



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Caracterização de aquíferos fissuro-cársticos: Bases conceituais e proposições*

Drielly Souza Rodrigues¹, José Eloi Guimarães Campos², Marco Antônio Caçador Martins-Ferreira³

¹ Mestre em Geociências Aplicadas e Geodinâmica pela Universidade de Brasília (UnB). Instituto de Geociências (IG), Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP: 70.910.970, Brasília (DF), Brasil, Tel (+55 61) 985252780, driellysrodrigues@gmail.com, ORCID 0000-0001-7752-1400.

² Professor no Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília (UnB). Instituto de Geociências (IG), Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP: 70.910.970, Brasília (DF), Brasil, Tel (+55 61) 999898167, camposeloi@gmail.com, ORCID 0000-0003-2007-2223.

³ Professor no Instituto de Geociências (IG) da Universidade de Brasília (UnB). Instituto de Geociências (IG), Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP: 70.910.970, Brasília (DF), Brasil, Tel (+55 61) 998484208, marcoc@gmail.com, ORCID 0000-0002-7212-8367.

* Parte da dissertação de mestrado da primeira autora.

Artigo recebido em 04/01/2023 e aceito em 15/04/2023

ABSTRACT

The aim of this paper is to contribute to the knowledge about mixed aquifers composed by two types of porosity: karstic dissolution and fracturing. This type of aquifer is commonly cited in the literature, but often informally, without a strict definition and all the necessary constraints for the proper understanding of the conceptual model. Thus, in this paper it is proposed that the fissure-karstic aquifers are those in which planar porosity (mainly fractures and bedding planes) occurs together with secondary porosity by karstic dissolution in the same hydrostratigraphic unit. These aquifers can be quite complex, since the water flow can change from laminar to turbulent or the opposite, when groundwater migrates through the different rock types. An important aspect to be evaluated is the observation scale and dimensions of these rock bodies. Fissure-karstic aquifers comprise carbonate lenses with a maximum of tens of meters in thickness and hundreds of meters wide. When carbonate is continuous or the lenses are very thick and laterally amalgamated the aquifers should be approached as a karstic system. Another important point is that water from the fissure-karstic aquifers is exploited by single wells that cut different sections of both types of rock, and so, the reservoir management should be treated as a single system. As a conclusion, the final approach shows many geological situations result in mixed aquifers that could be treated as fissure-karstic. The inclusion in an adequate conceptual framework is very important to many applications, including aquifer characterization, groundwater management and water resources quantification.

Characterization of fissure-karst aquifers: Conceptual bases and propositions*

RESUMO

O objetivo deste artigo é contribuir com o conhecimento sobre aquíferos mistos compostos por dois tipos de porosidade: por dissolução cárstica e por fraturamento. Esse tipo de aquífero é comumente citado na literatura, mas muitas vezes informalmente, sem uma definição estrita e todos os limites necessários para a compreensão adequada do modelo conceitual. Assim, neste artigo é proposto que os aquíferos fissuro-cársticos são aqueles em que a porosidade secundária planar (principalmente fraturas e planos de acamamento) ocorre simultaneamente com a porosidade secundária por dissolução cárstica na mesma unidade hidroestratigráfica. Esses aquíferos podem ser bastante complexos, uma vez que o fluxo de água pode mudar de laminar para turbulento ou o oposto, quando as águas subterrâneas migram através dos diferentes tipos de rochas. Um aspecto importante a ser avaliado é a escala de observação e dimensões desses corpos rochosos. Aquíferos fissuro-cársticos compreendem lentes de rochas carbonáticas com um máximo de dezenas de metros de espessura e centenas de metros de largura. Quando o carbonato é contínuo ou as lentes são muito espessas e amalgamadas lateralmente os aquíferos devem ser tratados como um sistema cárstico clássico. Outro ponto importante é que a água dos aquíferos fissuro-cársticos é explorada por poços únicos que cortam diferentes seções de ambos os tipos de rocha, e assim, a gestão do reservatório deve ser tratada como um único sistema. Como conclusão, a abordagem final mostra muitas situações geológicas resultando em aquíferos mistos que poderiam ser tratados como fissuro-cárstico. O enquadramento em um modelo conceitual adequado é muito importante para diversas aplicações, incluindo a caracterização de aquíferos, a gestão de águas subterrâneas e a quantificação dos recursos hídricos.

Introdução

Embora aquíferos relacionados a diferentes tipos de rochas ou conjuntos de rochas contrastantes sejam bastante comuns na natureza, muitos desses reservatórios subterrâneos não são bem descritos ou compreendidos. Esses aquíferos são importantes para os sistemas de abastecimento de água, e por isso, devem ter o modelo conceitual bem descrito e documentado. A literatura técnica e acadêmica ainda é incompleta no que diz respeito aos aquíferos mistos e em muitos casos sua complexidade é tratada de forma inadequada.

Materiais naturais (rocha, saprolito ou solo) comumente contêm espaços vazios que constituem sua porosidade, que corresponde ao volume de vazios em relação ao volume total do material. A porosidade pode ser classificada em três tipos fundamentais: matricial (intergranular), fissurada (associada a fraturas tectônicas ou térmicas) ou formada por dissolução (cárstica) (Custodio e Llamas, 1983; Driscoll, 1986; Fetter, 1994; Sedghi & Zhan, 2021).

Os aquíferos podem ser classificados pelo tipo de porosidade dominante associada ao material ou maciços rochosos: intergranular, fraturado e cárstico são os principais modelos conceituais fundamentais para descrever os reservatórios de água subterrânea. No entanto, aquíferos mistos são muito comuns e representam a combinação de dois ou mais modelos fundamentais. Aquíferos de dupla porosidade são aqueles em que a porosidade da matriz primária e a porosidade planar secundária coexistem na mesma unidade hidroestratigráfica (geralmente arenito ou rochas arenosas metamórficas de baixo grau). Outra classe de aquífero misto está relacionada ao modelo fissuro-cárstico, onde rochas carbonáticas estão associadas a rochas não carbonatadas (principalmente rochas pelíticas).

Os aquíferos cársticos clássicos são formados por camadas espessas e contínuas de rochas carbonáticas, nas quais a porosidade é resultado da dissolução do carbonato que forma cavidades por onde a água percola por meio de escoamento canalizado, geralmente do tipo turbulento (White, 1969; Legrand e Stringfield, 1973; Motyka, 1998; Kaufmann e Braun, 1999; Vesper et al., 2003; Quinn et al., 2006; Worthington et al., 2017).

Segundo White (2002), os aquíferos cársticos podem ser descritos como tendo porosidade tripla, incluindo matriz, fratura e dissolução, onde o fluxo migra ao longo de cada uma das diferentes escalas e tipos de poros. No

entanto, este modelo é visto como meramente teórico, pois é difícil observar, simultaneamente, os três tipos de porosidade mesmo em proporções diferentes. Neste caso, seria necessária a presença de um calcário granular (calcarenito ou grainstone), com porosidade intersticial remanescente, com fraturamento e dissolução ao longo dos planos de estratificação e fraturas. Esta situação é rara, porque as rochas carbonáticas comumente contêm cimentos que obliteram a porosidade primária durante sua litificação e, assim, as rochas carbonáticas teriam principalmente dois tipos de porosidade: fraturas (ou espaço plano de estratificação) e cavidades de dissolução.

Além da revisão apresentada, o aquífero misto é entendido como aquele em que ocorre a associação entre dois tipos de porosidade e pode ser classificado como: dupla porosidade e fissuro-cárstico. O conceito de aquífero de dupla porosidade foi originalmente proposto por Barenblatt et al., (1960) para descrever escoamento em meios porosos-fraturados aplicados à indústria do petróleo. Este tipo de reservatório ocorre mais comumente associado a rochas sedimentares clásticas ou metassedimentos arenosos metamórficos de baixo grau (Moench, 1984; Berryman e Wang, 1995; Ackerer et al., 2014; Paula e Campos, 2016; Wang et al., 2021).

O termo dupla porosidade não é o mais adequado, pois não especifica quais os tipos de porosidade estão sendo consideradas. No entanto, o termo está bem estabelecido na literatura e designa aquíferos com porosidade intersticial ou matricial representada pelos espaços vazios entre os grãos e porosidade secundária ao longo de descontinuidades planares (planos de estratificação e fratura). Este tipo de reservatório apresenta os dois tipos de porosidade em toda a sua extensão, de forma contínua, ou seja, seus parâmetros hidrodinâmicos (condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento) são os valores médios das rochas ao longo da unidade hidroestratigráfica.

Por outro lado, alguns aquíferos mistos são compostos, concomitantemente, pela porosidade do tipo fraturada e pela dissolução cárstica (mesmo que pouco desenvolvida). Esse tipo de reservatório é bastante complexo e pouco citado na literatura científica, pois o conhecimento sobre ele ainda é limitado.

Existe uma inconsistência no que se refere à definição deste tipo de aquífero misto, inclusive sobre sua conceituação. Na literatura internacional é possível verificar diferentes

termos associados ao mesmo tipo: *fissured-karstic aquifer* (Debieche et al., 2002), *karst-fissured aquifer* (Witkowski et al., 2003), *fissured carbonate aquifer* (Tallini et al., 2014), *carbonate fissure-karstic aquifer* (Rozkowski & Rozkowski, 2016), *fissured karst aquifer* (Robineau et al., 2018), *fissure-karst aquifer* (Malik et al., 2019), *fractured and karstified aquifer* (Fischer, 2020, Dantas et al., 2022).

Em português são encontradas as expressões: aquífero cárstico-fissural (Guerra, 1986), aquífero fissurado-cárstico (Mourão et al., 2001), aquífero fissuro-cárstico (Lousada & Campos, 2005) e aquífero pelítico-carbonático (Gastmans et al., 2005).

Trabalhos publicados recentemente mais especificamente relativos aos aquíferos cársticos, podem ter seus resultados aplicados a sistemas fissuro-cársticos, incluindo: Tziritis et al., (2021), Medici et al., (2021); Kresic & Panday, (2021); Kovács, (2021); Zhao et al., (2022), Ji et al., (2022); Hamed et al., (2023); Farrant et al., (2023) e Filpi et al., (2023).

Apesar do uso habitual, tanto na literatura internacional quanto nacional, os estudos referentes não trazem um conceito formal a respeito desse tipo de aquífero. Assim, o objetivo deste trabalho é propor a definição de uma terminologia padrão para o aquífero fissuro-cárstico, enfatizando os tipos de rochas associadas (por exemplo, lentes de calcário, dolomito, margas em associação com xisto, siltito ou mármore com xisto e filito, etc.) e tipos de fluxo associados (laminar ou turbulento).

Contexto Geológico Relacionado ao Aquífero Fissuro-Cárstico

Sedimentos carbonáticos são produzidos na própria bacia de deposição pela atividade biológica, sendo tanto por acumulação direta de fragmentos de carapaças, quanto pelo metabolismo de microrganismos e invertebrados. Os principais controles da deposição de grandes volumes de rochas carbonática incluem presença de águas limpas, quentes, com subsidência lenta, estabilidade tectônica e ausência de sedimentos terrígenos (não carbonáticos), visto que a contribuição desses sedimentos acarreta a diminuição da produção orgânica e consequente, redução da sedimentação orgânica.

Esses carbonatos ocorrem de forma contínua em camadas espessas com ampla continuidade lateral e, quando compõem aquíferos, são associados a sistemas cársticos clássicos com dissolução bem desenvolvida gerando grandes

cavidades, geomorfologia particular, além dos demais produtos do ambiente cárstico (espeleotemas, rios subterrâneos, águas duras, etc.) (Zhao et al., 2012, Shen et al., 2015, Pontes et al., 2023).

Os sedimentos terrígenos são produzidos a partir do intemperismo e da erosão na área fonte, que passam por transporte e deposição na bacia. O transporte envolve processos de suspensão, tração e fluxo de detritos, de modo que são levados até a bacia de deposição e depositados em ambientes distintos (Belperio, 1983).

Além dos ambientes que geram rochas carbonáticas e terrígenas, existem situações geológicas que possibilitam a deposição simultânea de sedimentos carbonáticos e clásticos ou rochas carbonáticas ricas em componentes clásticos (ex.: margas). Os principais parâmetros que determinam e controlam a deposição simultânea de carbonatos e terrígenos em sucessões de plataformas mistas carbonáticas/siliciclásticas (Dorsey & Kidwell, 1999, Khetani & Read, 2002, Arana et al., 2005, Campos et al., 2012, Thran et al., 2020), incluem:

- i) paleotopografia de fundo que mantém porções elevadas do embasamento entre porções rebaixadas, de forma que a deposição carbonática se desenvolve nas elevações e os terrígenos nas áreas com maior lâmina d'água;
- ii) águas límpidas em que há restrito aporte de sedimentos detríticos, o que possibilita maior desenvolvimento de microrganismos (algas e invertebrados com exoesqueleto carbonático);
- iii) águas mais quentes com ambientes mais iluminados que apresentam maior disponibilidade de nutrientes, o que favorece o desenvolvimento da fábrica orgânico-carbonática;
- iv) manutenção da estabilidade da lâmina d'água que permite que as condições favoráveis à deposição carbonática sejam permanentes;
- v) controle químico da sedimentação nos casos em que ocorre saturação de bicarbonato, cálcio e magnésio em condições físicas adequadas (pH, Eh e temperatura) que permite a deposição direta de lamelas micríticas diretamente a partir da água do mar (principalmente no Proterozoico).

Assim, a formação de lentes de rochas carbonáticas interdigitadas lateral e verticalmente com rochas não carbonáticas é relativamente comum no registro geológico. As lentes associadas a pelitos (folhelhos e siltitos) podem ter dimensões variáveis de dezenas de metros até poucos quilômetros, e espessuras de até poucas dezenas de metros.

Em outro contexto geológico podem ser depositadas camadas contínuas de sedimentos margosos, em situações químicas e físico-químicas em que há condições para a deposição de carbonato, mas com elevado aporte de terrígenos finos. Os sedimentos provenientes de sucessões de plataformas mistas formam rochas com a mesma natureza quando submetidas ao metamorfismo, gerando lentes de mármore interdigitadas a xistos ou filitos (Campos et al., 2012).

Portanto, todos os conjuntos de rochas consideradas mistas, com contribuição de lentes de carbonatos associadas a rochas terrígenas (essencialmente pelíticas) comporão aquíferos mistos classificados como fissuro-cársticos. Esses reservatórios são naturalmente anisotrópicos e podem ser classificados como homogêneos e heterogêneos em função da litologia.

Quando homogêneos são representados por camadas contínuas de rochas calcárias impuras (margas) com alto grau de anisotropia gerado por planos de acamamento, planos de fraturas e vazios de dissolução. Inúmeros exemplos podem ser citados, incluindo: Cracóvia, Polônia (Rozkowvski, 1998), Membro Pedro Leopoldo da Formação Sete Lagoas do Grupo Bambuí nas cidades de Sete Lagoas e Lagoa Santa, MG, Brasil (Carneiro, 2013 e Pessoa & Mourão, 1998).

Quando heterogêneos são compostos por lentes de rochas carbonáticas com restrita continuidade lateral interdigitadas vertical e lateralmente com rochas pouco permeáveis, de baixa condutividade hidráulica, como siltitos, folhelhos, filitos ou xistos. Como exemplos desta classe podem ser citados: Paderborn, Alemanha (Michel & Struckmeier, 1985); Burgundy, França, (Robineau et al., 2018), e São Sebastião, DF, Brasil (Campos & Freitas, 1998).

Marsaud (1996) propôs os termos sistema cárstico unitário e binário, respectivamente, relacionados ao fluxo de água exclusivo em rochas carbonáticas e fluxo de água subterrânea em rochas carbonáticas e não carbonáticas (Figura 1).

Por este ponto de vista, o carste clássico seria classificado como um sistema cárstico unitário onde a recarga, o fluxo de água e a descarga podem ocorrer em rochas carbonáticas e o modelo fissuro-cárstico representa um sistema cárstico binário, onde a recarga ou a descarga pode ocorrer em margas ou em rochas pelíticas interdigitadas com rochas carbonáticas.

Além dos autores citados acima, existem muitas outras contribuições para a modelagem de aquíferos cársticos, incluindo: Jeannin e Sauter, (1998); Malozewski et al., (1998 e 2002); Scanlon

et al. (2003); Bakalowicz, (2005) e Ford e Williams, (2007); Moutsopoulos et al., (2022).

Metodologia

A presente pesquisa foi desenvolvida a partir da integração de dados da literatura com novas propostas relacionadas ao modelo conceitual para o entendimento da circulação de águas subterrâneas em reservatórios de rochas carbonáticas e não carbonáticas.

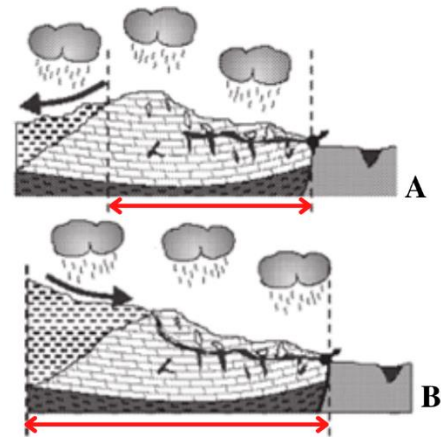


Figura 1. Ilustração de sistemas cársticos unitário (A) e binário (B) relacionados aos tipos de rochas onde ocorrem a recarga, o fluxo e a descarga da água subterrânea. A distribuição lateral dos sistemas e o fluxo são representados pelas setas vermelhas e pretas, respectivamente (compilado de Marsaud, 1996).

O principal método aplicado é a integração de informações anteriores com novos *insights* através do uso de ilustrações esquemáticas e descrições detalhadas, para enfatizar o objetivo principal da pesquisa aplicada. Nenhum tipo específico de análise química, física ou estatística foi aplicado, uma vez que o principal interesse inclui a avaliação qualitativa, incluindo discussões de definições com detalhamento do fluxo de água subterrânea em meios de estrutura complexos. Nesse sentido, a geologia e os ambientes de deposição de rochas carbonáticas foram especialmente considerados.

Resultados e discussão

O Modelo Conceitual para Aquífero Fissuro-Cárstico

Como explicado, os reservatórios de águas subterrâneas denominados fissuro-cársticos apresentam simultaneamente os dois tipos de porosidade, planar secundária por fraturamento e porosidade secundária em canal por dissolução

cárstica. Para enquadramento neste modelo conceitual, os dois tipos de poros devem ocorrer em rochas carbonáticas e não carbonáticas, que combinadas formam o maciço rochoso aquífero.

Em geral, a porosidade planar pode ser primária (por exemplo, planos de estratificação) ou secundária (por exemplo, anisotropias associadas a zonas fraturadas). A porosidade associada à dissolução cárstica é comumente limitada, devido a limitação dos corpos carbonáticos.

Os aquíferos classificados neste modelo conceitual apresentam sempre uma forte anisotropia. No entanto, eles podem ser classificados como homogêneos ou heterogêneos de acordo com o tipo de rocha. Quando associados a camadas contínuas de rochas carbonáticas impuras (margas), são considerados homogêneos (Figura 2) e quando relacionados a lentes de rochas carbonáticas intercaladas com rochas não carbonáticas, são considerados heterogêneos (Figura 3).

Quanto à classificação por outros critérios, esses aquíferos podem ser: i) não confinados ou confinados; ii) associado ao fluxo hidrogeológico local a regional; e iii) ter fluxo laminar a turbulento em função da abertura dos planos de fratura/camada e grau de dissolução.

Outro aspecto importante no enquadramento desses aquíferos está relacionado ao tamanho das lentes das rochas carbonáticas e à escala de observação. Quando camadas individuais de rochas carbonáticas e não carbonáticas têm espessuras de dezenas de metros, os reservatórios devem ser tratados como aquíferos individuais. No entanto, quando as camadas ou lentes de rochas carbonáticas ocorrem com espessuras de até algumas dezenas de metros e até centenas de metros de extensão lateral e são intercaladas com outras rochas não carbonáticas, devem ser tratadas como aquífero fissuro-cárstico.

Esta diferenciação baseia-se no fato de a exploração e a gestão da combinação de rochas carbonáticas (com dissolução cárstica) e rochas não carbonáticas (fraturadas) serem realizadas conjuntamente. Os poços que interceptam esses dois tipos de rochas produzem água com características químicas mistas. Da mesma forma, a determinação de áreas de proteção, áreas de recarga, e propriedades hidráulicas devem considerar, simultaneamente, a existência dos dois conjuntos de rochas (Rodrigues, 2022).

Um dos contrastes entre aquíferos mistos de dupla porosidade e fissuro-cársticos está relacionado à origem e à natureza da porosidade. Reservatórios de dupla porosidade apresentam uma

porosidade primária residual (matriz ou intergranular) e outra porosidade planar que pode ser primária (planos de estratificação) ou secundária (tectônica ou não tectônica). Os sistemas fissuro-cársticos apresentam uma porosidade secundária desenvolvida por dissolução e ainda outra porosidade secundária formada por planos de fratura, que também podem estar associados a estratificação primária.

Outro contraste é que os aquíferos mistos de dupla porosidade são compostos por uma única unidade geológica, pois as fraturas e os poros da matriz são preservados na mesma unidade litológica. No entanto, os aquíferos fissuro-cársticos representam uma unidade litológica composta que consiste em uma única unidade hidroestratigráfica, pois são comumente relacionados a situações onde as rochas carbonáticas ocorrem na forma de lentes com continuidade lateral restrita intercaladas com rochas pouco permeáveis. Neste caso, os parâmetros hidrodinâmicos diferem de aquíferos fraturados ou cársticos clássicos, comumente apresentam valores médios dependendo da contribuição de cada tipo de rocha.

Aquíferos relacionados à classe fissuro-cárstico ainda possuem um fator que pode tornar seu entendimento mais complexo em termos de parâmetros hidráulicos. Nesses meios, o fluxo apresenta padrão laminar em fraturas de pequena abertura ou fluxo turbulento em cavidades de dissolução ou fraturas com grande abertura (Figura 4). Nestas circunstâncias, a determinação da velocidade de fluxo linear média, condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e outras variáveis são dificultadas (Medici & West 2021, Yadav et al. 2022; Sun et al., 2021).

A Figura 4 exemplifica as seguintes possibilidades de escoamento no tempo e no espaço: **A** - escoamento laminar no plano de fratura para escoamento turbulento na cavidade de dissolução e escoamento laminar na fratura; **B** - escoamento laminar no plano de estratificação para escoamento turbulento na cavidade cárstica e escoamento laminar na fratura; **C** - escoamento laminar/turbulento na zona de fratura para escoamento turbulento na cavidade cárstica e **D** - escoamento laminar na fratura para escoamento turbulento na abertura cárstica.

Este tipo de reservatório é naturalmente anisotrópico e consequentemente compartimentado. Sua distribuição em blocos se deve à natureza heterogênea da carstificação, que faz com que a dissolução das rochas carbonáticas

varie em diferentes profundidades em função da circulação da água de recarga.

Diferentemente dos sistemas cársticos clássicos, os aquíferos fissuro-cársticos não apresentam dissolução cárstica intensa; portanto,

não estão associados a características típicas da hidrologia e da paisagem cárstica, incluindo a formação de grandes cavidades, presença de grandes sumidouros e nascentes e desenvolvimento de vários tipos de espeleotemas.

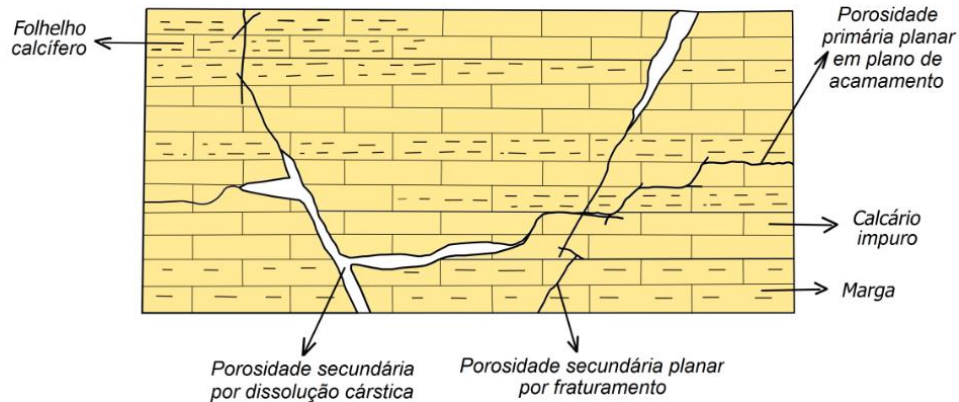


Figura 2. Ilustração esquemática exemplificando o modelo conceitual de aquífero fissuro-cárstico em sistema homogêneo representado por calcários argilosos intercalados com margas.

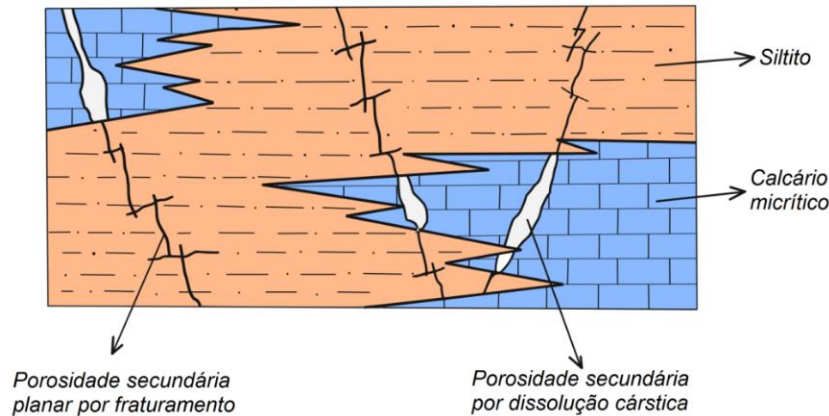


Figura 3. Ilustração esquemática do modelo conceitual de aquífero fissuro-cárstico em sistema heterogêneo com lentes de rocha carbonática interdigitadas por siltitos.

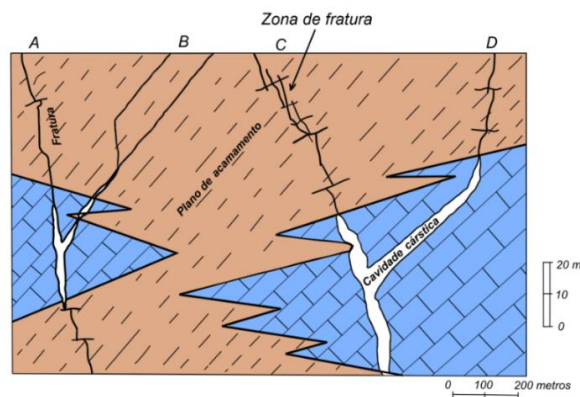


Figura 4. Ilustração esquemática que mostra a potencial mudança no regime de fluxo laminar e turbulento em aquífero fissuro-cárstico heterogêneo composto por lentes de calcários interdigitadas lateralmente com folhelhos laminados.

Abordagens para o Estudo dos Aquíferos Físsuro-Cársticos

Normalmente, as mesmas ferramentas e técnicas que são utilizadas para estudar aquíferos clássicos devem ser aplicadas a aquíferos mistos.

No entanto, o tipo de modelo conceitual e possíveis adaptações dos métodos comuns devem ser levados em consideração.

Goldscheider e Drew (2007) editaram um livro sobre métodos de estudos aplicados a aquíferos cársticos, que podem ser funcionais ao meio físsuro-cárstico. Além das técnicas apresentadas nesta importante publicação, outras devem ser consideradas, e são, a seguir, listadas e comentadas.

Inventário de Pontos d'água

O inventário de pontos d'água é uma ferramenta primordial e indispensável para estudos hidrogeológicos. É realizado a partir do estudo de

poços profundos que permitem o acesso direto aos aquíferos para obter todas as informações necessárias para serem utilizadas na sua caracterização. O inventário de pontos d'água é o cadastro de poços profundos, nascentes e poços rasos na área de estudo. As descrições geológicas (tipos de rochas, zonas de intemperismo, fraturas, presença de veios) e construção de perfilagem (posição da tela, diâmetro, teste de bombeamento) estão entre as informações mais importantes.

No caso dos aquíferos físsuro-cársticos a descrição geológica é fundamental para definir a presença de lentes, suas espessuras e relações entre rochas carbonáticas e não carbonáticas, aportes hídricos associados aos diferentes tipos de rochas interceptadas, entre outros aspectos. Dados de inspeção de vídeo ou perfilamento são muito importantes e devem ser aplicados sempre que possível para estudos de sistemas físsuro-cársticos complexos (Figura 5).



Figura 5. Exemplo de imagem obtida a partir da videoinspeção de poço profundo (SS-01), perfurado no sistema físsuro-cárstico localizado na região de São Sebastião, Distrito Federal, Brasil. A cavidade de dissolução tem uma abertura máxima de 25 cm a 96 m de profundidade (Souza, 2013).

Caracterização Hidráulica

Apesar de não haver um método de estudo hidráulico ideal para aquíferos físsuro-cársticos, a definição dos parâmetros hidrodinâmicos pode ser realizada a partir de dados de teste de bombeamento em poços de monitoramento.

Os parâmetros hidrodinâmicos (condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento) em aquíferos clássicos representam valores médios das rochas relacionadas. No caso do modelo físsuro-cárstico os valores não correspondem aos aquíferos fraturados ou cársticos individualmente, mas valores médios dependendo da contribuição de cada conjunto de rochas no sistema.

De qualquer forma, os valores dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos, com ênfase na condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, devem ser avaliados e comparados com sistemas individuais (fraturados e cársticos) para verificar a coerência dos dados obtidos.

As Tabelas 1 e 2 fornecem uma visão geral das principais características físicas e parâmetros hidrodinâmicos utilizados para distinguir os diferentes tipos de aquíferos em termos de sua modelagem conceitual. Os critérios e parâmetros propostos foram obtidos da literatura de diferentes autores (Freeze e Cherry, 1979; Custodio e Llamas, 1983; Keller, 1996; Fetter, 2008; Paula e Campos, 2016; Pontes et al., 2021).

Tabela 1. Contrastes entre parâmetros de definição e caracterização de diferentes modelos conceituais de aquíferos.

AQUÍFEROS		PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO		
Quanto à porosidade	Tipo de porosidade predominante	Unidade litológica	Isotropia/Anisotropia	Tipo de fluxo
Intergranular	Intergranular (matricial)	Única ou composta	Isotrópico (maior parte dos casos)	Laminar
Fraturado	Secundária planar (fraturas)	Única ou composta	Anisotrópico	Laminar a turbulento
Cárstico	Secundária planar por dissolução	Única	Fortemente anisotrópico	Turbulento
Dupla Porosidade	Matricial primária residual + secundária planar	Única	Anisotrópico	Laminar a turbulento
Físsuro-Cárstico	Secundária planar + secundária por dissolução	Única ou composta	Fortemente anisotrópico	Laminar e turbulento

Tabela 2. Comparação entre valores de referência de parâmetros hidrodinâmicos e dimensionais de diferentes modelos conceituais de aquíferos. η = porosidade, η_e = porosidade efetiva, K = condutividade hidráulica, T = transmissividade, S = coeficiente de armazenamento, $Cesp$ = capacidade específica.

AQUÍFEROS		PARÂMETROS HIDRÁULICOS E DIMENSIONAIS				
Quanto à porosidade	η (%)	ηe (%)	K (m/s)	T (m ² /s)	S	$Cesp$ (m ³ /h/m)
Intergranular	12 a 25	8 a 22	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁷	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	10 ⁻¹ - 10 ⁻⁵	1 - 10
Fraturado	0,5 a 3	0,2 a 2,5	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁸	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	10 ⁻¹ - 10 ⁻⁴	0,01 - 0,5
Cárstico	15 a 30	12 a 28	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶	10 ⁻¹ - 10 ⁻⁴	5 - 50
Intergranular + Fraturado	6 a 10	4 a 8	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶	10 ⁻¹ - 10 ⁻⁴	1 - 5
Cárstico + Fraturado	10 a 12	6 a 10	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁸	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶	10 ⁻¹ - 10 ⁻⁴	1 – 8

Estudos Hidroquímicos

Estudos sobre a composição química da água nos sistemas físsuro-cársticos devem ser aplicados para verificar a mistura de água dos diferentes reservatórios, incluindo água meteórica, água de circulação exclusiva de rochas carbonáticas e não carbonáticas, bem como misturas de água. A amostragem pode ser realizada em poços profundos, nascentes e entradas e saídas de cavidades naturais existentes.

A variação sazonal na composição da água pode ser especialmente importante para a definição das condições de recarga e transporte de água entre fraturas de rochas não carbonatadas e em cavidades em contato com calcário.

As mesmas espécies químicas e substâncias analisadas nos diferentes tipos de

aquíferos devem ser avaliadas em sistemas físsuro-cársticos. Entretanto, dureza, alcalinidade, pH, bicarbonato, carbonato, cálcio e magnésio devem ser priorizados para permitir uma avaliação de misturas de água, interação água-rocha em diferentes contextos de influência de rochas carbonáticas e não carbonáticas.

Uma característica comum observada nos aquíferos físsuro-cársticos é a composição média da água distinta dos aquíferos cársticos clássicos, com menor dureza, pHs próximos do neutro ou levemente alcalino e menor alcalinidade relativa. Estas feições se devem à restrita carstificação observada nestes aquíferos mistos (Rodrigues, 2022).

Mapas Potenciométricos

Os aquíferos classificados como do tipo fissuro-cárstico, assim como os sistemas cársticos, são frequentemente compartimentados. A compartimentação pode ser controlada por falhas ou pela descontinuidade lateral de camadas carbonáticas e lentes. Assim, a análise potenciométrica representa de forma mais fiel a real natureza destes aquíferos, sendo fundamental que se tenha em conta a presença destes compartimentos. Para a confecção de um mapa potenciométrico em um sistema carbonático misto, sugere-se a aplicação do seguinte roteiro metodológico, de acordo com Oliveira et al., 2022:

- i) Determinar a carga hidráulica total para cada poço localizado na área estudada, incluindo poços possivelmente localizados em áreas adjacentes (para melhorar o processo de interpolação);
- ii) Traçar os grandes lineamentos estruturais que cruzam a área de estudo, especialmente aqueles potencialmente classificados como fraturas e falhas mais profundas;
- iii) Delimitar os blocos separados por estes lineamentos que devem ser tratados como compartimentos individuais;
- (iv) Interpolarm os dados separadamente para cada compartimento.

A construção de um mapa segmentado é interessante para melhor caracterizar a realidade desse tipo de aquífero, pois em muitos casos não existe uma superfície potenciométrica única e contínua, mas grandes variações laterais de profundidade em distâncias laterais restritas. Outro aspecto que deve ser considerado é a possibilidade de ocorrência de trechos confinados dentro do aquífero, nos quais rochas pelíticas fraturadas podem participar como camadas confinantes.

Uma possibilidade mais adequada de representar as características potenciométricas é pela construção de modelos tridimensionais como

blocos diagramas. Nessa perspectiva é possível avaliar as relações entre estruturas e mudanças na profundidade da superfície potenciométrica, a presença de cavernas vadosas e saturadas, a relação de carstificação (mesmo que incipiente) e as principais estruturas, além das possíveis águas subterrâneas. direção do fluxo em cada compartimento.

Testes de Traçadores

Testes de traçadores são muito relevantes para estudos de aquíferos cársticos. Quando realizados em reservatórios fissuro-cársticos são mais comumente aplicados diretamente nos poços, uma vez que a presença de sumidouros e nascentes é mais restrita do que em áreas cársticas clássicas. Neste caso, o traçador deve ser aplicado em poços situados a montante da vazão e verificado em poços a jusante, após a definição preliminar das condições de contorno de cada caso estudado e dos compartimentos do aquífero.

Para a determinação dos pontos de lançamento e amostragem, deve ser realizado um estudo prévio estrutural dos lineamentos para aumentar o sucesso do teste. Outro aspecto importante é a determinação da periodicidade de amostragem, uma vez que a velocidade média do escoamento linear é menor quando comparada aos carstes típicos.

As diretrizes para desenvolver testes de traçadores, o tipo e o volume do traçador, métodos de amostragem, técnicas de análise e todos os aspectos práticos envolvidos podem ser encontrados em Käss (1998).

A Figura 6 ilustra um exemplo de um bloco diagrama que representa um estudo de caso de um aquífero fissuro-cárstico com extensa variação lateral potenciométrica.

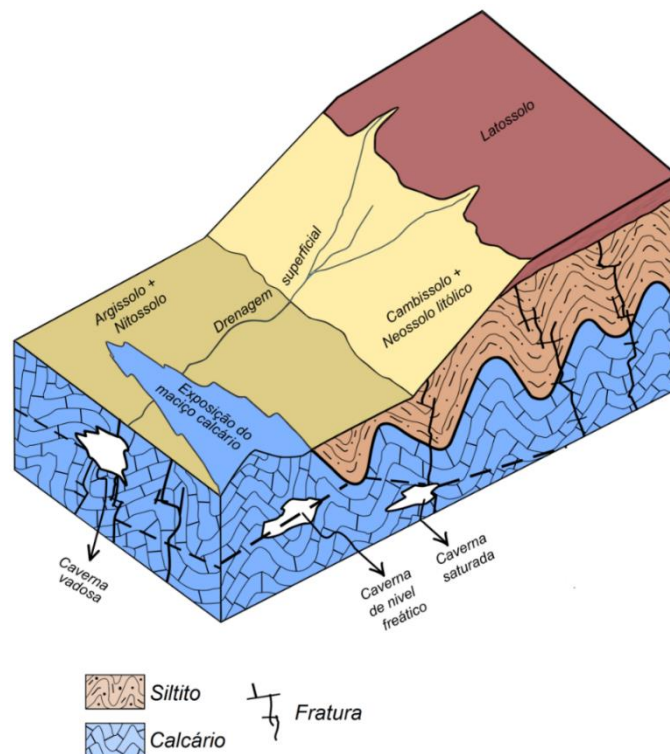


Figura 6. Modelo conceitual do sistema fissuro-cárstico associado à Formação Sete Lagoas, Grupo Bambuí no Distrito de Crixalândia, região de Formosa, Estado de Goiás, Brasil. Detalhe para a compartimentação da superfície potenciométrica descontínua (linha tracejada) que é comumente observada neste tipo de aquífero. Nesta região, as lentes calcárias não ultrapassam 500 metros de largura horizontal, com comprimentos que podem chegar a mais de 2 km.

Estudos de Caso e Aplicação da Terminologia

Este item objetiva apresentar alguns exemplos de casos de estudo que foram descritos como aquíferos fissuro-cársticos sem o uso de uma definição precisa da terminologia; ou o exemplo dos aquíferos cársticos que, pelas suas características, estariam melhor enquadrados no modelo fissuro-cárstico, como proposto no presente estudo.

Debieche et al. (2002) trabalharam com um conjunto complexo de rochas calcárias intercaladas com gesso e formações argilosas em um *graben* intensamente fraturado localizado em Mouans-Sartoux, sudeste da França. O reservatório, apesar de apresentar os dois tipos de porosidade (fratura e dissolução cárstica), foi considerado um meio único no modelo equivalente contínuo e com diferentes graus de confinamento em regime de baixa taxa de bombeamento. Em uma alta taxa de bombeamento, os autores consideraram o aquífero do tipo de dupla porosidade. De fato, o reservatório em questão possui dupla permeabilidade, mas não é um exemplo de dupla porosidade, pois os tipos de porosidade estão associados à fratura e dissolução cárstica, sendo, portanto, melhor enquadrado como um aquífero fissuro-cárstico. Além disso, este caso não deve ser tratado como um meio único e contínuo, mas sim

como heterogêneo, devido à interdigitação do carbonato com as formações de gesso e argila.

Witkowski et al. (2003) estudaram o aquífero na região entre Katowice e Cracóvia, sul da Polônia, que é representado por rochas dolomíticas e calcárias intercaladas com conglomerados e margas argilosas. A espessura total do conjunto varia de 20 m a mais de 200 m e os reservatórios têm caráter cárstico e fraturado, sendo cortados por sistemas de falhas. As condutividades hidráulicas variam da seguinte forma: rochas pelíticas (margas) de $1,9 \times 10^{-10}$ a $2,2 \times 10^{-8}$ m/s; o meio fraturado de $3,8 \times 10^{-8}$ a $1,1 \times 10^{-4}$ m/s; e os valores médios calculados dos testes de bombeamento variam de $1,2 \times 10^{-7}$ a $7,8 \times 10^{-4}$ m/s. Nesse caso, seria mais adequado calcular a condutividade hidráulica de acordo com a contribuição de cada conjunto no sistema, e não considerar os tipos de rochas em uma perspectiva separada.

Campos (2013) descreveu o aquífero relacionado à base do Grupo Bambuí na Região de Formosa, estado de Goiás, como associado a um sistema cárstico, entretanto, a natureza das lentes de rochas carbonáticas intercaladas com siltitos argilosos laminados e fraturados indica que a descrição associada com o modelo fissuro-cárstico seria mais apropriado. Essa afirmação é corroborada

pela verificação das dimensões de centenas de metros das lentes calcárias pouco carstificadas na região.

Tallini et al. (2014) trabalharam com uma sucessão estratigráfica composta por rochas carbonáticas mesozoicas e cenozoicas de fácies plataformais, de recife e de talude intercalada com unidades terrígenas que compõem um aquítarde regional em Gran Sasso, Itália Central. Os autores consideram o reservatório como cárstico com uma densa rede de fraturas. Neste caso, a presença de rochas siliciclásticas fraturadas e pouco permeáveis limita a carstificação da sucessão carbonática, que se enquadra mais adequadamente, como aquífero fissuro-cárstico.

Rozkowski e Rozkowski (2016) consideram um aquífero entre Cracóvia e Silésia, sul da Polônia, como um carste típico com desenvolvimento incompleto (carstificação restrita) devido à presença de margas e sedimentos argilosos. Este é um caso típico de um aquífero que foi classificado como sistema cárstico pouco desenvolvido, mas deve ser descrito como fissuro-cárstico, em que as principais características não são comparáveis ao ambiente de águas subterrâneas carbonáticas clássicas.

Robineau et al. (2018) estudaram um reservatório na Borgonha, França, cuja estratigrafia regional é representada por rochas calcárias intercaladas com margas. Os autores descreveram o reservatório como fissuro-cárstico homogêneo por ser um carste pouco desenvolvido. O modelo de meio duplo de Gerke e Van Genuchten foi implementado no código METIS, desenvolvido pelo Departamento de Geociências da MINES ParisTech, no qual cada sistema foi considerado como um meio poroso equivalente. Além disso, os parâmetros hidráulicos do modelo foram calibrados ajustando o nível de água subterrânea simulado com variações no nível do poço de água subterrânea semelhante à dinâmica de uma nascente cárstica. Tratar o aquífero como um carste, utilizando um modelo de dupla porosidade e considerar cada sistema (fraturado e cárstico) como um meio poroso não é aconselhado, pois não é compatível com a realidade da natureza destes tipos de aquíferos. Embora a descrição do aquífero fissuro-cárstico tenha sido utilizada adequadamente, a classificação foi, a nosso ver, equivocada. Neste contexto, como as rochas calcárias são intercaladas com margas, é mais adequado classificar o reservatório como fissuro-cárstico heterogêneo.

Malik et al. (2019) apresentaram um estudo de caso na parte norte do Monte Vel'ká Fatra, Eslováquia, e descreveram um aquífero composto de dolomito e calcário com permeabilidade fissura-cárstica cercado por margas menos permeáveis. Há registro de um pequeno número de cavernas,

nenhuma delas com mais de algumas dezenas de metros de desenvolvimento. No entanto, feições cársticas são frequentemente observadas em poços existentes na região, que foram em sua maioria considerados como fraturas alargadas por dissolução. Nesse caso, os autores não levaram em consideração a escala do reservatório. Embora as rochas carbonáticas sejam cercadas por rochas pouco permeáveis, trata-se de uma área de 16.901 km² formada por calcários contínuos. O que os autores classificaram como um tipo de aquífero fissuro-cárstico é, na verdade, um sistema cárstico clássico pouco desenvolvido.

Fischer (2020), apresenta um modelo em escala de 10 m de representação de redes de fraturas e condutos em um estudo realizado ao norte da cidade de Montpellier, na França. Dados obtidos de poços indicam que o aquífero é composto por finas camadas de calcário margoso na parte superior e calcário maciço na parte inferior da sucessão estratigráfica. O modelo de aquífero fissuro-cárstico seria mais aplicável à camada superior, enquanto a porção de base se encaixaria mais especificamente em um carste clássico.

Contrastes entre Aquíferos Fissuro-Cársticos e Cársticos Clássicos

Existem diversos exemplos de casos de aquíferos fissuro-cársticos que foram estudados na perspectiva do modelo descritivo de um cárstico típico. Este tipo de abordagem pode alterar resultados esperados ou gerar informações desconectadas com a realidade. Assim, a seguir são enumeradas diferenças entre estes dois modelos conceituais de aquíferos.

A principal diferença é vinculada às dimensões e continuidade das cavidades de dissolução. Como no modelo fissuro-cárstico os carbonatos ocorrem na forma de lentes ou como rochas impuras (argilosas), os processos de dissolução do carbonato de cálcio são limitados. A dissolução de calcita e dolomita depende da mistura de água de recarga ao longo do trajeto do fluxo subterrâneo, uma vez que a tendência da água é de aumentar a concentração de bicarbonato de cálcio e alcançar o equilíbrio entre a solução e a própria rocha que compõe o aquífero. Assim, é necessário que ocorra novas entradas de águas meteóricas no sistema para ampliar a eficiência da carstificação. Em sistema cársticos é comum existir recarga ao longo do fluxo, pois as sucessões carbonáticas são espessas e contínuas. Nos fissuro-cársticos a recarga e o fluxo são mais restritos nas porções fraturadas, o que dificulta a entrada de água de recarga ao longo do trajeto do fluxo subterrâneo limitando a dissolução cárstica.

Poços e nascentes associados a sistemas cársticos típicos comumente apresentam grandes vazões, que podem, inclusive, ser consideradas anômalas. Poços podem apresentar vazões de mais de 150 m³/h, uma vez que, o reservatório subterrâneo apresenta ampla continuidade lateral, o que resulta em um grande volume de rocha que, potencialmente, contribui para alimentação da captação. O mesmo é observado em nascentes, pois o fluxo no carste tende a convergir e gerar surgências com vazões muito grandes. Por outro lado, as vazões em sistema fissuro-cársticos são mais reduzidas, comumente da ordem de dezenas de metros cúbicos por hora (Campos & Freitas-Silva, 1998 e Campos, 2004). Este contraste é diretamente proporcional ao volume de rocha não carbonática, que por apresentar menor porosidade, é responsável pela redução da vazão do poço. De forma geral, os poços instalados em sistemas fissuro-cársticos apresentam vazões tanto maiores quanto maior a espessura de rochas carbonáticas interceptadas. (Rodrigues, 2022)

A composição química das águas associadas aos aquíferos cársticos e fissuro-cárstico é outro ponto importante para sua distinção. De forma geral, águas provenientes de sistemas cársticos são mais mineralizadas, ricas em bicarbonato, cálcio e magnésio, elevada alcalinidade e pHs muito elevado. O total de sólidos dissolvidos (TDS) associado aos aquíferos típicos podem alcançar, comumente, valores de 300 a 400 mg/L e dependendo da condição climática estes valores podem alcançar mais de 500 mg/L. Em sistemas classificados como fissuro-cárstico a composição química das águas é mais amena, sendo que de forma geral o TDS é inferior a 200 mg/L, o pH entre 7 e 8 e o mesmo ocorre com os demais parâmetros químicos que enquadram as águas como água potáveis (Sousa, 2013).

Sistemas cársticos típicos apresentam todas as feições da paisagem cárstica incluindo grande número de sumidouros e surgências, dolinas, uvalas, sistemas ricos em espeleotemas, pináculos, dentre outras feições características. Em sistemas fissuro-cársticos, ao contrário, em função da menor presença de rochas carbonáticas e de sua descontinuidade as feições da geomorfologia cárstica são mais escassas ou ausentes.

Considerando sistemas hidrogeológicos cársticos e fissuro-cársticos similares, com áreas de recarga e descarga às mesmas distâncias, com as mesmas coberturas de solos e em um mesmo contexto geomorfológico é comum que as idades das águas em circulação apresentem idades distintas. No sistema fissuro-cárstico as águas tendem a ser mais antigas em função da menor condutividade hidráulica média,

resultante do fluxo em meios carstificados e fraturados (Ribeiro, 2020).

Conclusão

O presente trabalho apresentou o conceito de aquífero fissuro-cárstico, as ferramentas aplicadas ao seu estudo, além das principais diferenças relativas aos aquíferos cársticos.

Aquíferos compostos por duas porosidades definidas como fissuro-cárstico podem estar associados a camadas individuais de calcários argilosos (margas) sendo descritos como homogêneos e anisotrópicos ou ligados a lentes de rochas carbonáticas intercaladas ou interdigitadas a rochas não carbonáticas (por exemplo, xisto, siltito ou xisto) e, neste caso, descritas como heterogêneas e anisotrópicas.

Na análise do sistema hidrogeológico enquadrado no modelo conceitual fissuro-cárstico a escala de observação e as dimensões das rochas carbonáticas são fundamentais. Quando as lentes de calcário se tornam muito grandes, maiores que 10 km² (por exemplo, > 5 x 2 km de comprimento lateral) e dezenas de metros de espessura, o sistema deve ser tratado como um cárstico individual. O modelo fissuro-cárstico só é aplicável para casos em que as lentes de rocha carbonática têm dimensões de centenas de metros de comprimento.

A classificação do reservatório de água subterrânea em um modelo conceitual adequado é importante não apenas do ponto de vista teórico, mas também como base para a calibração de simulação numérica do aquífero, validação de parâmetros hidráulicos obtidos por testes de campo, processos de gestão, estimativa das reservas de água, projeto de remediação *in situ*, e muitas outras aplicações práticas.

Sistemas fissuro-cársticos, embora não formalmente tratados sob esse conceito, são bastante comuns na literatura (geralmente sendo descritos como sistemas cársticos) e são importantes para o abastecimento público de água, uma vez que o ambiente sedimentar responsável pela deposição simultânea de rochas carbonáticas e não carbonáticas é comum no registro geológico.

Referências

- Abbott, M.D. Stanley, R.S. 1999. Modeling groundwater recharge and flow in an upland fractured bedrock aquifer. *System Dynamics Review*. 15(2):163-184.
- Ackerer, P., Trotter, N., Delay, F. 2014. Flow in double-porosity aquifers: Parameter estimation using an adaptive multiscale method. *Advances*

- in Water Resources 73:108-122, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.07.001>
- Arana, H.A.H., Attrill, M.J., Hartley, R., Bouchot, G.G. 2005. Transitional carbonate-terrigenous shelf sub-environments inferred from textural characteristics of surficial sediments in the Southern Gulf of Mexico. *Continental Shelf Research*, 25:1836-1852, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.06.007>.
- Bakalowicz, M. 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, 13:148-160, <https://doi.org/10.1016/j.csj.2005.06.007>.
- Barenblatt, G.I., Zheltov I.P., Kochina, I.N. 1960. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, (24):1286-1303.
- Belperio, A.P. 1983. Terrigenous sedimentation in the central Great Barrier Reef Lagoon: a model from the Burdekin Region. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 8:179-190.
- Berryman, J.G. Wang, H.F. 1995. The elastic coefficients of double-porosity models for fluid transport in jointed rock. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 100(B12):24611-24627.
- Campos, J.E.G. 2004. Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(1):41-48.
- Campos, J.E.G. 2013. Estudo hidrogeológico. CPX Cimentos SA. Unidade Formosa. Relatório Técnico. 56p.
- Campos, J.E.G., Bogossian, J., Carvalho, R.M. 2012. Sedimentology of the psamo-pelitic-carbonate unit, Paranoá Group, and Sete Lagoas Formation, Bambuí Group: examples of mixed carbonate-siliciclastic sedimentation in the Proterozoic of the Brasília Fold Belt. *Revista Brasileira de Geociências*. 42(3):513-522.
- Campos, J.E.G., Freitas-Silva, F.H. 1998. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*, Brasília, IEMA / SEMATEC / UnB. (Vol. IV- Relatório Técnico). 1-84.
- Carneiro, F.A. 2013. Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa, Sete Lagoas/MG-Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia da UFMG. 338p.
- Cook, P.G. 2003. A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers. *CSIRO Land and Water*. Australia, 115p.
- Custodio, E. Llamas, M.R. 1983. *Hidrologia Subterránea*. 2.ed. Ed. Omega. Barcelona. 1157p.
- Dantas, J.C.M., Velasquez, L.N.M., Paula, R.S. 2022. Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surroundings, Minas Gerais, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 123 (2023) 104219, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104219>.
- Debieche, T.H., Guglielmi, Y., Mudry, J. 2002. Modeling the hydraulic behavior of a fissured-karstic aquifer in exploitation conditions. *Journal of Hydrology*:257,247-255, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00539-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00539-X)
- Dorsey, R. Kidwell, S.M. 1999. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation on a tectonically active margin: example from the Pliocene of Baja California Sur, Mexico. *Geology* 27(10):935-938, [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0935:MCSOA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0935:MCSOA>2.3.CO;2).
- Driscoll, F.G. 1986. *Groundwater and Wells*. Johnson Screen, St. Paul, Minnesota. 2ª ed. 1089p.
- Farrant, A.R., Maurice, L., Ballesteros, D., Nehme, C. 2023. The genesis and evolution of karstic conduit systems in the Chalk. *Geological Society, London, Special Publications*, 517, <https://doi.org/10.1144/SP517-2020-126>.
- Feitosa, A.C.F., Manoel Filho, J., Feitosa, E.C., Demétrio, J.G.A. 2008. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. CPRM/LABHID. Rio de Janeiro. 3a ed. Ampliada e Revisada. 812p.
- Fetter, C.W. 2003. *Applied Hydrogeology*. 4th Edition. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 598p.
- Filipi, T.C.F.C.M., Galvão, P.H.F., Santos, L.R., Athayde, C.V.M., Rumbelsperger, A.B., Cury, L.F., Athayde, G.B. 2023. Permeability scale effect analyzed in high resolution in Brazilian Neoproterozoic karst aquifer. *Environmental Earth Sciences* 82:57 <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10743-9>.
- Fischer, P., Jardani, A., Jourde, H. 2020. Hydraulic tomography in coupled discrete-continuum concept to image hydraulic properties of a fractured and karstified aquifer (Lez aquifer, France). *Advances in Water*: 137, 103523, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103523>.
- Ford, D.C. Williams, P.W. 1989. *Karst geomorphology and hydrology*. Academic Division of Unwin Hyman Ltd, London, 601p.

- Freeze, R.A. Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 604p.
- Gastmans, D., Alberto, M.C., Bufon, A.G.M., Moraes, F.T., Santos, M.M., Silva, J.R.M., Chang, H.K. 2005. Implicações hidroquímicas da interação rocha-água: interpretações através da representação gráfica de análises químicas de águas subterrâneas. In: XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. 18p.
- Goldscheider, N. Drew, D. 2007. Methods in karst hydrogeology. International contributions to hydrogeology. Robins, N.S., Chief-Editor. International Association of Hydrogeologists. Taylor and Francis / Balkema. 264p.
- Guerra, A.M. 1986. Processos de carstificação e hidrogeologia do Grupo Bambuí na região de Irecê- Bahia. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. 132p.
- Hamed, Y., Hadji, R., Hadji, R., Ayadi, Y., Shuhab, K., Pulido-Bosch, A. 2023. Hydrogeological investigation of karst aquifers using an integrated geomorphological, geochemical, GIS, and remote sensing techniques (Southern Mediterranean Basin—Tunisia). Environment, Development and Sustainability <https://doi.org/10.1007/s10668-023-02994-8>.
- Jeannin, P.Y. Sauter, M. 1998. Analysis of karst hydrodynamic behavior using global approach: a review. Bulletin d'Hydrologie, Centre d'Hydrologie, Université de Neuchâtel, 16:31-48.
- Ji, H., Luo, M., Yin, M., Li, C., Wan, L., Huang, K. 2022. Storage and release of conservative solute between karst conduit and fissures using a laboratory analog. Journal of Hydrology 612, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol..128228>.
- Käss, W. 1998. Tracing technique in Geohydrology. Balkema, Rotterdam. 581p.
- Kaufmann, G. Braun, J. 1999. Karst aquifer evolution in fractured rocks. Water Resources Research, 35:3223-3238.
- Keller, E.A. 1996. Environmental Geology. 7th ed. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 560p.
- Khetani, B. Read, J.F. 2002. Sequence development of a mixed carbonate-siliciclastic high-relief ramp, Mississippian, Kentucky, USA. Sedimentary Geology 72(5):657-672, <https://doi.org/10.1306/022102720657>
- Kovács, A. 2021. Quantitative classification of carbonate aquifers based on hydrodynamic behaviour. Hydrogeology Journal 29:33–52. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02285-w>.
- Kresic, N., Panday, S. 2021. Modeling of groundwater flow and transport in coastal karst aquifers. Hydrogeology Journal (2021) 29:249–258, <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02262-3>.
- Legrand, H.E. Stringfield, V.T. 1973. Karst Hydrology: a review. Journal of Hydrology (20):97-120, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90034-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90034-6).
- Loáiciga, H. 2002. Sustainable ground-water exploitation. International Geology Review. 44 (12):1115-1121, <https://doi.org/10.2747/0020-6814.44.12.1115>.
- 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.
- Malik, P. Coplak, M., Kuvik, M, Svasta, J. 2019. Recharge impulse spreading in Western Carpathian's Mountainous fissure-karst aquifer. Water: 11, 763; doi:10.3390/w11040763.
- Maloszewski, P., Benischke, R., Harum, T., Zojer, H. 1998. Estimation of solute transport parameters in a karstic aquifer using artificial tracer experiments. In: Simmers PD (ed) Shallow groundwater systems. International contribution to hydrogeology. Balkema, Rotterdam, pp 177-190
- Marsaud, B. 1996. Structure and functioning of the saturated zone of karsts from experimental results. Doctorate Thesis, Paris XI, Orsay, 305p.
- Medici, G., Smeraglia, L., Torabi, A., Botte, C. 2021. Review of Modeling Approaches to Groundwater Flow in Deformed Carbonate Aquifers.59(3):334-351, doi: 10.1111/gwat.13069.
- Medici, G., West, L.J. 2021. Groundwater flow velocities in karst aquifers; importance of spatial observation scale and hydraulic testing for contaminant transport prediction. Environmental Science and Pollution Research (2021) 28:43050–43063, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14840-3>.
- Medici, G., West, L.J., Mountey, N.P. 2016. Characterizing flow pathways in a sandstone aquifer: tectonic vs sedimentary heterogeneities. Journal of Contaminant Hydrology: 194, 36-58, <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.09.008>.
- Michel, G. Struckmeier, W. 1985. The cretaceous basin of Münster- A general groundwater system in response to multiple impacts. (Water Supply, SPAS, Deep Mining). Hydrogeology in Service of Man, Memories of the 18th Congress of the International Association of Hydrogeologists,

- Cambridge, 150-159.
- Moench, A.F. 1984. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research*, 20:831-846, <https://doi.org/10.1029/WR020i007p00831>.
- Motyka, J. 1998. A conceptual model of hydraulic networks in carbonate rocks, illustrated by examples from Poland. *Hydrogeology Journal*, 6(4), 469-482, <https://doi.org/10.1007/s100400050169>.
- Mourão, M.A.A., Cruz, W.B., Gonçalves, R.L.F. 2001. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco, In: Pinto, C.P.; Martins-Neto, M.A (eds.), *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte, SBG-MG, 327-350.
- Moutsopoulos, K.N., Papaspyros, J.N.E., Fahs, M. 2022. Approximate solutions for flows in unconfined double porosity aquifers. *Journal of Hydrology* 615 (2022) 128679, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128679>.
- 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 Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambai, GO. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.15, nº 5 (2022), 2327-2329, <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339>.
- Paula, T.L.F., Campos, J.E.G. 2016. Aquíferos com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e planar: Aplicação a rochas metassedimentares do Alto Paraguai, MT. *RBRH. Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(1):11-24, <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p11-24>
- Pessoa, P.F.P. Mourão, M.A.A. 1998. Levantamento Hidrogeológico. In: IBAMA; CPRM; (Eds.). *APA Carste de Lagoa Santa - Meio físico*. Belo Horizonte, 1998. 36p. (Série APA Carste de Lagoa Santa - MG).
- Pontes, C.C.C., Bezerra, F.H.R., Bertotti, G., La Bruna, V., Audra, P., De Waele, J., Auler, A. S., Balsamo, F., De Hoop, S., Pisani, L. 2021. Flow pathways in multiple-direction fold hinges: Implications for fractured and karstified carbonate reservoirs. *Journal of Structural Geology* 146 (2021) 104324, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104324>.
- Price, M. 1977. Specific yield determinations from a consolidated sandstone aquifer. *Journal of Hydrogeology*, 33:147-156, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(77\)90104-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(77)90104-4)
- Quinn, J.J., Tomasko, D., Kuiper, J.A. 2006. Modeling complex flow in a karst aquifer. *Sedimentary Geology* 184:343-351, <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.11.009>.
- Ribeiro, C.G. 2020. Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos ^2H , ^{18}O e ^3H na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 260p.
- Robineau, T., Tognelli, A., Goblet, P., Renard, F., Schaper, L. 2018. A double medium approach to simulate groundwater level variations in a fissured karst aquifer. *Journal of Hydrology*. 565:861-875, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.002>.
- Rodrigues, D.S.R. 2022. Modelagem Conceitual de Fluxo em Aquífero Físsuro-Cárstico Associado à Base do Grupo Bambuí na Região de Formosa – GO. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 92p.
- Rohde, M.M.; Edmunds, W.M., Freyberg, D., Sharma, O.P., Sharma, A. 2015. Estimating aquifer recharge in fractured hard rock: analysis of the methodological challenges and application to obtain a water balance. *Hydrogeology Journal* 23:1573-1586, <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1291-9>.
- Rozkowski, J. 1998. Endangering of the Upper Jurassic karst-fissured aquifer in the Krakow Upland (southern Poland). *Environmental Geology*, 33(4):274-278, <https://doi.org/10.1007/s002540050246>.
- Rozkowski, J. Rozkowski, K. 2016. Influence of fissuring and karstification of the carbonate aquifer unsaturated zone on its vulnerability to contamination (Cracow Upper Jurassic Region, Poland). *Environmental Earth Sciences*, 75:1023, <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5790-3>.
- Scanlon, B., Mace, R.E., Barrett, M.E., Smith, B. 2003. Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *Journal of Hydrology* 276:137-158, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00064-7).
- Sedghi, M.M. Zhan, H. 2021. Discharge variation of multiple springs associated with a fractured aquifer. *Journal of Hydrology* 603. 127030, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127030>.
- Shen, A., Zhao, W., Hu, A., She, M., Chen, Y., Wang, X. 2015. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*,

- 42(5):597-608, doi:10.1016/S1876-3804(15)30055-0.
- Singhal, B.B.S., Gupta, R.P. 1999. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Springer-Science+Business Media, B.V, 400p.
- Souza, M.M. 2013. Determinação das áreas de recarga para a gestão do sistema aquífero fissuro-cárstico da região de São Sebastião. Master Dissertation, Institute of Geosciences, University of Brasília, 73p.
- Stasko, S. 2003. Groundwater occurrence in fractured rocks- spatial zonality and temporal changes (Experiment results from Sudety Mts. - Poland. In: International Conference on Groundwater in Fractured Rocks IHP-VI, Series on Groundwater No. 7. Prague, Czech Republic. 424p.
- Sun, K., Liu, X., Ye, Z., Wang, E. 2021. Experimental investigation of the nonlinear evolution from pipe flow to fissure flow during carbonate rock failures. Bulletin of Engineering Geology and the Environment (2021) 80:4459–4470, <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02210-9>.
- Tallini, M., Falcone, R.A., Carucci, V., Falgiani, A., Parisse, B., Petitta, M. 2014. Isotope hydrology and geochemical modeling: new insights into the recharge processes and water–rock interactions of a fissured carbonate aquifer (Gran Sasso, central Italy). Environmental Earth Science: 72:4957-4971, <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3364-9>.
- Thran, A.C., East, M., Webster, J.M., Salles, T., Petit, C. 2020. The influence of carbonate platforms on the geomorphological development of a mixed carbonate-siliciclast margin (Great Barrier Reef, Australia) 21, e2020GC008915, <https://doi.org/10.1029/2020GC008915>.
- Tziritis, E., Pisinaras, V., Panagopoulos, A., Arampatzis, G. 2021. RIVA: a new proposed method for assessing intrinsic groundwater vulnerability. Environmental Science and Pollution Research (2021) 28:7043–7067, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10872-3>.
- Vesper, D.J., Loop, C.M., White, W.B. 2003. Contaminant transport in karst aquifer. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifer, 1(2):101-111.
- Villaroya, F., Adwell, C.R. 1998. Sustainable development and groundwater resources exploitation. Environmental Geology, 34(2/3):111-115, <https://doi.org/10.1007/s002540050261>
- Wang, Y., Zhan, H., Huang, K., He, L. , Wan, J. 2021. Identification of non-Darcian flow effect in double-porosity fractured aquifer based on multi-well pumping test. Journal of Hydrology 600 126541, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126541>.
- White, W.B. 1969. Conceptual models for limestone aquifers: Ground Water, 7(3):15-21.
- White, W.B. 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. Engineering Geology, 65:85-105, [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00116-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00116-8).
- Witkowski, A.J., Rubin, K., Kowalczyk, A., Rozkowski, A., Wrobel, J. 2003. Groundwater vulnerability map of the Chrzanow karst-fissured Triassic aquifer (Poland). Environmental Geology, 44:59-67, <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0735-4>.
- Worthington, S.R.H., Jeannin, P.Y., Alexander Jr, E.C., Davies, G.J., Schindel, G.M. 2017. Contrasting definitions for the term “karst aquifer”. Hydrogeology Journal, 25:1237-1240, <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1628-7>.
- Yadav, M.P., Agarwal, R., Purohit, S.D., Kumar, D., Suthar, D.L. 2022. Groundwater flow in karstic aquifer: analytic solution of dualporosity fractional model to simulate groundwater flow, Applied Mathematics in Science and Engineering, 30:1, 598-608, <https://doi.org/10.1080/27690911.2022.2117913>.
- Zhao, L., Yang, Y., Cao, J., Wang, Z., Luan, S., Xia, R. 2022. Applying a modified conduit flow process to understand conduit-matrix exchange of a karst aquifer. China Geology 5 26-33, <https://doi.org/10.31035/cg2021046>.
- Zhao, W., Shen, A., Hu, S., Zhang, B., Pan, W., Zhou, J., Wang, Z. 2012. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China. Petroleum Exploration and Development, 39(1):1-14, [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(12\)60010-X](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(12)60010-X)