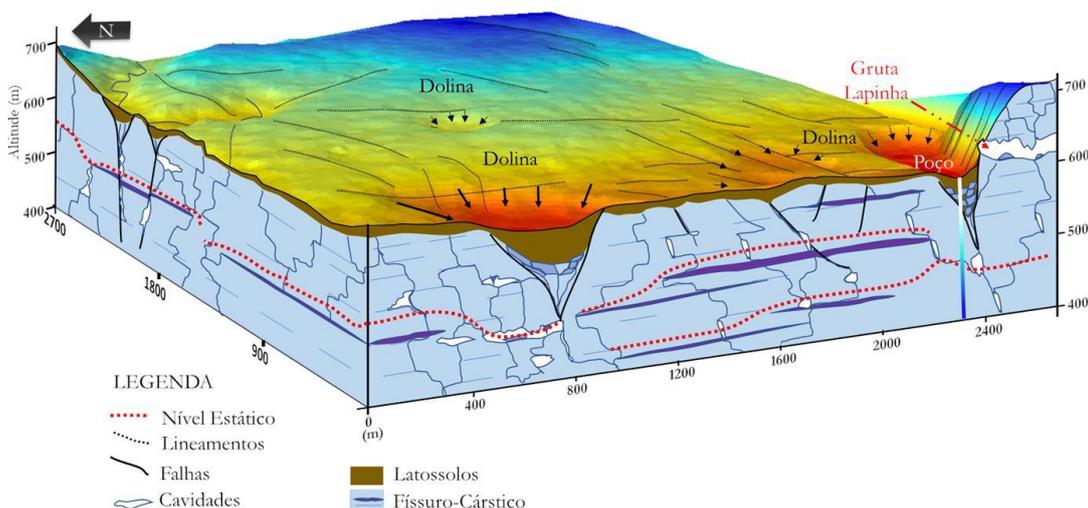
predominam os campos rupestres ou pradaria nos topos, floresta estacional e mata nas encostas e vales. A precipitação média é superior 800 mm/ano, podendo chegar a 1.800 mm/ano, enquanto a temperatura média anual é de 23,9 °C (Climate-data, 2018). Em termos de hidrologia superficial, representa as principais 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 se caracteriza 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 acamadado/dobrado e intensamente fraturado. Em algumas áreas ocorrem porções de sedimentos inconsolidados (Figura 3.8). Diferencia-se do domínio descrito anteriormente principalmente pela vegetação (predomina vegetação Caatinga, com restritas matas densas 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 3.8.** 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 4.6. Em subsuperfície, observam-se os acamamentos dobrados conectados ao intenso sistema de fraturas verticais que atingem a superfície. Essas áreas têm raras ocorrências solos, permitindo percolação e infiltração direta das águas de chuvas.

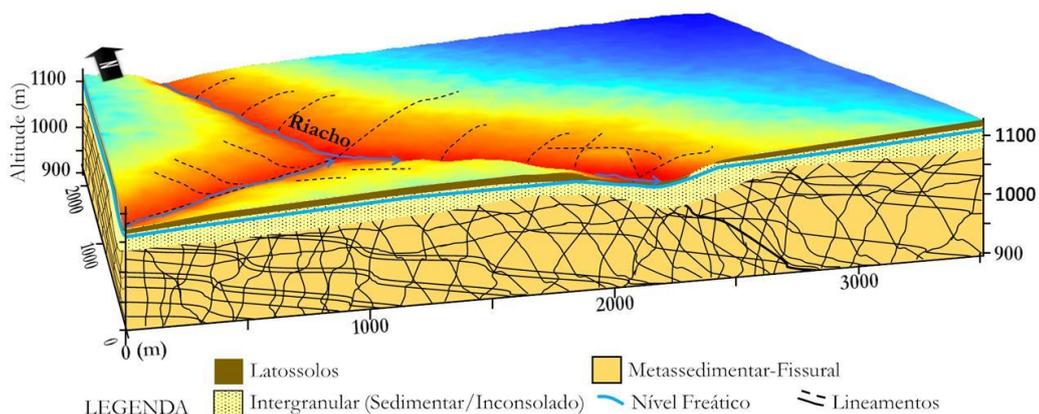
**iv) Domínio Cárstico Semiárido:** em termos de reservatórios, é representado pela unidade cárstica-fissural integrada a unidade pelítica-fissural, dispostas em duas áreas (bacias do Irecê e Una-Utinga). Na Figura 3.9, a unidade pelítica-fissural está integrada ao domínio cárstico devido a sua coexistência 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 e 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 de agricultura irrigada. Na bacia do Una-Utinga, a altimetria varia entre 320 e 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 predominam pluviosidades médias menores que 800 mm/ano.



**Figura 3.9.** Bloco-diagrama representando os sistemas de aquíferos do Domínio Cárstico Semiárido. A localização do bloco é mostrada pelo ponto C da Figura 4.6. 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.

**v) Domínio Intergranular Subúmido:** é caracterizado pela área da unidade porosa-intergranular e pluviosidades médias > 800 mm/ano (Figura 3.10). 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 3.4). 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 3.10.** Bloco-diagrama representando os sistemas de aquíferos do Domínio Sedimentar Subúmido.

A localização do bloco é mostrada pela letra D na Figura 4.6. Em subsuperfície observam-se dois sistemas de aquíferos, o sedimentar-intergranular arenosos interconectado ao metassedimentar-fissural. O recorte está sobre um afluente do rio Paraguaçu, mostrando relevo semiplano e vales encaixados nos lineamentos regionais.

### 3.5. 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 em 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 domínios hidrogeoclimáticos 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 domínios para gestão dos recursos hídricos subterrâneos: 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 hidrolíticas dos reservatórios subterrâneos e suas condições de fluxos regionais; a precipitação média anual ( $> 800$  mm = subúmido;  $< 800$  mm = semiárido); e, as inter-relações 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 recursos hídricos subterrâneos. A definição de critérios de outorgas e/ou autorização de usos das águas subterrâneas devem seguir as premissas técnicas específicas de cada domínio, respeitando suas limitações de disponibilidade hídrica no tempo e no espaço.

Importante lembrar que, em cada domínio, 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 domínios definidos na área de estudo apresentam particularidades na disponibilidade hídrica e são relativamente autônomos, permitindo uma gestão independente. Entretanto, entre os domínios existe certa conectividade por meio de águas superficiais, o que ressalta a importância da gestão ser observada 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 domínios que podem impactar a disponibilidade ou qualidade das águas, o plano de gestão dos recursos hídricos subterrâneos deve ser revisado.

Na área de estudo, constatou-se que o Domínio 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

Domínio 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 Domínio 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 devem iniciar pela definição dos domínios, que devem ser a unidade de área geográfica base para condicionar a definição dos critérios de outorgas nos usos das águas subterrâneas, 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 domínios 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 domínios, o órgão gestor poderá ter previsibilidade dos possíveis impactos da implantação de projetos no tempo e prevenir problemas, garantindo assim, uma melhor relação custo/benefício para os investidores, oferecendo ainda segurança hídrica necessária aos empreendimentos.

## **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.

**CAPÍTULO 4 e 5 – Compõe dois artigos em fase de publicação. A tese completa será compartilhada no máximo até 21 de dezembro de 2023.**

## CAPÍTULO 6 - DISCUSSÕES INTEGRADAS

Os temas tratados e os resultados obtidos neste trabalho trazem luz e indicam caminhos ou soluções potenciais para vários pontos relevantes no contexto de gestão das águas subterrâneas no Brasil, e principalmente para o Estado da Bahia. O retrospecto de entendimento histórico legal e sua evolução quanto as tratativas sobre recursos hídricos subterrâneos mostram claramente que o tema águas subterrâneas ainda é um algo desconhecido. Desconhecido pelos legisladores, pela população, pelos gestores e até pelos usuários de águas subterrâneas. O fato de ter importância no desenvolvimento econômico e ser fundamental em muitos municípios não as torna protagonistas em aspectos legais que visam sua gestão adequada ou uso sustentável, ou no mínimo seu uso racional. O que impera é a clandestinidade nos usos, a falta de controle por parte dos órgãos gestores e enormes dificuldades de avanços no cumprimento da legislação vigente (Política Nacional dos Recursos Hídricos).

Mesmo para casos em que não é possível manter os poços na irregularidade, como é o caso dos poços utilizados para prover água para sistemas de irrigação, ainda há importantes problemas a serem solucionados. A questão mais crítica é a emissão, por parte dos órgãos estaduais, de outorgas de direito de uso de forma direta, sem o devido conhecimento do aquífero em exploração, e sem critérios técnicos ou com aplicação de parâmetros sem base nas relações disponibilidades/demandas e sustentabilidade do aquífero.

Quando se analisa os aspectos evolutivos dentro do histórico legal, partindo da constituição de 1988, cabe um reconhecimento quanto às melhorias alcançadas. É fato que a partir da promulgação da Lei das Águas, da instituição do Conselho Nacional dos Recursos Hídricos - CNRH, da criação da Agência Nacional de Águas e saneamento Básico - ANA, e outras instituições afins, mesmo que lentamente, os processos de gestão estão avançando.

Em nível nacional, o Conselho Nacional dos Recursos Hídricos tem discutido e tentado aperfeiçoar com novas resoluções tratando temas relevantes como, gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas, recarga gerenciada de aquífero, inserção das águas subterrâneas nos planos de recursos hídricos e outros.

Em nível estadual esses avanços são mais tímidos, e muitos estados estão buscando soluções para seus problemas relativos à gestão das águas subterrâneas. No estado da Bahia em 2022 foram propostas novas tratativas para reduções de vazões outorgáveis para o Sistema Aquífero Urucua. Interessante observar, que geralmente as tratativas legais e propostas de avanços relativos ao tema recursos hídricos também respeitam as variações do ciclo hidrológico. Infelizmente apenas quando os problemas hídricos se tornam críticos, que as águas se tornam pauta de discussão e relevância na sociedade (Brasil Econômico 2014).

Especificamente quanto aos critérios para definição de outorga para captação de águas subterrâneas, o Brasil representa um contexto diverso em suas características hidrogeológicas, entretanto os diferentes estados buscaram legislar e aplicar soluções similares ou idênticas. Poucos estados, conforme observado no quadro de critérios (Figura 2.2), estão realmente focados nas particularidades internas de seus aquíferos ou seus usos. Os critérios utilizados para outorga dos usos das águas subterrâneas são genéricos e não refletem as particularidades técnicas locais ou regionais. A única unidade da federação que de fato teve avanços embasados em aspectos técnicos foi o Distrito Federal. No qual se utilizou estudos hidrogeológicos prévios para definir disponibilidades hídricas subterrâneas e limites outorgáveis diferenciados para cada região. Especialmente no estado da Bahia, essas tratativas têm sido marcadas por avanço, retrocessos e novos avanços tímidos, e, em princípio, com restrito uso do embasamento técnico.

Dentro do contexto dos resultados dessa tese, o primeiro ponto relevante consolidado foi a publicação do artigo intitulado “Domínios Hidrogeoclimáticos no Semiárido Brasileiro, Estado da Bahia: Unidades-Base para Gestão Sustentável das Águas Subterrâneas”. Esse resultado traz o conceito de Domínio Hidrogeoclimático, e ressalta a necessidade da gestão com base nos fatores que contribuem para disponibilidade das águas subterrâneas. Simplifica e integra condições similares que favorecem ou limitam a oferta natural das águas subterrâneas, criando uma unidade base para definição de critérios de outorga para captação de águas subterrâneas.

Definir critérios considerando todos os fatores dos diferentes tipos aquíferos e considerar toda variabilidade hidrogeoclimática existente pode ser uma tarefa demasiadamente ampla, e por vezes complexa. Entretanto, se propõe uma análise multidisciplinar, envolvendo todos esses aspectos, procurando identificar os fatores preponderantes na disponibilidade e no controle do fluxo hídrico subterrâneo. Esses fatores devem ser considerados os guias direcionadores para definição de critérios e suas aplicações.

Importante ressaltar que toda proposição e definição dos domínios hidrogeoclimáticos apresentados, em nenhum momento fere ou contrapõe os aspectos legais referentes à gestão das águas subterrâneas. Essa é uma premissa básica para que se possam viabilizar melhorias técnicas e administrativas dentro do contexto gestão e uso dos recursos hídricos.

Ainda dentro do contexto dos domínios hidrogeoclimáticos, parte dos resultados apresentados indica uma interdependência entre sistemas aquíferos e águas superficiais. Grande parte dos recursos hídricos superficiais, incluindo nascentes e rios perenes no Estado da Bahia, são dependentes de descargas subterrâneas. Exemplos destas condições podem ser observados nos afluentes do rio São Francisco e seu vínculo com o Sistema Aquífero Urucuaia; ou nas nascentes dos rios Paraguaçu e de Contas e seu vínculo com os aquíferos metassedimentares na região da Chapada Diamantina.

Na Figura 4.1 é possível observar a relevante disponibilidade hídrica superficial oriunda dos sistemas aquíferos. Incluindo, nos casos dos rios Paraguaçu e de Contas a relação com os domínios hidrogeoclimáticos metassedimentares. Nesses domínios, o reflexo de suas propriedades e evolução natural condiciona a preservação de um relevo elevado, com favorabilidade climática, que por sua vez, favorecem o aumento da disponibilidade hídrica superficial. Assim, mesmo que os domínios hidrogeoclimáticos metassedimentares sejam considerados intrinsecamente de baixa disponibilidade hídrica subterrânea, ou seja, com menor capacidade de armazenamento de água, contribui fortemente para formação e manutenção de rios importantes do Estado da Bahia.

Em outra direção, também é possível observar o contrário, rios que alimentam os aquíferos do entorno e os mantêm aumentando suas disponibilidades hídricas. Fato observado no rio São Francisco no trabalho de Vieira (2021), onde o rio diminui suas vazões quando flui na região de aquíferos cársticos, nos estados de Minas Gerais e Bahia. Também na região do Aquífero Paleodunas do São Francisco, onde ocorrem os processos de recarga e de descarga simultaneamente em trechos diferentes do rio São Francisco. Também nos aquíferos cársticos da região de Irecê, Rio Santo Antônio, aonde a sobreexploração nos últimos anos vem invertendo as descargas.

Essa inversão de fluxo de recargas e descargas (aquífero-rio ou rio-aquífero) pode acontecer ao longo de vários trechos de rios regionais. Esses rios nascem ou se alimentam de aquíferos de um determinado domínio hidrogeoclimático, enquanto noutros trechos geralmente em domínios semiáridos ou áridos contribuem para aquíferos locais. Isso implica que se existirem excessos nos usos em algum trecho na cadeia de fluxo, seja no aquífero ou nos rios, o trecho seguinte dependente poderá ser afetado. Isso mostra a importância de informações técnicas que possam embasar as estratégias de gestão desses recursos.

No Capítulo 4, foi possível observar as grandes diferenças em termos de produtividades e condições de circulação hídricas entre os domínios hidrogeológicos existentes no estado da Bahia. Os dados de poços mostrados, mesmo que não representem a totalidade existente, tem grande significado e traz importantes bases técnicas para definição critérios e embasamento de progressos na gestão das águas subterrâneas. Alguns domínios hidrogeoclimáticos têm grande capacidade produtiva, como o intergranular úmido e subúmido. Contudo, quando se observa suas condições de recarga efetiva média anual (Figura 4.6) e potencial de reserva renovável, contata-se uma vulnerabilidade e riscos de sobreexploração local, pela capacidade de bombeamento ser superior à recarga natural. O que também traz importante alerta da necessidade de desvinculação dos aspectos relativos à capacidade de produção dos sistemas de bombeamento com sua sustentabilidade (Kalf & Woolley, 2005).

Ainda no contexto dos poços, alguns mostram grandes profundidades, atingindo águas em condições de confinamento ou semiconfinamento, em aquíferos regionais profundos (Figura 4.7). Por outro lado, alguns também aproveitam águas de aquíferos rasos estratégicos para manutenção das águas superficiais, como no caso dos aquíferos suspensos do Sistema Aquífero Urucua (Figura 4.7). Ou ainda estão instalados em zona de contribuições de nascentes interestaduais, como no extremo oeste da Bahia, e em pontos muito próximo da costa com riscos de intrusão da cunha salina. A soma destes fatores sinaliza para alguns riscos potenciais e respectivos cuidados que devem ser adotados preventivamente nos processos de outorgas. Com a proposição dos critérios apresentados no Capítulo 4 foram colocadas várias restrições que visam auxiliar na compensação dessas vulnerabilidades.

Os resultados apresentados no contexto dos volumes de reservas permanentes e renováveis mostram a grande dimensão dos volumes hídricos subterrâneos disponíveis no estado. Contudo, também fica claro que esses volumes não estão distribuídos uniformemente pelo território, o que leva à necessidade de aplicação de critérios de gestão diferenciados para cada domínio hidrogeoclimático e contexto de usos (abastecimento humano, abastecimento industrial, irrigação etc.). Cabe também ressaltar que os volumes de reservas calculados representam estimativas com base em valores de porosidades efetivas aproximadas, oriundas de outras áreas no mesmo contexto e tipos aquíferos similares. Isso remete a necessidade de novos estudos mais detalhados na Bahia para definição precisa destes parâmetros necessários para estimativa mais precisa das reservas subterrâneas.

As estimativas de reservas foram realizadas considerando cada domínio hidrogeoclimático, entretanto para efeitos de aplicação das propostas para emissão de outorga é necessário que áreas menores sejam recortadas na forma de unidade de gestão ou unidade de gerenciamento dos aquíferos. As reservas ou disponibilidades que devem ser debitadas a cada processo de outorga devem ser com relação às unidades de gerenciamento e não com relação ao domínio inteiro.

Essa observação é devida ao fato de que a gestão dos aquíferos deve ser local, ao contrário das águas superficiais que deve considerar a bacia hidrográfica como unidade territorial de gestão.

Outro aspecto relevante das propostas de critérios para cada domínio hidrogeoclimático é que técnicos com diferentes formações podem ser facilmente treinados para que possam ser responsáveis pelos processos de emissão de outorga de uso de águas subterrâneas. Neste sentido, um rápido treinamento incluindo interpretação dos dados de testes de bombeamento, avaliação do rebaixamento durante o bombeamento, determinação da capacidade específica do poço,

análise dos tempos de recuperação do nível estático já é suficiente para que os técnicos (mesmo que não especialistas em hidrogeologia possam emitir outorga com segurança).

Outra questão importante no âmbito da proposta de critérios é que a partir de uma análise espacial sobre bases cartográficas existentes (densidade de poços, domínios hidrogeológicos, uso e ocupação do território e outras) os técnicos poderão emitir outorga sem necessariamente ter que fazer avaliações de campo. Por exemplo, para análise de solicitação de outorga em regiões com baixa densidade de poços, com usos que não resultem em risco de contaminação e para volumes restritos de consumo, não seria necessária uma avaliação com visita a campo. Por outro lado, locais com grande sensibilidade hidrogeológica, em função dos tipos de aquíferos (ex.: livres, suspensos, cársticos, costeiros e outros) ou em função do conhecimento prévio de pressão de exploração ou rebaixamentos regionais (ex.: região de Irecê, Camaçari, Luiz Eduardo Magalhães, e outras) demandarão visitas a campo e solicitações de estudos adicionais para a emissão de outorga para captação de águas subterrâneas.

Um fato relevante que chama atenção é a grande ocorrência de coberturas inconsolidadas no estado, atingindo 20% do território. Algumas delas apresentam grandes dimensões contínuas, como o paleodunas e os lençóis arenosos ao norte do rio Grande, e da região de Vitória da Conquista. Constatou-se que no geral essas áreas não recebem a devida atenção relativa aos seus recursos hídricos subterrâneos, seja por parte de gestores e ou do meio acadêmico. Essa constatação motivou a elaboração do último capítulo de resultados (Capítulo 5), onde se propôs estudar em maior detalhe o Sistema Aquífero Paleodunas do São Francisco. A partir deste trabalho, foi possível constatar que essas coberturas inconsolidadas recentes, que por vezes são consideradas irrelevantes como reservatórios, podem ter importantes papéis no sistema hídrico, e armazenar grandes volumes de água subterrânea. Podem ainda contribuir para a manutenção de reservatórios superficiais, e ou abastecer grandes populações.

Os resultados do Capítulo 5 traz um foco da dinâmica na formação, e funcionamento do Sistema Aquífero Paleodunas. Mostra sua vulnerabilidade, impactos sofridos com as mudanças do regime de chuva nos últimos anos, incluindo os impactos em pequenas drenagens e sua relação com o rio São Francisco. O Sistema Aquífero Paleodunas é um reservatório subterrâneo do tipo intergranular livre, mas apresenta grande espessura saturada, que pode superar os 100 m em determinadas áreas. Em outras regiões se mostra pouco espesso, e com áreas sem zonas saturadas. Suas dimensões de ocorrência dentro do contexto semiárido, o torna um aquífero estratégico e fundamental para ecossistema da região. Dentro dos aspectos de gestão de recursos hídricos, esse tipo de aquífero, em função de sua vulnerabilidade e importância regional precisa ser monitorado.

Para finalizar, essa discussão integrada de uma forma geral, os resultados apresentados em diferentes capítulos se somam de forma complementar. Foram resultados da evolução de ideias que ocorrem do desenvolver do projeto, seguindo etapas necessárias para atingir o principal objeto deste trabalho. Primeiro surgem as limitações legais e seu contexto histórico evolutivo, seguido pela busca de uma unidade de gestão compatível com as características dos aquíferos. Além disso, a unidade de gestão precisa ser embasada no uso sustentável, para enfim partir para definição de critérios técnicos para emissão de outorga para captação de águas subterrâneas. Durante esse percurso surgem fatos reveladores, como o caso das grandes ocorrências de coberturas inconsolidadas e seu papel. Isso instiga e fomenta a busca por novas respostas, levando a observar fatos importantes concluído no último capítulo de resultados.

Importante também comentar que trabalhos propositivos como este, não são infalíveis, estáticos ou apresentam um fim em si próprio. Na prática, tendem a representar uma etapa intermediária da evolução natural dos temas tratados. Portanto, as propostas aqui apresentadas precisam ser validadas na prática e aperfeiçoadas com o tempo de aplicação e utilização. Mas não se pode perder a perspectiva de que sobre temas urgentes, como a gestão de recursos hídricos subterrâneos, iniciativas devem ser desenvolvidas no sentido de implantar ações o mais rapidamente possível, mesmo que em primeiro momento não sejam perfeitas, ou completas.

## CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de vários resultados apresentados, análises e discussões, pode-se concluir que o destaque deste projeto está na proposição de critérios técnicos para definição de volumes outorgáveis para águas subterrâneas. Foram propostos critérios simples e de fácil aplicação, e todos representam restrições para favorecer o uso e gestão sustentáveis dos recursos hídricos subterrâneos do Estado da Bahia. São propostas construídas considerando as limitações dos sistemas aquíferos, mas também ponderando as necessidades dos usuários das regiões. O processo de gestão, de definir restrições ou admitir concessões, precisa ser dinâmico (revisado quando necessário), e seguir a busca pelo equilíbrio da relação demanda e capacidade de oferta contínua destes recursos. E assim, ser possível dar suporte à implantação de políticas estaduais e ações que visem de fato à gestão sustentável das águas subterrâneas.

Os avanços deste projeto passam por ampla revisão dos aspectos legais que favorecem ao entendimento, contextualização histórica dos processos de outorga e a gestão das águas subterrâneas no Brasil. Essa revisão é de extrema relevância, pois parte dos problemas de gestão advém da falta de adequação legal ou da inaplicabilidade de propostas técnicas, que muitas vezes são excelentes do ponto de vista técnico-teórico, mas não funcionam no mundo real. Além disso, é necessário conhecer o status atual das tratativas de outorga para águas subterrâneas no Brasil para proposição de avanços, principalmente quanto às particularidades de cada estado. Esse resultado traz um panorama amplo de como se pratica outorga de uso das águas subterrâneas no Brasil e favorece o conhecimento das limitações impostas para proposição de critérios técnicos cuja implantação seja factível.

A análise dos critérios nos estados mostra que na maior parte o processo é meramente cartorial, isto é, os usuários preenchem formulários nos processos de requerimento de outorga, anexam documentos exigidos e os técnicos dos órgãos estaduais emitem outorgas, em geral considerando a mesma vazão dos testes de bombeamento sem nenhuma restrição a partir da aplicação de critérios técnicos.

A partir da revisão e conhecimento dos aspectos legais apresentados, o desafio se volta aos aspectos técnicos. Principalmente na definição do que é sustentável, e de como delimitar unidades ou áreas de gestão que favoreçam ao uso sustentável. Conforme previsão legal, a unidade básica de gestão de recursos hídricos é a bacia hidrográfica. Porém, é constatado que esta unidade muitas vezes não abrange a área geográfica dos aquíferos. Além disso, grande parte dos critérios de outorga existentes e praticados não remete a sustentabilidade do uso coletivo das águas subterrâneas. A busca por solução desses problemas resultou em uma análise ampla sobre os aspectos que favorecem a disponibilidade hídrica subterrâneas no espaço e tempo. Esse

trabalho resultou na proposição da definição de domínios hidrogeoclimáticos como unidade base de planejamento e gestão das águas subterrâneas. A partir dos domínios hidrogeoclimáticos, que em sua essência de definição já considera os aspectos de sustentabilidade, devem ser propostos os critérios técnicos para os processos de outorga.

No contexto citado, está disponível no âmbito dos resultados da tese um artigo completo publicado no ano 2021 e intitulado “Domínios hidrogeoclimáticos no semiárido brasileiro, Estado da Bahia: unidades-base para gestão sustentável das águas subterrâneas”. A partir destes resultados e novas abordagens foi possível propor critérios técnicos para outorgas das águas subterrâneas no Estado da Bahia.

Também foi redigido outro manuscrito intitulado “Paleodunas do São Francisco: caracterização, análises hidrogeoclimática e dinâmica das reservas hídricas subterrâneas” onde se denota a relevância de aquíferos em sedimentos das coberturas inconsolidadas. Comprovando que mesmo nestas condições, é possível existir importantes reservas hídricas subterrâneas.

Quanto às reservas hídricas subterrâneas do estado, os volumes estimados demonstram números significativos, atingindo volumes totais de 2779 km<sup>3</sup> de reserva permanente. Sendo que deste total apenas 1,5% são reservas renováveis anualmente. Contudo, esses volumes de reservas renováveis, em termos relativos *per capita*, totalizam 2.803 m<sup>3</sup>/hab/ano, valor superior à média global de 2.091 m<sup>3</sup>/hab/ano (Döll & Fiedler, 2008). Ou maior que a média de várias regiões do mundo no ano 2000, como da África (2.604), Europa (1.740), e da Ásia (873), Döll & Fiedler (2008).

Com relação às reservas hídricas chama atenção os cuidados necessários para gerir os usos destes recursos, pois a maior parte das disponibilidades está concentrada em 24% do território. Os domínios aquíferos intergranulares concentram os maiores volumes permanentes e renováveis, seguindo pelos cársticos e as coberturas inconsolidadas.

Considerando as dimensões dos domínios hidrogeoclimáticos no estado da Bahia, as vulnerabilidades dos sistemas aquíferos no contexto semiárido, e a grande informalidade dos usos das águas subterrâneas considera-se de extrema relevância o aprimoramento da rede de monitoramento e incentivo à realização de estudos para ampliar o conhecimento sobre todos os aquíferos do estado. Principalmente os sistemas aquíferos com maiores reservas (intergranulares), os mais vulneráveis (cársticos e intergranulares rasos), e os que apresentam em regiões especiais como os costeiros, de áreas urbanas, em áreas sob sobreexploração, ou com forte conexão hidráulica com as águas superficiais.

Também é necessário citar as diferentes funções que os aquíferos exercem, dentre elas o de agente regulador natural das disponibilidades hídricas superficiais. Incluindo sua grande relevância na garantia de segurança hídrica subterrânea e superficial no tempo.

Não se deve deixar de se observar a grande diferença apresentada na capacidade de extração das águas subterrâneas (por bombeamento) em detrimento das baixas capacidades de recarga natural dos aquíferos (de forma geral muito lenta).

A esses fatos, se associa, de forma agravante, os efeitos recentes constatados das variações climáticas (chuvas) que podem dificultar ainda mais a recarga (Sandstrom 1995, Green *et al.* 2011, Ali *et al.* 2012). Esses fatores somados impactam diretamente na diretriz de planejamento do uso das águas subterrâneas, pois a opção pela extração atual de volumes maiores que a recarga implica em uso de águas do futuro.

Apesar de não ser o foco deste trabalho, considera relevante o uso de modelagem numérica para estimativa de reservas e sua aplicação no contexto de gestão das águas subterrâneas. Contudo, recomenda-se que sejam aplicadas de forma responsável onde há dados e informações suficientes para análises confiáveis. Onde seja possível representar coerência entre o modelo numérico e o modelo conceitual, refletindo os máximos da realidade do aquíferos e seus parâmetros de controle.

Considera-se extremamente importante que haja investimentos por parte da gestão de recursos hídricos quanto ao processo de formação e instrução técnica mínima para os agentes reguladores. Seria de extrema relevância que os agentes reguladores tenham um conhecimento mínimo quanto à classificação dos aquíferos, seu funcionamento hidráulico, condições de exploração, reservas hídricas, potenciais de exploração e riscos envolvidos. No âmbito da formação continuada dos técnicos é fundamental que se desenvolva ações no sentido de se interpretar os dados e resultados dos testes de bombeamento (que em última análise são as informações básicas para a emissão de outorga para captação de águas subterrâneas).

Além disso, é preciso instruir os usuários de águas subterrâneas, empresas perfuradoras de poços e sociedade em geral, em um processo de formação contínuo e compartilhado por todos envolvidos diretamente ao tema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab'saber A. 2006. O paleodeserto de Xique-Xique. Universidade de São Paulo. Instituto de Estudos Avançados. São Paulo. v.20, n.56: 301-308.
- Andrade T. S. et al. 2014. Estimation of alluvial recharge in the semiarid. Engenharia Agrícola. v.34, n.2: 211-221.
- Alley W.M., Reilly T.E., Franke O.L. 1999. Sustainability of ground-water resources. U.S. Geological Survey Circular. n.1186: 79p.
- Alley W.M., Leake S.A. 2004. The journey from safe yield to sustainability. National Ground Water Association. Groundwater Journal. v.42, issue 1: 12-16.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, v.7, n.4: 349-364.
- Ali R., McFarlane D., Varma S., Dawes W., Emelyanova I., Hodgson G., Charles S. 2012. Potential climate change impacts on groundwater resources of south-western Australia. Journal of Hydrology. v.475: 456-472.
- ANA & EMBRAPA 2016. Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil - ano 2014. Relatório Síntese, Agência Nacional de Águas. Brasília. 33p.
- ANA 2017. Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão integrada compartilhada: volume 1 - diagnóstico do meio físico da região de abrangência dos Sistemas Aquíferos Urucuia e Areado: tomo I – caracterização do meio físico, do uso e ocupação da terra, levantamento hidrogeológico e investigações geofísicas: relatório final / Agência Nacional de Águas; Elaboração e Execução: Consórcio Engecorps - Walm. – Brasília. 138p.
- Arraes T.M. 2008. Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UNB). Brasília, DF. 125p.
- Arraes T.M., Campos, J.E.G. 2007. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. Revista Brasileira de Geociências, v.37: 81-89.
- ASF D.A.A.C. 2015. ALOS PALSAR\_Radiometric\_Terrain\_Corrected\_high\_res; Includes Material © JAXA/METI 2007. Accessed through ASF DAAC 01 May 2017. <https://asf.alaska.edu>.
- 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, v.44. 36253.
- Barbosa N.S. 2016. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia, Bahia. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia (UFBA). Salvador, BA. 168p.
- Bernardes E. S., Ibrahim L., Meira de Andrade C., dos Santos D. L. 2021. Água Subterrânea e Vitória da Conquista – BA: Gestão dos Recursos e Vulnerabilidade. Águas Subterrâneas. Recuperado de <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29359>>.
- Barreto A.M.F. 1993. Estudo morfológico e sedimentológico da porção norte do mar de areia fóssil do médio Rio São Francisco, Bahia. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, SP. 98p.
- Barreto A.M.F. 1996. Interpretação paleoambiental do sistema de dunas fixadas do médio Rio São Francisco, Bahia. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, SP. 223p.

- Barreto A.M.F., Suguio K. 1993. Considerações sobre a idade e a paleogeografia das paleodunas do médio Rio São Francisco, Bahia. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, n.4. Anais. São Paulo. 11p.
- Barreto A.M.F., Tatumi S.H., Suguio K., Ngatomo T., Watanabe S. 1996. O Quaternário Tardio no Sistema de Dunas Fixadas do Médio Rio São Francisco (Bahia) datado pelo Método da Termoluminescência. Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário e Reunião sobre o Quaternário da América do sul, n.6. Anais.
- Bear J., Levin O. 1967. The optimal yield of an aquifer. I.A.S.H. Symposium on Artificial Recharge and Management of Aquifers, IASH Publ. n.72: 401-412.
- 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. 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.
- Brasil. 2022. Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH 2022-2040), Plano de Ação: estratégia para implementação do PNRH. Ministério do Desenvolvimento Regional. Brasília, v.2. 108p.
- Brasil Econômico 2014. Falta d'água: não podemos desperdiçar essa crise. Brasil, 14 de agosto de 2015. Acessado em 15 de julho de 2018. <http://www.ffconsultores.com.br/falta-dagua-nao-podemos-desperdicar-essa-crise/>.
- Bristow C.S., Harry M.J. 2003. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. Geological Society, London, Special Publications. v.211: 1-7.
- Campos J.E.G. 2010. Meio Físico do Distrito Federal. In: Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal. Relatório. Secretaria de desenvolvimento urbano e meio ambiente (SEDUMA). Brasília, DF.
- Campos J.E.G., Correa P.M. 2013. Critérios para Determinação de Vazões Outorgáveis em Mananciais Subterrâneos: Aplicação no Distrito Federal. São Paulo, UNESP, Geociências. v. 32, n.1: 23-32.
- Campos J.E.G., Dardenne, M.A. 1997. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: Uma Revisão. Rev. Bras. Geociências v.27: 269-282.
- Carvalho L.M., Ramos Barreto M.A. 2010. Geodiversidade do estado da Bahia. Salvador, BA. CPRM. 184p.
- CHESF 2020. Companhia Hidro Elétrica do São Francisco. Sistema de geração de energia de Sobradinho. Bahia. <https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Sobradinho.aspx>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- Climate-data org. 2018. Clima Bahia. <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/bahia/>>. Acesso em: 22 de ago. 2018.
- Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM). 2015. <http://www.cbpm.ba.gov.br/acervo-tecnico-cientifico/publicacoes/>.
- Conkling H. 1946. Utilization of groundwater storage in stream system development. Trans. Am. Soc. Civ. Eng. n.111: 275-305.
- Correa P.M. 2011. Critérios para a determinação de vazões outorgáveis em mananciais

- subterrâneos: aplicação no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UNB). Brasília, DF. 104p.
- Costa et al. 2008. Análise da integração das águas superficiais e subterrâneas no aparato legal de recursos hídricos do Brasil e do Estado da Paraíba. Anais. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Nov/2008. Natal, RN. ABAS.
- Costa M.I.P. 1984. Caracterização e avaliação dos ambientes dunares nas folhas AS 24 Fortaleza: SB 24/25 Jaguaribe/Natal e SC 23 Rio São Francisco. Boletim técnico do Projeto Radam Brasil, Série Geomorfologia. n.187: 84- 87.
- CPRM/SIAGAS. 2019. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Serviço Geológico do Brasil. SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acessado em: 01 jul 2022.
- 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&inoid=1463>>. Acessado em: 02 nov 2018, 25 mar. 20129 e 02 nov. 2022.
- 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. Resumos Expandidos, Anais SBSR, João Pessoa. INPE. 6153-6160.
- Dalton S.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 - Escala 1:1.000.000. Salvador: CPRM. Versão 1.1. Programas Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo e Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB). Convênio de Cooperação e Apoio Técnico-Científico CBPM/CPRM.
- De Wiest, R.J.M. 1998. Ghyben–herzberg theory. In: Encyclopedia of Hydrology and Lakes. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4497-6\\_104](https://doi.org/10.1007/1-4020-4497-6_104).
- Diniz J.A.O., Lima J.B. 2008. O Aquífero de Dunas da Região do Médio São Francisco/BA. CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16. Anais. Natal: ABAS. DOI: 10.5067/Z97HFCNKR6VA.
- 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. 119p.
- Dogan A., Fares A. 2008. Effects of land-use changes and groundwater pumping on saltwater intrusion in coastal watersheds. Chapter 8: 221-249. In: Fares A, El-Kadi AI (eds). 2008. Coastal watershed management, progress in water resources series, v.13. WIT Press, Southampton. 432p.
- Domingues A.J.P 1948. Contribuição à geologia do sudeste da Bahia. Revista Brasileira de Geografia. São Paulo. n.10: 255-289.
- Döll P., Fiedler K. 2008. Global-scale modeling of groundwater recharge, Hydrol. Earth Syst. Sci. v.12: 863–885.
- Dooge J.C.I. 2001. International Symposium OH2 ‘Origins and History of Hydrology’, Dijon, May, 9-11. Accessed: [http://hydrologie.org/ACT/OH2/actes/03\\_dooge.pdf](http://hydrologie.org/ACT/OH2/actes/03_dooge.pdf).
- Esri 2020. Layer for Arcgis Desktop presents low-resolution satellite imagery for the world and high-resolution satellite and aerial imagery for most of the world. Sources: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, USDA FSA, USGS, and the GIS User Community.

- <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9>. Acessado em: jan de 2021.
- Mantovani E.C. et al. 2019. Relatório Técnico Final: estudo do potencial hídrico da região Oeste da Bahia: quantificação e monitoramento da disponibilidade dos recursos do Aquífero Urucuia e superficiais nas bacias dos Rios Grande, Corrente e Carinhanha. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 359p.
- 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*, v.45. n.2: 1-33.
- Fernandes V.D. 2012. Considerações biogeográficas sobre a fauna de Squamata do Médio curso do rio São Francisco, Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG. 77p.
- Fetter C.W. 2004. *Applied Hydrogeology*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 4 ed. 625p.
- Feitosa, Fernando A.C., et al. 2008. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. CPRM- Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro. 3. Ed. rev. 812p.
- Gaspar M. T. P., Campos J. E. G. 2007. O Sistema Aquífero Urucuia. *Revista Brasileira de Geociências*. v.37, n.4: 216-226.
- Galloway D.L., Jones D.R., Ingebritsen S.E., eds. 1999. Land subsidence in the United States: U.S. Geological Survey Circular n.1182. 177p.
- Giannini P.C.E., Assine M.L., Barbosa L.M., Barreto A.M.F., Carvalho A.M., Sales V.C., Maia L.P., Martinho C.T., Peulvast J.P., Sawabuchi A.Q., Tomazelli L.J. 2005. Dunas e Paleodunas Eólicas. In: Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto: Holos.
- Gleeson T., Befus K., Jasechko S. et al. 2016. The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience* v.9: 161–167.
- Google Earth PRO. 2018. Imagens satelitais de diversas resoluções e épocas. <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 27 de jan. 2018.
- Gomes A. W. 2019. Impactos da variabilidade temporal do regime pluviométrico na recarga de aquíferos: estudo de caso em Caetité-BA., Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UNB), Brasília, DF. 108p.
- Gonçalves T.D. 2007. Geoprocessamento como ferramenta de apoio a gestão de recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília (UNB), Brasília, DF. 88p.
- Green T.R., Taniguchi M., Kooi H., Gurdak J.J., Allen D.M., Hiscock K.M., Treidel H., Aureli A. 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*. v.405, issues 3–4: 532-560.
- Harari Z. 1996. Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. *Journal of Applied Geophysics*. v. 36, Issue 1: 43-52.
- Hisz D. 2010. Predicting Long-Term Well Performance from Short-Term Well Tests in the Piedmont. Thesis, Clemson University, 963. [https://tigerprints.clemson.edu/all\\_theses/963](https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/963).
- IBGE. 2018. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao//index.html>. Acessado em: dez 2018.
- Ilijanić N., Miko S., Hasan O., Brunović D., Šparica Miko M., Sladović Ž., Ivkić Filipović I.,

- Šenolt N., Goreta G. 2021. Geomorphology of the lakebed and sediment deposition during the Holocene in Lake Visovac, EGU General Assembly 2021, online, 19-30 Apr 2021, EGU21-15787. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15787>.
- 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.
- INEMA 2022. Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado da Bahia. Portaria n. 8578, Instruções Normativas n. 03/2022 Disponível em: <<http://www.inema.ba.gov.br/legislacao/normas-tecnicas-e-portarias/>>. Acessado em: nov. 2022.
- 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.
- Jayawardena U.S. 2003. The Availability of Groundwater in Crystalline rocks of Kandy area, Sri Lanka. International Conference on Groundwater in Fractured Rocks. Praga, Czech Republic. Proceedings: 69-70.
- Kalf F.R., Wooley D.R. 2005. Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. *Hydrogeology Journal* n.13: 295-312.
- King L.G. 1956. A Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*. v.18, n.2: 147-265.
- Kluck E.G.J. 2011. O Trabalho vai para o Brejo: mobilização, migração e colapso da modernização. Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em geografia humana, Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, SP. 291p.
- Konikow Leonard F. 2015. Long-term groundwater depletion in the United States. *Ground water*. v.53, n.1: 2-9.
- Leal A.S. 1968. Elementos de Estratigrafia do Médio São Francisco. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 4, Recife, Resumo das Comunicações. Recife, Soc. Bras. De Geologia - Núcleo Pernambuco.
- Lee C.H. 1915. The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed basin type. *Transactions of American Society of Civil Engineers*. n.1315: 48-251.
- Hirata R. et al. 2019. As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. São Paulo: IGc/USP. Disponível em: [http://igc.usp.br/igc\\_downloads/Hirata%20et%20al%202019%20Agua%20subterranea%20e%20sua%20importancia.pdf](http://igc.usp.br/igc_downloads/Hirata%20et%20al%202019%20Agua%20subterranea%20e%20sua%20importancia.pdf).
- 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*. v.14: 153-163.
- Maia P.H.P., Rodrigues Z.R.C. 2012. Estratégias para Gestão das Águas Subterrâneas do Aquífero Urucuia da Região Oeste do Estado da Bahia. *Águas Subterrâneas*, [S. l.]. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27724>. Acesso em: 29 nov. 2021.
- Manoel Filho, J. 1996. Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetros hidráulicos em meio fissural. Tese. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP). doi:10.11606/T.44.1996.tde-04112015-155049.
- Mescolotti P.C. 2021. Planície fluvial e campo de dunas eólicas do médio rio São Francisco:

- cronologia de depósitos e sucessão de eventos geológicos durante o Quaternário no Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rio Claro, SP. 140p.
- Mescolotti P.C., Pupim F., Ladeira F.B., Sawakuchi A., Catharina A., Assine M. 2021. Fluvial aggradation and incision in the Brazilian tropical semiarid: climate-controlled landscape evolution of the São Francisco River. *Quaternary Science Reviews*. v.263: 106977.
- Meinzer O.E. 1920. Quantitative methods of estimating ground-water supplies, *Bull. Geological Soc. Am.* n.31: 329-338.
- Meinzer O.E. 1923. The occurrence of ground water in the United States with a discussion of principles. *US Geological Survey Water-Supply*. n.489.
- Moraes Rego L.F. 1926. Reconhecimento geológico da parte ocidental do Estado da Bahia. *Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico*. v.17: 33-54.
- Nimmo J. R., Horowitz C., Mitchell L. 2015. Discrete-storm water-table fluctuation method to estimate episodic recharge. *Groundwater*. v.53, n. 2: 282-292.
- Oda G., Ezaki S., Akie Iritani M., Luciana Varnier C., Rossini Penteadó D. 2017. Avaliação Hidrogeológica dos Sistemas Aquíferos Tubarão e Cristalino da Porção Sul da UGRHI-05. *Águas Subterrâneas*. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28690>.
- Pacheco C.S.G.R., Oliveira N.M.G.A. 2016a. As vulnerabilidades do geossistema paleodunar do médio Rio São Francisco (BA) uma proposta de conservação. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*. v.7, n.2: 45-60.
- Pacheco C.S.G.R., Oliveira N.M.G.A. 2016b. Caracterização histórico-ambiental da APA dunas e veredas do baixo-médio São Francisco (BA). *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*. v.7, n.2: 29-44.
- Peixinho F.C. 2010. GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS HÍDRICOS. Anais. XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Luiz-MA, Ago/Set/2010. Disponível no link:<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22943>.
- Pereira R.G.F.A. 1998. Caracterização geomorfológica e geoespeleológica do Carste da Bacia do Rio Una, Borda Leste da Chapada Diamantina (Município de Itaetê, Estado da Bahia). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, SP. 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.
- Pulido-Bosch, A. 2021. Principles of Karst Hydrogeology. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment, Springer Nature Switzerland AG. ISBN 978-3-030-55370-8 (eBook): DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-030-55370-8>.
- 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: 1-18.
- Pordata 2019. Base de Dados Portugal Contemporâneo. Disponível em: <https://www.pordata.pt/Portugal>. Acessado em: 25 jan. 2019.
- Ramos S.O., Araujo H.A., Bastos Leal L.R., Luz J.A.G., Dutton A.R. 2007. 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*. v.37, n.4, suplemento:

227-233.

- Rebouças A.C. 2002. A política nacional de recursos hídricos e as águas subterrâneas. *Revista Águas Subterrâneas*. v.16, n.1: 1302.
- Ribeiro P. H. B. 2013. Espacialização da vazão produzida por poços tubulares em diferentes formações hidrogeológicas no nordeste baiano. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Vale do São Francisco, UNIVASF, Juazeiro-BA. 90p.
- Rodrigues M.T. 1991. Herpetofauna das dunas interiores do Rio São Francisco, Bahia, Brasil. *Papéis Avulsos de Zoologia*. v.37 n.19: 285-320.
- Roedel R.M. 2017. Proposição de critérios técnicos para outorga de águas subterrâneas. Estudo de caso: polo industrial de Camaçari. Dissertação de mestrado. Universidade federal da Bahia, Escola Politécnica. Salvador. 121p.
- Sandmeier J. 2020. REFLEXW, Version 9.5, Technical manual. 709p. [https://www.sandmeier-geo.de/Download/reflexw\\_manual\\_a4.pdf](https://www.sandmeier-geo.de/Download/reflexw_manual_a4.pdf). Acesso em abril de 2020.
- 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.
- Sandstrom K. 1995. Modeling the effects of rainfall variability on groundwater recharge in semi-arid Tanzania. *Nordic Hydrology*. v.26: 313-330.
- Scanlon B.R., Keese K.E., Flint A.L., Flint L.E., Gaye C.B., Edmunds W.M., Simmers I. 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*. v.20: 3335-3370.
- 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.
- Sophocleous M.A. 1997. Managing water resources systems: Why safe yield is not sustainable Ground water. n.35, issue 4: 561-561.
- Sophocleous M. 2000. From Safe Yield to Sustainable Development of Water Resources - The Kansas Experience. *Journal of Hydrology*. n.235: 27-43.
- 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.
- Theis C.V. 1935. The relation between lowering the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. In: *Trans. American Geophysical Union*, 16th Annual Meeting, Part 2: 519-524.
- Theis C.V. 1940. The source of water derived from wells: essential factors controlling the response of an aquifer to development. *Civil Engineering* n.10: 277-280.
- USGS DATA CENTER SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). 2017. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 02 de nov. 2017.
- Silva J.C. 2003. Arqueologia no médio São Francisco indígenas, vaqueiros e missionários. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em História, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). 460p.
- Sontek 2009. FlowTracker Handheld ADV: Technical Documentation. 126p.
- Sforcin A.M. 2021. Dunas quaternárias do médio rio São Francisco: proveniência sedimentar com base em minerais pesados 2021. 144 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual

Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro.

- Sophocleous M. 2000. From safe yield to sustainable development of water resources the kanas experience. *Journal of Hydrology*. n.235: 27-43.
- Thomas C. W. et al. 1998. Ground water and surface water: a single resource. (U.S. Geological Survey circular: 1139). Series. GB661.2.G76: 98–2686.
- Tricart J. 1974. Existence de périodes seches au Quaternaire en Amazonie et dans les régions voisines. *Revue Geomorphologie Dynamique*. v.4 :145-158.
- Vieira M.S.B. 2021. Estudo das vazões do Sistema Aquífero Urucuia em períodos de recessão hídrica. (Tese de Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 217p.
- Voudouris K., Kazakis N. 2021. Groundwater Quality and Groundwater Vulnerability Assessment. *Environments*. v.8, issue 10: 100.
- Williams H.E. 1925. Notas Geológicas e Econômicas Sobre o Vale do Rio São Francisco. *Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico*. n.12: 56p.
- Zhou Y. 2009. A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *Journal of Hydrology*. v.370, issues 1–4: 207-213.