



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Uso de Traçadores Corantes Fluorescentes na Identificação de Rotas de Fluxos em Sistemas Cársticos: Panorama de Estudos no Brasil

Matheus Santiago Vieira¹, André Silva Tavares², Rogério Elias Soares Uagoda³, Pedro Assunção⁴

¹ Mestre em Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP: 70297-400, Brasília (DF), Brasil, Tel (+55 61) 998255156, e-mail: teumice@gmail.com. ORCID 0000-0002-9492-1278

² Doutor em Geociências Aplicadas. Instituto de Geociências (IG), Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP: 70.910.970, Brasília (DF), Brasil, Tel (+55 35) 991721675, e-mail: andresttavares@gmail.com. ORCID 0000-0002-7099-8916

³ Doutor em Ciências. Professor Associado I do Departamento de Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Universidade de Brasília. Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP: 70297-400, Brasília (DF), Brasil, Tel (+55 61) 995898585, e-mail: rogeriouagoda@unb.br. ORCID 0000-0002-9448-1313

⁴ Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geologia. Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Campus Pampulha, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte - MG, 31270-901, Brasil, e-mail: pedroassuncao94@hotmail.com. ORCID 0000-0001-9477-3247

Artigo recebido em 10/07/2023 e aceito em 27/03/2024

RESUMO

O transporte de poluentes por condutos cársticos é preocupante, visto que podem ocasionar a perda da biodiversidade aquática na contaminação dos recursos hídricos subterrâneos. Para a identificação e avaliação da origem e destino dos contaminantes e as interações entre fluxos superficiais e subterrâneos os traçadores do tipo corante fluorescente são amplamente usados em todo mundo. Logo, este trabalho teve como objetivo apresentar um panorama sobre a evolução metodológica do uso de traçadores corantes em sistemas cársticos e os principais avanços desses estudos no Brasil. Para isso foi realizada uma pesquisa bibliográfica com o método de análise exploratória quantitativa que contemplou análise de livros, periódicos, teses e dissertações nacionais e internacionais publicadas recentemente nos últimos 10 anos, disponíveis no Portal Periódicos CAPES, Web of Science e Google Scholar. Como resultado, foi possível identificar os avanços de novos instrumentos de campo e laboratoriais, softwares de modelagem específicos e novos traçadores. No Brasil, observou-se um crescimento no número de pesquisas, avanço importante para o melhor entendimento sobre os sistemas cársticos brasileiros. As avaliações sobre as rotas de fluxos subterrâneos permitiram identificar principalmente os limites entre bacias hidrogeológicas cársticas, obter parâmetros mais confiáveis de transporte de contaminantes, e compreender melhor sobre a hidrodinâmica de bacias cársticas no Brasil.

Palavras-chave: Fluvicárste, Hidrodinâmica, Transporte de poluentes, Hidrogeologia.

Use of Fluorescent Dye Tracers in the Identification of Groundwater Flow Pathways in Karst Systems: Overview of Studies in Brazil

ABSTRACT

The transport of pollutants through karst conduits is of growing concern, as irreversible environmental damage can be caused, such as the loss of aquatic biodiversity and the contamination of groundwater resources. For the identification and assessment of, for example, the origin and fate of contaminants and the interactions between surface and subsurface flows (subsurface connections, flow direction), fluorescent dye tracers are widely used. Therefore, this work aimed to present a review on the methodological evolution of the use of dye tracers in karstic systems and the main advances of these studies in Brazil. To this end, a bibliographical survey was carried out using the quantitative exploratory analysis method, which included an analysis of books, journals, theses and national and international dissertations published recently in the last 10 years, available on the CAPES Journals Portal, Web of Science and Google Scholar. As a result, it was possible to identify the advances of new field and laboratory instruments, specific modeling software, and new dye tracers. For the studies in Brazil, an increase in the number of research in the explored historical series was observed, which enabled a better understanding of the hydrodynamic behavior of karst systems, such as the identification of karst springshed limits and the identification and quantification of the flow and transport parameters.

Keywords: subsurface flow, fluorescent tracers, contamination.

Introdução

O carste é uma forma de relevo caracterizada pela presença de rochas solúveis, como calcários e dolomitos, que sofrem dissolução química, resultando na formação de feições geomorfológicas distintas, com sistemas de drenagem predominantemente subterrâneos (Ford e Williams, 1989). Cerca de 20% da superfície terrestre do planeta é composta por formações cársticas (Ford e Williams, 2007) abrigando aproximadamente 16% da população global, (Goldscheider et al., 2020), onde, cerca de 9% da população depende diretamente dos recursos hídricos subterrâneos para suas atividades (Stevanović, 2015).

Esses ambientes apresentam diversas feições morfológicas e hidrológicas, como: cavernas, lápias, dolinas, sumidouros e surgências. Aos quais inserem-se em intrincados sistemas de circulação de água subterrânea por meio de condutos subterrâneos (Ford e Williams, 2007). Essas características conferem uma importância significativa a esses ambientes em estudos diversos, abrangendo desde a análise de registros arqueológicos e paleoambientais até a preservação de espécies de fauna subterrânea, muitas vezes, endêmicas (Palmer, 2007; Souza e Auler, 2018). Além disso, a capacidade de abrigar vastas reservas de água subterrânea (White, 2012), sujeitas à facilidade de contaminação, amplia ainda mais a sua relevância (Hartmann et al., 2014; Simaubi, et al., 2023).

Como mencionado, os ambientes cársticos apresentam diversas complexidades morfoestruturais o que resultam em ambientes altamente anisotrópicos e heterogêneos (White e White, 2013; Priebe et al., 2018; Mudarra et al., 2019). Essa condição propicia a ocorrência de redes complexas de condutos subterrâneos e cavernas, com capacidade de circulação ou armazenamento de água subterrânea (Gillieson, 1996; Karmann, 2001; Piló, 2000; Piló e Auler, 2011; Assunção et al., 2023). Os condutos são caracterizados por fluxos turbulentos e rápidos, que podem ter sua origem pela captura de drenagens superficiais (sumidouros) para os sistemas de água subterrânea ou pela presença de dolinas e entrada de cavernas (Gutiérrez et al., 2014; Hartmann et al., 2014).

Assim, as diversas peculiaridades relacionadas à dinâmica hidrológica do meio cárstico são caracterizadas pela dissolução química das rochas solúveis. Nesse caso, observa-se a presença de bacias hidrográficas subterrâneas com

a presença de cavernas e condutos influenciam a direção do escoamento superficial (devido a captura por (sumidouros) para o meio subterrâneo e consequentemente ocasiona a redução do escoamento superficial; a infiltração (recarga) de água pode ocorrer tanto de forma rápida e turbulenta, por meio de uma rede de condutos, quanto de forma lenta e difusa, pela rede de fraturas; a descarga de água pode acontecer em uma ou mais surgências cársticas, com fluxos divergentes ou convergentes para vários pontos, e esses ambientes podem apresentar variações nos parâmetros hidráulicos, como condutividade hidráulica, porosidade e transmissividade (White, 2002; 2005; Ford e Williams, 2007).

Consequentemente, essa dinâmica facilita o transporte de vários tipos de contaminantes, como compostos orgânicos industriais, herbicidas, sedimentos, inseticidas, vírus, bactérias e metais pesados, para os aquíferos. Infelizmente, devido à natureza complexa e rápida dos fluxos nesses sistemas cársticos, a capacidade de remediação desses contaminantes é bastante limitada (Müll et al., 1988; Drew e Hötzel, 1999, Ren, 2023).

Uma das formas de estudar a distribuição, o comportamento e as características das rotas de fluxo subterrâneas em condutos cársticos, consistem na aplicação de métodos de investigação hidrogeológica, como o uso de traçadores (Smart e Smith, 1976; Müll et al., 1988; Ford e Williams, 2007, Benischke, 2021). Os traçadores podem ser classificados em naturais e artificiais, sendo os corantes fluorescentes destacados devido às suas características consideradas ideais. Esses corantes apresentam baixa toxicidade, propriedades conservadoras (ou seja, não reagem ou se degradam significativamente no meio) e possuem um baixo limite de detecção (Smart e Laidlaw, 1977; Field, 2002b; Miller e Tobin, 2023).

A utilização de corantes fluorescentes para rastrear o fluxo de água subterrânea tornou-se extremamente importante na investigação dos sistemas cársticos. Esses traçadores exibem espectros de fluorescência específicos, que correspondem aos seus comprimentos de onda de excitação e emissão que variam dentro da faixa de visibilidade da luz, abrangendo desde os comprimentos de onda ultravioleta até os mais elevados do infravermelho (B350-750 nm) (Müll et al., 1988; Aliouache et al., 2024).

De modo geral, os traçadores corantes compreendem um dos meios mais eficazes para demonstrar a conectividade dos pontos de recarga

e descarga de água subterrânea (Maliva, 2016). Por meio de métodos qualitativos e quantitativos, os traçadores corantes fluorescentes, possibilitam: (1) identificar conexões através da rede de condutos entre fluxos superficiais e subterrâneos, e consequentemente, a origem ou destinação de contaminantes; (2) delimitar os limites da bacia hidrográfica subterrânea e através de métodos quantitativos, (3) auxiliam na estimativa de propriedades estruturais (diâmetro, volume, área da seção transversal) de condutos subterrâneos e de parâmetros hidrodinâmicos (velocidade média da rota de fluxo, tempo médio de trânsito, velocidade máxima) (Atkinson e Smart, 1981; Smart, 1988; Müll et al., 1998; Field, 2002b; Goldscheider e Drew, 2007; Goldscheider, 2009; Benischke, 2021).

Os corantes podem ser detectados visualmente na água em concentrações de partes por milhão, por detectores passivos (bolsas de tela de nylon contendo carvão ativado granulado) (Dunn, 1957) ou através de ferramentas mais avançadas, como os espectrofluorímetros de laboratório e fluorímetros submersíveis de campo. Nesse caso, estes instrumentos podem detectar concentrações muito mais baixas (partes por bilhão), o que permite obter análises quantitativas mais acuradas através da concentração medida de corante ao longo do tempo (BTC) (Smart, 1988; Field, 1999; 2002b, (Schnegg, 2002). Essas análises incluem por exemplo, a velocidade média de fluxo usando o tempo de pico de concentração; restituição do traçador integrando a superfície sob a curva; propriedades hidrodispersivas avaliando a forma da curva, o primeiro tempo de chegada, o tempo até o pico de concentração, o tempo decorrido de passagem da pluma de corante e o formato da cauda da BTC (Goldscheider e Drew, 2007).

Nesse contexto, este estudo teve como objetivo apresentar um panorama sobre a evolução metodológica do uso de traçadores corantes em sistemas cársticos no Brasil. Neste é possível identificar o crescimento, nos últimos 10 anos, do número de estudos sobre a dinâmica hidrológica em bacias cársticas (Tavares et al., 2023). Os trabalhos trazem novas metodologias e descobertas no que tange o comportamento hidrodinâmico dos sistemas cársticos brasileiros. A obtenção das rotas de fluxos subterrâneos e superfície por meio de traçadores permitiu identificar limites entre bacias hidrogeológicas cársticas, a identificação de parâmetros mais confiáveis sobre os fluxos e quantificação de contaminantes, aperfeiçoando a

compreensão sobre a hidrodinâmica de bacias cársticas no Brasil.

Metodologia

Este artigo consistiu na revisão sobre a metodologia da técnica de traçadores fluorescentes e na compilação dos principais autores que abordaram os estudos com traçadores corantes fluorescentes em sistemas cársticos brasileiros.

Para tanto, foi usado o método de análise exploratória quantitativa baseado nas etapas de preparação das bases a serem pesquisadas, verificação das inter-relações entre os dados encontrados, apresentação e interrelação dos dados, detalhamento, modelo integrador e verificação por evidências. O método foi baseado na Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado (TEMAC) (Mariano e Rocha, 2017) que consiste em selecionar os termos de pesquisa, indicar o recorte temporal e selecionar a base de dados.

Nesse estudo a “Web of Science” e o “Portal Periódicos CAPES” foram utilizados considerando um recorte temporal entre 2013 e 2023. As palavras-chave foram “tracers dye fluorescent”, “karst hydrology” e “karst systems”, considerando as áreas de pesquisa em geociências, recursos hídricos e geografia física.

A segunda fase foi selecionar os trabalhos mais relevantes considerando dez critérios diferentes para refinamento, como por exemplo, as revistas com maior fator de impacto, que mais publicam sobre o tema, documentos mais citados, autores que mais publicaram e foram mais citados, universidades que mais publicaram, frequência de palavras-chave, entre outros.

Após, a validação por evidências foi elaborada a partir da criação de agrupamentos usando as análises de “co-citação” e “acoplamento bibliográfico”. Essa fase possibilita encontrar núcleos de pesquisa comum, a partir da conexão entre artigos que citam as mesmas publicações dentro do recorte temporal, com auxílio do programa VOSViewer (1.6.15.0).

Resultados e discussão

Traçadores e suas classificações

O traçador pode ser definido com uma substância capaz de ser transportada pela água no estado sólido ou dissolvido, a fim de obter informações sobre a direção e circulação das águas subterrâneas (Käss, 1998; Benischke, et al., 2008). Klimchouk et al. (2000) ressaltam que os

traçadores possuem uma importância histórica significativa, uma vez que esses estudos foram responsáveis pelo desenvolvimento dos primeiros conceitos e considerações sobre as bacias hidrográficas subterrâneas. Essa abordagem permitiu a compreensão de sistemas integrados de fluxo hidrológico superficial e subterrâneo, em vez de considerá-los separadamente.

Nesse sentido, Goldscheider (2005) enfatiza que a combinação de técnicas de traçadores com observações geológicas e hidrológicas se tornou uma ferramenta poderosa para estudar a circulação da água subterrânea, especialmente em ambientes cársticos, onde a rede de condutos desempenha um papel crucial.

De maneira geral, os traçadores podem ser classificados em naturais e artificiais. Os traçadores naturais são compostos que ocorrem naturalmente no sistema em análise, como isótopos ambientais e radioativos, microrganismos e bacteriófagos. Por outro lado, os traçadores artificiais consistem em substâncias introduzidas intencionalmente em experimentos controlados em sistemas hidrológicos, como corantes

fluorescentes, sais, microesferas fluorescentes sintéticas e partículas (Leibundgut e Seibert, 2011).

Devido possuírem propriedades desejáveis para investigações hidrológicas, os corantes fluorescentes, são os traçadores artificiais mais utilizados para estudar o movimento de água subterrânea na rede de condutos cársticos (Smart, 1988; Field et al., 1995; Käss, 1998; Benischke, 1989). Em geral, possuem limites de detecção extremamente baixos, exigindo uma pequena quantidade de injeção; são altamente solúveis em água e apresentam baixa toxicidade, além de comportamento essencialmente conservador (Goldscheider, 2015).

Conforme observado na Tabela 1, cada traçador corante fluorescente apresenta espectros de fluorescência específicos, correspondentes aos seus comprimentos de onda de excitação e emissão, que variam na faixa de visibilidade da luz entre os comprimentos de onda ultravioleta e infravermelho mais altos (350-750 nm) (Müll et al., 1988; Alexander e Quinlan, 1996) e devido à semelhança na nomenclatura, essas substâncias são diferenciadas pelo número CAS (Colour Index).

Tabela 1 – Principais traçadores corantes fluorescentes utilizados em estudos hidrogeológicos

Traçador	Excitação Máxima (nm)	Emissão Máxima (nm)	Número (CAS)	Intensidade Fluorescente (%)	Limite de Detecção (µg/l)	Sorção
Fluoresceína Sódica	492	513	518-47-8	100	0,002	Muito Baixa
Eosina	512	536	17372-87-1	18	0,001	Baixa
Rodamina B	555	582	81-88-9	60	0,006	Forte
Rodamina-WT	558	583	37299-86-8	25	0,006	Moderado
Sulforodamina G	535	555	5873-16-5	14	0,005	Moderado
Sulforodamina B	560	584	3520-42-1	30	0,007	Moderado
Tinopal CBS-X	355	435	54351-85-8	60	0,01	Moderado
Tinopal 5BM GX	-	-	12224-01-0	-	-	-
Phorwite BBH Puro	349	439	4404-43-7	20	-	-
Flavina Difenil Brilhante 7GFF	415	489	61725-08-4	-	-	-
Lissamina Flavina FF	422	512	2391-30-2	1,6	-	-
Piranina	460/407	512	6358-69-6	18 pH>7/ 6 pH <4,5	-	-
Amino-G	359	459	86-65-7	-	-	-
Naftionato de Sódio	325	420	-	18	0,007	Baixo

Fonte: Leibundgut e Seibert (2011). Adaptado pelos autores.

Breve histórico sobre o uso de traçadores corantes fluorescentes

A utilização de traçadores em estudos hidrogeológicos possui uma história longa, remontando a mais de 2.000 anos atrás, quando uma experiência foi conduzida para investigar a

conexão hidrológica entre nascentes e sumidouros do Rio Jordão, localizado na fronteira entre Jordânia e Israel. Em 1871, ocorreu um marco com a invenção do primeiro corante confiável e solúvel, conhecido como fluoresceína sódica/uranina, que foi amplamente utilizado em estudos de pesquisa hidrogeológica na Europa Oriental e,

posteriormente, na América do Norte (Käss, 1988). Por sua vez, os primeiros experimentos utilizando traçadores corantes fluorescentes foram realizados para identificar redes de condutos subterrâneos em cavernas na França, investigar a conexão entre o sumidouro do rio Danúbio e a fonte cárstica de Aach na Alemanha, estudar surgências na Iugoslávia e delimitar bacias hidrogeológicas na região cárstica da Caverna de Mammoth, em Kentucky, Estados Unidos (Quinlan e Evers, 1989).

No entanto, as primeiras aplicações eram limitadas devido ao uso de métodos volumosos que exigiam a injeção de grandes quantidades de corante e dependiam exclusivamente da observação visual para detectar a presença do traçador. Em 1877, na Alemanha, foi realizada a primeira tentativa de teste quantitativo, utilizando traçadores como: óleo de xisto, cloreto de sódio (NaCl) e fluoresceína sódica no sumidouro do rio Danúbio. A detecção quantitativa ocorreu por meio da elaboração de curvas de concentração em função do período monitorado (Käss, 1998). Posteriormente, foram desenvolvidos detectores passivos compostos por pequenas bolsas de malha feitas de carvão ativado granular, que permitiam a adsorção do corante fluorescente (Dunn, 1957) e a posterior eluição do material adsorvido (Jones, 1984a).

A partir da década de 60, o avanço tecnológico e a era da computação trouxeram melhorias significativas para as técnicas de traçadores fluorescentes (Smart e Laidlaw, 1977; Käss, 1998; Smart et al., 1998). Progressos significativos nas técnicas de fluorimetria, com o desenvolvimento de fluorímetros de campo e de laboratório mais precisos (Auler e Stevanović, 2020), assim como uma maior variedade de instrumentos fluorimétricos disponíveis. Isso inclui espectrofotômetros convencionais capazes de análise espectral nos comprimentos de onda visível (VIS) e ultravioleta (UV) e espectrofluorômetros com capacidade de varredura (Benischke 2020).

Nesse sentido, ressaltasse também o desenvolvimento dos instrumentos fluorimétricos, com capacidade de medição contínua em campo, como os fluorímetros de campo (por exemplo, GGUN-FL30), os submersíveis (modelo GGUN-FL24) (Schnegg, 2002) permitindo a medição das curvas de concentração em função do tempo do traçador (BTC - The breakthrough curve), os fluorímetros portáteis (modelo AquaFluor – TurnerDesigns), de equipamentos laboratoriais com o espectrofotômetro de fluorescência

(HITACHI, modelo F-2700), além de um fluorímetro baseado na adaptação de um telefone celular (Hossain et al., 2014). Além disso, novos traçadores fluorescentes com comprimentos de onda no espectro ultravioleta (UV), como o naftionato de sódio, amino-G, tinopal e branqueadores ópticos possibilitaram ensaios que não comprometessem a qualidade estética da água, sendo útil para estudos em locais de abastecimento populacional (Meus et al., 2014).

Recentemente, outra importante inovação, foi o desenvolvimento de softwares de modelagem específicos, criados para auxiliar na interpretação das BTC. Esses softwares incluem: o CXTFIT (Toride et al., 1999), QTRACER2 (Field, 2002b), EHTD (Field, 2003a), CXTFIT com extensão EXCEL (Tang et al., 2010) e TRAC (Gutierrez et al., 2013). Por meio de modelos analíticos, essas ferramentas computacionais possibilitam estimar diversos parâmetros hidrodinâmicos, como a velocidade média de fluxo e a recuperação de massa do traçador, e as características estruturais da rede de condutos subterrâneos, como volume e diâmetro (Field, 1999a; 2002b).

Procedimentos metodológicos no uso de traçadores fluorescentes em sistemas cársticos

Ao planejar um ensaio com traçadores fluorescentes é essencial obter informações sobre dados hidrológicos, climáticos, hidroquímicos e geológicos, bem como o contexto legal, regulamentar e administrativo das propriedades privadas envolvidas (Benischke, 2021). Assim, é necessário seguir algumas etapas importantes para melhor execução dos ensaios, como: a) escolha dos locais de injeção e monitoramento; b) escolha do tipo de traçador; c) medição da fluorescência natural (background); d) escolha do tipo de amostragem e análise; e e) instrumentação e modelos analíticos (Figura 1).

Conforme observado na Figura 1, no experimento, é realizado o processo de injeção instantânea do traçador corante fluoresceína sódica em um sumidouro. Acredita-se que um conduto subterrâneo conecte o sumidouro com a ressurgência a jusante. Para detectar a presença do traçador, são utilizados detectores passivos e instrumentos de medição de campo, como os fluorímetros, além de espectrofotômetros laboratoriais.

Definição dos pontos de injeção e amostragem

Os locais de injeção e monitoramento envolvem diversas feições do relevo cárstico, devendo levar em consideração os objetivos do estudo e as características hidrológicas do local.

Esses locais geralmente são sumidouros, cavernas, dolinas, poços tubulares, surgências e nascentes cársticas. Para a escolha dos tipos de traçadores corantes, estão disponíveis diversos tipos de substâncias, cada uma com suas características e propriedades específicas. A escolha adequada do traçador depende das características do sistema cárstico, das propriedades desejadas (como tempo de detecção, solubilidade, visibilidade) e dos objetivos do estudo.

Desse modo, a metodologia com traçadores fluorescentes envolve a adição controlada de uma quantidade mensurável de corante em um fluxo de água turbulento. A quantidade de massa corante utilizada pode variar desde gramas até quilogramas, sendo estimada por equações empíricas ou ferramentas computacionais. Desse modo, depende de diversas variáveis que envolvam a diluição do traçador, como: a distância entre o local de injeção e o ponto de monitoramento e dados de vazão e descarga do sistema cárstico (Müll et al., 1988; Käss, 1998; Field, 2002b).

Definição do tipo de traçado

Em relação ao método de injeção, existem dois tipos que podem ser utilizados: injeção constante e injeção instantânea. No método de injeção constante, é necessário empregar um injetor automático para garantir um fluxo contínuo durante a introdução do traçador corante. Por outro lado, no método de injeção instantânea, o traçador é inserido diretamente no fluxo turbulento da água, sendo considerado o mais adequado para obter parâmetros hidrodinâmicos e estruturais do conduto investigado (Genthner, 2001).

Background

Uma etapa importante na execução dos testes com traçador corante, é realizar medições da fluorescência natural do fluxo de água do local de monitoramento. Esse procedimento é chamado de background e serve para identificar a fluorescência natural da água, que é causada pela presença de matéria orgânica e sedimentos suspensos. A realização dessa etapa é crucial, uma vez que a fluorescência natural tem o potencial de interferir

nos resultados do monitoramento com os traçadores corantes, levando a resultados falso-positivos (Müll et al., 1988).

Definição do tipo de amostragem

Existem três possibilidades de métodos de amostragem com traçadores corantes fluorescentes, sendo eles: a amostragem integrativa, discreta e contínua (Benischke et al., 2007). O método de amostragem integrativa, também conhecido como qualitativo, foi o primeiro a ser utilizado para detecção de traçadores fluorescentes e foi desenvolvido por Dunn (1957). Nesse método, detectores passivos, constituídos de pequenas bolsas de malha (nylon) contendo carvão ativado granular de coco, são inseridos no fluxo de água. As moléculas dos corantes fluorescentes são adsorvidas e retidas pelo carvão ativado e após a amostragem, os detectores são eluídos com uma solução apropriada.

Uma solução comumente utilizada é a proposta por Jones (1984a), que consiste em uma mistura de hidróxido de potássio (5%) e álcool etílico (95%) para extrair a fluoresceína sódica, por exemplo. Em seguida, as substâncias extraídas são analisadas por instrumentos fluorimétricos, como espectrofotômetros, que medem a intensidade da energia eletromagnética em diferentes comprimentos de onda de luz em uma região específica, incluindo a ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Esse método apresenta como vantagem a capacidade de monitorar vários pontos a baixo custo, sendo em alguns casos a única opção em locais de difícil acesso (Goldscheider et al., 2008).

A amostragem discreta consiste na coleta de amostras de água em determinados intervalos de tempo, de forma manual ou através de amostradores automáticos, e posteriormente na interpretação laboratorial, resultando em uma série de dados temporais de concentração. Desse modo, são realizadas análises semi-quantitativas por meio de instrumentos fluorimétricos laboratoriais gerando dados de concentração em função do tempo. A vantagem deste método está na possibilidade de reproduzi-lo em diversos locais. A desvantagem consiste na necessidade de uma equipe suficiente de pessoas quando realizado coletas discretas e na instalação de amostradores automáticos quando medição contínua (Benischke et al., 2007).

A amostragem contínua ou quantitativa consiste em medir a concentração do traçador corante fluorescente utilizando instrumentos

fluorimétricos de campo, o que proporciona dados com alta resolução temporal (de segundos a minutos) e em concentrações em partes por milhão, bilhão e trilhão (Smart, 2005; Goldscheider et al.,

2008). Esse método é o mais econômico, pois substitui os amostradores automáticos e não requer intervenção de um operador por dias ou semanas (Barckzewski et al., 1996).

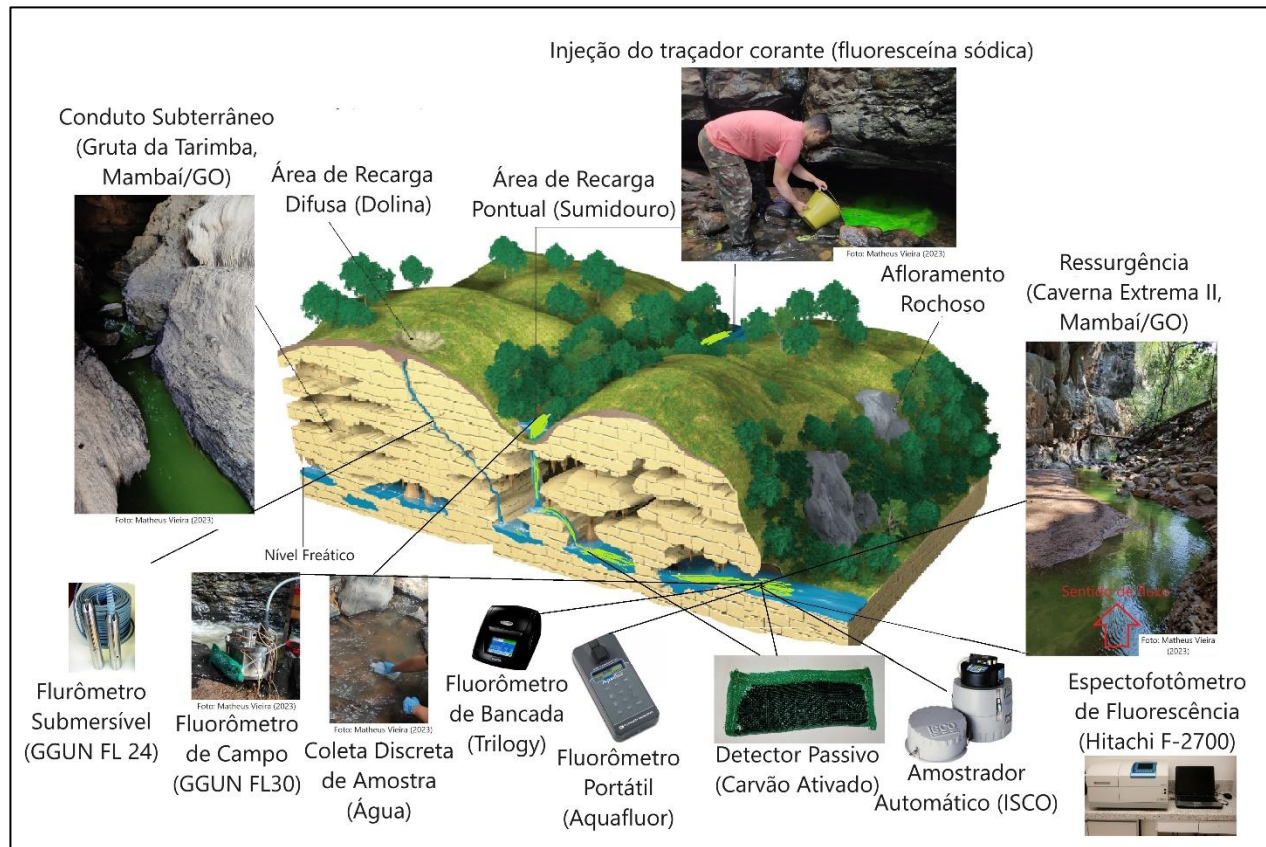


Figura 1 – Ilustração metodológica da aplicação, detecção e análise do uso de traçadores corantes fluorescentes na identificação de condutos subterrâneos ativos em um sistema cárstico.

Estimativa de parâmetros hidráulicos e estruturais

O resultado principal de um ensaio quantitativo é a obtenção da curva de concentração, também conhecida como Breakthrough curve (BTC), que representa o comportamento do traçador ao longo da rota de fluxo investigada. As BTCs podem ser unimodais, apresentando um único pico de concentração, o que indica uma única rota de fluxo subterrâneo, ou também, que sejam multimodais, exibindo dois ou mais picos de concentração, o que indica a presença de múltiplas rotas de fluxo subterrâneo (Atkinson et al. 1973; Gaspar, 1987; Goldscheider e Drew, 2007).

A análise da curva de concentração é realizada pelo método dos momentos (Field, 1999a; 2002b), que descreve a passagem do traçador em tempos decorridos após a injeção do corante. A curva de concentração é composta por pontos que

representam a concentração do traçador em diferentes momentos de tempo, sendo os principais pontos analisados: T0 (tempo de injeção), T1 (tempo de primeira detecção ou velocidade de fluxo máxima), Tp (tempo de pico de concentração ou velocidade de fluxo dominante), Tc (tempo de centroide de concentração ou velocidade de fluxo efetiva), T50 (tempo médio, tempo de recuperação de 50% ou velocidade média) e Te (tempo de término do período de observação), conforme observado na Figura 2. A curva de recuperação que exprime a quantidade de traçador que passou pelo ponto monitorado é obtida através dos dados da concentração do traçador e dos valores de descarga medidos no local de monitoramento (Benischke et al., 2007).

Benischke et al. (2021) destaca que a hora da primeira detecção e a hora do pico de concentração são importantes na avaliação dos riscos de contaminação dos recursos hídricos, tendo em vista que muitos desses locais são utilizados para abastecimento de água. Ainda segundo o autor, dependendo das condições de fluxo, ocorre uma grande variação de tempos de trânsito variando de alguns metros por hora até centenas de metros.

Através da análise da BTC, juntamente com dados de vazão, descarga e da distância linear entre o ponto de injeção e o local de monitoramento, é possível obter informações importantes sobre o sistema em estudo, como a estrutura da rede cárstica, tempos e velocidades de viagem e parâmetros de dispersão. Conforme Field (2002b), os parâmetros estruturais da rede cárstica, incluem, por exemplo, o volume do aquífero, a sinuosidade da rota de fluxo, a área da seção transversal, o diâmetro e a profundidade do conduto. Por outro lado, os parâmetros hidrodinâmicos incluem, a dispersão longitudinal, o tempo médio de residência, a velocidade média do traçador e a diluição do traçador. Além disso, também é possível obter informações sobre as características do transporte de contaminantes, como dispersividade, retardo e degradação (Smart, 1988). Uma avaliação adequada da BTC pode ser realizada através de modelos matemáticos,

formulados com base em um modelo conceitual adequado (Benischke et al., 2021). O modelo Advecção-Dispersão (AD) é o mais simples e assume que a advecção (transporte do soluto com a água subterrânea) e a dispersão (difusão do soluto devido a heterogeneidades do meio) são as principais forças que governam o transporte do soluto. O modelo 2RNE (Two-region nonequilibrium) leva em conta o fato de que o soluto pode ficar retido em regiões de baixa permeabilidade e não se mover com a água subterrânea, enquanto o modelo MDP-2RNE (Multi-double porosity with two-region nonequilibrium) considera a presença de porosidades duplas no meio poroso.

Esses modelos são calibrados com os dados experimentais obtidos das curvas de concentração e recuperação e, a partir disso, são estimados os parâmetros hidrodinâmicos e estruturais do sistema subterrâneo, como a velocidade média de fluxo, dispersividade, tempo de trânsito, volume e área da seção transversal do conduto subterrâneo, entre outros. Essas estimativas são úteis para o entendimento do comportamento do fluxo de água e solutos subterrâneos, permitindo a avaliação do risco de contaminação do aquífero e o planejamento adequado do gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos (Assunção, 2021).

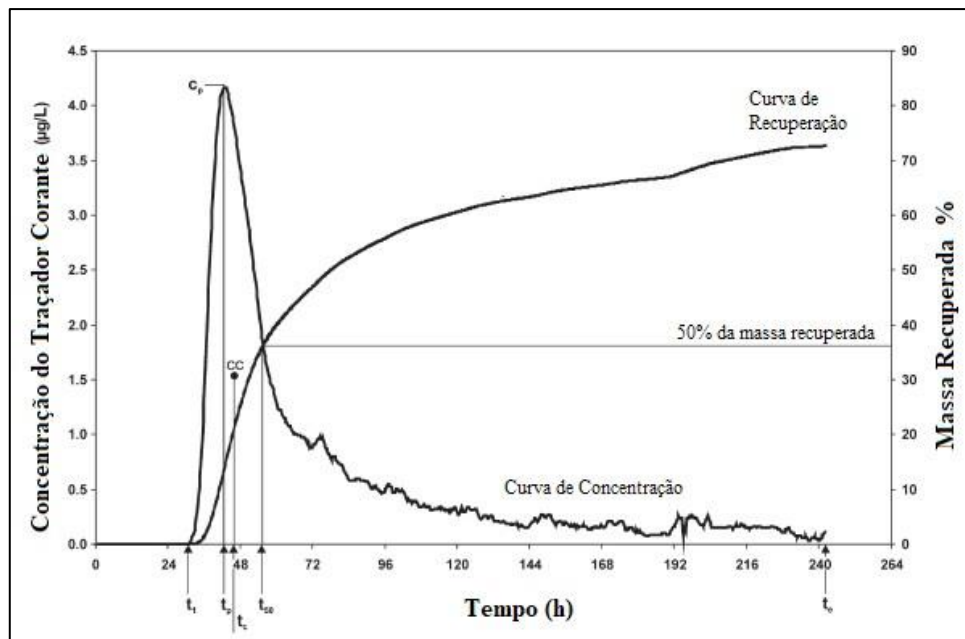


Figura 2 - Análise de uma curva de concentração (BTC) e recuperação de um traçador corante

Fonte: Benischke et al. (2007): Cp (Concentração do Pico), T0 (tempo de injeção), T1 (tempo de primeira detecção), Tp (tempo de pico de concentração), Tc (tempo de centroide de concentração), T50 (tempo médio, tempo de recuperação de 50%), Te (tempo de término do período de observação). Adaptado pelo autor.

Estudos com traçadores fluorescentes em sistemas cársticos no Brasil

Os estudos que utilizaram a metodologia com traçadores fluorescentes em sistemas cársticos no Brasil desempenharam um papel crucial na compreensão do funcionamento dos sistemas de circulação de água subterrânea do carste e na remediação de contaminantes nesses ambientes. Essas pesquisas têm fornecido subsídios valiosos para o desenvolvimento de estratégias de conservação desses sistemas, que são altamente sensíveis à contaminação das águas subterrâneas.

Nesse sentido, as primeiras experiências com traçadores fluorescentes no sistema cárstico brasileiro, ocorreram em 1973, por um grupo de espeleólogos do Grupo Opiliões, onde, utilizaram os traçadores corantes, rodamina-WT e a fluoresceína sódica, para comprovar a conexão hidrológica entre duas cavernas no sistema-cárstico Angélica-Bezerra, em São Domingos, Goiás. No mesmo ano, realizaram também experiências com a fluoresceína sódica no sistema Pérolas-Santana, São Paulo, comprovando a ligação entre as duas cavernas. Em 1975, novos experimentos foram empregados na Gruta das Areia e Laboratório, em Goiás, utilizando o traçador corante fluoresceína sódica (Ayub, 1998).

Entre as décadas de 80 e 90, e início dos anos 2000, ocorre a realização de trabalhos científicos marcando o início de uma nova fase na utilização de traçadores corantes para o estudo de sistemas de cavernas ativas e aquíferos cársticos. Estes estudos foram realizados nas regiões cársticas carbonáticas do Vale do Ribeira em São Paulo, de Lagoa Santa, Montes Claros e do Alto São Francisco, em Minas Gerais (Slavec, 1976;; Auler, 1994; Ayub, 1998; Minardi e Bomtempo (2000), Genthner, 2001; Genthner et al., 2003; Pessoa, 2005; Ferrari e Karmann, 2008 e Freitas, 2009). Na Figura 3, é apresentada a localização geográfica de todos os estudos que foram realizados com traçadores corantes fluorescentes em sistemas cársticos no Brasil no período de 1976 a 2023, além de estudos em desenvolvimento.

De acordo com os objetivos e o recorte temporal definido neste estudo, a pesquisa realizada nas bases Web of Science e Google Scholar resultaram em cinco trabalhos científicos, sendo cinco dissertações de mestrado (Teodoro, 2019; Assunção, 2021; Ferreira, 2020; Ferreira, 2023; Vieira, 2023), uma tese de doutorado (Calux, 2019), quatro artigos publicados em periódicos (Leão e Krebs, 2017; Auler et al., 2019; Ferreira et al., 2021; Assunção et al., 2023), um relatório

técnico-científico (Ferrari et al., 2018) e um capítulo de livro (Kimura et al., 2015).

Kimura et al. (2015) ao estudarem zona de proteção das cavidades denominadas CAV-0001A e CAV-0001B, inseridas na bacia do ribeirão das Lajes, no município Morro do Pilar (MG), por meio da aplicação de fluoresceína e rodamina WT, concluíram que as cavidades em rochas ferruginosas e quartzíticas fazem parte de um mesmo sistema hídrico. Além disso, os autores constataram que a recarga acontece por infiltração do fluxo do ribeirão das Lajes em fraturas do maciço rochoso e a descarga do sistema ocorre no cânion a montante do ponto de confluência de um afluente do próprio ribeirão.

Devido à preocupação ambiental relacionada ao risco de contaminações entre águas superficiais e subterrâneas, Leão e Krebs (2017) realizaram testes qualitativos com o objetivo de comprovar a conexão hidrológica entre uma mina de carvão abandonada com a lagoa Língua do Dragão, em Criciúma, Santa Catarina. Os ensaios consistiram no uso do traçador corante rodamina B injetado em um poço tubular da mina subterrânea e na coleta de amostras discretas de água e carvão ativado. Os resultados obtidos comprovaram a conexão entre as águas subterrâneas da mina e as águas superficiais da lagoa Língua do Dragão, indicando que as galerias da mina se comportam como um aquífero cárstico.

Ferrari et al. (2018) estudaram a área de influência hídrica da Gruta Éden, no município de Pains (MG), utilizando os métodos de corantes fluorescentes (fluoresceína e rodamina WT), mapeamento da vulnerabilidade intrínseca (PI), monitoramento hidrológico (análise de séries temporais). Este sistema cárstico já havia sido estudado inicialmente por Freitas (2009), que confirmaram as interconexões hidráulicas do sistema de rotas de fluxo Mina-Sócrates-Éden-Angolinhas, utilizando rodamina WT. O novo estudo de Ferrari et al. (2018), além de definirem a área de influência hídrica da Gruta Éden, trouxe uma nova informação sobre a contribuição de recarga da Janela Cárstica do Timburé para o sistema.

Auler et al. (2019) estudaram o comportamento hidrogeológico de aquíferos quartzíticos cársticos na Chapada Diamantina, Bahia, por meio de ensaios com traçadores corantes fluorescentes, amino-G e fluoresceína sódica, em sumidouros e cavernas da região. Para medições de fluorescência natural, foram utilizados captadores de carvão ativado, coleta discreta de amostras de água e um fluorímetro portátil (Turner Designs -

AquaFluor). Os ensaios qualitativos envolveram o uso de captadores de carvão ativado, coleta discreta de amostras de água e medição contínua da concentração dos traçadores por meio de quatro fluorímetros de campo (modelos GGUN-FL30 e GGUN-FL24). Em laboratório, espectrofotômetros de fluorescência (modelos Hitachi F-2500 e Hitachi F-2700) foram usados para identificar a presença do traçador corante nas amostras de água e nos captadores de carvão ativado. Os resultados obtidos revelaram a existência de conexões entre sumidouros e cavernas na área de estudo, proporcionando uma compreensão aprimorada dos efeitos do pH ácido do ambiente, que difere do pH básico dos aquíferos carbonáticos e da alta fluorescência natural na região, o que demonstrou a eficácia dos métodos de rastreamento com traçadores fluorescentes em aquíferos quartzíticos.

Devido a pressões antrópicas em razão da expansão demográfica e industrial e os riscos associados à contaminação e exploração das águas na Área de Proteção Ambiental (APA) do carste de Lagoa Santa, em Minas Gerais, Teodoro (2019), empregou ensaios qualitativos e quantitativos com os traçadores corantes fluoresceína sódica e rodamina-WT. A amostragem qualitativa consistiu no uso de detectores de carvão ativado e análise em um espectrofotômetro de laboratório (modelo Hitachi F-2700). Já a amostragem quantitativa envolveu a medição contínua dos traçadores utilizando amostradores automáticos e fluorímetros de campo (modelos GGUN FL24 e GGUN FL30). Os resultados obtidos a partir dessas análises permitiram a identificação de conexões hidrológicas e a quantificação das contribuições de áreas de recarga, a compreensão das condições hidrodinâmicas das rotas de fluxo (incluindo direção e velocidade dos fluxos) e informações sobre os parâmetros estruturais dos condutos, como volume e área da seção.

No estudo realizado por Calux (2019) na região de planalto cárstico Alambari-Ouro Grosso, em Iporanga - São Paulo, foram investigadas a estrutura e os parâmetros hidráulicos dos condutos subterrâneos da região. Para isso, foram utilizados testes qualitativos e quantitativos utilizando os traçadores corantes fluoresceína e rodamina-WT. Nos testes qualitativos, foram empregados captadores de carvão ativado juntamente com um fluorímetro portátil (modelo Aquafluor, Turner Designs). Já nos testes quantitativos, foram utilizados fluorímetros de campo (modelo GGUN FL 30 ALBILLA). Através da análise das conexões hidrológicas e da morfometria das depressões poligonais, a zona de recarga dos

sistemas cársticos foi determinada. Além disso, foram obtidos os parâmetros hidráulicos e estruturais dos condutos investigados na área de estudo.

Ferreira (2020) se preocupou em caracterizar a dinâmica hídrica da área de influência de 34 cavidades em formações ferríferas bandadas e cangas lateríticas, localizadas nas minas da Serra Norte, Carajás (PA). Para isso, foram aplicados traçadores fluorescentes (fluoresceína, rodamina WT e Amino G), com diferentes espaçamentos dentro das áreas de influência e um monitoramento de pontos para análise no interior de cada cavidade. Ferreira et al. (2021), concluíram que a influência hídrica das cavidades mais rasas é local, sendo que essa influência pode ser reduzida com presença maior de solo e vegetação. Além disso, os autores demonstraram que o volume de canga ensaiada em decorrência das feições cársticas e fissurais, controlam as velocidades de fluxo subterrâneo.

Assunção (2021) teve como objetivo identificar as principais rotas de fluxo subterrâneas, variações espaciais e sazonais dos parâmetros de fluxo e transporte ao longo das rotas, e os mecanismos de recarga e descarga de três sistemas cársticos localizados na bacia hidrográfica do rio São Miguel, em Minas Gerais. Para isso, foram utilizados os traçadores fluorescentes, fluoresceína sódica e rodamina WT, amostragem contínua e realizadas modelagem e análises das curvas de restituição dos traçadores usando modelos de equilíbrio e não-equilíbrio para obtenção dos parâmetros de fluxo e transporte (Assunção et al., 2023). Um método denominado "método da favorabilidade da rota cárstica" foi proposto neste estudo, baseado em Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Esse método integra os testes com traçadores fluorescentes, os resultados da modelagem e variáveis geológicas, geomorfológicas e espeleológicas, permitindo indicar as rotas de fluxo mais prováveis do sistema cárstico, reduzindo incertezas e fornecendo índices de sinuosidade e distâncias sinuosas.

Considerando o contexto cárstico da região de Vazante (MG) e sua associação com uma mina subterrânea de extração de Pb e Zn, Ferreira (2023) investigou uma possível conexão hídrica do rio Santa Catarina e a mina subterrânea, por meio de uma avaliação geológico-estrutural, geofísica, sensoriamento remoto e traçadores fluorescentes. Os testes com fluoresceína, rodamina B e PTSA indicaram a conexão do rio com a mina subterrânea, por meio de um sistema de falhas/fraturas e condutos. Além disso, o autor

adotou modelagem numérica (FEFLOW) para realizar simulações de possíveis cenários (adução de água à montante, impermeabilização do leito do rio, tamponamentos dos condutos cársticos e evento de seca extrema), que influenciariam o aumento ou perda das vazões.

Na região cárstica de Mambai (GO), Vieira (2023) realizou estudo com testes com traçadores fluorescentes baseado na abordagem qualitativa, com o objetivo de identificar a direção de fluxo e as conexões hídras do sistema cárstico da Gruta da Tarimba, para entender a dinâmica de circulação da água subterrânea através da rede de condutos cársticos. Para isso, o autor realizou 4 testes com injeção de fluoresceína em quatro pontos do sistema e monitorou pontos com carvão ativado e fluorímetros de campo (modelo GGUN FL 30 ALBILLIA). O estudo permitiu estabelecer nove conexões hidrológicas entre os sistemas cársticos estudados (Tarimba, Matadeiro e Saruê), além

disso constatou que a caverna Extrema se comporta como o local de descarga de todo sistema cárstico estudado, influenciado pelo córrego Extrema, nível de base local.

Atualmente, existem alguns estudos com traçadores fluorescentes sendo desenvolvidos, que são inéditos e outros buscam detalhar as áreas já estudadas. Por exemplo: Barbosa (no prelo) contribui para a descoberta de novas áreas de recarga da APA Cárstica de Lagoa Santa (MG); Oliveira et al. (no prelo) verificam a conexão hídrica em cavernas de quartzito na serra de Ibitipoca (MG); Godinho (no prelo) está estudando a conexão hídrica entre o sistema de cavernas São Rodrigues no carste em São Desidério (BA); Matos (no prelo) estuda a hidrodinâmica do aquífero cárstico em Sete Lagoas (MG) e Oliveira (no prelo) está detalhando os sistemas estudados por Assunção (2021), na região cárstica do Alto São Francisco em Pains (MG).

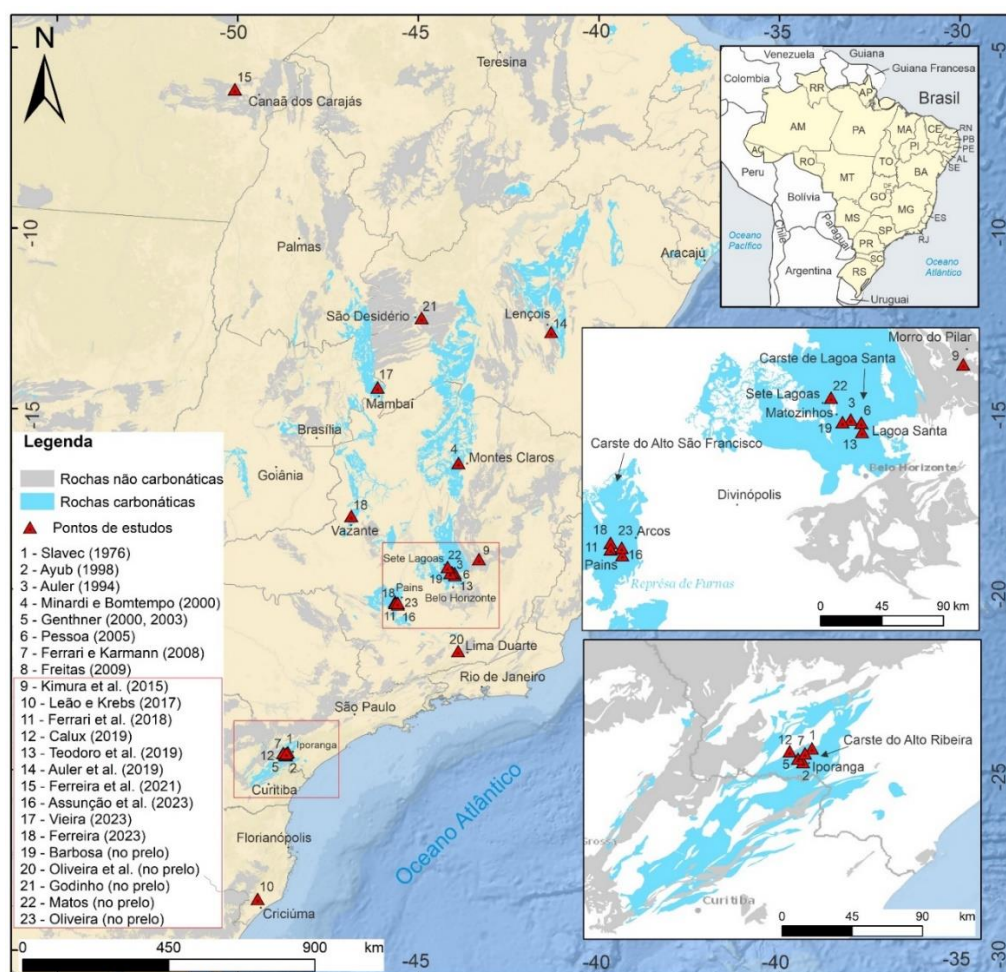


Figura 3 - Mapa de localização dos estudos realizados com traçadores corantes fluorescentes em sistemas cársticos no Brasil, destacando as áreas cársticas..

Conclusão

O método para a identificação de fluxos a partir de traçadores corantes fluorescentes é o mais utilizado atualmente, tendo como referência os estudos avaliados neste trabalho, principalmente na prospecção de fluxos em condutos cársticos ainda pouco estudados. Com os avanços tecnológicos e resultados cada vez mais precisos, a técnica por meio de traçadores corantes demonstrou ser viável economicamente e eficiente.

No Brasil, a técnica de traçadores fluorescentes tem contribuído para avanços no conhecimento dos sistemas cársticos e na compreensão da circulação de águas subterrâneas,

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade de Brasília (UnB) e o apoio financeiro no projeto TCCE 01/2018 Vale/ICMBio: ‘‘Susctibilidade hidrológica e geomorfológica das cabeceiras do Rio Vermelho’.

Referências

- Atkinson, T.C.; Smith, D.I.; Lavis, J.J.; Whitaker, R.J. (1973). Experiments in tracing underground waters in limestones: *Journal of Hydrology*, v. 19, p. 323–349. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90106-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90106-6)
- Atkinson, T. C.; Smart, P.L.; Artificial tracers in hydrogeology. (1981) in *A Survey of British Hydrogeology*, London, Royal Society, p. 173-190.
- Ayub, S. (1998). Aplicação do corante traçador fluorescente Rhodamina-wt no estudo hidrológico e hidrogeológico dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo, município de Iporanga, estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 104p. <https://doi.org/10.11606/D.44.1998.tde11062015-105732>
- Auler, A. S.; Stevanović, Z. (2021). Preface: Five decades of advances in karst hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, v. 29, n. 1, p. 1-6. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02292-x>
- Assunção, P. H. S. (2021). Associação de traçadores corantes e método de favorabilidade de rota cárstica para caracterizar direções de condutos e variabilidade sazonal dos parâmetros do fluxo e transporte em sistemas cársticos na bacia do São Miguel, Brasil. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto.

desempenhando um papel fundamental na proteção desses ambientes. Esses estudos têm sido realizados em áreas importantes, como o carste de Lagoa Santa (MG), do Alto São Francisco (MG), do Alto Ribeira (SP), de São Desidério (BA) e de Mambá (GO) e incluem pesquisas inovadoras, como aquelas conduzidas no carste composto por rochas quartzíticas na Chapada Diamantina (BA), Serra do Espinhaço Meridional (MG) e Serra de Ibitipoca (MG), além de carste formado por rochas ferruginosas, como na serra de Carajás (PA). No entanto, ainda existe uma grande lacuna de estudos em outras áreas cársticas no Brasil, que também carecem ser exploradas e estudadas.

- 101p. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/14330>. Acesso em 03 de jan. 2023.
- Assunção, P.; Galvão, P.; Lucon, T.; Doi, B.; Fleming, P M.; Marques, T.; Costa, F. (2023). Hydrodynamic and hydrodispersive behavior of a highly karstified neoproterozoic hydrosystem indicated by tracer tests and modeling approach. *Journal of Hydrology*, v. 619, ISSN 0022-1694. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129300>
- Benischke R. (1989). *Hydrology: principles instrumentation físico—chemical properties analytics*. Austria Institute of Hydrogeology & Geothermics-Joanneum Research, 64p.
- Barczewski, B.; Kass, W.; Schmid, G.; Werner, A. (1996). New possibilities and applications of groundwater marking technology, v. 86, p. 20-24.
- Benischke, R.; Goldscheider, N.; Smart, C. (2007). Tracer techniques. In: Goldscheider N, Drew D (eds) *Methods in karst hydrogeology*. Taylor and Francis, London, 147–170p. <https://doi.org/10.1201/9781482266023>
- Benischke, R. (2021). Review: Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. *Hydrogeology Journal*. V.29. 67-88p. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02278-9>
- Calux, A. S. (2019). A dinâmica da drenagem subterrânea no planalto cárstico Alambari-Ouro Grosso, Iporanga- SP. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências. 146p. <https://doi.org/10.11606/T.44.2019.tde22082019-140046>
- Dunn, J. R. (1957). Stream tracing. *Mid-Appalachian Bull. Natl. Spe-leol. Soc.*, 2, 7.
- Drew, D.; Hötzl, H. (1999). Karst Hydrology and Human Activities. *International Contributions to Hydrogeology*. A. A. Balkema, International

- Association of Hydrologists, pp. 322, Rotterdam. <https://doi.org/10.1201/9780203749692>
- Ferrari, J. A.; Karmann, I. (2008). Comportamento hidrodinâmico de sistemas cársticos na bacia do rio Betari, Município de Iporanga-SP. Geologia USP. Série Científica, v8, ed.1, p. 1-13
- Ferrari, J. A.; Ribeiro, A. A.; Ferreira, C. F.; Cruz J. B.; Reino, J. C. R.; Piló, L. B. (2018). Identificação e Caracterização Hidrológica da Área de Influência da Gruta Do Éden - Pains – MG. São Paulo, v(1), p 34.
- Ferreira, B. S. C. (2020). Análise crítica da metodologia de traçadores químicos fluorescentes para estudo da influência hídrica ao entorno de cavidades ferríferas: estudo de caso Serra do Norte, Carajás/PA. 2020. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/13128>
- Ferreira, B. D. S. C.; Bacellar, L. D. A. P.; Lima, H. M. D. (2021). Comparação entre traçadores químicos fluorescentes e seus respectivos resultados obtidos através da metodologia de injeção de traçadores no entorno de cavidades para detecção de influência hídrica. Estudo de caso em Serra Norte, Carajás/PA. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v35i1.29968>
- Ferreira, O. B. (2023). Multi-technical approach to evaluate the impacts caused by the Vazante Mine (MG) on the Santa Catarina River flow loss through the overexploitation of a fissure-karst aquifer and simulation of mitigating solutions by numerical modeling (Master dissertation, Universidade de São Paulo). Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-07122023-082334/en.php>
- Field, M. S. (1995). Wilhelm, R. G.; Quinlan, J. F.; Aley, T. J. An assessment of the potential adverse properties of fluorescent tracer dyes used for groundwater tracing. Environmental Monitoring and Assessment, 38: 75–96. <https://doi.org/10.1007/BF00547128>
- Field, M.S. (1999a). Quantitative analysis of tracer breakthrough curves from tracing test in karst aquifers. In: Karst Waters Institute, Karst Modeling Symposium, Virginia, Proceedings, 163-171.
- Field, M. (2002b). The QTRACER2 Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other Hydrologic Systems, U.S. Environmental Protection Agency. EPA, Washington, D.C. Disponível em: <http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS44856>. Acesso em 05 de jan. de 2023.
- Field, M. S. (2003a). Tracer-test planning using the efficient hydrologic tracer-test design (EHTD) program. EPA/600/R-03/034 US EPA, Washington, DC.
- Ford, D.; Williams, P. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology. Second ed. Chichester: Wiley. 562p. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- Gaspar, E. (1987). Flowthrough hydrokarstic structures. Modern Trends in Tracer Hydrology. Boca Raton, CRC Press, 2, 137 p.
- Gillieson, D. (1996). Caves. Processes, Development, Management. Oxford, England: Blackwell. 324p. Doi:10.1002/9781444313680
- Genthner, C. (2001). Aplicação do traçador fluorescente rodamina-WT no estudo geohidrológico da área carbonática Lajeado-Bombas, Vale do Betari, sul do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.44.2001.tde-18092015-171000>
- Genthner, C.; Ferrari, J.; Karmann, I. (2003). Identificação das áreas de recarga de fontes cársticas com o uso do traçador rodamina FWT (área carbonática Lajeado - Bombas, Iporanga-SP). Revista do Instituto Geológico. 24. 11-23p. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20030002>
- Goldschneider, N. (2005). Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabian Alb, Germany. Hydrogeology Journal, v. 13, p. 555-564. <https://doi.org/10.1007/s10040-003-0291-3>
- Goldscheider, N.; Drew, D (2007). Methods in Karst Hydrogeology. International Contributions to Hydrogeology. 26, London, Taylor & Francis, 264p. <https://doi.org/10.1201/9781482266023>
- Geyer, T.; Birk S.; Liedl R.; Sauter, M. (2008). Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs. J Hydrol. 348:452–463. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.015>
- Goldscheider, N., Meiman, J., Pronk, M., Smart, C. (2008). Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. International Journal of Speleology, Bologna, 37: 27-40. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.3>
- Gutierrez, A.; Klinka, T.; Thiéry, D.; Buscarlet, E.; Binet, S.; Jozja, N.; Défarge, C.; Leclerc, B.; Fécamp, C.; Ahumada, Y.; Elsass, J. (2013). TRAC, a collaborative computer tool for tracer-

- test interpretation. EPJ WebConf, v. 50, p. 03002.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/20135003002>
- Gutiérrez, F.; Parise, M.; De Waele, J.; Jourde, H. (2014). A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst, *Earth-Science Reviews*, 61-88p, ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>
- Goldscheider, N. (2015). Overview of Methods Applied in Karst Hydrogeology. In: Stevanović, Z. (eds) *Karst Aquifers—Characterization and Engineering*. Professional Practice in Earth Sciences. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4>
- Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A.S. (2020). Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeol J* 28, 1661–1677. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>
- Hossain, Md.; Canning, J.; Ast, S.; Rutledge, P.; Li Yen, T.; (2014). A Lab-in-a-Phone: Smartphone-Based Portable Fluorometer for pH Measurements of Environmental Water. *IEEE Sensors Journal*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1405.4357>
- Hartmann, A., N. (2014). Goldscheider, T.; Wagener, J.; Lange, M. Weiler. *Karst Water Resources in a Changing World: Review of Hydrological Modeling Approaches*. *Reviews of Geophysics* 52 (3): 218–42, 2014. <https://doi.org/10.1002/2013RG000443>
- Jones, W, K. (1984a). Dye Tracer Tests in Karst Areas. *National Speleological Society Bulletin*, v. 46, p.3-9.
- Käss, W. (1998). Tracing technique in geohydrology. Roterdão, Balkema. 592 p. <https://doi.org/10.1201/9780203735282>
- Karmann, I. (2001). Carste e cavernas; paisagens subterrâneas. In: *Decifrando a Terra*. (orgs, Wilson Texeira, et al.). São Paulo: Ed. Ofi cina de textos. P. 129-138.
- Kimura, G.; Pessoa, P.; Rinaldo, F. (2015). Águas e Cavernas. In: *Cavernas da Serra do Espinhaço Meridional* (ogs. Auler, A.; Alt, L.; Moura, V.; e Leão, M.), p 201-213.
- Klimchouk, A.; Ford, D.; Palmer, A. (2000). Wolfgang, D. *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. [https://doi.org/10.1016/S00221694\(00\)00341-3](https://doi.org/10.1016/S00221694(00)00341-3)
- Leibundgut, C.; Maloszewski, P.; Küll, C. (2009). *Tracers in Hydrology*. Wiley-Blackwell. Chichester, UK. Lemke D. Liao Z, Wöhling T, Osenbrück, ISBN: 978-0-470-51885-4, 432p.
- Leibundgut, C.; Seibert, J. (2011). *Tracer Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/B978044453199-5.00036-1>
- Mariano, A. M., Rocha, M. S. (2017). Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora. XXVI Congresso Internacional AEDEM. Economy, Business and Uncertainty: ideas for a European and Mediterranean industrial policy, Reggio Calabria (Italia).
- Minardi, P. S. P.; Bomtempo, V. L. (2000). Traçadores e técnicas isotópicas em hidrologia subterrânea: a experiência do CDTN/CNEN, Brasil. *Águas Subterrâneas*. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneaarticle/view/23757> .
- Müll, D. S.; Liebermann, T. D.; Smoot, J. L.; Woosley, L. H, JR. (1988). Application of dye tracking techniques to determine the solute transport characteristics of groundwater in karst terranes. U.S. Environmental Protection Agency, Region 4, EPA 904/6-88-001, 103 p. Disponível em: https://digitalcommons.usf.edu/kip_articles/229. Acesso em 14 de jan. de 2023.
- Maloszewski, P.; Stichler, W.; Zuber, A.; Rank, D. (2002). Identifying the flow systems in a karstic fissured-porous aquifer, the Schneealpe, Austria, by modelling of environmental O-18 and H-3 isotopes. *J Hydrol* 256:48–59. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)005261](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)005261)
- Maliva, R. G. (2016). *Aquifer Characterization Techniques (Schlumberger Methods in Water Resources Evaluation Series No. 4)*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32137-0>.
- Mudarra, M.; Hartmann, A.; Andreo, B.; (2019). Combining experimental methods and modeling to quantify the complex recharge behavior of karst aquifers: *Water Resources Research*, v. 355, no. 2, p. 1384–1404. <https://doi.org/10.1029/2017WR021819>.
- Miller, B.V.; Tobin, B. (2023). Mapping karst groundwater flow paths and delineating recharge areas for Fern Cave, Alabama, through the use of dye tracing: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3506, 2 sheets, <https://doi.org/10.3133/sim3506>. ISSN: 2329-132X (online).
- Aliouache, M.; Fischer, P.; Brunet, P.; Lapierre, L.; Ropars, B.; Vasseur, F.; Jourde, H.. (2024). Influence of karst conduit's geometry and morphology on 3D flow and transport processes: Insights from 3D tracer tests and numerical modelling, *Journal of Hydrology*, Volume 632, ISSN 0022-1694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130953>.
- Piló, L. B. (2000). Geomorfologia Cárstica - Revisão de Literatura. *Revista Brasileira de*

- Geomorfologia, 1, 1, 88-102. <https://doi.org/10.20502/rbg.v1i1.73>
- Pessoa, P. F. P. (2005). Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG. SMARH/UFMG, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, 375 p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/ENG-D-6LBJ3W>. Acesso em 14 de fev. De 2023.
- Palmer, A.N. (2007). Cave Geology. Dayton: Cave Books. 454 p.
- Piló, L. B. (2011). Auler, A. Cap I. Introdução à Espeleologia. In: CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental. Brasília: CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Cap. 1, p. 7-23. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313024638_Introducao_a_Espeleologia. Acesso em 11 de jan. de 2023.
- Priebe, E.H., Brunton, F.R., Rudolph, D.L., and Neville, C.J. (2018). Geologic controls on hydraulic conductivity in a karst-influenced carbonate bedrock groundwater system in southern Ontario, Canada: Hydrogeology Journal, v. 27, no. 4, p. 1291–1308, accessed December 2021 at <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1911-2>.
- Quinlan, J. F.; Ewers, R.O. (1989). Subsurface drainage in the Mammoth Cave área. White, W.B., and White, E.L., eds., Karst hydrology concepts from the Mammoth Cave area: New York, Van Nostrand Reinhold, p. 65–104.
- Ren, K.; Pan, X.; Peng, C.; Chen, J.; Li, J.; Zeng, J. (2023). Tracking contaminants in groundwater flowing across a river bottom within a complex karst system: Clues from hydrochemistry, stable isotopes, and tracer tests, Journal of Environmental Management. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118099>
- Slavec, P. (1976). Pesquisas do conjunto hidrológico das Areias, Municípios de Iporanga, estado de São Paulo. Espeleo-tema: Reedição Histórica, São Paulo, v. 8, p.16-22.
- Smart, P. L.; Smith, D. I. J. (1976). Water Tracing Techniques in tropical regions, the use of fluorometric techniques in Jamaica. Journal of Hydrology, 179-195. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(76\)90097-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(76)90097-4)
- Smart, C.C. (1988). Artificial tracer techniques for the determination of the structure of conduit aquifers. Ground Water 26(4):445–453. <https://doi.org/10.1111/j.17456584.1988.tb00411.x>
- Smart, P. L.; Laidlaw, I. M. S. (1977). An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing. Water Resour. Res., 13(1), 15–33. <https://doi.org/10.1029/WR013i001p00015>
- Smart, C.C.; Zabo, L.; Alexander, E.C., Jr. (1998). Worthington, S.R.H. Some advances in fluorometric techniques for water tracing: Environmental Monitoring and Assessment, v. 53, p. 305–320. <https://doi.org/10.1023/A:1005816719920>
- Schnegg, P. A. (2002). An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. In: Bocanegra E, Martinez D, Massone H (eds) XXXII IAH and ALHSUD Congress on Groundwater and Human Development. Mar del Plata, Argentina, October. <https://doi.org/10.1007/s00254-001-0517-4>
- Smart, C.C. (2005). Error and technique in fluorescent dye tracing, in Beck, B.F., ed., Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst: Reston, Va., American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication no. 144, p. 500–509. [https://doi.org/10.1061/40796\(177\)53](https://doi.org/10.1061/40796(177)53)
- Stevanović, Z. (2015). Karst Aquifers – Characterization and Engineering. Series: Professional Practice in Earth Science, Springer Intern. Publ., 692 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4>
- Souza, T.; Auler, A. O. (2018). Carste de Vazante-Paracatu Unai: Revelando Importâncias, Recomendando Refúgios. 1 a Edição. Carste Ciência e Meio Ambiente. Belo Horizonte. 14p.
- Simaubi, M.; Banda, K.; Levy, J. (2023). Dye tracing of the Lusaka karstified aquifer system: implications towards urban groundwater quality protection. Environ Monit Assess 195, 732. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11272-z>
- Tavares, A. S., Vieira, M. S., & Uagoda, R. E. S. (2023). Desafios e Alternativas na Simulação da Dinâmica Hidrológica e Sedimentológica em Sistemas Cársticos. Revista Brasileira De Geografia Física, 16(4), 1714–1731. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.4.p1714-1731>
- Toride, N.; Leij, F. J.; Van Genuchten, M. T. (1999). The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments. Research Report No. 137, US Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/247824027_The_CXTFIT_Code_for_Estimating_Transport_Parameters_from_Laboratory_or_Field_Tracer_Experiments. Acesso em 12 de fev. 2023.

- Tang, G.; Mayes, M. A.; Parker, J. C.; Jardine, P. M. (2010). CXTFIT/Excel: a modular adaptable code for parameter estimation, sensitivity analysis and uncertainty analysis for lab and field tracer experiments. *Comput Geosci*, v. 36, n. 9, p. 1200-1209. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.01.013>.
- Vieira, M. S. (2023). Estudo das conexões hidrológicas no sistema cárstico Gruta da Tarimba, Mambaí, Goiás. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade de Brasília. 119 p.
- White, W.B. (2005). Hydrology of karst aquifers. In: Culver, D. C.; White, W. B. (Ed.). *Encyclopedia of Caves*. London: Elsevier Academic Press. First Edition. ISBN: 0121986519. p. 293-300..
- White, W. B. (2012). Hidrogeology of karst aquifers. In: Culver, D. C., White, W. B. (Ed.). *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier. ISBN: 9780123838339. p. 383-391.
- White, W.B.; White, E.L. (2013). Karst landforms:scope and processes in the early twenty-first century. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). *Treatise on geomorphology*. San Diego (CA): Academic Press. p. 14-22 (Volume 6, Karst Geomorphology), 2013. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00142-1>