

BACIAS HIDROGEOLÓGICAS: CONCEITOS E APLICAÇÕES

Manuela Freire GALVÃO

José Eloi Guimarães CAMPOS

RESUMO

Uma bacia hidrogeológica representa um compartimento em subsuperfície, representado por um aquífero, conjunto de aquíferos ou parte de uma unidade estratigráfica cujo fluxo converge para um único exutório ou área de descarga. Assim, um aquífero ou sistema aquífero pode representar uma única bacia hidrogeológica ou pode ser subdividido em diferentes bacias, em função do arranjo divergente dos sentidos do fluxo subterrâneo. Ao contrário de uma bacia hidrográfica que pode ter seu exutório representado por um ponto que representa toda a área a montante, na bacia hidrogeológica a zona de descarga é comumente representada por uma área, ou um corpo hídrico de superfície, ou segmento de curso d'água superficial. Um conjunto de bacias hidrogeológicas pode ocorrer de forma sobreposta em função da complexidade geológica regional, da espessura dos estratos e do relevo na superfície. A determinação dos limites das bacias hidrogeológicas associadas a um aquífero ou conjunto de aquíferos é importante para o entendimento da dinâmica de fluxo em subsuperfície, além de auxiliar na compreensão da relação com as bacias hidrográficas que as sobrepõem em superfície. Diferentes técnicas e métodos de estudos podem ser aplicados para a determinação e cartografia dos limites das bacias hidrogeológicas incluindo, potenciometria, geofísica, hidroquímica, técnicas hidrológicas, testes de traçadores, hidrologia isotópica, dentre outros. Entretanto, apesar de sua importância este não é um tema recorrente na literatura aplicada aos recursos hídricos subterrâneos, sendo uma terminologia ainda pouco utilizada no meio científico. A maior parte das citações a esta denominação apenas se refere a aquíferos, conjuntos de aquíferos, unidades hidroestratigráficas, sem considerar o conceito da bacia hidrogeológica *sensu strictu*. Considerando tais questões, o presente trabalho propõe uma revisão do conhecimento a respeito das bacias hidrogeológicas, bem como expandir e atualizar seu conceito e discutir suas aplicações em diferentes contextos, incluindo: gestão de recursos hídricos, projetos de recarga artificial, estimativa de reservas hídricas, desenvolvimento de modelos conceituais e simulações numéricas, dentre outras.

Palavras-chave: Bacia hidrogeológica; Bacia hidrográfica; Recursos hídricos; Gestão.

ABSTRACT

HYDROGEOLOGICAL BASINS: CONCEPTS AND APPLICATIONS. A hydrogeological basin represents a subsurface compartment, represented by an aquifer, set of aquifers or part of a stratigraphic unit whose flow converges to a single point or discharge area. Thus, an aquifer or aquifer system can represent a single hydrogeological basin or can be subdivided into different basins, depending on the divergent arrangement of the directions of the underground flow. Unlike a watershed that may have its exutory, represented by a point that represents the entire upstream area, in the hydrogeological basins the discharge zone is commonly represented by an area, or a surface water body, or surface watercourse segment. A set of hydrogeological basins can occur in an overlapping way due to the regional geological complexity, the thickness of the strata and the relief on the surface. Determining the boundaries of the hydrogeological basins associated with an aquifer or set of aquifers is important to the understanding of the flow

dynamics at subsurface, besides helping in the understanding of the relationship with the watershed that overlap them on the surface. Different techniques and methods of studies can be applied to determination and cartography of hydrogeological basins boundaries including, potentiometer, geophysics, hydrochemistry, hydrological techniques, tracer tests, isotopic hydrology, among others. However, despite its importance, this is not a recurring theme in the literature applied to groundwater resources, being a terminology still little used in the scientific research. Most of the citations to this denomination only refer to aquifers, sets of aquifers, hydrostratigraphic units, without considering the actual concept of hydrogeological basins. Considering these issues, the present paper proposes a review of the knowledge about hydrogeological basins, as well as expands and updates its concept and discusses its applications for different contexts, including: water resources management, artificial recharge projects, estimation of water reserves, development of conceptual models and numerical simulations, among others.

Keywords: Groundwater basin; Watershed; Water resources; Management.

1 INTRODUÇÃO

As bacias hidrogeológicas devem ser a unidade básica de gestão dos recursos hídricos subterrâneos em uma escala local, da mesma forma que as bacias hidrográficas são a unidade de gestão das águas superficiais. No entanto, o conceito de bacia hidrogeológica ainda não está tão bem definido na literatura quanto o de bacia hidrográfica. A busca por trabalhos referentes a este tema (mesmo a partir da utilização de sistemas automáticos de bibliometria) resulta em dezenas de trabalhos. Entretanto, quando se verifica em detalhe, os trabalhos apenas se referem de forma superficial à bacia hidrogeológica, muitas vezes sem a preocupação com o conceito do termo, ou como parte secundária de uma pesquisa cujo tema central não se refere às bacias de subsuperfície (CASTANY 1981; PEREIRA *et al.* 2003; CAVALCANTE *et al.* 2006, 2007; VERÍSSIMO *et al.* 2007; ANANDAN *et al.* 2010; ALBUQUERQUE FILHO *et al.* 2012; ENGELBRECHT & CHANG 2015; ARAÚJO *et al.* 2016; MUÑOZ *et al.* 2016; GURITA 2020; BATJARGAL & BATSUKH 2022).

TIEDMAN *et al.* (1998) definiram bacia hidrogeológica como os limites e caminhos que o fluxo subterrâneo percorre através do aquífero, englobando desde as zonas onde ocorre a recarga até os exutórios específicos. Desde TIEDMAN *et al.* (1998) não foram realizados trabalhos que buscassem conceituar e definir as ferramentas necessárias para a delimitação de bacias hidrogeológicas, até que ARRAES (2008) e ARRAES & CAMPOS (2007 e 2010)

publicaram trabalhos que tratam da proposição de critérios para a delimitação destas bacias. Estes trabalhos propuseram o uso das seguintes técnicas para delimitação das bacias hidrogeológicas: estudos potenciométricos, estudos hidrológicos, ensaios de traçador, análises hidroquímicas, geoquímica isotópica, análise de lineamentos e estudos geofísicos.

Os limites das bacias hidrográficas e hidrogeológicas subjacentes podem coincidir ou não, configurando em simetria ou assimetria entre estes limites, que quando são coincidentes são denominados de limites simétricos e quando discordantes são chamados de limites assimétricos.

A definição da extensão lateral de bacias hidrogeológicas é mais abstrata que a das bacias hidrográficas, onde os limites podem ser obtidos de maneira relativamente simples e acessível, através da análise de modelos digitais de elevação, de onde dados como declividade, topografia e hipsometria podem ser avaliados. Contudo, na análise em profundidade, uma bacia hidrogeológica pode apresentar extensão maior do que a de sua bacia hidrográfica sobreposta (TIEDMAN *et al.* 1998) (Figura 1). Da mesma maneira pode ocorrer o oposto, uma bacia hidrográfica pode abranger diversas bacias hidrogeológicas subjacentes a ela (Figura 1), o que acontece quando o fluxo em subsuperfície e o escoamento de base apresentam padrões divergentes com pontos de recarga e exutórios distintos (ARRAES & CAMPOS 2007).

No conjunto de dados para determinação dos limites das bacias subterrâneas destacam-se: níveis freáticos pontuais ou na forma de

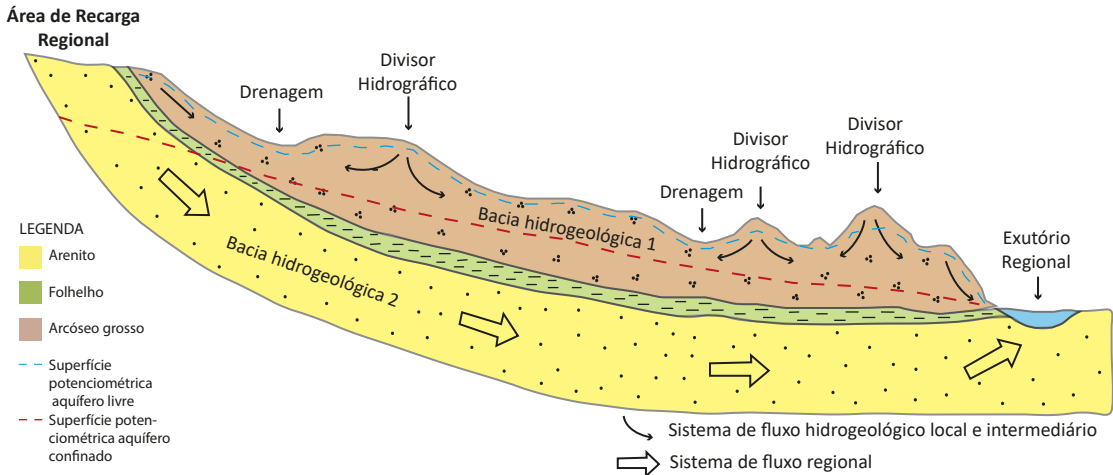


FIGURA 1 – Ilustração esquemática demonstrando caso em que duas bacias hidrogeológicas, com um aquitardo representado por camada de folhelho entre elas. A bacia hidrogeológica 1 se caracteriza por sistemas de fluxos hidrogeológicos locais e intermediários, e a bacia hidrogeológica 2 por fluxo regional. Este é um caso em que a área de uma única bacia hidrogeológica corresponde a diversas bacias hidrográficas. A linha pontilhada em vermelho representa a superfície potenciométrica do sistema aquífero 2, e a linha pontilhada azul representa a do sistema aquífero 1. Modificado de ARRAES & CAMPOS (2007).

mapas de isopiezas (mapas potenciométricos), informações hidroquímicas, elementos hidrográficos, dados de vazão de nascentes e cursos d'água superficiais, tipos de rochas, estratigrafia, estruturas geológicas (com destaque para dobras regionais e principais lineamentos estruturais), além de subsídios complementares.

Outro aspecto importante na distinção entre bacias hidrográficas e hidrogeológicas envolve o caso de avaliação de sistemas aquíferos, entendendo-se que um sistema aquífero é composto por diferentes subtipos de aquíferos (como é o caso dos sistemas aquíferos Guarani ou Urucua). O Sistema Aquífero Urucua (GASPAR 2006, GASPAR & CAMPOS 2007) é representado pelos subtipos regional livre; suspenso, confinado ou semiconfinado e regional profundo. O Sistema Aquífero Guarani é constituído por porções livres, semiconfinadas e confinadas em suas diferentes áreas de ocorrência (ARAÚJO *et al.* 1999, OLIVEIRA 2009). Uma bacia hidrogeológica pode ser composta por apenas um subtipo ou por mais de um subtipo de aquífero que compõe o sistema. Esta distinção dependerá da organização lateral e vertical das unidades que formam o sistema aquífero como um todo.

Assim o objetivo do presente artigo é contribuir com as discussões sobre o conceito, as

ferramentas para delimitação, e as implicações do conhecimento sobre as bacias hidrogeológicas ou bacias subterrâneas.

As definições dos principais termos citados neste trabalho de revisão são apresentadas, de forma a nortear os usuários não especialistas, uma vez que diferentes técnicas de formações distintas potencialmente necessitam do conhecimento e das aplicações sobre bacias hidrogeológicas. Estas definições são referenciadas a trabalhos clássicos de hidrogeologia conceitual como os de FETER (2001) e FREEZE & CHERRY (2017):

- *Aquífero* é qualquer material geológico (rocha, solo, ou rocha alterada) com capacidade de acumular e transmitir água. Verticalmente o aquífero é dividido em três zonas classificadas como: *zona vadosa ou não saturada* (onde a água ocorre na forma de unidade, na porção superior), *zona de transição* e *zona saturada* (onde a água ocupa todo o espaço vazio, na base do sistema).

- *Condutividade hidráulica* representa o potencial de fluxo através do meio, sendo uma grandeza definida por uma dimensão de comprimento dividida por uma dimensão de tempo, por exemplo, m/s ou cm/dia. O conceito de condutividade hidráulica não deve ser confundido com velocidade de fluxo, uma vez que a distân-

cia do fluxo pelo tempo depende do gradiente hidráulico e da *porosidade efetiva*, que representa a porção dos vazios livre para o trânsito da água.

- Em função do tipo de espaços vazios nestes materiais, os aquíferos podem ser classificados em *intergranulares*, quando os vazios ocorrem entre os grãos constituintes, *fraturados*, quando os espaços são associados a fraturas em rochas duras, ou *cársticos*, quando a água fica armazenada em rochas que sofrem dissoluções formando grandes vazios (cavidades na forma de cavernas).

- Outra classificação importante é devida à pressão cuja água subterrânea está submetida, sendo o aquífero definido como *livre* quando a superfície superior da zona saturada for igual à pressão atmosférica e *confinado* quando o topo da zona saturada estiver a pressões maiores que a atmosférica. Um aquífero confinado pode ser subclassificado como *totalmente confinado* ou *semiconfinado*, em função do contraste entre a condutividade hidráulica da camada aquífera com relação ao estrato sobreposto. Assim, quando as condutividades hidráulicas apresentarem amplo contraste o sistema é definido como totalmente confinado e a camada sobreposta é classificada como um *aquífero*. Quando o contraste for reduzido o aquífero se enquadra como semiconfinado e a camada superior é denominada de *aquitarde*.

- *Área de recarga* corresponde aos locais em que a água das chuvas se infiltra para reabastecer a zona saturada dos aquíferos. Área de descarga ou *exutório* é a região ou ponto em que as águas voltam à superfície e se tornam parte dos cursos d'água superficiais.

- O *escoamento subterrâneo* é classificado como *fluxo local*, quando a área de recarga for próxima ao local de descarga, e neste caso as águas são jovens, frias e pouco mineralizadas, ou *fluxo regional*, em que a recarga se dá nos divisores das bacias e os exutórios se localizam nos vales principais, e em geral apresentam águas mais antigas, com maiores temperaturas e com maior total de sais dissolvidos (devido ao maior tempo de contato entre a água e a rocha).

- A *mineralização* da água corresponde ao total de sais dissolvidos, sendo controlada pelos tipos e solubilidade dos minerais que compõem o aquífero, composição da água de recarga, clima, tipos de solos, usos em superfície, dentre outros controles.

2 CONCEITUAÇÃO E CRITÉRIOS PARA DELIMITAÇÃO

Uma *bacia hidrogeológica* é definida pela porção de um aquífero ou conjunto de aquíferos que tem o fluxo convergente para um exutório comum. Assim, um aquífero individual ou sistema aquífero pode ser dividido em diferentes bacias hidrogeológicas, isto é, bacia hidrogeológica não é sinônimo de aquífero ou unidade estratigráfica.

As bacias hidrogeológicas podem ser sobrepostas verticalmente em função da estratigrafia da bacia, da presença de aquíferos confinados e da existência de fluxo vertical ascendente ou descendente.

Uma bacia hidrogeológica poderá conter ou ser subdividida em sub-bacias a exemplo do que é observado em bacias hidrográficas.

Uma bacia hidrográfica de curso d'água de grande porte, poderá se sobrepor a diferentes bacias hidrogeológicas. O contrário também poderá ser observado, quando o relevo em superfície gerar diferentes bacias hidrográficas que sobrepõem uma única bacia hidrogeológica em profundidade.

As bacias hidrográficas são definidas por divisores localizados em regiões de elevada altitude entre duas áreas de menor altitude. A delimitação das bacias hidrográficas é feita diretamente sobre mapas planialtimétricos ou imagens de satélite com aplicação de softwares específicos.

Os divisores das águas subterrâneas comumente coincidem com os divisores superficiais principalmente para aquíferos intergranulares e livres, em regiões de relevo plano. Contudo, as áreas limítrofes dos aquíferos frequentemente não coincidem com as áreas superficiais de drenagem (WHITE 2002, GUNN 2007, PALMER 2010, DEMIROGLU 2016).

A delimitação de bacia hidrogeológica é muito importante para a elaboração de diretrizes de gestão das águas subterrâneas, sendo que os limites das bacias hidrogeológicas podem alterar ao longo do tempo, em função da exploração vigente no local. O estabelecimento de um cone de depressão regional pode causar a inversão do fluxo, de forma que o limite de uma bacia hidrogeológica pode migrar lateralmente em função do rebaixamento.

Os métodos utilizados na definição dos limites entre bacias hidrogeológicas são em gran-

de parte qualitativos, porém a integração entre as diferentes técnicas, mesmo as quantitativas, pode fornecer resultados mais precisos. Uma análise essencial que deve ser realizada antes da aplicação dos métodos de delimitação citados é a dinâmica dos fluxos subterrâneos, tanto locais quanto regionais, bem como dos fluxos superficiais, levando em consideração a classificação dos cursos d'água superficiais em efluentes e influentes.

2.1 Estudos potenciométricos

A água subterrânea se movimenta através de espaços vazios no arcabouço das rochas, incluindo espaços intersticiais (aquíferos intergranulares), por fraturamento (aquíferos fraturados e de dupla porosidade) e por dissolução (aquíferos cársticos e físsuro-cársticos). Este fluxo subterrâneo é gerado por diferenças de potencial entre pontos de cotas distintas, situação na qual a água flui de pontos de maior potencial para pontos de menor potencial hidráulico (FETTER 2001, FREEZY & CHERRY 2017).

O método envolve três conceitos básicos, o de superfície potenciométrica, superfície equipotencial e linha equipotencial (FEITOSA 1997). O primeiro consiste no lugar geométrico formado pelos pontos que determinam as elevações potenciométricas de um aquífero, as quais são referentes a uma profundidade específica do nível d'água. O segundo, de superfície equipotencial, é determinado como uma superfície virtual onde todos os pontos possuem o mesmo potencial hidráulico (ou carga hidráulica). A linha equipotencial se caracteriza como a projeção no plano da intersecção da superfície potenciométrica com um plano de cota potenciométrica definida. O mapa potenciométrico, por fim, é o conjunto de linhas equipotenciais geradas pela projeção de diversas intersecções da superfície potenciométrica com planos de diferentes cotas potenciométricas. Tais mapas possibilitam a visualização bidimensional da direção de fluxo subterrâneo, e são elaborados a partir de dados de níveis potenciométricos obtidos em pontos d'água, que podem ser representados por poços de produção (desde que em repouso do bombeamento), poços de monitoramento, poços escavados e nascentes.

A elaboração de mapas potenciométricos é a principal ferramenta para a determinação dos limites das bacias hidrogeológicas, pois fornecem direções de fluxo subterrâneo em duas dimensões, que devem ser comparadas com as direções de fluxo da bacia hidrográfica sobrejacente. Assim

pode-se determinar se há alguma assimetria indicada por direções distintas de fluxo. Os mapas de isopiezas, além da delimitação das bacias hidrogeológicas também são importantes nos programas de monitoramento dos aquíferos, estudos para determinação e remediação de plumas de contaminação, caracterização de vulnerabilidade dos aquíferos dentre outras aplicações.

Para aquíferos compartimentados, o que é comum em sistemas fraturados e cársticos, os mapas potenciométricos devem ser confeccionados respeitando os diferentes blocos, que são determinados a partir de estudos de lineamentos estruturais sobre imagens orbitais de diferentes escalas espaciais (OLIVEIRA *et al.* 2022).

Para os casos em que o número de poços é insuficiente ou mal distribuído pela área de ocorrência do aquífero, outras ferramentas devem ser utilizadas para a delimitação das bacias subterrâneas.

2.2 Estudos hidrológicos

Os estudos hidrológicos são fortemente baseados no monitoramento de longo período de vazões de cursos d'água superficiais e as relações das variações das descargas no tempo e no espaço. Vazões específicas que representam a vazão dividida pela área de drenagem são úteis para entender a relação entre o escoamento de base e o rio no ciclo hidrológico. Variações sazonais das vazões são utilizadas para verificação da regularização do curso d'água, sendo que nos rios com vazões mais regularizadas as diferenças entre as máximas e mínimas são pequenas indicando a maior contribuição da descarga de base do aquífero. Nos rios com variações extremas, o escoamento superficial contribui de forma mais significativa que a descarga do aquífero. As vazões de permanência de longo termo (como a Q_{90} ou Q_{95}) também indicam o quanto o aquífero contribui para o rio nos períodos de recessão das chuvas.

As heterogeneidades e anisotropias do meio geológico subterrâneo frequentemente podem fazer com que as vazões medidas sejam diferentes do que esperadas a partir da análise fisiográfica do terreno (ARRAES & CAMPOS 2007).

A análise das vazões específicas de cursos d'água superficiais fornece somente um indicativo de que pode ou não haver assimetria entre os limites das bacias, logo este não é um método de análise preciso para determinação das bacias hidrogeológicas subjacentes. Entretanto, este critério pode ser utilizado para

uma primeira aproximação na escala de avaliação de grandes bacias hidrográficas.

Esta ferramenta é particularmente útil para sistemas cársticos e fissuro-cársticos, em que o próprio modelo conceitual dos sistemas é complexo e de difícil previsão, uma vez que o conjunto de fluxo de canais subterrâneos pode apresentar padrão convergente ou até divergente.

2.3 Ensaio de traçadores

Os estudos com traçadores com uso de corantes fluorescentes, sais ou outras substâncias representam uma excelente ferramenta para a delimitação de bacias hidrogeológicas, pois validam os limites indicados pelos demais métodos, além de definirem com precisão os limites, uma vez que os ensaios necessitam de acesso direto aos aquíferos, que é alcançado através de sumidouros em aquíferos cársticos ou de poços para os demais tipos de aquíferos (ARRAES & CAMPOS 2007). Os ensaios com traçador também apresentam o benefício de possibilitar a definição dos limites quando estes variam no espaço em função de bombeamento de aquíferos livres sob intensa exploração.

Traçadores em águas subterrâneas fornecem dados de padrão de fluxo no interior do aquífero, velocidade linear média de trânsito da água, dispersão longitudinal e lateral, dentre outros. Ensaio com traçadores também auxiliam na definição com maior precisão dos parâmetros hidrodinâmicos: condutividade e transmissividade do aquífero (BENISCHKE *et al.* 2007, GOLDSCHIEDER 2015, CAO *et al.* 2020, BENISCHKE 2021). Como estes ensaios requerem grande quantidade de poços monitorados, e ampla geração de dados, sua aplicação é recomendada para estudos em áreas não maiores que 1 km² e com objetivos específicos como, por exemplo, a delimitação de condições de contorno em projetos de modelagem de aquífero para remediação *in situ*.

2.4 Hidrologia isotópica

Os estudos isotópicos em águas subterrâneas apresentam ampla aplicação e também são importantes para a delimitação das bacias hidrogeológicas a partir da determinação do sinal isotópico das águas de recarga ou a partir da datação das águas depois que deixam o ambiente atmosférico ou superficial e passam a integrar o fluxo no aquífero por recarga natural.

Os isótopos radioativos de Carbono 14 e Trítio são amplamente utilizados na datação de

águas devido às suas meias-vidas, que se adequam aos intervalos necessários para a datação da maior parte das águas subterrâneas, e por serem elementos naturalmente presentes nas águas. O Trítio apresenta meia-vida de 12,3 anos, e é utilizado para a datação de amostras de águas jovens. O Carbono 14 apresenta meia-vida de 5.730 anos, e é adequado para a datação de amostras mais antigas, de 500 a 40.000 anos (FEITOSA *et al.* 2008, SILVA Jr. 2021). A idade das águas é um importante indicativo em termos de fluxo, pois está associada ao tempo de residência destas no aquífero, em que as águas mais jovens mostram menor tempo de residência, o que indica proximidade entre as áreas de recarga e de descarga, e por isso são menos mineralizadas. As águas mais antigas mostram maior tempo de residência, suas áreas de recarga e descarga são os divisores e os cursos principais da bacia, e tendem a ser mais mineralizadas por permanecerem maior tempo em contato com as rochas do aquífero.

Os isótopos estáveis de oxigênio (¹⁸O) e de hidrogênio (²H) são muito utilizados em estudos de hidrogeologia para diferenciação de fontes de recarga das águas subterrâneas e possíveis misturas entre elas, águas superficiais e meteóricas. O sinal isotópico do oxigênio e hidrogênio nas águas varia naturalmente, como resultado do fracionamento isotópico destes elementos, e pelo transporte ao qual eles são submetidos no ciclo hidrológico. As concentrações destes isótopos são medidas como $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, que não refletem concentrações absolutas, mas apontam desvios (na unidade por mil) das razões isotópicas com relação a um padrão definido, o SMOW- *Standard Mean Ocean Water*. As razões isotópicas são calculadas como delta de acordo com a equação: $\delta (\text{‰}) = [R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}] / R_{\text{padrão}} \times 1000$, sendo que a razão R é expressa pelo quociente entre a concentração do isótopo pesado pelo respectivo isótopo leve.

O fracionamento dos isótopos estáveis ocorre devido a mudanças de fases no ciclo hidrológico, como evaporação, condensação e fusão. Este processo de fracionamento resulta em uma composição isotópica específica da água, que indica a sua fonte (CLARK & FRITZ 1997).

Em geral estes dados são plotados em gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ e os resultados das amostras de águas do aquífero em estudo são comparados com as retas da água meteórica global ou local e os desvios interpretados a partir de processos físicos que incluem evaporação prévia à infiltração da água no aquífero, interação água-rocha com hidratação de minerais ou ainda, misturas de águas

mais velhas com águas de circulação moderna ou submoderna.

Assim, quando o sinal isotópico das águas de uma determinada porção de uma unidade hidroestratigráfica é muito distinto de outra porção, pode-se inferir que se trata de bacias ou sub-bacias hidrogeológicas distintas.

2.5 Análise de lineamentos estruturais

A análise de lineamentos é uma técnica útil na delimitação de bacias hidrogeológicas, considerando que frequentemente a assimetria entre bacias superficiais e subterrâneas é causada pela presença de estruturas geológicas de grande porte, tais como falhas regionais, zonas de cisalhamento ou dobras. As falhas e fraturas muitas vezes causam a inversão do fluxo subterrâneo, pelo fluxo lateral das águas de infiltração em direção às zonas de maior condutividade hidráulica causada pela “zona de dano” destas estruturas.

A análise de lineamentos é realizada a partir de imagens orbitais ou fotografias aéreas com o objetivo de destacar as estruturas lineares e retilíneas como zonas de falhas ou de fraturas. Ao longo destas estruturas o conjunto de rochas subjacentes às coberturas de solos apresenta maior condutividade hidráulica que suas porções laterais. A drenança vertical ao longo de lineamentos regionais (principalmente aqueles situados em regiões de relevo aplainado) causa o rebaixamento localizado da superfície potenciométrica, o que resulta na diferenciação de sub-bacias hidrogeológicas.

Além dos traços das estruturas, seu mergulho também é importante, pois a água que drena através do plano das estruturas tenderá a migrar para a direção do seu caimento, resultando na mudança do sentido do fluxo, e causando potencial assimetria com relação às bacias hidrográficas sobrepostas.

3 ASSIMETRIA ENTRE LIMITES SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEOS

A falta de sobreposição entre os limites das bacias hidrográficas e hidrogeológicas foi denominada por ARRAES & CAMPOS (2007) de assimetria entre as bacias superficial e subterrânea.

Diversos fatores podem ser responsáveis pela divergência entre os limites das bacias superficiais e subterrâneas, sendo os principais representados por: estruturas geológicas (falhas e fraturas), feições cársticas (sumidouros e surgências), heterogeneidades estratigráficas (presença de camadas com diferentes condutividades hidráulicas) e padrão de relevo na superfície (geomorfologia).

3.1 Assimetria causada pela presença de estruturas geológicas

A presença de estruturas geológicas como dobras, zonas cataclásticas ou falhas pode ser responsável pela alteração da dinâmica de fluxo no meio subterrâneo, pois afetam tanto a configuração física do meio, quanto a disposição de camadas litológicas de diferentes propriedades (Figura 2).

Uma dobra, por exemplo, que pode gerar a repetição de uma mesma camada hidroestratigráfica que não existiria caso o substrato não estivesse deformado, tornando mais complexo o estabelecimento dos limites das bacias hidrogeológicas.

CORNIELLO *et al.* (2017) observam que a complexa configuração tectônica da área estudada na região de Campania, no sul da Itália, com falhas extensionais associadas à pequenos cinturões cataclásticos de baixa permeabilidade, interfere nitidamente no fluxo de água subterrânea, configurando um grande número de bacias hidrogeológicas distintas.

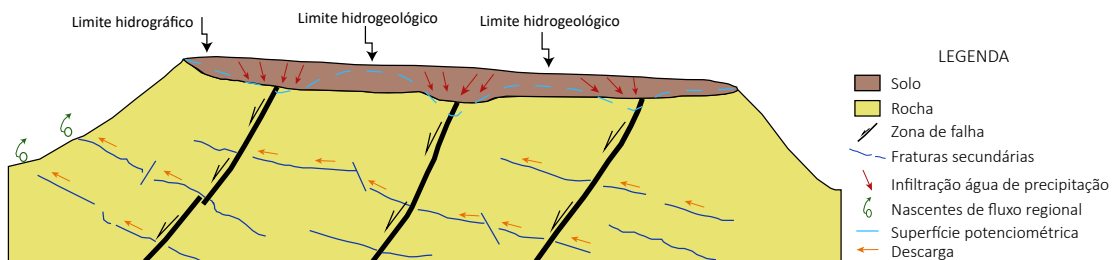


FIGURA 2 – Ilustração esquemática demonstrando a influência que estruturas geológicas de grande porte exercem no estabelecimento de assimetrias entre os divisores hidrográficos e hidrogeológicos.

PUTRANTO & LUTHFI (2019) mostram a divisão de bacias hidrogeológicas a partir da análise dos sistemas hidrogeológicos e das áreas de recarga e descarga na região de Karankobar, Indonésia.

A presença de anisotropia está associada a diferenças da condutividade hidráulica para as direções representadas pelos eixos principais das estruturas rúpteis, como zonas de falhas e fraturas (FEITOSA 1997).

3.2 Assimetria causada por feições cársticas

No caso de sistemas cársticos ou fissuro-cársticos, as aberturas representadas por estruturas planares como falhas e fraturas ou por estruturas secundárias, geradas por dissolução de carbonatos, podem representar direções de maiores condutividades hidráulicas, em função de propriedades como abertura dos condutos e interconexão entre as estruturas.

Nos sistemas cársticos a ampla dissolução do carbonato gera zonas de capturas representadas por dolinas de dissolução ou de colapso e sumidouros (zonas onde o fluxo de escoamento pluvial ou curso de água passam a integrar o meio subterrâneo). Nestes ambientes as zonas de descarga ou exutórios dos aquíferos são denominadas de surgências.

Na figura 3 está ilustrada situação em que os divisores hidrográficos e hidrogeológicos não

coincidem devido à zona de maior condutividade gerada por sumidouros em um sistema cárstico com mergulho para direção oposta ao escoamento superficial. Esta configuração é muito comum em ambientes cársticos e pode resultar em amplos deslocamentos entre os divisores.

3.3 Assimetria causada por heterogeneidades nos aquíferos

As heterogeneidades existentes nos meios subterrâneos são uma das causas mais comuns para ocorrência de assimetria entre bacias hidrográficas e hidrogeológicas. Elas podem ser causadas por intercalações entre diferentes unidades hidroestratigráficas, pela presença de camadas impermeáveis ou pouco permeáveis ou pela presença de materiais com amplo contraste de condutividade hidráulica (ex.: lentes de cascalhos em meio a arenitos argilosos, ou camadas silicificadas intercaladas em arenitos não cimentados).

No exemplo mostrado na figura 4 a assimetria se deve à presença da camada impermeável na base do aquífero livre além de seu mergulho. O arranjo das camadas resulta em um aumento de gradiente hidráulico que desloca o limite hidrogeológico em relação ao limite hidrográfico. Neste exemplo, mesmo considerando que as duas bacias hidrográficas tenham a mesma área de drenagem, a vazão de base da drenagem 2 deverá ser maior que a observada na drenagem 1.

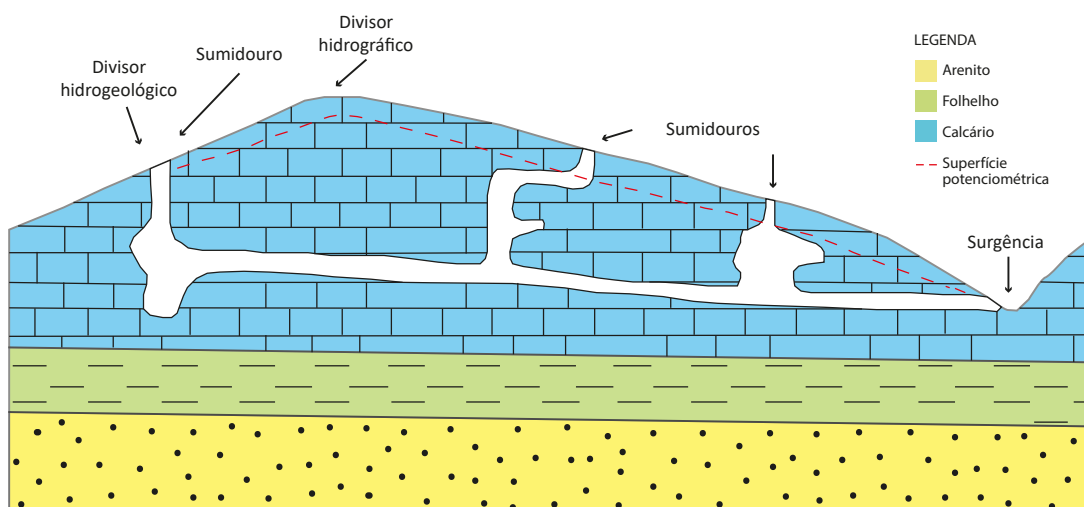


FIGURA 3 – Assimetria em sistema cárstico com presença de sumidouros que representam zonas de maior condutividade hidráulica. A linha pontilhada em vermelho representa a superfície potenciométrica do sistema aquífero. Modificado de ARRAES & CAMPOS (2007).

3.4 Assimetria controlada por feição geomorfológica

Estruturas geográficas regionais como serras alinhadas (ex.: Serra Geral de Goiás), platôs regionais (ex.: Serra de Caldas Novas), bordas de chapadas (ex.: limite norte da Chapada da Contagem no Distrito Federal), mesas regionais (ex.: Serra da Água Morna na região de Posse, GO), dentre outras, comumente determinam a assimetria entre as bacias superficial e subterrânea em sua porção de terminação lateral, como pode ser observado na figura 5. O controle é vinculado à elevada energia potencial que resulta no rápido rebaixamento da superfície potenciométrica do aquífero em direção ao compartimento de relevo rebaixado.

GASPAR (2006) mostra que a área de distribuição do Sistema Aquífero Urucuia apresenta um divisor transversal aproximadamente norte-sul que divide o sistema em duas grandes bacias hidrogeológicas com fluxos predominantemente para oeste e para leste. Esse divisor subterrâneo é exclusivamente condicionado ao modelado geomorfológico regional.

A rápida ruptura da superfície potenciométrica causa o deslocamento do limite hidrogeológico no sentido oposto ao da quebra abrupta do relevo. No contexto mais comum o limite hidrográfico fica situado próximo ao contorno do compartimento geomorfológico ou da estrutura elevada regional.

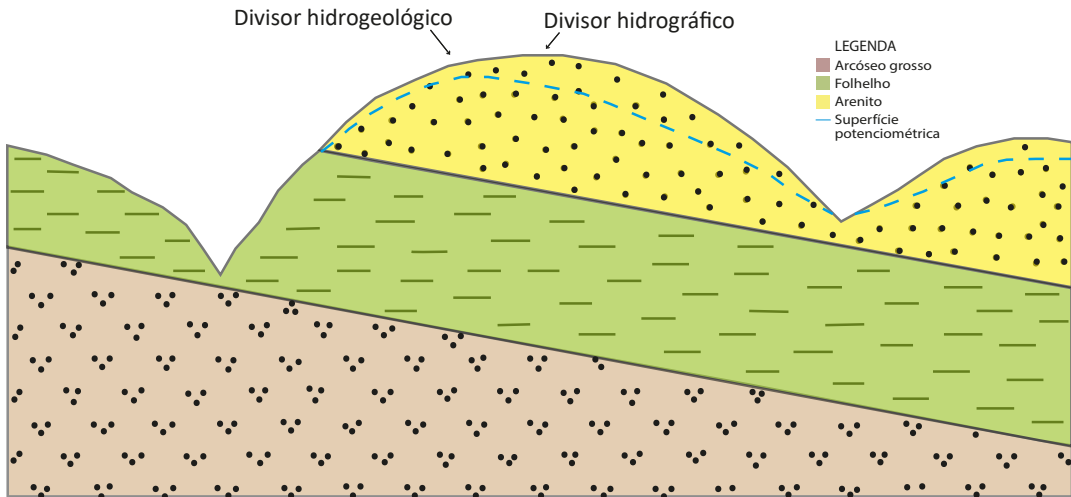


FIGURA 4 – Caso em que há assimetria entre os limites hidrográficos e hidrogeológicos causada por presença de camada impermeável de folhelho sob um aquífero livre composto por arenito. A linha tracejada em azul representa a superfície potenciométrica do sistema aquífero. Modificado de ARRAES & CAMPOS (2007).

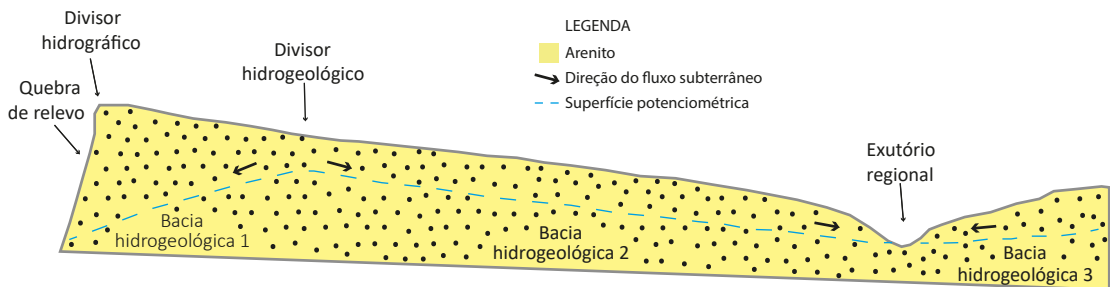


FIGURA 5 – Assimetria causada por acentuada quebra de relevo. Observar este caso, no qual uma mesma bacia hidrográfica comporta três bacias hidrogeológicas subjacentes. Modificado de ARRAES & CAMPOS (2007).

4 IMPLICAÇÕES E APLICAÇÕES

O conhecimento da delimitação das bacias hidrogeológicas é importante para várias aplicações práticas, além de ser um dos critérios para a própria definição do aquífero ou sistema aquífero. A seguir é mostrado de forma sucinta, e em alguns casos com uso de exemplos, as principais implicações e aplicações do conhecimento a respeito dos limites das bacias hidrogeológicas em estudos relativos aos recursos hídricos.

4.1 Gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos

A implantação de estratégias de gestão de águas subterrâneas, no que diz respeito à susceptibilidade dos aquíferos a contaminação por elementos presentes nos solos ou nas águas, requer que sejam estabelecidos os limites individuais das bacias e sub-bacias hidrogeológicas. Considerando uma situação em que haja assimetria entre os limites hidrográficos e hidrogeológicos, a área susceptível a contaminação das águas do aquífero pode ser consideravelmente maior do que o esperado a partir apenas das análises da dinâmica superficial, em imagens aéreas e de satélites.

Ainda, os recursos superficiais e subterrâneos devem ser tratados como uma unidade única quando se refere à gestão integrada de ambos. Não é possível gerir as águas subterrâneas sem levar em consideração as origens de suas recargas, o uso do solo em superfície e as relações dos limites hidrográficos e hidrogeológicos. É necessário compreender as áreas de descarga, quais rios são alimentados e inclusive mantidos em regime perene ou intermitente pelas águas provenientes dos reservatórios subterrâneos, quais são efluentes e quais são influentes. Todos os aspectos mencionados são afetados em alguma medida pela dinâmica de fluxo em subsuperfície, e como este se conecta com aquele em superfície.

Portanto, a determinação da conexão hidráulica entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos é uma premissa importante para a gestão integrada, visando à preservação de ambos os recursos. Quando não há conexão entre os rios e os aquíferos mais profundos, a gestão poderá ser realizada em separado, uma vez que se trata de reservatórios segmentados (BRASIL 1997; CNRH 2001, 2002).

Para a determinação da conexão hidráulica entre o aquífero e o rio, dois procedimentos técnicos podem ser adotados:

i) medições de vazão do rio, em um trecho sem tributários, em diferentes segmentos de montante para jusante. Caso a vazões aumentem ou reduzam sistematicamente verifica-se a conexão, que pode definir o rio como efluente ou influente, respectivamente;

ii) medições da carga potenciométrica em poços localizados perpendicularmente ao canal do rio. Neste caso, deve-se verificar a existência de mais de uma superfície potenciométrica e de eventuais camadas confinantes, além das características construtivas dos poços de monitoramento (materiais perfurados, profundidade e posição das seções de filtros).

Uma situação possível é a existência de aquíferos superpostos, associados a diferentes bacias hidrogeológicas em que há conexão hidráulica com os aquíferos mais rasos e desconexão com aquíferos situados a maiores profundidades.

4.2 Aquíferos transfronteiriços

Mundialmente já foram identificados cerca de 600 aquíferos transfronteiriços, segundo VILLASEÑOR & MEGDAL (2021). Porém, destes 600 aquíferos, apenas 6 possuem acordos binacionais ou multinacionais formais de cooperação para o uso e a gestão da água subterrânea presente em tais reservatórios compartilhados. Estes autores trazem uma comparação entre os números de acordos existentes para a manutenção das reservas e uso de águas subterrâneas, e aqueles para águas superficiais. Este fenômeno é atribuído à falta de capacidade das instituições para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, à ausência de dados ou incongruência com relação à dificuldade de se avaliar as reservas de água subterrânea, ao contrário dos recursos hídricos superficiais que podem ser observados e analisados diretamente.

O Programa de Avaliação de Aquíferos Transfronteiriços é uma espécie de força-tarefa entre os Estados Unidos e o México, com o objetivo de estudar aquíferos compartilhados ao redor do mundo e analisar os acordos estabelecidos por outras nações. O programa ainda visa estabelecer cooperação binacional robusta para a elaboração de diretrizes para gerir os recursos hídricos subterrâneos da região compartilhada entre os dois países, levando-se em consideração os aquíferos como unidade fundamental de análise. Neste sentido, foi autorizado o estudo dos aquíferos Santa Cruz e São Pedro, compartilhados entre o estado do Arizona (EUA) com Sonora (México), e dos aquíferos Mesilla e Hueco Bolson, compartilhados

entre Texas e Novo México (EUA) com Chihuahua (México) (VILLASEÑOR & MEGDAL 2021). Na América do sul também foi desenvolvido um estudo multinacional que incluiu os países em que o Sistema Aquífero Guarani está presente (OEA 2009).

A avaliação e o estudo dos sistemas aquíferos compartilhados configura uma ferramenta imprescindível para qualquer tipo de acordo visando a melhor gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

No Brasil, a legislação define que a dominialidade das águas subterrâneas é estadual ou distrital, de forma que quando o aquífero transpassa os limites geográficos, os aquíferos devem ser compartilhados pelas duas unidades geopolíticas.

Este é um assunto sensível, pois envolve gestores de diferentes países ou estados, com demandas de usos distintas, com legislações muitas vezes antagônicas, que pode resultar em dificuldades para o gerenciamento. Portanto, o processo necessita de embasamento científico, tanto para práticas de exploração e uso da água subterrânea pelos entes envolvidos, quanto para atribuições de responsabilidades com relação à sobreexploração do aquífero por bombeamento desordenado, desenvolvimento de atividades que possam levar à contaminação do solo e consequentemente das águas subjacentes e critérios para outorga dos recursos.

4.3 Estudos de remediação de aquíferos contaminados

A determinação de bacias e sub-bacias hidrogeológicas, principalmente aquelas controladas por lineamentos, é essencial na investigação de aquíferos contaminados. O padrão de fluxo subterrâneo é determinante para o entendimento da interação entre contaminante e meio subterrâneo, além é claro das características intrínsecas da substância química de interesse. A presença de bacias de menor ordem pode explicar mudanças no padrão de dispersão das plumas de contaminação, mudança no sentido de fluxo do contaminante ou até mesmo a presença de barreiras laterais ao fluxo. A distribuição da pluma em diferentes padrões tridimensionais é comumente vinculada à existência de sub-bacias hidrogeológicas nos sítios contaminados.

Além disso, um modelo conceitual de fluxo acurado é indispensável nas etapas de investigação confirmatória, direcionando inclusive os próximos passos a serem tomados nas etapas de tomada de decisão, como definição dos pontos a serem amostrados nas zonas vadosa e saturada. A caracterização do meio como um todo é importante, não

apenas nas etapas de investigação e definição da contaminação, mas também para os planos de remediação, aplicando técnicas de bombeamento e tratamento, bombeamento e reinjeção, biorremediação *in situ*, bio ventilação, extração de voláteis, dentre outras.

4.4 Proteção de aquíferos

De forma geral as águas subterrâneas apresentam legislações próprias e específicas no que se refere a sua proteção contra contaminação, usos inadequados que podem levar a sobreexploração, redução da recarga, ou intrusão da cunha salina (em casos de aquíferos costeiros), entre outros riscos aos quais estes recursos estão frequentemente expostos.

O cenário de regulamentação das águas subterrâneas se revela ainda mais crítico quando comparado à legislação existente para as águas superficiais. TOSCANO *et al.* (2008), em uma análise realizada a respeito da legislação de proteção das águas subterrâneas no Brasil, compararam brevemente o que já havia no país na época de elaboração do artigo, com as leis existentes em nações como Estados Unidos e países da Europa, e foi observado que estes últimos dispunham de normas que definem critérios de delimitação de perímetros de proteção, com estabelecimento de restrições e controle de uso do solo, diferentemente do que ocorria no Brasil na época. Estes autores relataram que apenas 6 estados brasileiros possuíam leis específicas referentes à proteção das águas subterrâneas, e 5 estados incluíam o assunto apenas nas Políticas Estaduais de Recursos Hídricos.

No cenário brasileiro, o sistema federal de meio ambiente dispõe de alguns documentos legais, como a Resolução N° 396 do CONAMA (CONAMA 2008), que abordam questões específicas referentes à proteção das águas subterrâneas, como perímetros de proteção de poços de abastecimento, áreas de restrição e controle do uso da água subterrânea, e áreas de proteção de aquíferos. Cabe ressaltar, que foi apenas com a constituição de 1988 (BRASIL 1988) que a água subterrânea deixou de ser enquadrada como recurso mineral de subsolo pertencente à União (Art. 176), e passou à categoria de bem público de propriedade dos Estados e do Distrito Federal (Art. 26, I).

Mais recentemente ANA (2022) apresenta a atualização do arcabouço legal brasileiro relativo à governança e proteção dos aquíferos, destacando como premissa a necessidade de se conhecer os

aquíferos e seus limites para se alcançar resultados efetivos da gestão.

LOBO-FERREIRA (1998) e KOHNKE (2001) apresentam discussões que consideram que o conhecimento dos limites da bacia hidrogeológica é importante para os estudos de proteção dos aquíferos.

4.5 Quantificação de reservas hídricas subterrâneas

A área de distribuição lateral de um aquífero é um dos principais parâmetros que deve ser considerado para os cálculos ou estimativas de reservas hídricas contidas nos aquíferos, além da sua espessura e porosidade efetiva ou índice de fraturamento interconectado. Todas as equações propostas para estimativa das reservas hídricas (COSTA 1998, 2000) de um aquífero e suas adaptações para diferentes aquíferos, ou o uso do balanço hídrico para este mesmo fim, requerem o conhecimento da área de distribuição dos sistemas.

Desta forma, quando se desconsidera as eventuais assimetrias existentes entre as bacias superficiais e subterrâneas erros significativos podem ser gerados e propagados nos diferentes cenários.

CAMPOS & ALMEIDA (2012) estimaram as reservas hídricas subterrâneas dos aquíferos termais da região de Caldas Novas, no estado de Goiás, onde as áreas dos diferentes reservatórios subterrâneos foram determinadas a partir da proposição prévia dos limites das bacias hidrogeológicas. JUNQUEIRA (2020) apresentou as estimativas de reservas hídricas dos sistemas aquíferos termais da região da Chapada dos Veadeiros, estado de Goiás, sendo os resultados considerados preliminares, uma vez que as bacias hidrogeológicas ainda não têm seus limites minimamente definidos nesta região.

4.6 Caracterização de modelos conceituais de aquíferos

O uso de modelos conceituais é essencial para o entendimento do funcionamento de sistemas hidrogeológicos, bem como para a elaboração de diretrizes e planos de gestão dos recursos hídricos de uma região. Para DEMIROGLU (2016), o termo modelo conceitual engloba as características relativas à extensão e à distribuição espacial do sistema, ou seja, os limites tridimensionais dos aquíferos. A elaboração de um modelo conceitual requer dados sobre a área de estudo, informações detalhadas a respeito da geologia da região, dinâmica do fluxo subterrâneo, da recarga, parâmetros

hidráulicos, além dos limites bem definidos das bacias hidrogeológicas (ROSEN & LEGRAN 2000). Dessa forma, a definição dos limites das bacias ou sub-bacias hidrogeológicas possibilita o entendimento da ocorrência e do fluxo da água subterrânea, e compreende dados tanto do fluxo de entrada (recarga) quanto do fluxo de saída (descarga) do sistema superficial e subterrâneo.

A caracterização conceitual de aquíferos envolve todos os diferentes aspectos referentes ao meio físico, a dinâmica de fluxo subterrâneo, a interação entre o meio superficial e subsuperficial, a determinação do balanço hídrico nos diferentes compartimentos que compõem o ciclo hidrológico como um todo, a identificação e caracterização das áreas de recarga e descarga, a compreensão da espessura e parâmetros da zona vadosa, dentre outros aspectos.

Assim, para que seja elaborado um modelo conceitual de um aquífero, os meios superficiais e subsuperficiais devem ser caracterizados. Essa caracterização deve especificar o tipo de solo, sua textura, estrutura, conteúdo de matéria orgânica, espessura aproximada da zona vadosa, condutividade hidráulica, definição da rocha-mãe e descrição dos horizontes. Depois de realizada a caracterização dos solos, é importante a compreensão do balanço hídrico nos diferentes compartimentos envolvidos na transferência de água, com entendimento do padrão tempo-espacial da precipitação, da sua parcela que sofre evapotranspiração e interceptação pela vegetação no local, o montante que atinge o substrato, qual a proporção que alimenta o escoamento superficial, qual proporção infiltra no solo e supre a capacidade de campo do meio, e qual parte de fato caracteriza recarga para o aquífero. ROSEN & LEGRAN (2000) apresentam o conceito e as bases para os estudos de modelagem conceitual de aquíferos. LOUSADA & CAMPOS (2005) e GOMES (2019) são autores que realizaram trabalhos relativos à proposição de modelos conceituais de fluxo em diferentes contextos hidrogeológicos.

A partir da análise de vazões de cursos d'água superficiais, e decomposição de hidrogramas pode-se alcançar a separação dos fluxos de escoamento superficial, de fluxo interno e fluxo de base. Em seguida, a partir de dados potenciométricos define-se se há assimetria entre os limites da bacia hidrográfica e hidrogeológica, e ainda é possível delimitar as sub-bacias hidrogeológicas. Por fim se caracteriza as áreas de recarga regionais, de descarga do fluxo de base e relações com a cunha salina com o mar, no caso de aquíferos costeiros.

4.7 Simulação numérica de fluxo

Os modelos numéricos têm caráter quantitativo, no sentido de possibilitarem a simulação previsional de fluxo de plumas de contaminação, da recarga e descarga do aquífero, da elevação ou rebaixamento da superfície potenciométrica em resposta a estímulos externos, além de outras aplicações. Estes modelos são desenvolvidos sobre a modelagem conceitual, que é considerada como uma representação qualitativa dos aquíferos.

Um dos maiores problemas durante a elaboração de um modelo de fluxo de água subterrânea que se propõe a representar a configuração hidrogeológica de um aquífero ou bacia hidrogeológica específica é a proposição de um modelo conceitual que de fato se assemelhe à realidade (DEMIROGLU 2016). A precisão de um modelo conceitual está intrinsecamente relacionada ao uso de dados de entrada igualmente acurados e detalhados. Apenas desta forma os dados de saída, que incluem a simulação e a análise de sensibilidade, poderão ser confiáveis (DEMIROGLU 2016).

Para a elaboração de modelos quantitativos é necessário o uso de parâmetros hidrodinâmicos, incluindo a condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento, transmissividade, porosidade efetiva, índice de fraturamento interconectado, dispersividade, dentre outros. Estes dados são utilizados como informações de entrada em softwares de modelagem numérica, como SWAT, FEFLOW ou MODFLOW.

Um dos principais conjuntos de dados de alimentação dos modelos numéricos de aquíferos são os limites dos sistemas, que compõem as condições de contorno da simulação, os quais são representados pelos próprios limites das bacias hidrogeológicas. Estes dados, em última análise, podem ser responsáveis pela maior ou menor sensibilidade da modelagem ou mesmo pela coerência dos resultados, pois a escolha inadequada dos limites dos sistemas pode distorcer os resultados. Além dos limites, outros fatores também interferem nos resultados, incluindo a qualidade dos dados de entrada, tipos de variáveis utilizadas na modelagem, acurácia dos dados de recarga, densidade da malha de pontos de monitoramento, dentre outros.

Os dados relativos à poligonal dos aquíferos (área de distribuição lateral) podem ser obtidos a partir da modelagem em ambiente de geoprocessamento, pela projeção dos aquíferos dentro dos limites da bacia hidrográfica. Este método é coerente quando as bacias subterrânea e superficial

apresentam a mesma delimitação. Para os casos de assimetria a poligonal dos aquíferos não pode ser calculada diretamente, mas apenas pode ser definida após uma análise que demonstre os limites das bacias sobrepostas.

As simulações numéricas podem ter grande imprecisão, quando realizadas em áreas limítrofes em que as bacias hidrográficas e hidrogeológicas não são coincidentes. O mesmo pode ocorrer para casos em que as bacias subterrânea e superficial são hidráulicamente desconectadas.

4.8 Enquadramento das águas subterrâneas

A Resolução CONAMA 396/2008 trata da classificação e diretrizes ambientais referentes ao enquadramento das águas subterrâneas e demais providências. Para o propósito de sua aplicação são enumeradas algumas diretrizes gerais incluindo: (i) o enquadramento dos corpos de água segundo classes será realizado de acordo com as características hidrogeológicas dos aquíferos e os seus usos respectivos; (ii) deve-se considerar que os aquíferos se apresentam em diferentes contextos hidrogeológicos e podem ultrapassar os limites das bacias hidrográficas; (iii) as águas subterrâneas apresentam características físicas, químicas e biológicas intrínsecas, com variações hidrogeoquímicas, sendo necessário que as suas classes de qualidade sejam pautadas nessas especificidades e (iv) as questões relacionadas a prevenção e controle de poluição estão associadas aos usos e classes de qualidade das águas que são exigidos para determinado corpo hídrico subterrâneo. Estes pontos devem ser considerados antes da introdução específica das classes definidas para o enquadramento das águas e demonstram a importância da caracterização correta do contexto hidrogeológico da área, integrado entre o contexto hidrográfico.

Todos estes pontos perpassam pela definição dos limites das bacias hidrogeológicas e pelo entendimento se há ou não assimetria entre estes limites e os das bacias hidrográficas, uma vez que o enquadramento da qualidade da água subterrânea é aplicado à porção de um aquífero e o conhecimento dos seus contornos é fundamental para delimitar as áreas enquadradas nas mesmas classes de qualidade.

Os usos que causam a degradação da qualidade das águas subterrâneas podem ocorrer em pontos localizados, mas a dispersão da contaminação na forma de plumas poderá afetar outras porções do aquífero que esteja na mesma bacia hidrogeológica. Por outro lado, um foco de contaminação po-

derá migrar no sentido oposto à bacia hidrográfica, caso o limite da bacia hidrogeológica em profundidade não seja sobreposto ao limite hidrográfico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Bacia hidrogeológica representa um corpo tridimensional em subsuperfície, representado total ou parcialmente por um aquífero, conjunto de aquíferos ou uma unidade estratigráfica cujo fluxo converge para uma única área de descarga.

Dentre os principais contrastes entre bacias hidrográficas e hidrogeológicas, destacam-se: i) bacias superficiais são facilmente delimitadas a partir de mapas planialtimétricos e imagens de satélite, bacias hidrogeológicas são de difícil delimitação sendo requeridos estudos de subsuperfície para a cartografia de seus limites; ii) bacias hidrográficas tem limites fixos, enquanto as bacias hidrogeológicas podem ter seus limites modificados em função de intenso bombeamento; iii) bacias hidrográficas podem conter em subsuperfície diferentes bacias hidrogeológicas e uma única bacia hidrogeológica pode ser sobreposta por inúmeras bacias hidrográficas; iv) uma bacia hidrográfica é sempre representada por uma única área de convergência do fluxo de escoamento superficial para um ponto, enquanto as bacias hidrogeológicas podem ser sobrepostas verticalmente em função da sucessão estratigráfica.

A determinação do limite de uma bacia subterrânea deve ser apoiada em diferentes bases de dados, incluindo: potenciometria, estudo de estruturas geológicas, informações hidrográficas, bases hidroquímicas e isotópicas, além de documentação complementar (imagens de satélite, mapas geomorfológicos e modelos digitais de elevação).

A assimetria entre os limites de bacias hidrográficas e as bacias subterrâneas sotopostas pode ser determinada por diferentes controles, incluindo: relevo, anisotropias, estruturas geológicas, heterogeneidades dos aquíferos dentre outras.

O conhecimento dos limites das bacias hidrogeológicas e sua relação com as bacias hidrográficas sobrepostas são importantes para diferentes estudos aplicados aos aquíferos com destaque para: aquíferos transfronteiriços, gestão integrada de recursos hídricos, remediação de aquíferos contaminados, estudos de simulação numérica de fluxo, dentre outras implicações.

As relações entre as bacias hidrográficas e subterrâneas apresentam maior relevância nos casos em que há efetiva conexão hidráulica entre o

aquífero e os cursos d'água superficiais. Nos casos de aquíferos confinados ou aquíferos fraturados profundos em regiões com relevo pouco pronunciado, a separação física dos reservatórios subterrâneo e superficial permite que os limites sejam tratados como coincidentes.

6 AGRADECIMENTOS

Aos pareceristas e editores pelas sugestões apresentadas que aprimoraram o artigo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE FILHO, J.L.; BARBOSA, M.C.; AZEVEDO, S.G.; CARVALHO, A.M. 2012. Aspectos para a gestão estratégica das águas subterrâneas. *In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 17, Bonito, *Anais*, 4 p.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO. 2022. *As águas subterrâneas na política nacional de recursos hídricos*. Série Capacitação em Gestão de Recursos Hídricos, 5, 220 p.
- ANANDAN, K.S.; SAHAY, S.N.; KARTHIKEYAN, S. 2010. Delineation of Recharge Area and Artificial Recharge Studies in the Neyveli Hydrogeological Basin. *Mine Water and the Environment*, 29: 14-22. <http://dx.doi.org/10.1007%2Fs10230-009-0090-8>
- ARAUJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. 1999. Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA. *Hydrogeology Journal*, 7: 317-336. <https://doi.org/10.1007/s100400050205>
- ARAÚJO, P.P.; FREDDO, V.J.F.; FERREIRA, H.S.; ABREU, F.A.M. 2016. Cartografia das bacias hidrogeológicas usando os métodos potenciométrico e gravimétrico, nordeste do estado do Pará. *In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 19, Campinas, *Anais*, 10 p.

- ARRAES, T.M. 2008. *Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 125 p.
- ARRAES, T.M.; CAMPOS, J.E.G. 2007. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(1): 81-89.
- ARRAES, T.M.; CAMPOS, J.E.G. 2010. Aplicação de ensaio de traçador e dados de potenciometria como ferramentas para a delimitação de bacias hidrogeológicas. *Geociências*, 29: 623-631.
- BATJARGAL, D; BATSUKH, N. 2022. Calculation of Potential Groundwater Resources in Orkhon River Basin. *Mongolian Geoscientist*, 27(54): 9-19. <https://doi.org/10.5564/mgs.v27i54.1126>
- BENISCHKE, R. 2021. Review: Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. *Hydrogeology Journal*, 29: 67-88. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02278-9>
- BENISCHKE, R; GOLDSCHIEDER, N; SMART, CC. 2007. Tracer techniques. In: N. Goldscheider & D. Drew (Eds.) *Methods in karst hydrogeology*. International Contribution to Hydrogeology, IAH, vol. 26, Taylor and Francis, Balkema, London, p. 147-170.
- 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. Acessado em: 2 fev. 2017.
- CAMPOS, J.E.G.; ALMEIDA, L. 2012. Balanço térmico aplicado à recarga artificial dos aquíferos da região de Caldas Novas, estado de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 42(1):196-207. <http://dx.doi.org/10.5327/Z0375-75362012000500016>
- CAO, V.; SCHAFFER, M.; TAHERDANGKOO, R.; LICHA, T. 2020. Solute Reactive Tracers for Hydrogeological Applications: A Short Review and Future Prospects. *Water*, 12(3): 653. <https://doi.org/10.3390/w12030653>
- CASTANY, G. 1981. Hydrogeology of deep aquifers, the Hydrogeological Basin as the Basis of Groundwater Management. *Episodes*, 3: 18-22. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1981/v4i3/004>
- CAVALCANTE, I.N.; CAJAZEIRAS, C.C.A.; VERÍSSIMO, L.S.; GUERRA JUNIOR, W.G.; MATTA, M.A.S.; ALMEIDA, F.M. 2006. Zoneamento hidrogeológico da faixa costeira de Caucaia, CE. In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14, Curitiba, *Anais*, 17 p.
- CAVALCANTE, I.N.; COSTA, N.B.; GOMES, M.C.R.; MAIA, J.V.M.; FREITAS, L.C.B.; LEMOS, E.C.L. 2007. Aquífero costeiro na região de Paracuru, Ceará. In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUL – SUDESTE, 1, Gramado, *Anais*, 16 p.
- CLARK, I.D.; FRITZ, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press, Boca Raton, 352 p.
- CNRH – CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. 2001. *Resolução nº 15, de 11 de janeiro de 2001*. Conselho Nacional de Recursos Hídricos, Diário Oficial da União, publicado em 22/01/2001.
- CNRH – CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS 2002. *Resolução nº 22, de 24 de maio de 2002*. Conselho Nacional de Recursos Hídricos, Diário Oficial da União, publicado em 04/07/2002.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 2008. *Resolução CONAMA nº 396, de 3 de Abril de 2008*. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Diário Oficial da União, publicado em 7/04/2008.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 2009. *Resolução CONAMA nº 396, de 27 de Junho de 2009*. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Diário Oficial da União, publicado em 29/06/2009.

- CORNIELLO A.; DUCCHI, D.; MONTI, G.M. 2017. An integrated approach for the delimitation of a groundwater basin: the case study of the Conca di Acerno (Campania, southern Italy). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Special Issue, 1: 17-28. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2017-01.S-02>
- COSTA, W.D. 1998. Avaliação de reservas, potencialidade e disponibilidade de aquíferos. In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10, São Paulo, *Anais*, 11 p.
- COSTA, W.D. 2000. Uso e gestão de água subterrânea. In: F.A.C. Feitosa & J. Manoel Filho (Coords.) *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, 2ª ed. Rev. e Ampl., p. 341-367.
- DEMIROGLU, M. 2016. Identifying the groundwater basin boundaries, using environmental isotopes: a case study. *Applied Water Science*, 7: 1161-1167. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0516-y>
- ENGELBRECHT, B.Z.; CHANG, H.K. 2015. Simulação numérica do fluxo de águas do Sistema Aquífero Urucuia na Bacia Hidrogeológica do Rio Corrente (BA). *Águas Subterrâneas*, 29(2): 244-256. <https://doi.org/10.14295/ras.v29i2.28435>
- FEITOSA, E.C. 1997. Pesquisa de Água Subterrânea. In: F.A.C. Feitosa & J. Manoel Filho (Coords.) *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, 2ª ed. Rev. e Ampl., p. 53-80.
- FEITOSA, A.C.F.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMÉTRIO, J.G.A. (Coord.). 2008. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. CPRM/LABHID, Rio de Janeiro, 3ª ed. Ampliada e Revisada, 812 p.
- FETTER C.W. 2001. *Applied Hydrogeology*. Prentice-Hall, Inc, New Jersey, USA, 4th ed., 691 p.
- FREEZE, A.R.; CHERRY, J.A. 2017. *Águas Subterrâneas*. Tradução de *Groundwater*, Everton de Oliveira (coord.), Edição Instituto Água Sustentável, São Paulo, 698 p.
- GASPAR, M.T.G. 2006. *Sistema Aquífero Urucuia: caracterização regional e propostas de gestão*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 158 p.
- GASPAR, M.T.P.; CAMPOS, J.E.G. 2007. O Sistema Aquífero Urucuia. *Revista Brasileira de Geociências*, 37: 216-226.
- GOLDSCHIEDER, N. 2015. Overview of Methods Applied in Karst Hydrogeology. In: Z. Stevanović (Ed.) *Karst Aquifers - Characterization and Engineering*. Professional Practice in Earth Sciences, Springer Cham, Switzerland, p. 127-145.
- GOMES, A.W. 2019. *Impactos da variabilidade temporal do regime pluviométrico da recarga de aquíferos: Estudo de caso em Caetité, BA*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 108 p.
- GUNN, J. 2007. *Contributory area definition for groundwater source protection and hazard mitigation in carbonate aquifers*. Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis, and Mitigation. Geological Society, London, Special Publications, 279: 97-109.
- GURITA, R.A. 2020. *Avaliação dos fatores condicionantes da favorabilidade hidrogeológica do sistema aquífero cárstico-fissural, região de Montes Claros, MG*. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Trabalho de Conclusão de Curso, 78 p.
- JUNQUEIRA, T.P. 2020. *Modelo conceitual das águas termais da região da Chapada dos Veadeiros (GO): estudos estruturais, hidroquímicos e isotópicos*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado em Geologia, 101 p.
- KOHNKE, M.W. 2001. Atenuação natural de contaminantes, metodologias para a

- delimitação do perímetro de proteção de poços (PPP). *ABAS Informa*, 121: 9-10.
- LOBO-FERREIRA, J.P. 1998. Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal. *In: APRH, CONGRESSO DA ÁGUA*, 4, Lisboa, *Comunicações*, p. 1-16.
- LOUSADA, E.O.; CAMPOS, J.E.G. 2005. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(3): 407-414.
- MUÑOZ, E.; ARUMÍ, T.; WAGENER, R.; OYARSÚN, R.; PARRA, V. 2016. Unraveling complex hydrogeological processes in Andean basins in south-central Chile: An integrated assessment to understand hydrological dissimilarity. *Hydrological Processes*, 30: 4934-4943. <https://doi.org/10.1002/hyp.11032>
- OEA – ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS. 2009. *Aquífero Guaraní: Programa Estratégico de Ação. Relatório do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guaraní*. OEA, Edição bilingue Brasil; Argentina; Paraguai; Uruguai.
- OLIVEIRA, L.A. 2009. *O Sistema Aquífero Guaraní no Estado de Goiás: Distribuição, caracterização hidrodinâmica, composição isotópica e CFCs*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 188 p.
- OLIVEIRA, O.A.; RODRIGUES, D.S.; CAMPOS, J.E.G.; UAGODA, R.E.S. 2022. Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Fissuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambáí, GO. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(5): 2327-2339. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339>
- PALMER, A.N. 2010. Understanding the hydrology of karst. *Geologia Croatica*, 63:143-148. <http://dx.doi.org/10.4154/gc.2010.11>
- PEREIRA, R.; GUIMARÃES Jr., J.A.; SILVA Jr., G.C. 2003. Estado da arte da bacia hidrogeológica do Sistema Lacustre Bonfim – RN, Nordeste do Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, 17: 41-47. <https://doi.org/10.14295/ras.v17i1.1311>
- PUTRANTO, T.T.; LUTHFI, M.I.; QADARYATI, N.; SANTI, N.; HIDAJAT, W.K. 2019. Aquifer system, recharge-discharge zone and groundwater basin boundary mapping to support open and transparent water data, case study: Karangobar Groundwater Basin. *E3S Web of Conferences*, 125: 01012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912501012>
- ROSEN, L.; LEGRAN, H.E. 2000. Systematic makings of early stage hydrogeologic conceptual models. *Groundwater*; 38: 887-893. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2000.tb00688.x>
- TIEDMAN R.C.; GOODE D.J.; HSIEH P.A. 1998. Characterizing a ground water basin in New England Mountain and valley terrain. *Groundwater*, 36(4): 611-621. 1998. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02835.x>
- TOSCANO G.L.G.; SANTOS K.M.; ALMEIDA C.N.; SILVA T.C. 2008. Uma Síntese Analítica sobre Legislação de Proteção das Águas Subterrâneas no Brasil. *In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 15, Natal, *Anais*, 20 p.
- SILVA Jr., G.C.; PITA, R.C.S.; CUNHA, C.M.B.; SILVA, T.A. 2021. Aplicação do isótopo radioativo de carbono (^{14}C) na determinação de tempos de residência em aquíferos. *Derbyana*, 42: e743. <https://doi.org/10.14295/derb.v42.743>
- VERÍSSIMO, L.S.; CAVALCANTE, I.N.; AGUIAR, R.B.; MAIA, J.V.M. 2007. Recursos hídricos subterrâneos da Bacia Sedimentar do Araripe, Zona Leste do estado do Ceará. *In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUL – SUDESTE*, 1, Gramado, *Anais*, 11 p.
- VILLASEÑOR, E.M.; MEGDAL, S.B. 2021. The U.S.-Mexico Transboundary Aquifer

Assessment Program as a Model for Transborder Groundwater Collaboration. *Water*, 13(4): 530. <https://doi.org/10.3390/w13040530>

WHITE, W.B. 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*, 65: 85-105. [http://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00116-8](http://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00116-8)

Endereço dos autores:

Manuela Freire Galvão (ORCID: 0009-0005-3208-1671) – Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil. *E-mail:* manuelafgeo@gmail.com

José Eloi Guimarães Campos* (ORCID: 0000-0003-2007-2223) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil. *E-mail:* eloi@unb.br

* Autor correspondente

Artigo recebido em 16 de janeiro de 2023, aceito em 5 de maio de 2023.

