

VRB Esp

Revista Brasileira de ESPELEOLOGIA

Edição Especial, V.01 - Nº 13 de 2024
ISSN 2179.4952

EDIÇÃO ESPECIAL

2º Prêmio
Nacional
de Espeleologia



Michel
Le Bret



Equipe editorial

Júlio Ferreira da Costa Neto, Jocy Brandão Cruz, Julio César Rocha Costa,
Diego de Medeiros Bento, Thais Xavier Nunes e Claudia Simone da Luz Alves.



VRBEsp
Revista Brasileira de
ESPELEOLOGIA

Brasília-DF
2024



Expediente edição especial

Publicada pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav www.icmbio.gov.br/cecav
Endereço: Parque Nacional de Brasília. Rodovia BR 450, km 8,5 via Epia. CEP: 70635-800, Brasília/DF. Brasil.
Telefone: +55 (61) 2028-9792.

Editores

Júlio Ferreira da Costa Neto

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Jocy Brandão Cruz

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Comissão de apoio editorial

Claudia Simone da Luz Alves

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Thais Xavier Nunes

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Diego de Medeiros Bento

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

Julio César Rocha Costa

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil.

Comissão Científica da edição especial

Dr. Allan Silas Calux

Scientific Director at Carstografica –Karst Applied Research Centre, Campinas, São Paulo, Brasil.

Me. Xavier Prous

Analista de Meio Ambiente na Gerência de Espeleologia da Mineradora Vale S.A.

Coordenação editorial

Javiera de la Fuente C.

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Projeto gráfico

Bruno Silva Bastos

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Diagramação

Júlia Mendes Araújo

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Foto da capa

Gruta Ermida, Almirante Tamandaré /PR / **Rodrigo Lopes Ferreira**

Catálogo na Fonte

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Revista Brasileira de Espeleologia. Edição Especial – 2º Prêmio Nacional de Espeleologia Michel Le Bret / Julio Ferreira da Costa Neto e Jocy Brandão Cruz (ed.) – Brasília: ICMBio, 2024.

ISSN 2179.4952 - Online

368 p. ; Il. Color.

1. Espeleologia. 2. Estudos Ambientais. 3. Geomorfologia cárstica. 4. Biologia subterrânea. I. Julio Ferreira da Costa Neto II. Jocy Brandão Cruz. III. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio. VI. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav. V. Título.

CDU: 551.44

A reprodução total ou parcial desta obra é permitida, desde que citada a fonte.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE
Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade
Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
Rodovia BR 450, km 8,5 via Epia – Parque Nacional de Brasília
CEP: 70635-800 - Brasília/DF - Tel: 61 2028-9792
<http://www.icmbio.gov.br/CECAV>

VULNERABILIDADE INTRÍNSECA E HIDRODINÂMICA DO SISTEMA CÁRSTICO DA GRUTA ÉDEN, PAINS – MG

HYDRODYNAMICS AND INTRINSIC VULNERABILITY OF THE ÉDEN CAVE KARST SYSTEM, PAINS - MG

Pedro Henrique da Silva Assunção

Universidade Federal de Minas Gerais Sociedade
Excursionista e Espeleológica - SEE
Espeleogrupos Pains - EPA
E-mail: pedroassuncao94@hotmail.com

Paulo Henrique Ferreira Galvão

Universidade Federal de Minas Gerais
E-mail: hidropaulo@gmail.com

Thiago Nogueira Lucon

Universidade Federal de Ouro Preto Sociedade
Excursionista e Espeleológica – SEE
E-mail: thiago.n.lucon@gmail.com

Peter Marshall Fleming

Centro de Desenvolvimento da
Tecnologia Nuclear - CDTN
E-mail: pmf@cdtn.br

Bruno Doi

Universidade de São Paulo

Tássia Marques

Universidade Federal de Ouro Preto

RESUMO

Os aquíferos cársticos são naturalmente mais vulneráveis à contaminação do que os demais tipos de aquífero, além de serem constituídos por complexas redes de condutos e sistemas de cavernas, cujo fluxo subterrâneo pode ser turbulento, onde as águas superficial e meteórica podem ser rapidamente transferidas para a zona freática. Essas características heterogê-

ABSTRACT

Karst aquifers are naturally more vulnerable to contamination than other types of aquifer. They are made up of complex conduits and cave systems networks, where surface and meteoric water can be rapidly transferred to the phreatic zone where underground flow can be turbulent. These heterogeneous and anisotropic characteristics makes it difficult to determine the karst network and

neas e anisotrópicas resultam em dificuldades na determinação da rede cárstica e direções de fluxo, sendo necessário associar métodos específicos de hidrogeologia cárstica. Este artigo busca mapear as zonas de vulnerabilidade intrínseca do sistema cárstico da Gruta Éden (maior caverna da região) da bacia do rio São Miguel, MG, além de compreender suas variações espacial e sazonal dos parâmetros de fluxo (velocidade média e dispersão longitudinal), e seus mecanismos de recarga e descarga. Assim, foi adaptado o método EPIK para mapear as zonas de vulnerabilidade do sistema associando com testes de traçadores (fluoresceína sódica) durante as estações seca e chuvosa, e analisadas as curvas de restituição dos traçadores para obter os parâmetros de fluxo. Os resultados mostram que o fluxo é controlado por dobras formando janelas cársticas e por fraturas/falhas subverticais com direções NW-SE e N-S. A recarga demonstrou ser difusa em locais com maiores espessuras de solos e concentrada em dolinas, sumidouros e maciços rochosos; as zonas de descargas estão próximas às margens do rio São Miguel, que é o nível de base local. As curvas de restituição dos traçadores mostraram que este sistema é sensível às variações sazonais e apontaram a existência de heterogeneidades, que controlam a variação dos parâmetros de fluxo. As zonas de maiores vulnerabilidades estão relacionadas às áreas sem cobertura protetora com recarga concentrada (autogênica) e às maiores velocidades de fluxo. A associação de diferentes técnicas mostrou-se eficaz para entender o comportamento hidrodinâmico e sua relação com a vulnerabilidade do sistema cárstico.

PALAVRAS-CHAVE: hidrogeologia cárstica, Traçador fluorescente, Vulnerabilidade Intrínseca, Sistema cárstico.

flow directions, being necessary to apply specific karst hydrogeology methods. This article aims to map the intrinsic vulnerability zones of the Éden Cave karst system (the largest cave in the region) in the São Miguel river watershed, MG, as well as understanding its spatial and seasonal variations in flow parameters (mean velocity and longitudinal dispersion), and its recharge and discharge mechanisms. Therefore, the EPIK method was adapted to map the system's vulnerability zones, associated with tracer tests (sodium fluorescein) during the dry and rainy seasons, and the breakthrough tracer curves were analyzed to obtain the flow parameters. The results show that the flow is controlled by folds forming karst windows and by subvertical fractures/faults in NW-SE and N-S directions. Recharge proved to be diffuse in places with thicker soils and concentrated in dolines, sinkholes and rock masses; the discharge zones are close to the São Miguel riverbanks, which is the local base level. The breakthrough tracer curves showed that this system is sensitive to seasonal variations and pointed to the existence of heterogeneities, which control the variation of the flow parameters. The greatest vulnerability zones are related to areas without protective cover with concentrated recharge (autogenic) and the highest flow velocities. The combination of different techniques proved to be effective in understanding the hydrodynamic behavior and its relationship with the vulnerability of the karst system.

KEYWORDS: Karst hydrogeology, Fluorescent tracer, Intrinsic vulnerability, Karst system.

INTRODUÇÃO

Os sistemas cársticos se desenvolvem pela dissolução de rochas solúveis, promovendo a espeleogênese, formando redes complexas de condutos e cavernas. Esse processo cria espaços vazios (porosidade terciária), onde a água é transmitida e armazenada, dando origem aos aquíferos cársticos. A rede cárstica pode passar por mudanças ao longo do tempo, como colapsos de cavernas, preenchimento de condutos por sedimentos, ter oscilações internas da superfície freática, além de surgências que podem ser reativadas durante condições chuvosas. Essas mudanças conferem, ao aquífero cárstico, alta variabilidade temporal e espacial dos parâmetros hidráulicos (velocidade de fluxo, dispersão e condutividade hidráulica). A variabilidade sazonal depende das condições climáticas e hidrológicas, que podem alterar a hidrodinâmica da rede cárstica em um curto intervalo de tempo. Por isso, esse tipo de aquífero é considerado heterogêneo e anisotrópico, dificultando o entendimento da circulação da água subterrânea e, sobretudo, altamente vulnerável à contaminação antrópica (White, 2003; Ford & Willians, 2007; Palmer, 2007; Goldscheider & Drew, 2007; Worthington & Ford, 2009; Klimchouk, 2015).

Os aquíferos cársticos naturalmente possuem uma maior vulnerabilidade à contaminação do que os demais tipos de aquífero, onde o fluxo rápido e turbulento não permitindo que haja tempo suficiente para possíveis atenuações de contaminantes (Gutiérrez *et al.*, 2014). As águas superficiais são rapidamente transferidas para o sistema subterrâneo conferindo-lhe uma recarga rápida, por meio de feições cársticas, como dolinas e sumidouros, podendo ser possí-

INTRODUCTION

Karst systems develop through the dissolution of soluble rocks, promoting speleogenesis and forming complex networks of conduits and caves. This process creates empty spaces (tertiary porosity) where water is transmitted and stored, giving rise to karst aquifers. The karst network can undergo changes over time, such as the collapse of caves, the filling in of conduits by sediments, internal oscillations in the phreatic surface, and springs that can be reactivated during rainy conditions. These changes give karst aquifers high temporal and spatial variability in hydraulic parameters (flow velocity, dispersion and hydraulic conductivity). Seasonal variability depends on climatic and hydrological conditions, which can alter the hydrodynamics of the karst network over a short period of time. For this reason, this type of aquifer is considered heterogeneous and anisotropic, making it difficult to understand groundwater circulation and, above all, highly vulnerable to anthropogenic contamination (White, 2003; Ford & Willians, 2007; Palmer, 2007; Goldscheider & Drew, 2007; Worthington & Ford, 2009; Klimchouk, 2015).

*Karst aquifers have a greater natural vulnerability to contamination than other types of aquifers, where rapid and turbulent flow does not allow sufficient time for possible attenuation of contaminants (Gutiérrez *et al.*, 2014). Surface water is quickly transferred to the underground system, giving it rapid recharge, through karst features such as dolines and sinkholes, which can be possible routes for contaminants entry. Piló (1999) and Ferreira (2019) point to common environmental problems in Brazilian karst regions, such as water contamination, changes in water dynamics, deforestation, farming, mineral extraction, urbanization and industrialization. One way of protecting ground-*

veis rotas de entrada do contaminante. Piló (1999) e Ferreira (2019) atentam para problemas ambientais comuns em regiões cársticas no Brasil, como contaminação da água, alterações da dinâmica hídrica, desmatamento, agropecuária, extração mineral, urbanização e industrialização. Uma das maneiras de proteção dos recursos hídricos subterrâneos em carste se dá mediante ao mapeamento das zonas de vulnerabilidade e de recarga, utilizando métodos desenvolvidos especificamente para aquíferos cársticos (Stevanović, 2015; Younos et al., 2018).

A vulnerabilidade intrínseca à contaminação de um aquífero pode ser definida como a sensibilidade do aquífero quando este é submetido a uma determinada carga de contaminante, que é influenciada pela capacidade natural de atenuação à contaminação. Por outro lado, o risco de poluição pode ser considerado como a interação das características dessa vulnerabilidade intrínseca com a carga de contaminante de origem antrópica (Foster et al., 2002). O método EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998) trata-se de uma análise multicritério ou paramétrica baseada em SIG (Sistemas de Informação Geográfica) que propõe o mapeamento do índice de vulnerabilidade intrínseca de águas subterrâneas em regiões cársticas. Além disso, são definidas zonas de proteção (S) para as classes estabelecidas pelo Fator de Proteção (F) no mapa de vulnerabilidade. Marín et al. (2015) fazem uma proposta semelhante em que se define recomendações para gestão das áreas de proteção ambiental, que podem ser adaptadas de acordo com a realidade de cada país. No Brasil, o método EPIK foi aplicado em estudos realizados em uma porção da Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas (Ribeiro, 2016), no Parque Estadual do Intervalos em São Paulos (Lenhare, 2014), na

water resources in karst is by mapping vulnerability and recharge zones, using specific methods developed for karst aquifers (Stevanović, 2015; Younos et al., 2018).

An aquifer intrinsic vulnerability to contamination can be defined as the aquifer sensitivity when it is subjected to a certain contaminant load, which is influenced by the natural capacity to mitigate contamination. On the other hand, the risk of pollution can be considered as the interaction between the characteristics of this intrinsic vulnerability and the contaminant load of anthropogenic origin (Foster et al., 2002). The EPIK method (Doerfliger & Zwahlen, 1998) is a multi-criteria or parametric analysis based on GIS (Geographic Information Systems) that proposes mapping the intrinsic vulnerability index of groundwater in karst regions. In addition, protection zones (S) are defined for the classes established by the Protection Factor (F) on the vulnerability map. Marín et al. (2015) make a similar proposal in which they define recommendations for the management of environmental protection areas, which can be adapted according to the reality of each country. In Brazil, the EPIK method has been applied in studies carried out in a portion of the Sergipe-Alagoas Sedimentary Basin (Ribeiro, 2016), the Intervalos State Park in São Paulo (Lenhare, 2014), the Salitre River Basin in Bahia (Melo, 2017) and the São Miguel river watershed (Pereira et al., 2019). On a regional scale, Pereira et al. (2019) proposed an adaptation of the EPIK considering the reality of a Brazilian karst region. For this article, an intrinsic vulnerability assessment was adopted based on the adaptation of the EPIK method proposed by Pereira et al. (2019), according to the contexts of the São Miguel River basin and the Neoproterozoic karst aquifer.

Bacia Hidrográfica do Rio Salitre na Bahia (Melo, 2017) e na bacia do Rio São Miguel (Pereira *et al.*, 2019). Na escala regional, Pereira *et al.* (2019) propõe uma adaptação do EPIK considerando a realidade de uma região cárstica brasileira. Para este artigo, adotou-se avaliação de vulnerabilidade intrínseca a partir da adaptação do método EPIK, proposta por Pereira *et al.* (2019), de acordo com os contextos da bacia do rio São Miguel e do aquífero cárstico neoproterozoico.

A técnica de traçadores corantes fluorescentes é uma excelente ferramenta na delimitação das áreas de contribuição hídrica de surgências cársticas, na estimativa de velocidade do fluxo e tempo de trânsito, e na determinação de áreas de recargas e descarga. Os corantes são substâncias orgânicas sintéticas que possuem propriedade de fluorescência, normalmente são ausentes nas águas naturais, seguros à saúde humana e altamente detectáveis, o que os tornam muito eficazes. A fluoresceína sódica (uranina) e rodamina WT são considerados os principais traçadores conservativos utilizados em áreas cársticas. Ao depender do objetivo e da abordagem aplicada no estudo, as análises dos resultados podem ser tanto qualitativas quanto quantitativas (Field, 2002; Smart, 2005; Benischke *et al.*, 2007; Leibundgut *et al.*, 2009; Benischke, 2021). As análises quantitativas são baseadas nas curvas de restituição de traçadores conservativos, *breakthrough tracer curves* (BTCs), e nos princípios de transporte de solutos (advecção e dispersão), em que é possível obter dados (velocidades de fluxo e coeficiente de dispersão) sobre processos de transporte do fluxo da rede cárstica e de sistemas de cavernas (Goldscheider, 2008; Morales *et al.*, 2010; Lauber *et al.*, 2014; Barberá *et al.*, 2017; Ender *et al.*, 2018; Goepfert *et al.*, 2020). Além disso, a técnica de

*The fluorescent dye tracers technique is an excellent tool for delineating the water contribution areas of karst springs estimating flow velocity and transit time, and determining recharge and discharge areas. Dyes are synthetic organic substances that have fluorescent properties, are normally absent in natural waters, safe for human health and highly detectable, which makes them very effective. Fluorescein sodium (uranine) and rhodamine WT are considered the main conservative tracers used in karst areas. Depending on the objective and approach applied in the study, the analysis of the results can be either qualitative or quantitative (Field, 2002; Smart, 2005; Benischke *et al.*, 2007; Leibundgut *et al.*, 2009; Benischke, 2021). Quantitative analyses are based on conservative tracers, breakthrough tracer curves (BTCs), and the principles of solute transport (advection and dispersion). In these analysis it is possible to obtain data (flow velocities and dispersion coefficients) on flow transport processes in the karst network and cave systems (Goldscheider, 2008; Morales *et al.*, 2010; Lauber *et al.*, 2014; Barberá *et al.*, 2017; Ender *et al.*, 2018; Goepfert *et al.*, 2020). In addition, the fluorescent tracer technique can be used to validate and complement vulnerability maps, since they point out the recharge and infiltration points of the system, as well as flow velocities, arrival time, transit time and concentrations along the underground route sections (Zwahlen, 2004; Marín *et al.*, 2015).*

*In Brazil, karst develops mainly in limestones and dolomites from the Neoproterozoic (~740-590 Ma), which makes up about 4% of the country's continental area, where several cities use groundwater from karst systems (Rubioli *et al.* 2019). The study area comprises the Éden Cave karst hydrosystem (26 km²), in the São Miguel River basin (520 km²), in the southwest of Minas Gerais*

traçadores fluorescentes pode ser usada para validar e complementar mapas de vulnerabilidade, uma vez que eles apontam os pontos de recarga e infiltração do sistema, assim como as velocidades do fluxo, tempo de chegada, tempo de trânsito e concentrações ao longo dos trechos das rotas subterrâneas (Zwahlen, 2004; Marín *et al.*, 2015).

No Brasil, o carste se desenvolve principalmente em calcários e dolomitos do Neoproterozoico (~740-590 Ma), constituindo cerca de 4% da área continental do país, onde diversas cidades utilizam a água subterrâneas dos sistemas cársticos (Rubiolli *et al.* 2019). A área de estudo compreende o hidrossistema cárstico da Gruta Éden (~26 km²), na bacia do rio São Miguel (~520 km²), sudoeste do estado de Minas Gerais, a 220 km da capital Belo Horizonte. A bacia do rio São Miguel faz parte da região cárstica do Alto São Francisco que apresenta feições típicas de relevo cárstico, como dolinas, sumidouros, surgências, cavernas e drenagens subterrâneas. Esta região está inserida na borda da Bacia São Francisco próximo à Faixa Brasília Meridional e sistemas de falhas transcorrentes sinistrais e dobramentos. A geologia é constituída predominantemente por rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí) que atua como reservatório de água subterrânea (Saadi *et al.*, 1998; Alkmim & Martins Neto, 2001; Menegasse *et al.*, 2002; Santos, 2002; Dias & Velásques, 2002; Camaduro *et al.*, 2007; Ribeiro *et al.*, 2008; Freitas, 2009; SEE, 2012; Meyer, 2018; Ferrari *et al.*, 2017; Lucon *et al.*, 2020, Lucon *et al.*, 2022) (Fig. 1).

Este artigo busca mapear as áreas de vulnerabilidade intrínseca do aquífero cárstico do hidrossistema da Gruta Éden na bacia do São Miguel,

*state, 220 km from the capital Belo Horizonte. The São Miguel river watershed is part of the Alto São Francisco Karst Region, which has typical karst relief features such as dolines, sinkholes, springs, caves and underground drainages. This region is located on the edge of the São Francisco watershed near the Southern Brasília Belt sinistral transcurrent faults and folds systems. The geology predominantly consists of carbonate rocks of the Sete Lagoas Formation (Bambuí Group), which acts as a groundwater reservoir (Saadi *et al.*, 1998; Alkmim & Martins Neto, 2001; Menegasse *et al.*, 2002; Santos, 2002; Dias & Velásques, 2002; Camaduro *et al.*, 2007; Ribeiro *et al.*, 2008; Freitas, 2009; SEE, 2012; Meyer, 2018; Ferrari *et al.*, 2017; Lucon *et al.*, 2020, Lucon *et al.*, 2022) (Fig. 1).*

This article aims to map the intrinsic vulnerability areas of the Éden Cave hydrosystem karst aquifer in the São Miguel watershed, Pains (MG), considering its complexity, aquifer heterogeneity, spatial and seasonal variations in flow and transport parameters along the main route, recharge and discharge mechanisms, and the evolution of water and speleogenetic dynamics. In addition, environmental protection measures that can serve to improve the environmental management of the hydrosystem by the public authorities are proposed.

Pains (MG), considerando a sua complexidade, heterogeneidade do aquífero, variações espacial e sazonal de parâmetros de fluxo e transporte ao longo da principal rota, mecanismos de recarga e descarga, e evolução da dinâmica hídrica e espeleogenética. Além disso, são propostas medidas de proteção ambiental que possam servir para uma melhor gestão ambiental do poder público para o hidrossistema.

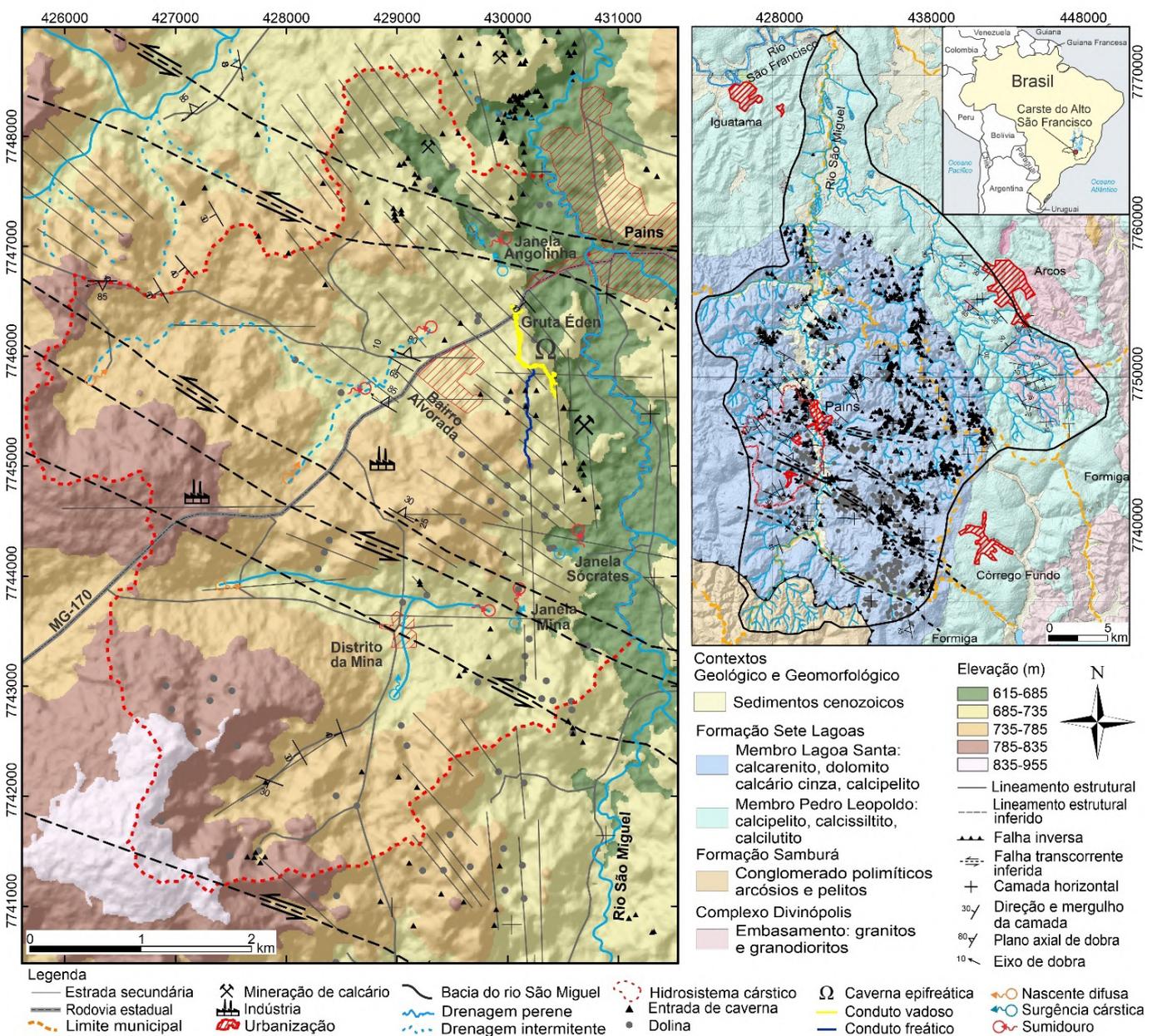


Figura 1 - Mapa mostrando a localização do hidrossistema da Gruta Éden que faz parte da bacia do rio São Miguel e o contexto geológico-estrutural, geomorfológico e espeleológico da região.

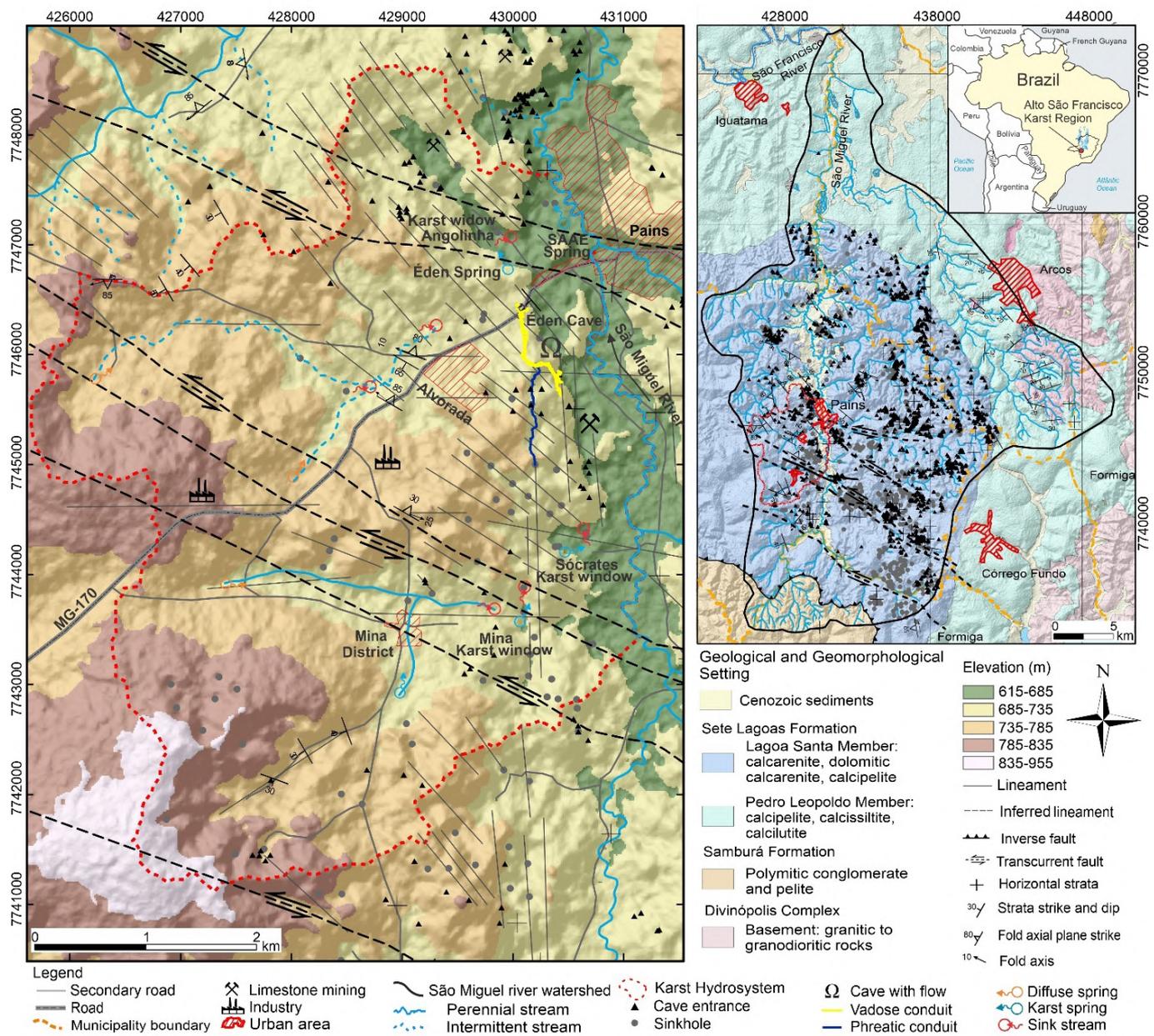


Figure 1 - Map showing the location of the Éden Cave hydrosystem, which is part of the São Miguel river basin, and the geological-structural, geomorphological and speleological context of the region.

MATERIAIS E MÉTODOS

Mapeamento das feições cársticas e geológico-estruturais

As feições cársticas identificadas inicialmente por meio da fotointerpretação foram verificadas durante a etapa do mapeamento de campo, que consistiu no levantamento de dados sobre o tipo de feição, suas características geomor-

MATERIALS AND METHODS

Karst and geological-structural features mapping

The karst features initially identified through photointerpretation were verified during the field mapping stage. This stage consisted of collecting data on the type of feature, its geomorphological and speleological characteristics, geogra-

fológicas e espeleológicas, posição geográfica (coordenadas), condições do entorno, condições hídricas e direções do fluxo de água. No mapeamento geológico-estrutural foi realizado um levantamento das estruturas geológicas (planos de acamamento, fraturas e falhas) que condicionam com planos de dissolução e percolação de águas meteóricas, superficiais e subterrâneas. Essas estruturas foram plotadas e identificadas em mapa geológico preexistente (Ribeiro *et al.*, 2008) e integradas às estruturas fotointerpretadas. Para isso, foram visitados pontos de afloramento e maciços de calcário, além de cavernas, onde foram levantados dados de atitudes e orientações dos planos e lineamentos estruturais. Para confecção das rosetas estruturais, foi utilizado o *software* OpenStereo 1.2, a partir das medidas estruturais obtidas em campo.

Método EPIK adaptado

O método EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998) constitui-se de uma análise paramétrica por meio de geoprocessamento, onde são realizadas sobreposições de mapas bases de determinados parâmetros ponderados, sendo eles: (E) epicarste; (P) cobertura protetora; (I) condições de infiltração; (K) desenvolvimento da rede cárstica. Cada parâmetro, com base em valores de ponderação específicos, gera-se, então, o índice de vulnerabilidade ou fator de proteção (F), que significa: quanto menor numericamente for o F maior será a necessidade de proteção, podendo variar entre 9 (mais vulnerável) até 34 (menos vulnerável) de acordo com a equação abaixo:

$$F = \alpha E_i + \beta P_i + \gamma I_i + \delta K_i$$

*phical position (coordinates), surrounding conditions, water conditions and water flow directions. In the geological-structural mapping, a survey was carried out of the geological structures (bedding planes, fractures and faults) that condition dissolution planes and percolation of meteoric, surface and underground water. These structures were plotted and identified on a pre-existing geological map (Ribeiro *et al.*, 2008) and integrated with the photointerpreted structures. To do this, limestone massifs outcrops and caves were visited, where data on the attitudes and orientations of the structural planes and lineaments were collected. Based on the structural measurements obtained in the field, OpenStereo 1.2 software was used to make the structural rosettes.*

Adapted EPIK method

The EPIK method (Doerfliger & Zwahlen, 1998) consists of a parametric analysis using geoprocessing, where base maps of certain weighted parameters are superimposed: (E) epikarst; (P) protective cover; (I) infiltration conditions; (K) development of the karst network. Each parameter, based on specific weighting values, then generates the vulnerability index or protection factor (F), which means: the lower the F numerically, the greater the need for protection, which can range from 9 (most vulnerable) to 34 (least vulnerable) according to the equation below:

$$F = \alpha E_i + \beta P_i + \gamma I_i + \delta K_i$$

onde F = índice de proteção; E_i , P_i , I_i , K_i = classificação relativa aos parâmetros EPIK; e $\alpha = 3$, $\beta = 1$, $\gamma = 3$, $\delta = 2$, ambos sendo os coeficientes de ponderação.

Pereira *et al.* (2019) adaptaram o método considerando as diferenças de contextos geomorfológicos e hidrológicos entre as áreas cársticas do Brasil e da Europa, este último onde o método foi desenvolvido. Esta modificação foi realizada dentro do contexto da bacia hidrográfica do rio São Miguel, onde está o hidrossistema da Gruta Édén e, por isso, foi adotada essa adaptação do método para este trabalho. Os autores propõem modificações nos parâmetros para cada mapa base de acordo com a descrição das classificações apresentadas na Figura 2. Diferentemente do proposto por Doerfliger & Zwahlen (1998) e Pereira *et al.* (2009), neste trabalho, é feita uma separação e subdivisão das classes de baixa e moderada vulnerabilidades referentes ao fator F (Figura 2). Essa modificação é proposta julga-se ser importante que haja uma distinção dessas duas classes, uma vez que elas podem ser expostas a distintas condições antrópicas, que devem ser levadas em contas para uma melhor gestão ambiental do poder público.

Todas as informações referentes a cada parâmetro foram levantados durante a etapa de escritório (levantamento preexistentes e fotointerpretação) e durante a etapa de campo (mapeamento das feições cársticas e estruturais). Na etapa de geoprocessamento foi utilizado o software ArcGis 10.5; para a confecção dos mapas bases foi empregada a ferramenta de reclassificação para ajustar os arquivos raster de acordo com os pesos de cada classe. Para o mapa base de epicarste (E), foram considerados pontos de dolinas e lineamentos estruturais, sendo adicionado um buffer 50 m no entorno das feições,

where F = protection index; E_i , P_i , I_i , K_i = classification relative to EPIK parameters; and $\alpha = 3$, $\beta = 1$, $\gamma = 3$, $\delta = 2$, both being the weighting coefficients.

Pereira *et al.* (2019) adapted the method considering the differences in geomorphological and hydrological contexts between karst areas in Brazil and Europe, where the method was developed. This modification was carried out within the context of the São Miguel river watershed, where the Édén Cave hydrosystem is located, which is why this adaptation was used for this work. The authors propose modifications to the parameters for each base map according to the description of the classifications shown in Figure 2. Unlike the proposal by Doerfliger & Zwahlen (1998) and Pereira *et al.* (2009), this work separates and subdivides the low and moderate vulnerability classes in relation to the F factor (Figure 2). This modification is proposed because it is considered important to distinguish between these two classes, since they can be exposed to different anthropogenic conditions, which must be taken into account for better environmental management by public authorities.

All the information relating to each parameter was collected during the office stage (pre-existing surveys and photointerpretation) and during the field stage (mapping of karst features and structures). ArcGis 10.5 software was used in the geoprocessing stage; the reclassification tool was used to make the base maps, adjusting the raster files according to the weights of each class. For the epikarst base map (E), doline points and structural lineaments were considered, and a 50 m buffer was added around the features, considering a radius of influence. For the protective cover base map (P), the Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation tool was used for soil thickness values. The infiltration base map (I) considered the use and occupation

essa distância considerando um raio de influência das feições. Para o mapa base de cobertura de proteção (P), foi utilizado a ferramenta de interpolação Inverse Distance Weighted (IDW) para valores de espessuras de solo. O mapa base de infiltração (I) considerou os mapas de uso e ocupação (Pereira et al., 2019), de declividade gerado a partir do modelo digital de terreno ALOS/PALSAR, e as depressões fechadas e sumidouros. Para a rede cárstica (K), foram considerados pontos de entradas de cavernas obtidos pelo CANIE/CECAV e o mapa da Gruta Éden, sendo adicionado um buffer 250 m entorno das feições, considerando a área de influência preliminar segundo a legislação vigente. Para o mapa final de vulnerabilidade utilizou-se a ferramenta de calculadora raster para a álgebra de mapas (sobreposição) com base nos coeficientes de ponderação α , β , γ , δ .

maps (Pereira et al., 2019), slope generated from the ALOS/PALSAR digital terrain model, and closed depressions and sinkholes. For the karst network (K), cave entry points obtained from CANIE/CECAV and the Éden Cave map were taken into account, and a 250 m buffer was added around the features, considering the preliminary area of influence according to current legislation. For the final vulnerability map, the raster calculator tool was used for map algebra (overlapping) based on the weighting coefficients α , β , γ , δ .

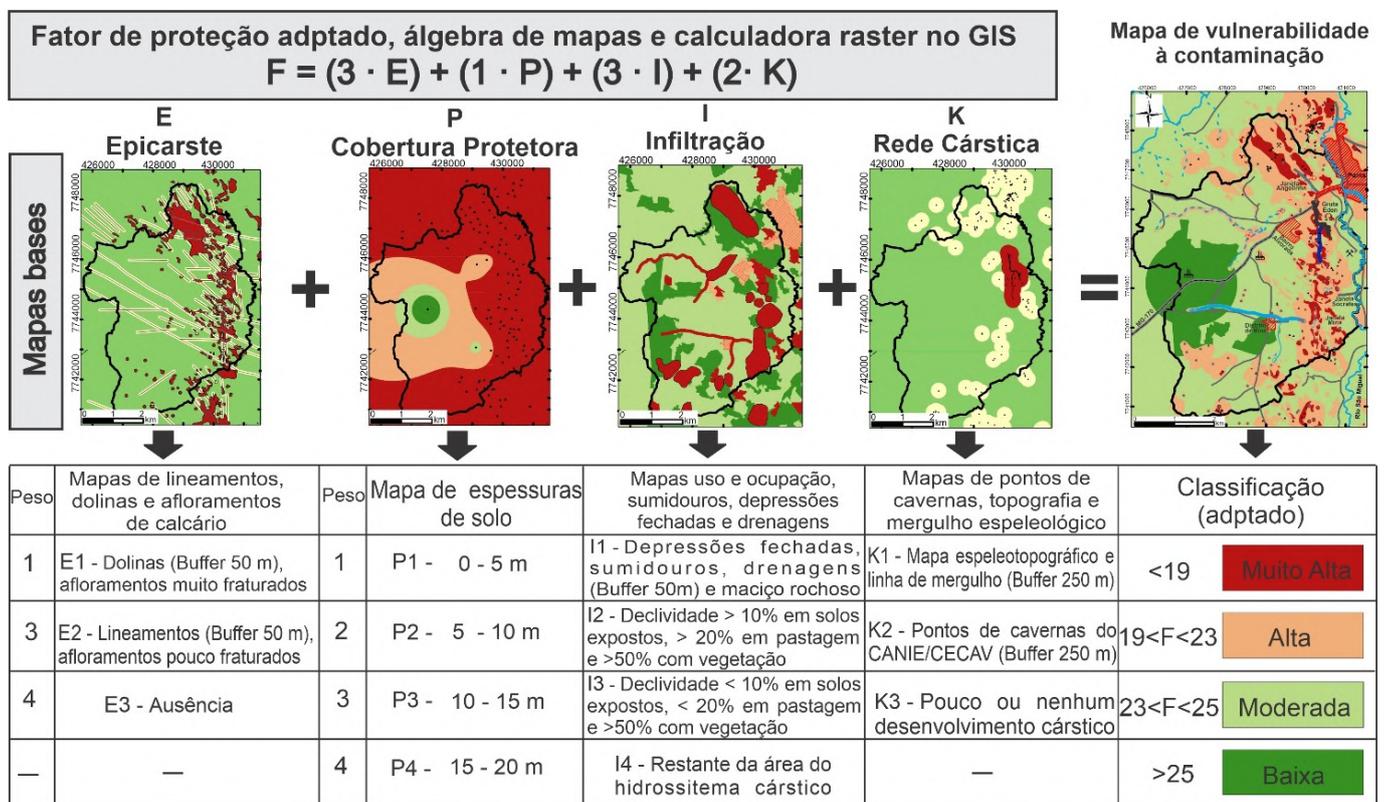


Figura 2 – Quadro resumo da metodologia adapta do método EPIK, destacando os pesos e especificações de cada parâmetros, bem como a equação e seus coeficientes de ponderação.

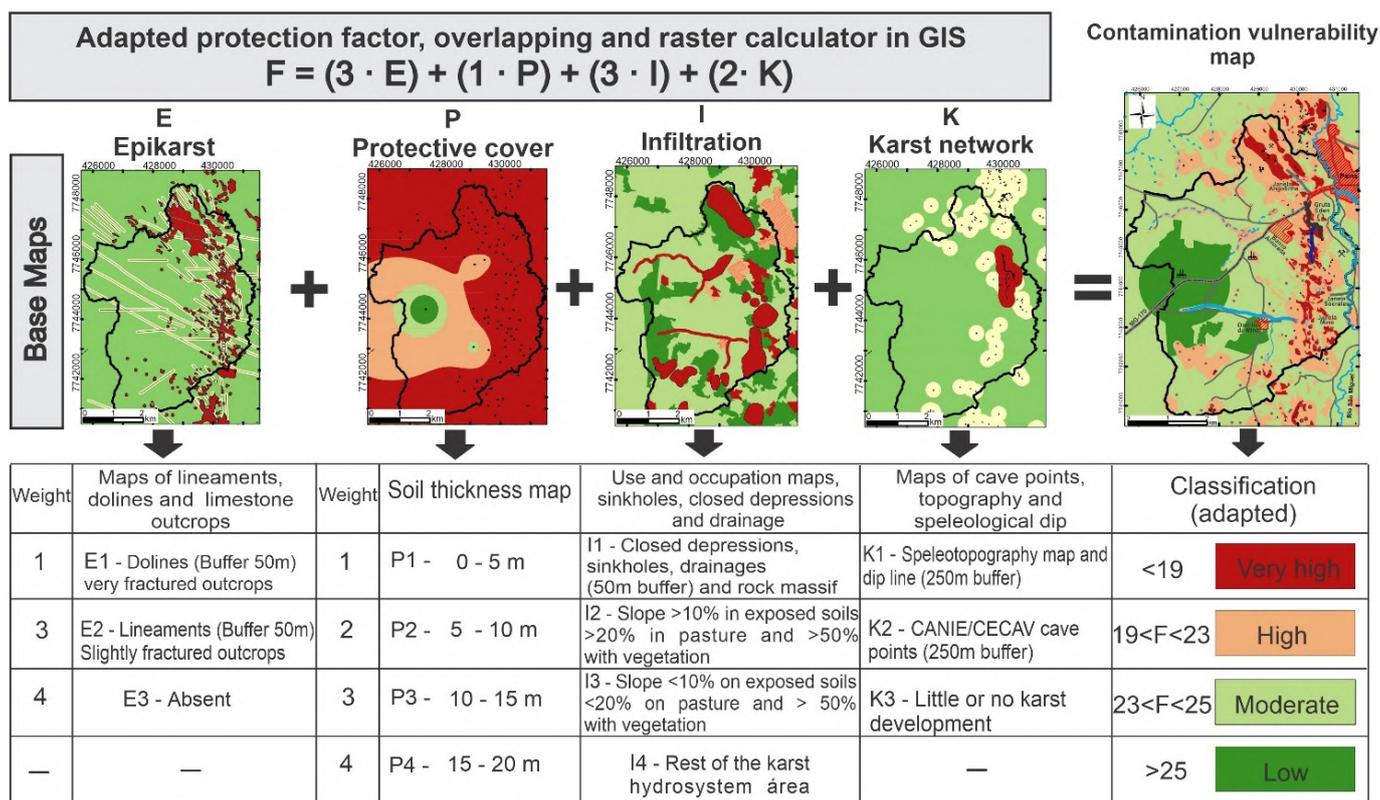


Figure 2 – Summary table of the methodology adapted from the EPIK method, highlighting the weights and specifications of each parameter, as well as the equation and its weighting coefficients.

Traçadores corantes fluorescentes

Para compreender, temporal e espacialmente, o comportamento hidrodinâmico da principal rota de fluxo do sistema cárstico da Gruta Éden, foram realizados dois testes quantitativos de traçadores fluorescentes durante os meses de setembro de 2020 (estação seca) e abril de 2021 (estação chuvosa). Para isso, foram usados os pontos de injeção e monitoramento ao longo da rota já identificados por estudos anteriores (Camaduro, 2007; Freitas, 2009; Ferrari et al., 2017). Assim, foram estabelecidos um ponto de injeção (IP1) e três pontos de amostragem (SP1, SP2 e SP3) em surgências e em cavernas (Fig. 3). Foram injetados 300 g de fluoresceína (Nº. CAS: 518-47-8) no sumidouro do córrego da Mina (IP1). O monitoramento das curvas de restituição dos traçadores (BTCs) foi realizado

Fluorescent dye tracers

In order to gain a temporal and spatial understanding of the hydrodynamic behavior of the main flow route of the Éden Cave karst system, two quantitative fluorescent tracer tests were carried out during the months of September 2020 (dry season) and April 2021 (rainy season). For this, the injection and monitoring points along the route already identified by previous studies were used (Camaduro, 2007; Freitas, 2009; Ferrari et al., 2017). Therefore, an injection point (IP1) and three sampling points (SP1, SP2 and SP3) were established in springs and caves (Fig. 3). 300 g of fluorescein (CAS No.: 518-47-8) was injected into the Mina stream sinkhole (IP1). Breakthrough tracer curves (BTCs) were monitored at the Socrates spring (SP1), inside Éden Cave (SP2), and at the Angolinha spring (SP3), which is the main outlet (discharge) of

na surgência do Sócrates (SP1), dentro da Gruta Éden (SP2), e na surgência da Angolinha (SP3), que é a saída (descarga) principal do hidrossistema. As quantidades de massas injetadas e pontos de monitoramentos foram as mesmas nas duas estações com o intuito de comparação entre as estações sazonais.

A amostragem quantitativa das concentrações dos traçadores recuperados foi possível utilizando-se dois fluorímetros de campo GGUN-FL30 (modelos 1920 e 1921) (Schneegg, 2002), calibrados antes de cada campanha de campo. O intervalo de tempo de registro foi de 15 min em todos os pontos e estações, para obter um melhor detalhamento das BTCs. As concentrações de *background* foram obtidas nos dias anteriores ao início de cada teste, com os fluorímetros de campo, registrando durante 48 horas as concentrações naturais de fluorescência deste hidrossistema cárstico, a fim de corrigir possíveis valores de concentrações dos traçadores. O resumo das informações de injeções e amostragens estão na Tabela 1 e na Fig. 3. As vazões foram medidas a partir do uso de molinete.

the hydrosystem. The quantities of mass injected and the monitoring points were the same at both stations in order to compare the seasonal stations.

Quantitative sampling of recovered tracer concentrations was possible using two GGUN-FL30 field fluorimeters (models 1920 and 1921) (Schneegg, 2002), calibrated before each field campaign. The recording time interval was 15 min at all points and stations, in order to obtain a better detail of the BTCs. Background concentrations were obtained in the days prior to the start of each test, with the field fluorimeters recording the natural fluorescence concentrations of this karst hydrosystem for 48 hours, in order to correct for possible tracer concentration values. A summary of the information on injections and sampling is shown in Table 1 and Fig. 3. Flow rates were measured using a windlass.

Tabela 1 – . Informações dos testes de traçadores injetados no hidrossistemas da Gruta Éden.

SEÇÃO	A-A'	
Traçador	Fluoresceína sódica	
Massa injetada (g)	300	
Ponto de injeção	IP1 – Sumidouro da Mina	
Estação	Seca	Chuva
Injeção (data/hora)	30/08/20	21/03/21
	10:20	12:15
Background (µg/L)	0,06	0,09

SEÇÃO	A-A'	
	IP1-SP1	862
Distâncias lineares (m)	IP1-SP2	2.383
	IP1-SP3	3.393

Table 1 – Information on tracer tests injected in Éden cave hidrosystem.

SECTION	A-A'	
Tracer	Fluorescein sodium	
Injected mass (g)	300	
Injection Point	IP1 – Mina Sinkhole	
Station	Dry	Rainy
Injection (date/time)	30/08/20	21/03/21
	10:20	12:15
Background (µg/L)	0,06	0,09
Linear distances (m)	IP1-SP1	862
	IP1-SP2	2.383
	IP1-SP3	3.393

A partir dos dados obtidos pelos testes quantitativos, foram realizadas análises gráficas das BTCs por meio do *software* QTRACER2 (Field, 2002) e foram estimados a concentração de pico (C_p), tempo de chegada (t_1), tempo de pico (t_p), tempo quando metade da massa recuperada passa pelo ponto de amostragem ($t_{R/2}$), massa recuperada (R) e tempo médio de trânsito (t_m). A velocidade máxima ($v_{m\acute{a}x}$) foi calculada a partir do tempo de chegada. Optou-se por obter as velocidades médias de fluxo e coeficiente de dispersão por meio de modelos analíticos, descritos a seguir, pois eles estimam esses parâmetros com menos incertezas.

From the data obtained by the quantitative tests, graphical analyses of the BTCs were carried out using the QTRACER2 software (Field, 2002). In addition, the peak concentration (C_p), arrival time (t_1), peak time (t_p), time when half of the recovered mass passes through the sampling point ($t_{R/2}$), recovered mass (R) and mean transit time (t_m) were estimated. The maximum velocity ($v_{m\acute{a}x}$) was calculated from the arrival time. To obtain the mean flow velocities and dispersion coefficient the analytical models described below were chosen, as they estimate these parameters with fewer uncertainties.

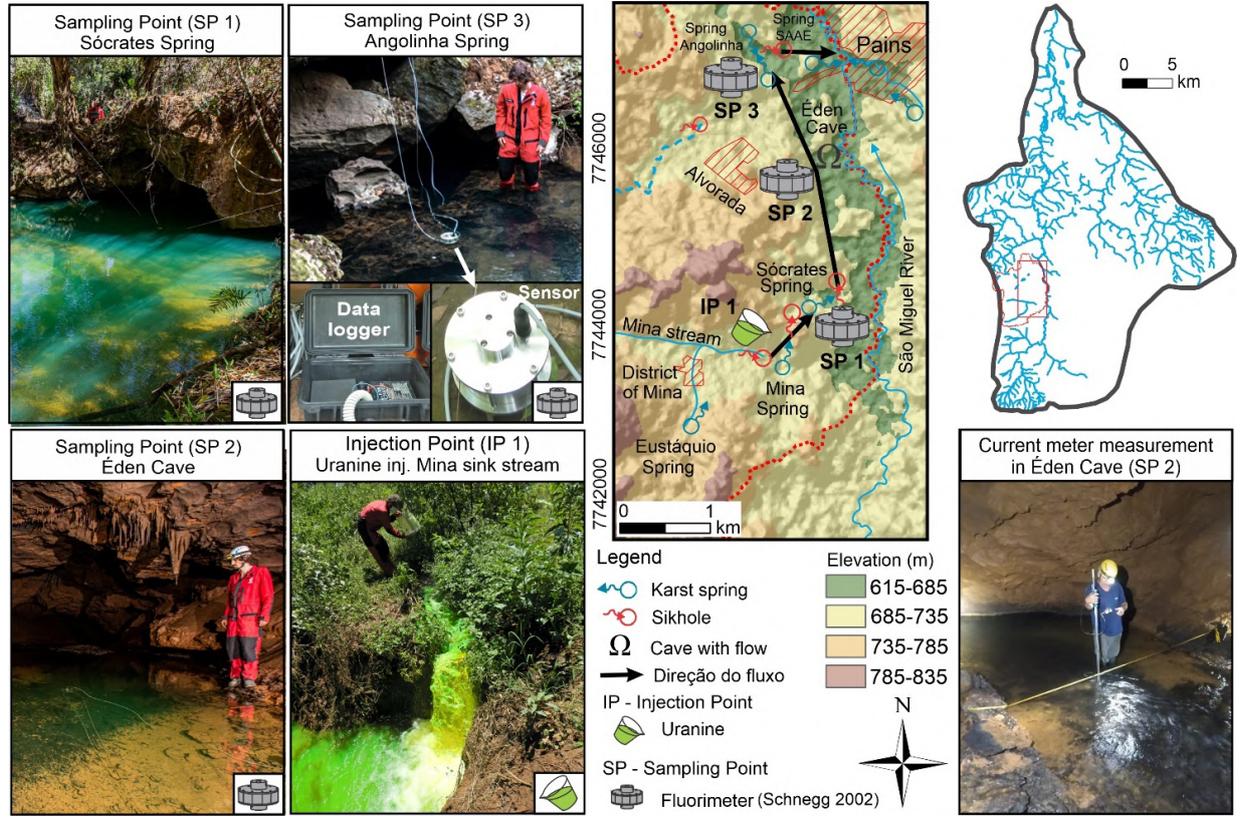
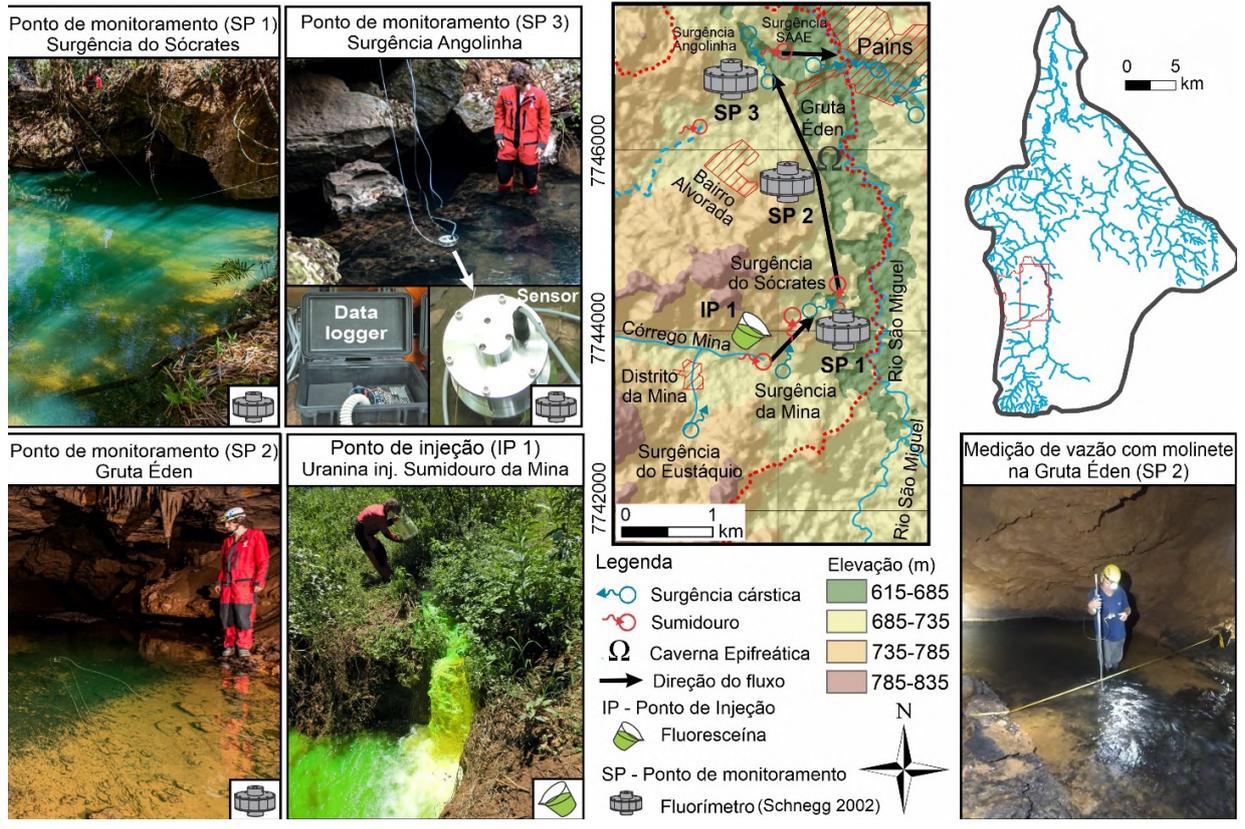


Figura 3 - Esquema metodológico da técnica de traçadores corantes, com localizações e fotos de pontos de amostragem (fluorímetro de campo - datalogger e sensor), pontos de injeção de traçador de corante (fluoresceína) e medição de vazão com molinete.

Figure 3 - Methodological scheme of the dye tracer technique, with locations and photos of sampling points (field fluorimeter - datalogger and sensor), dye tracer injection points (fluorescein) and flow measurement with a reel.

RESULTADOS

Arcabouços geológico-estrutural e espeleológico

O arcabouço estrutural em que o sistema está inserido é constituído por lineamentos estruturais, identificado como fraturas, falhas e eixos de dobras, com frequência majoritária na direção NW-SE e na direção secundária N-S, como visto no diagrama de rosetas da Figura 4. Os planos de acamamento (S_0) são sub-horizontais na porção leste do sistema, em afloramentos de calcário próximo ao rio São Miguel. Na porção central e oeste, os S_0 apresentam dobrados com eixos de dobra na direção NW-SE. Assim, há um sistema de dobras anticlinais e sinclinais, onde, em escala de afloramento, apresentam-se fechadas, do tipo Chevron, e em escala local, abertas (Fig. 4 - fotos a esquerda). Além disso, há zonas de falhas transcorrentes sinistrais (Muzzi Magalhães, 1989), interpretadas como posteriores ao sistema de dobramento seccionando praticamente toda a área de estudo, bem como pares conjugados de fraturas subverticais que estão associadas as zonas de falhamento.

A Gruta Éden é a principal e maior cavidade do hidrossistema da margem leste do rio São Miguel, apresentando um desenvolvimento horizontal com uma zona vadosa de 572 m, uma zona epifreática de 746 m e uma zona freática de 412 m, totalizando 1.730 m de caverna mapeada (Ferrari et al., 2017). A direção de desenvolvimento principal da Gruta Éden é N-S, concordante com a direção de lineamentos N-S e a direção de fluxo do rio São Miguel. As demais cavidades estão predominantemente na zona vadosa do sistema,

RESULTS

Geological-structural and speleological frameworks

The structural framework of the system is made up of structural lineaments, identified as fractures, faults and fold axes, mostly in the NW-SE direction and in the secondary N-S direction, as seen in the rosette diagram in Figure 4. The bedding planes (S_0) are sub-horizontal in the eastern part of the system, in limestone outcrops near the São Miguel river. In the central and western portions, the S_0 are folded with fold axes in a NW-SE direction. Thus, there is an anticlinal and synclinal folds system, that are closed and Chevron-like on an outcrop scale, and open on a local scale (Fig. 4 - photos on the left). In addition, there are sinistral transcurrent fault zones (Muzzi Magalhães, 1989), interpreted as subsequent to the folding system, sectioning practically the entire study area, as well as conjugate pairs of subvertical fractures that are associated with the fault zones.

The Éden Cave is the main and largest cave in the hydrosystem on the east bank of the São Miguel River. It has a horizontal development with a vadose zone of 572 m, an epiphreatic zone of 746 m and a phreatic zone of 412 m, totaling 1,730 m of mapped cave (Ferrari et al., 2017). The main direction of development of the Éden Cave is N-S, in line with the direction of the N-S lineaments and the São Miguel River flow direction. The other caves are predominantly in the vadose zone of the system, with 61 cave entrances, 50 dolines and 14 closed depressions identified. These features are associated with the structural lineaments, mainly aligned in NW-SE and N-S directions, or associated with the intersections of the same lineaments.

sendo identificadas 61 entradas de cavernas, 50 dolinas e 14 depressões fechadas. Estas feições estão associadas às direções de lineamentos estruturais, alinhadas principalmente nas direções NW-SE e N-S, ou associadas às intersecções dos mesmos lineamentos.

Uma característica importante deste hidrossistema é a presença de janelas cársticas ao longo da trajetória do fluxo, permitindo a exposição da água subterrânea em superfície em curtos trechos, caracterizado por uma surgência e logo em seguida um sumidouro. Nota-se a presença de, pelo menos, três destas, representado pela janela da Mina à montante, pela janela do Sócrates no meio do trajeto e pela janela da Angolinha à jusante (Fig. 7). Essa constatação também foi levantada por outros autores que estudaram o fluxo subterrâneo deste sistema (Freitas, 2009; Ferrari *et al.*, 2017).

An important feature of this hydrosystem is the presence of karst windows along the flow path that allow the groundwater to be exposed at the surface in short stretches, characterized by a spring and then a sinkhole. There are at least three of these, represented by the Mina karst window upstream, the Sócrates karst window in the middle of the path and the Angolinha karst window downstream (Fig. 7). This was also discovered by other authors who studied the underground flow of this system (Freitas, 2009; Ferrari *et al.*, 2017).

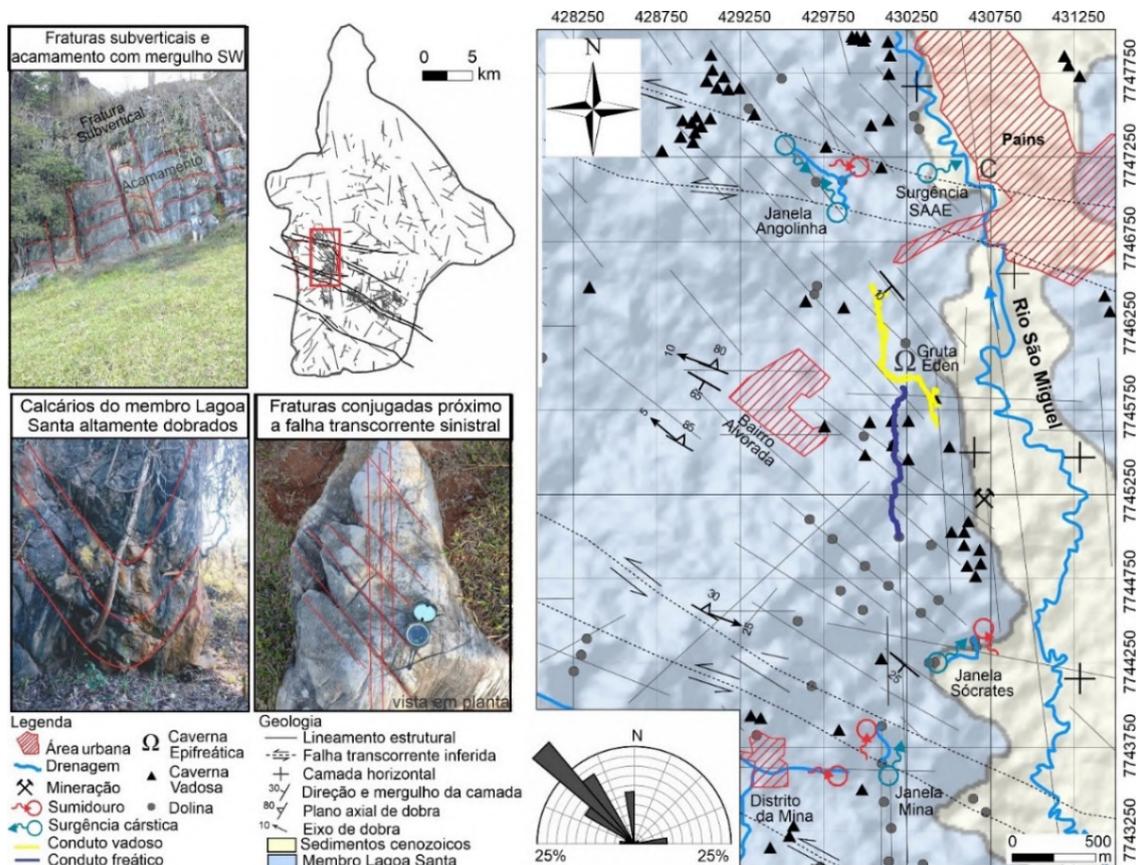


Figura 4 - Contexto da geologia e do arcabouço estrutural do hidrossistema da Gruta Éden, destacando os pontos observados em campos evidenciados nas fotos a esquerda.

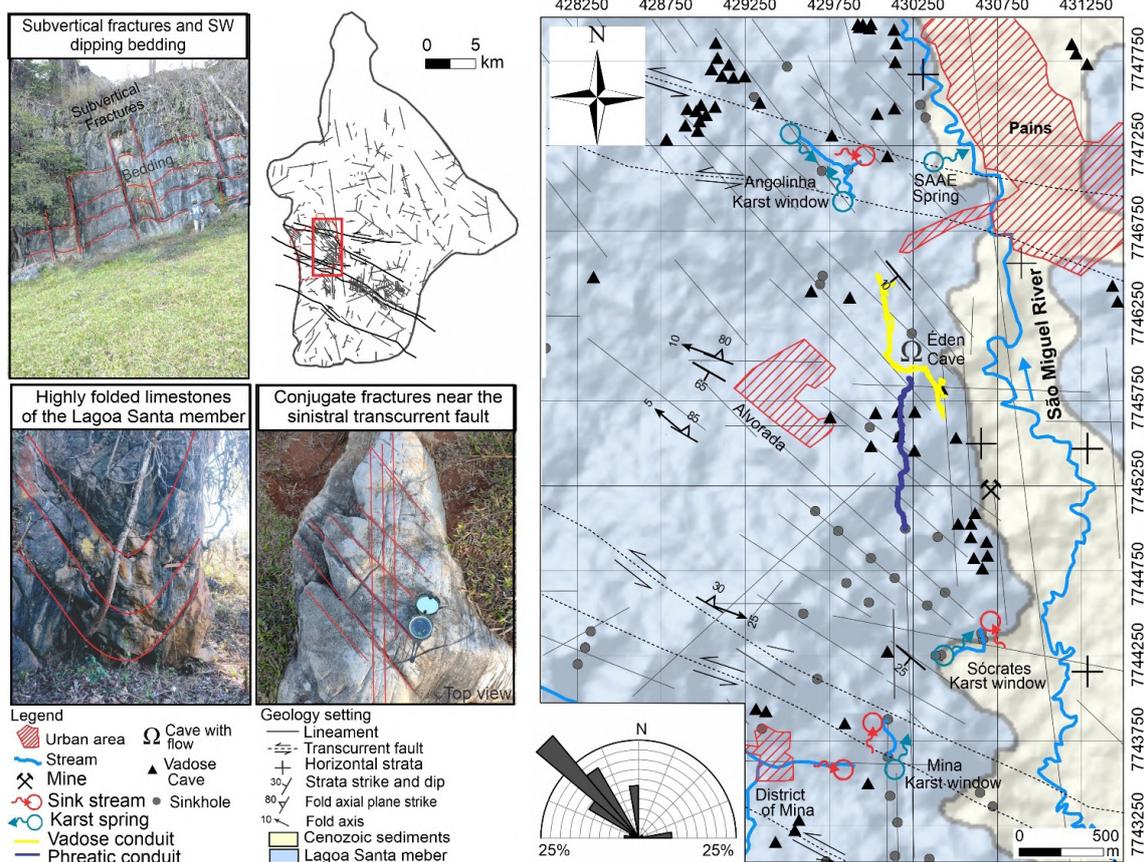


Figure 4 – Context of the geology and structural framework of the Éden Cave karst hydrosystem, highlighting the points observed in the fields shown in the photos on the left.

Vulnerabilidade cárstica (EPIK)

O fator F para a área do hidrossistema variou entre 9 e 33, sendo classificado em quatro zonas de vulnerabilidade muito alta (≤ 19), alta (19 a 23), moderada (23 a 25) e baixa (≥ 25). As áreas de baixa vulnerabilidade ocorrem na parte oeste e representa 15% da área do sistema; são regiões com recargas mais difusas, devido ao solo e ausência de cavidades, além de maiores espessuras de solos e com vegetação arbórea não nativa proveniente de silvicultura. As zonas de moderada vulnerabilidade são predominantes e recobrem 46% da área; são bem dispersas ocorrendo em toda parte central, sul e norte. Nestas regiões, são comuns a ausência de vegetação e o predomínio de pastagens, mas ainda apresentam uma espes-

Karst vulnerability (EPIK)

The F factor for the hydrosystem area varied between 9 and 33, and was classified into four zones of very high (≤ 19), high (19 to 23), moderate (23 to 25) and low (≥ 25) vulnerability. The low vulnerability areas occur in the western part and represent 15% of the system's area; they are regions with more diffuse recharge, due to the soil and absence of caves, as well as greater soil thicknesses and non-native tree vegetation from forestry. Moderate vulnerability zones are predominant and cover 46% of the area; they are well dispersed and occur throughout the central, southern and northern parts. In these regions, the absence of vegetation and the predominance of pastures are common, but they still have a moderate soil thickness, where recharge is still

sura de solo moderada, onde a recarga ainda é difusa pelo solo e sedimentos inconsolidados próximos às margens do rio São Miguel. As áreas de muito alta e alta vulnerabilidade estão associadas entre si e constitui 39% da área. Ocorrem principalmente na parte leste onde estão localizadas as maiores concentrações de entradas de cavernas, dolinas, sumidouros, i.e., feições de recarga autogênica e pontual. Além disso, apresentam pequenas espessura de solo e maiores áreas de afloramento de calcários, sendo influenciadas pelos parâmetros de desenvolvimento cárstico (K), epicarste (E) e infiltração (I).

diffused by the soil and unconsolidated sediments near the São Miguel River banks. The areas of very high and high vulnerability are associated with each other and make up 39% of the area. They occur mainly in the eastern part where the highest concentrations of cave entrances, dolines, sinkholes, i.e. autogenic and punctual recharge features, are located. They also have smaller soil thicknesses and larger areas of limestone outcrop, and are influenced by the parameters of karst development (K), epicarst (E) and infiltration (I).

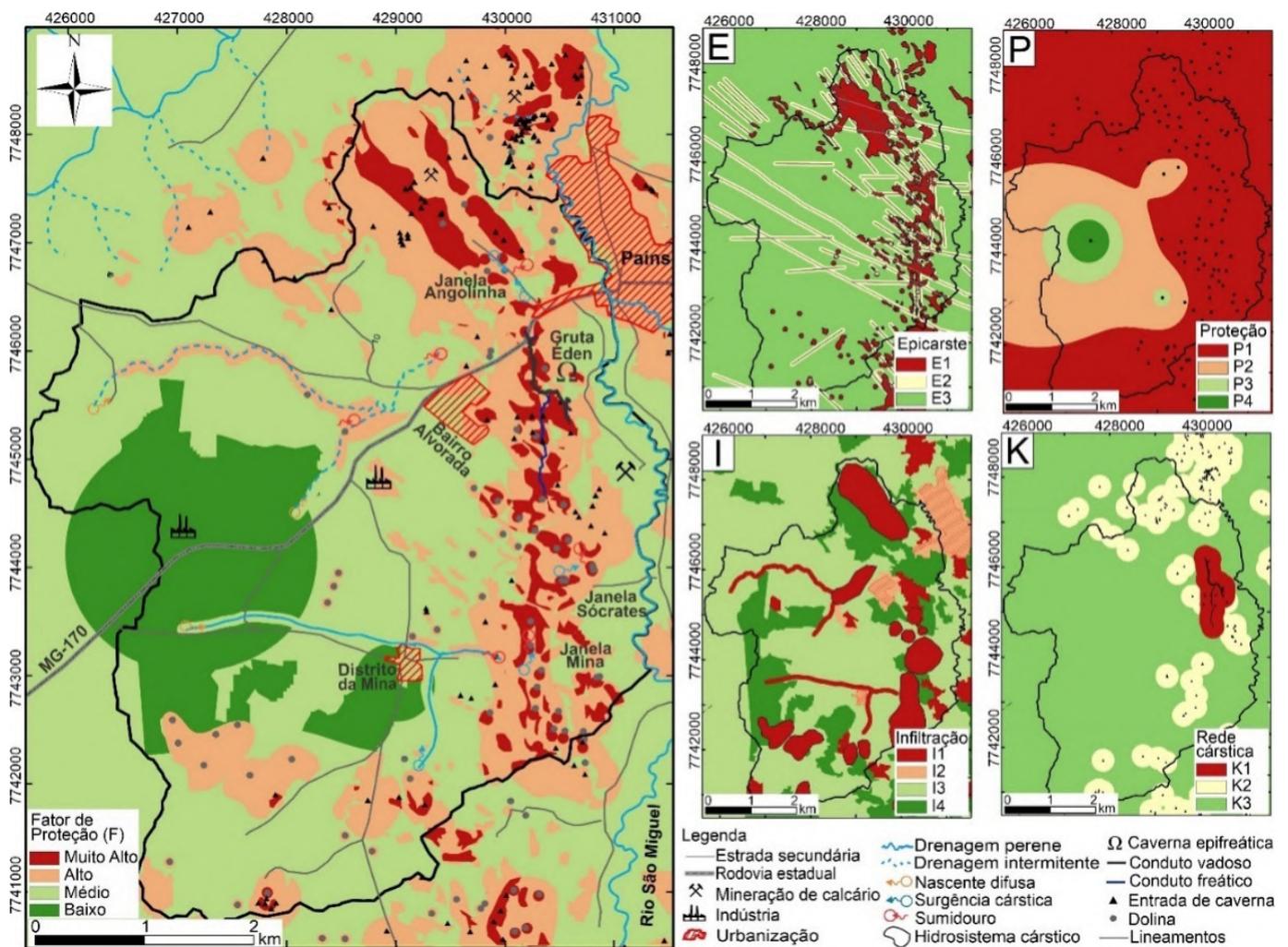


Figura 5 - Mapa de vulnerabilidade intrínseca à contaminação representando o fator de proteção (F), com base nos mapas bases E, P, I e K, à direita.

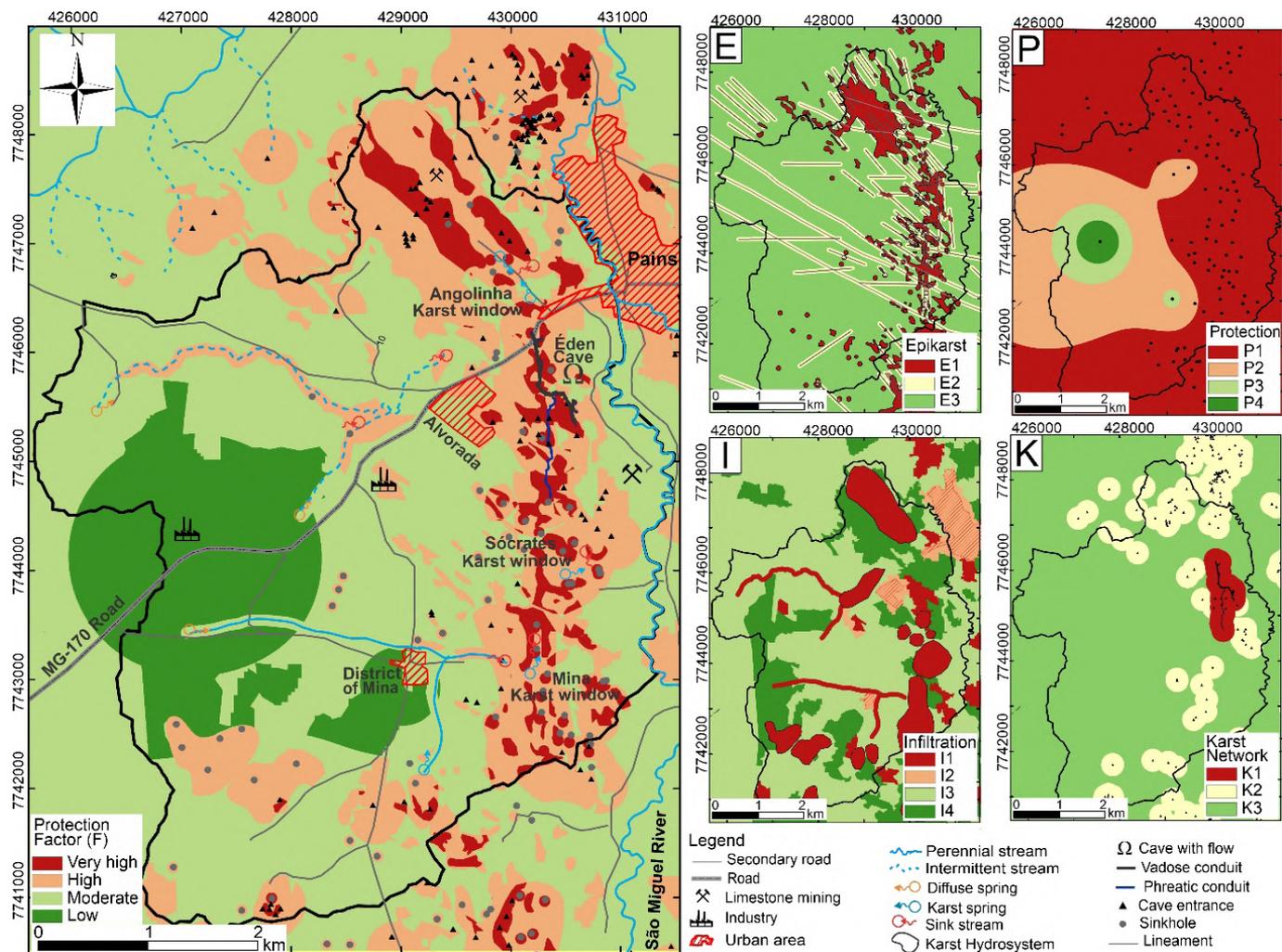


Figure 5 - Map of intrinsic vulnerability to contamination representing the protection factor (F) based on the base maps E, P, I and K, on the right.

Parâmetros das curvas de restituição e do fluxo

Para a principal rota do hidrossistema da Gruta Édén, foram obtidas seis BTCs, entre a seca e chuva, nos três pontos de amostragem (SP1, SP2 e SP3). Em SP1, a vazão variou de 569 m³/h para 834 m³/h; em SP2, de 587m³/h para 911 m³/h; e em SP5, de 594 m³/h para 1.084 m³/h (Fig. 6).

O trecho IP1-SP1 apresentou variação, entre as estações de seca e de chuva, para a massa recuperada (R) de 56% a 68%. Para os demais, houve diminuições do tempo médio de trânsito (tm) de 75 h para 52 h; tempo de chegada (t1) de 42 h para 19 h; do tempo de pico de (tp) de 61 h para

Breakthrough curves and flow parameters

For the main route of the Édén Cave hydrosystem, between dry and rainy season, six BTCs were obtained at the three sampling points (SP1, SP2 and SP3). At SP1, the flow varied from 569 m³/h to 834 m³/h; at SP2, from 587 m³/h to 911 m³/h; and at SP5, from 594 m³/h to 1,084 m³/h (Fig. 6).

The IP1-SP1 stretch showed a variation in recovered mass (R) of 56% to 68% between the dry and rainy seasons. For the others, there were decreases in mean transit time (tm) from 75 h to 52 h; arrival time (t1) from 42 h to 19 h; peak time (tp) from 61 h to 30 h; time when half the recovered mass passes

30 h; do tempo quando metade da massa recuperada passa pelo ponto de amostragem ($t_{R/2}$) de 69 h para 42 h e da concentração de pico (C_p) de 10.1 $\mu\text{g/L}$ para 7.7 $\mu\text{g/L}$. O trecho IP1-SP2 teve R variando de 68% a 93%, mantendo as tendências de diminuições de t_m de 118 h para 73 h; t_1 de 82 h para 39 h; t_p de 106 h para 53 h; $t_{R/2}$ de 114 h para 66 h; e C_p de 10.3 $\mu\text{g/L}$ para 8.9 $\mu\text{g/L}$. Em IP1-SP3, R variou de 48% a 79% com diminuições de t_m de 140 h para 91 h; t_1 de 106 h para 50 h; t_p de 169 h para 25 h; $t_{R/2}$ de 138 h para 81 h; mas um leve aumento de C_p de 13.2 $\mu\text{g/L}$ para 17.9 $\mu\text{g/L}$ (Fig. 6). Os parâmetros do fluxo, como velocidade média (v_m) e dispersão longitudinal (D_L), aumentaram progressivamente ao longo do trajeto do traçador, sendo que as médias de v_m foram de 23,55 m/h a 37,40 m/h e as de D_L foram de 115 m^2/h a 622 m^2/h , seguido de um aumento nas médias das velocidades máximas (v_{max}) entre os períodos seco (35,15 m/h) e chuvoso (70,18 m/h) (Fig. 6).

Comparando todos os trechos, há um aumento nas recuperações do traçador e uma diminuição dos tempos de trânsito, de chegada, de pico e na concentração de pico, juntamente com o aumento das vazões no período de chuva. Entretanto, ressalta-se o fato de a recuperação do traçador ser maior à jusante, em SP2 (Caverna do Édén) e em SP3 (Surgência da Angolinha), e menor à montante, em SP1 (Surgência do Sócrates), tanto na seca quanto na chuva (Fig. 6). Além disso, o padrão geométrico das BTCs exibe mais de um pico de concentração (multipico ou multifluxo). As possíveis causas desses comportamentos são explicadas no item de discussão a seguir.

the sampling point ($t_{R/2}$) from 69 h to 42 h and peak concentration (C_p) from 10.1 $\mu\text{g/L}$ to 7.7 $\mu\text{g/L}$. The IP1-SP2 stretch had R ranging from 68% to 93%, maintaining the trends of decreases in t_m from 118 h to 73 h; t_1 from 82 h to 39 h; t_p from 106 h to 53 h; $t_{R/2}$ from 114 h to 66 h; and C_p from 10.3 $\mu\text{g/L}$ to 8.9 $\mu\text{g/L}$. In IP1-SP3, R varied from 48% to 79% with decreases in t_m from 140 h to 91 h; t_1 from 106 h to 50 h; t_p from 169 h to 25 h; $t_{R/2}$ from 138 h to 81 h; but a slight increase in C_p from 13.2 $\mu\text{g/L}$ to 17.9 $\mu\text{g/L}$ (Fig. 6). The flow parameters, such as mean velocity (v_m) and longitudinal dispersion (D_L), increased progressively along the tracer path. The mean v_m ranged from 23.55 m/h to 37.40 m/h and D_L ranged from 115 m^2/h to 622 m^2/h , followed by an increase in the mean maximum velocities (v_{max}) between the dry (35.15 m/h) and rainy (70.18 m/h) periods (Fig. 6).

Comparing all the stretches, there is an increase in tracer recovery and a decrease in transit times, arrival times, peak times and peak concentration, along with an increase in flow rates during the rainy season. However, it is noteworthy that tracer recovery is higher downstream in SP2 (Éden Cave) and SP3 (Angolinha spring), and lower upstream in SP1 (Socrates spring), both during dry and rainy season (Fig. 6). In addition, the geometric pattern of the BTCs shows more than one concentration peak (multi-peak or multi-flow). The possible causes of these behaviors are explained in the discussion below.

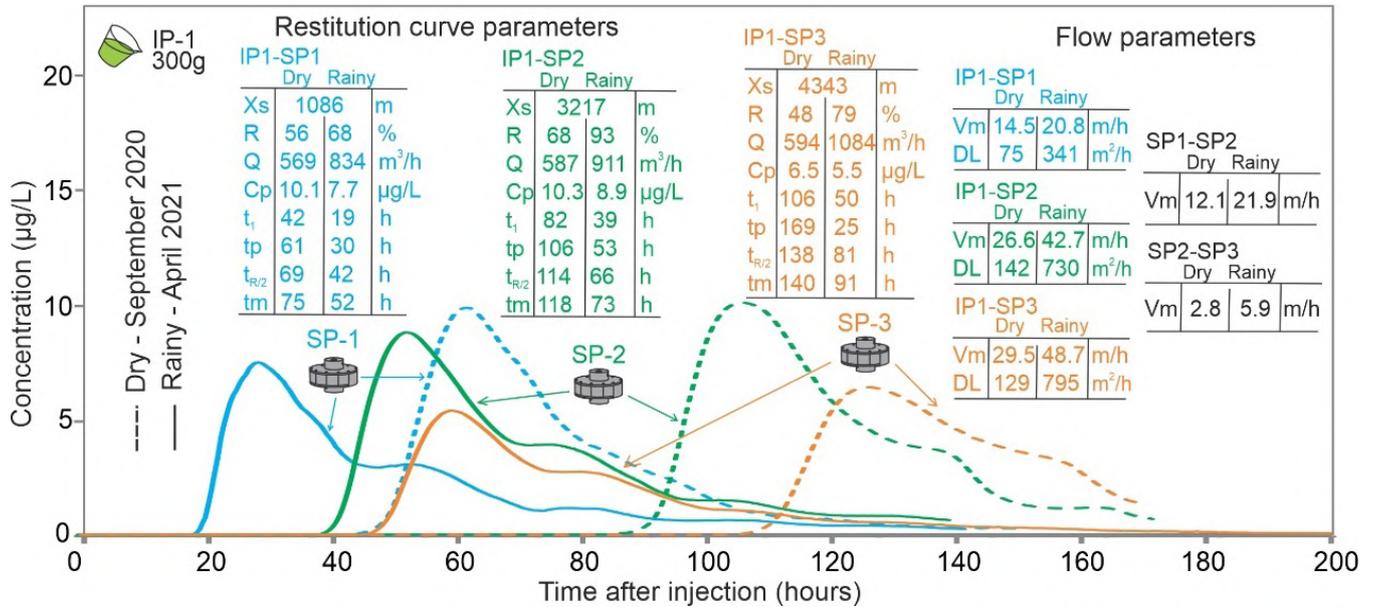
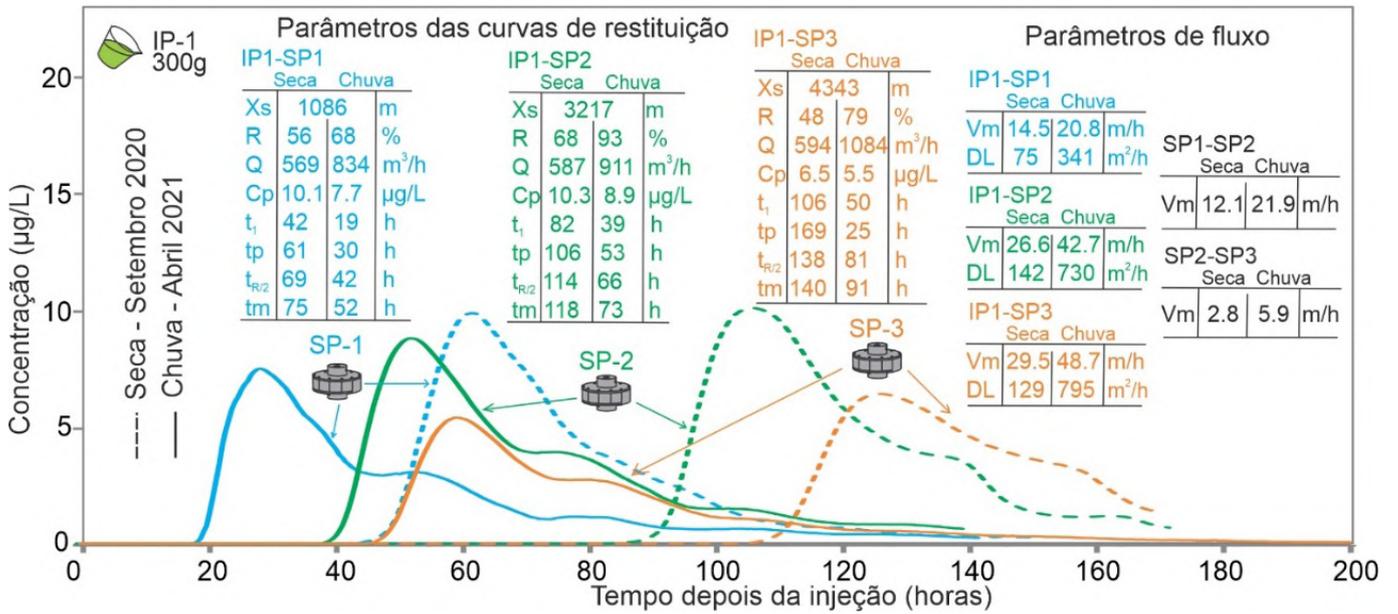


Figura 6 - Curvas de restituição dos traçadores durante as estações de seca (tracejado) e chuva (contínuo), comparando os parâmetros de cada trecho das seções.

Figure 6 - Breakthrough tracer curves during the dry (dashed) and rainy (continuous) seasons, comparing the parameters of each section.

DISCUSSÃO

Hidrodinâmica e vulnerabilidade cárstica

Os lineamentos estruturais NW-SE estão relacionados tanto aos eixos das dobras quanto ao sistema de falhas transcorrentes sinistrais regionais (Muzzi Magalhães, 1989), onde os lineamentos N-S, relacionados a falhas normais posteriores, cortam as demais estruturas (Saadi, 1991). A ocorrência de janelas cársticas provavelmente está ligada à condição geológico-estrutural local, influenciada por sistemas dobrados formados por anticlinais e sinclinais. O acamamento dobrado promove zonas de carstificação por onde o fluxo é facilmente transmitido formando um padrão de loops, forçando-o ascender nas charneiras das anticlinais e mergulhar no sentido das charneiras dos sinclinais. Esse mecanismo também foi constatado por outros autores (Goldscheider, 2005). Assim, as janelas cársticas atuam como trechos de exposição do fluxo à possíveis contaminações e elas estão relacionadas às classes de muito alta e alta vulnerabilidade cárstica apontadas pelo método EPIK.

Apesar da alta frequência de lineamentos estruturais de direção NW-SE, o sentido preferencial do fluxo é N-S, explicado pela carstificação mais desenvolvida nos lineamentos desta direção e devido ao controle hidráulico que o rio São Miguel (de direção N-S) exerce sobre o afluente subterrâneo. A Gruta Éden retrata bem essa carstificação N-S, em que a zona vadosa é caracterizada por paleocanais e depósitos de sedimentos, indicando que houve rebaixamento do nível do aquífero, conforme as hipóteses de evolução do carste da região proposta por Saadi

DISCUSSION

Hydrodynamics and karst vulnerability

The NW-SE structural lineaments are related to both the fold axes and the regional sinistral transcurrent fault system (Muzzi Magalhães, 1989), where the N-S lineaments, related to later normal faults, cut through the other structures (Saadi, 1991). The occurrence of karst windows is probably linked to the local geological-structural condition, influenced by folded systems formed by anticlines and synclines. The folded bedding promotes karstification zones through which the flow is easily transmitted, forming loop patterns, forcing it to rise in the hinges of the anticlines and plunge towards the hinges of the synclines. Other authors (Goldscheider, 2005) have also observed this mechanism. Therefore, the karst windows expose flow stretches to possible contamination and they are related to the very high and high karst vulnerability classes as indicated by the EPIK method.

Despite the high frequency of NW-SE structural lineaments, the preferential flow direction is N-S, which is explained by the more developed karstification in the lineaments in this direction and due to the hydraulic control that the São Miguel River (N-S direction) exerts over the underground tributary. The Éden Cave is a good illustration of this N-S karstification, in which the vadose zone is characterized by paleochannels and sediment deposits, indicating that the aquifer level has been lowered, according to the hypotheses of karst evolution in the region proposed by Saadi et al. (1980) and Santos (2002). On the other hand, the epiphreatic and phreatic zones are the current stage of karstification, with perennial underground streams

et al. (1980) e Santos (2002). Por outro lado, as zonas epifreática e freática são o atual estágio da carstificação, com drenagens subterrâneas perenes situadas no nível inferior da caverna, constatados pelos testes de traçadores.

Na parte oeste e central do hidrossistema a recarga ocorre de forma difusa e alogênica, através do solo e do epicarste pouco desenvolvido, além de possuir zonas de descarga pontuais que formam surgências menores dando origem às drenagens superficiais. Devido à essa característica, essa região é considerada de baixa e moderada vulnerabilidades, embora, no entorno das drenagens superficiais perenes e intermitentes, a vulnerabilidade seja alta, uma vez que atuam como recarga autogênica e pontual. Na parte leste, onde está a principal rota do hidrossistema, a recarga é preferencialmente autogênica, representada tanto pela captura subterrânea do córrego da Mina (IP1), quanto pontualmente pelas dolinas e entrada de cavernas, sendo que a infiltração é via fraturas/falhas subverticais até atingir a zona saturada do aquífero (Fig. 6). As surgências da Angolinha e do SAAE, que constituem as principais zonas de descargas do hidrossistema, estão próximas à margem esquerda do rio São Miguel e são classificadas como uma surgência de fluxo ascendente, provavelmente ocasionada pelos "loops". Vale destacar que a surgência do SAAE constitui um importante ponto de captação de água usada para o abastecimento público de Pains, são áreas de alta vulnerabilidade como constatado pelo método EPIK e por Camaduro *et al.* (2007).

Os padrões geométricos das BTCs, apresentando vários picos de concentração (multipico) indicam a presença de condutos anastomosados (bypass), que dividem o fluxo em mais de

located at the lower level of the cave, as confirmed by the tracer tests.

*In the western and central part of the hydrosystem, recharge occurs in a diffuse and allogenic way, through the soil and the poorly developed epikarst. In addition, there are punctual discharge zones that form smaller springs giving rise to surface drainages. Due to this characteristic, this region is considered to be of low and moderate vulnerability. Nevertheless, in the surroundings of the perennial and intermittent surface drainages, vulnerability is high, since they act as autogenic and punctual recharge. In the eastern part, where the main route of the hydrosystem is, recharge is preferably autogenic, represented both by the underground capture of the Mina stream (IP1), and punctually by the dolines and cave entrances, with infiltration via subvertical fractures/faults until it reaches the aquifer's saturated zone (Fig. 6). The Angolinha and SAAE springs, which are the main discharge zones in the hydrosystem, are close to the left bank of the São Miguel river and are classified as upward flow springs, probably caused by loops. It is worth noting that the SAAE spring is an important water collection point used for the public supply of Pains, and these are areas of high vulnerability as verified by the EPIK method and by Camaduro *et al.* (2007).*

The several concentration peaks (multi-peak) showed in the BTCs geometric pattern, indicate the presence of anastomosed conduits (bypass), which divide the flow into more than one path (multi-flow) that meets again before exiting the system. This type of structure can occur both in plan and in cross-section (Ford & Williams, 2007), with anastomosed cave patterns being common when a stream seeps through a sinkhole (Palmer, 2007). In addition, associated with the multi-peak pattern, there is the characteristic extended tail indicating the existence of some underground lakes (Field &

uma trajetória (multifluxo), mas que se encontram novamente antes da saída do sistema. Esse tipo de estrutura pode ocorrer tanto em planta quanto em seção transversal (Ford & Williams, 2007), onde padrões de cavernas anastomosados são comuns quando um córrego infiltra por um sumidouro (Palmer, 2007). Além disso, associado ao padrão de multipico, existe a característica de cauda prolongada indicando a existência de alguns lagos subterrâneos (Field & Pinsky, 2000). Essa hipótese é corroborada pela análise das BTCs, onde o ponto SP2 (jusante) apresenta uma recuperação menor do que no ponto SP1 (montante) (Fig. 6), evidenciando o desvio do traçador antes de SP1 e depois a recuperação em SP2, tanto na seca quanto na chuva. Esse padrão de multifluxo pode aumentar a dispersão de um possível contaminante aumentando a vulnerabilidade do sistema.

Com relação aos parâmetros de fluxo (v_m e D_L) ao longo dos trechos da rota, há uma diminuição das velocidades médias do fluxo explicado pela diminuição do gradiente hidráulico e um aumento progressivo da dispersão longitudinal, devido ao aumento da distância entre o ponto de injeção (IP1) e o ponto de descarga (SP3). Há um aumento destes parâmetros durante a chuva, relacionado ao aumento das vazões, indicando que o sistema é hidrodinamicamente dependente das variações sazonais. Ademais, existe um aumento pequeno de vazão entre os trechos da rota que indica a existência de canais distributários que contribuem com um pequeno aumento do fluxo (inflow), como demonstrado pela contribuição extra da região do Timburé (Ferrari *et al.*, 2017). As altas velocidades de fluxo, de concentrações de pico e de taxas de recuperação dos traçadores, principalmente durante as chuvas, são fatores determi-

Pinsky, 2000). This hypothesis is corroborated by the analysis of the BTCs, where point SP2 (downstream) shows a lower recovery than point SP1 (upstream) (Fig. 6), showing the detour of the tracer before SP1 and then the recovery in SP2, both in dry and rainy season. This multi-flow pattern can increase the dispersion of a possible contaminant, increasing the system's vulnerability.

*With regard to the flow parameters (v_m and D_L) along the sections of the route, there is a decrease in the mean flow velocities explained by the decrease in the hydraulic gradient and a progressive increase in longitudinal dispersion, due to the increase in the distance between the injection point (IP1) and the discharge point (SP3). There is an increase in these parameters during rainfall, related to the increase in flows, indicating that the system is hydrodynamically dependent on seasonal variations. In addition, there is a small increase in flow between sections of the route, which indicates the existence of distributary channels that contribute to a small increase in flow (inflow), as demonstrated by the extra contribution from the Timburé region (Ferrari *et al.*, 2017). The high flow velocities, peak concentrations and recovery rates of tracers, especially during rainfall, are determining factors for an increase in the contamination vulnerability of groundwater and, for this reason, seasonal variations must be taken into account (Fig. 7).*

nantes para um aumento da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação e, por isso, as variações sazonais devem ser levadas em consideração (Fig. 7).

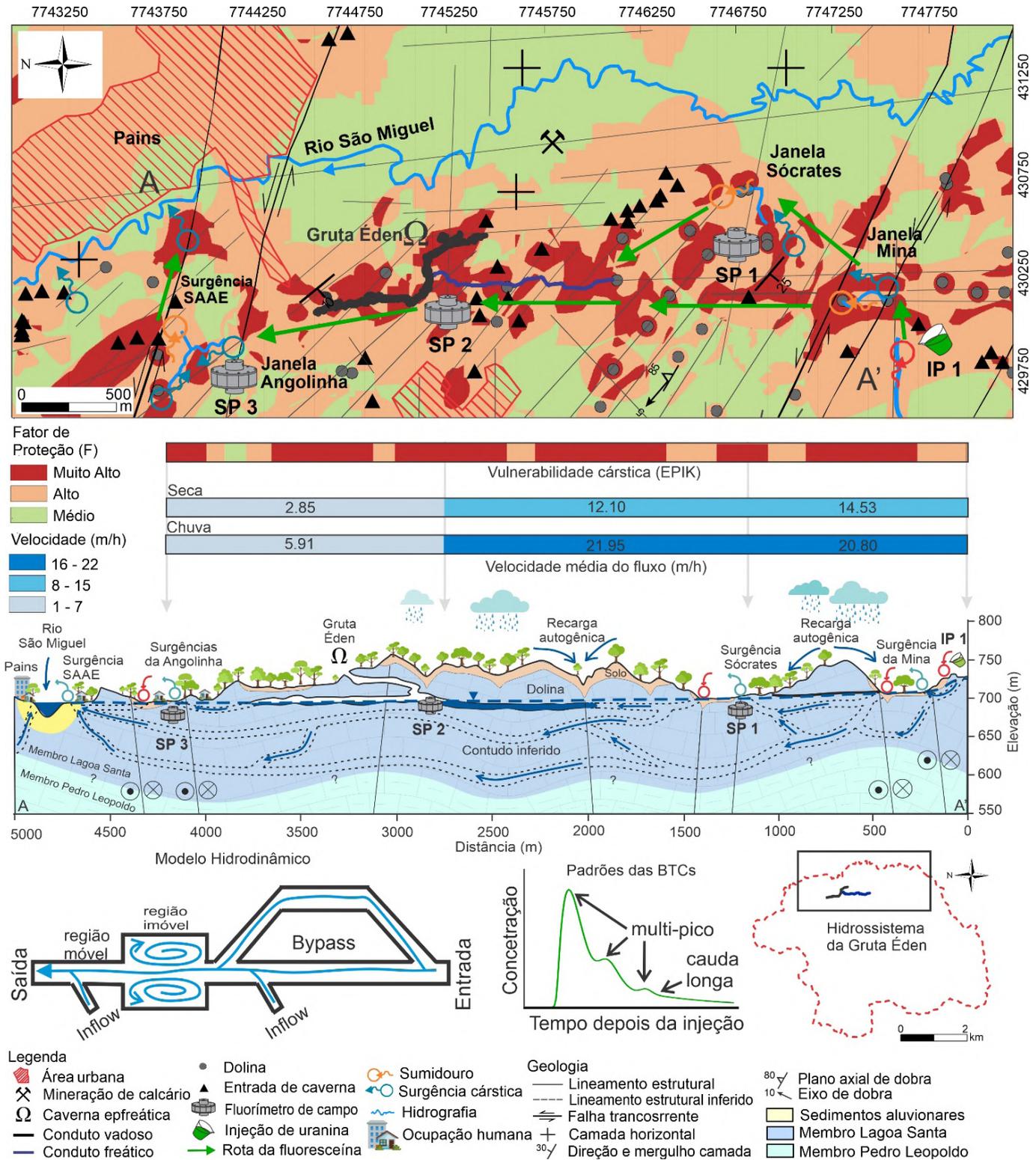


Figura 7 – Modelo hidrodinâmico e sua relação com a vulnerabilidade cárstica da principal rota do sistema cárstico da Gruta Éden. A seção hidrogeológica mostra a variação espacial e sazonal da velocidade média (v_m) e da variação espacial da vulnerabilidade ao longo da rota.

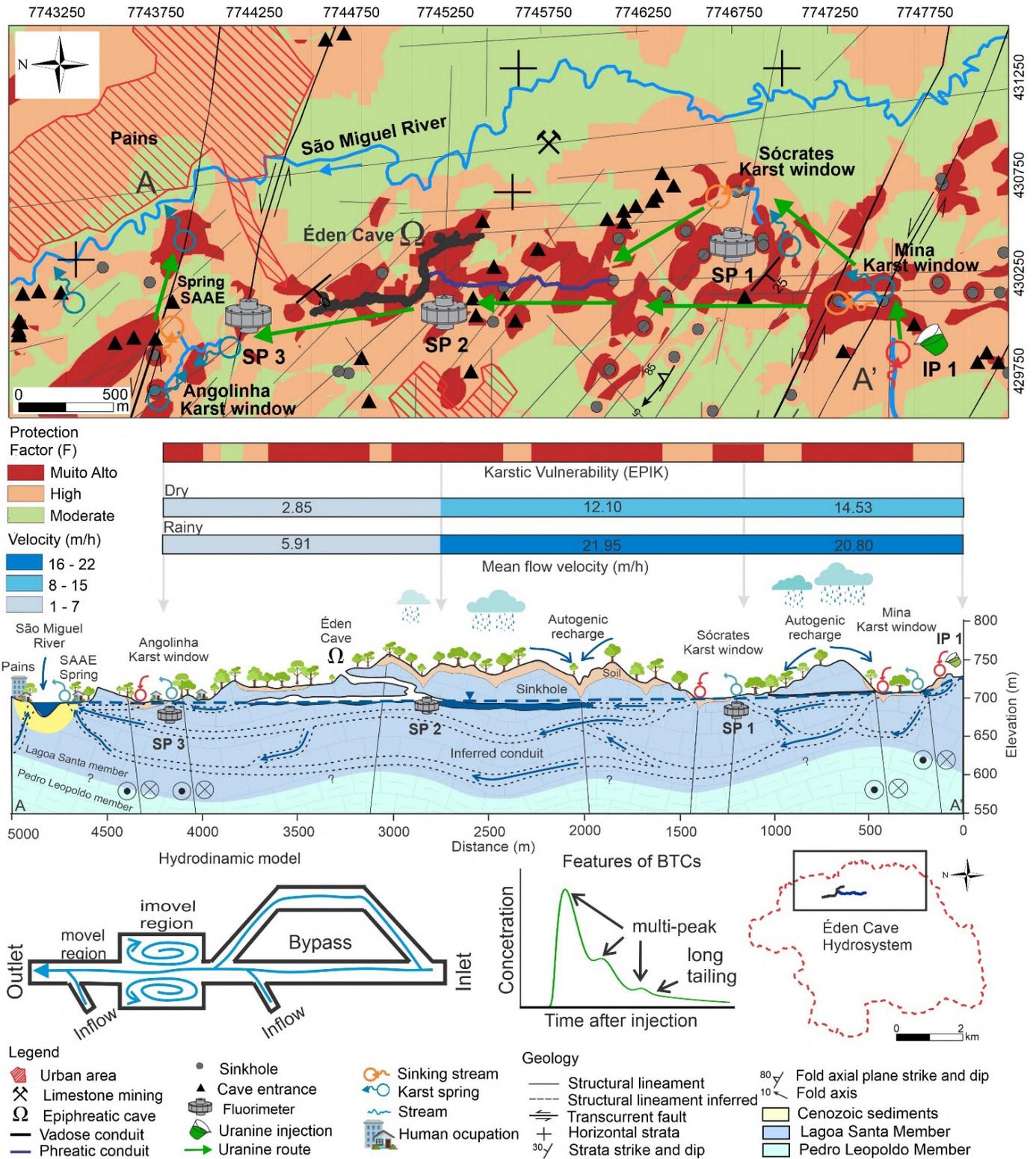


Figure 7 - Hydrodynamic model and its relationship with the karst vulnerability of the main route of the Éden Cave karst system. The hydrogeological section shows the spatial and seasonal variation in mean flow velocity (v_m) and the spatial variation in vulnerability along the route.

Zoneamento e medidas de proteção ambiental

Um dos objetivos deste trabalho é propor a definição de algumas medidas de proteção ambiental sustentadas pelas evidências e resultados dos métodos aplicados e a realidade socioeconômica local. Nesse sentido, são definidas quatro zonas de proteção (S1, S2, S3 e S4) dentro dos limites do hidrossistema da Gruta Éden (Fig. 8). As zonas S1 e S2 estão relacionadas às áreas de muito alta e alta vulnerabilidade, que inclui a principal rota e a área de influência direta da Gruta Éden. Essas duas zonas foram agrupadas por apresentarem uma maior fragilidade ambiental. A zona S3 está associada às áreas de moderada vulnerabilidade. Embora elas apresentem uma fragilidade menor do que a S1 e S2, há potenciais atividades antrópicas que aumentam o risco de contaminação ou impactos ambientais ao hidrossistema. A zona S4 está ligada às áreas de baixa vulnerabilidade. Mesmo apresentando potenciais atividades antrópicas, trata-se de uma zona com um maior fator intrínseco de proteção, contribuindo para amenizar impactos e atenuação de possíveis contaminantes. De acordo com essas quatro zonas, são apresentadas, a seguir, duas possíveis medidas de proteção ambiental:

1) Zonas de proteção S1 e S2: consideradas críticas, requer alta proteção e prioridade na proteção ambiental. Um possível poluente pode atingir rapidamente o ponto de abastecimento SAAE entre 3 e 6 dias. As restrições de uso da terra devem ser rígidas e requerem vigilância especial das atividades que poderiam reduzir a proteção natural do aquífero (remoção de camadas de solo ou alterando a espessura insaturada) ou se tornar uma fonte de poluição (perigo), como calcinações, mineração de calcário, depósitos

Zoning and environmental protection measures

One of the objectives of this work was to propose some environmental protection measures based on the evidence and results of the applied methods and the local socio-economic reality. To this end, four protection zones (S1, S2, S3 and S4) were defined within the boundaries of the Éden Cave hydrosystem (Fig. 8). Zones S1 and S2 are related to the areas of very high and high vulnerability, which include the main route and the Éden Cave direct influence area. These two zones were grouped together due to their greater environmental fragility. Zone S3 is associated with areas of moderate vulnerability. Although they are less fragile than S1 and S2, there are potential human activities that increase the risk of contamination or environmental impacts on the hydrosystem. Zone S4 is linked to areas of low vulnerability. Even though it has potential anthropogenic activities, it is a zone with a greater intrinsic protection factor, helping to mitigate impacts and attenuate possible contaminants. According to these four zones, two possible environmental protection measures are presented below:

1) Protection zones S1 and S2: considered critical, they require high protection and priority in environmental protection. A possible pollutant can quickly reach the SAAE supply point within 3 to 6 days. Land use restrictions must be strict and require special surveillance of activities that could reduce the natural protection of the aquifer (removal of soil layers or altering the unsaturated thickness) or become a source of pollution (danger), such as calcining, limestone mining, solid waste deposits and gas stations (Camaduro et al., 2007). Considering the local socio-economic reality, it is proposed to create environmental protection areas, such as a Private Natural Heritage Reserve

de resíduos sólidos e postos de combustíveis (Camaduro *et al.*, 2007). Considerando a realidade socioeconômica local, propõe-se a criação de áreas de proteção ambiental, como Reserva Particular Patrimônio Natural (RPPN) (Decreto nº 1922/1996) ou de um Parque Municipal na área de influência direta (rota principal) da Gruta Éden. Além disso, deve ser dada atenção à coleta de esgoto e saneamento básico do distrito da Mina, que influencia diretamente o córrego da Mina. Sugere-se um trabalho de educação ambiental para a conscientização dos proprietários de terras que abrange essas zonas. Recomenda-se ao Plano Diretor da cidade de Pains que não haja expansão da malha urbana sobre essas zonas.

2) Zonas de proteção S3 e S4: nestas áreas é possível desenvolver atividades humanas sem impacto direto no hidrossistema, o que condiz com a capacidade de atenuação de impactos do aquífero. São áreas onde são permitidas a ocupação humana e atividade industrial, embora recomende-se sempre a atenção do poder público nas atividades antrópicas estabelecidas nestas zonas.

(Reserva Particular Patrimônio Natural - RPPN) (Decree No. 1922/1996) or a Municipal Park in the Éden Cave direct influence area. Attention should also be paid to sewage collection and basic sanitation in the Mina district, which directly influences the Mina stream. Environmental education work is suggested to raise awareness among landowners in these areas. The Pains Master Plan recommends that the urban fabric should not be expanded over these areas.

2) Protection zones S3 and S4: in these areas it is possible to carry out human activities without direct impacts in the hydrosystem, which is in line with the aquifer's ability to mitigate impacts. These are areas where human occupation and industrial activity are permitted, although it is always recommended that the public authorities pay close attention to the anthropogenic activities established in these zones.

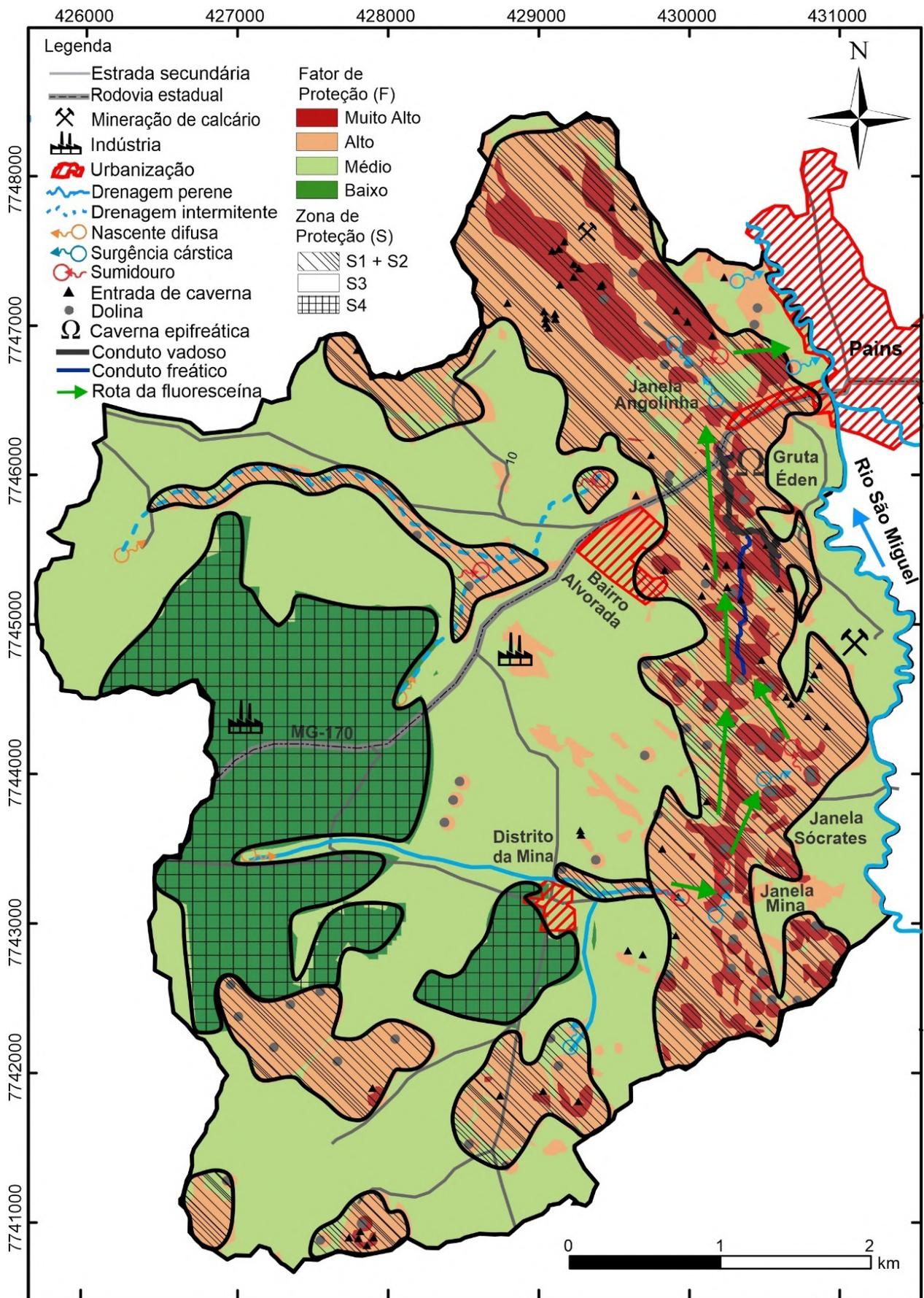


Figura 8 - Zoneamento de proteção do hidrossistema da Gruta Éden proposto com base no mapeamento de vulnerabilidade cárstica à contaminação e pelos testes de traçadores corante.

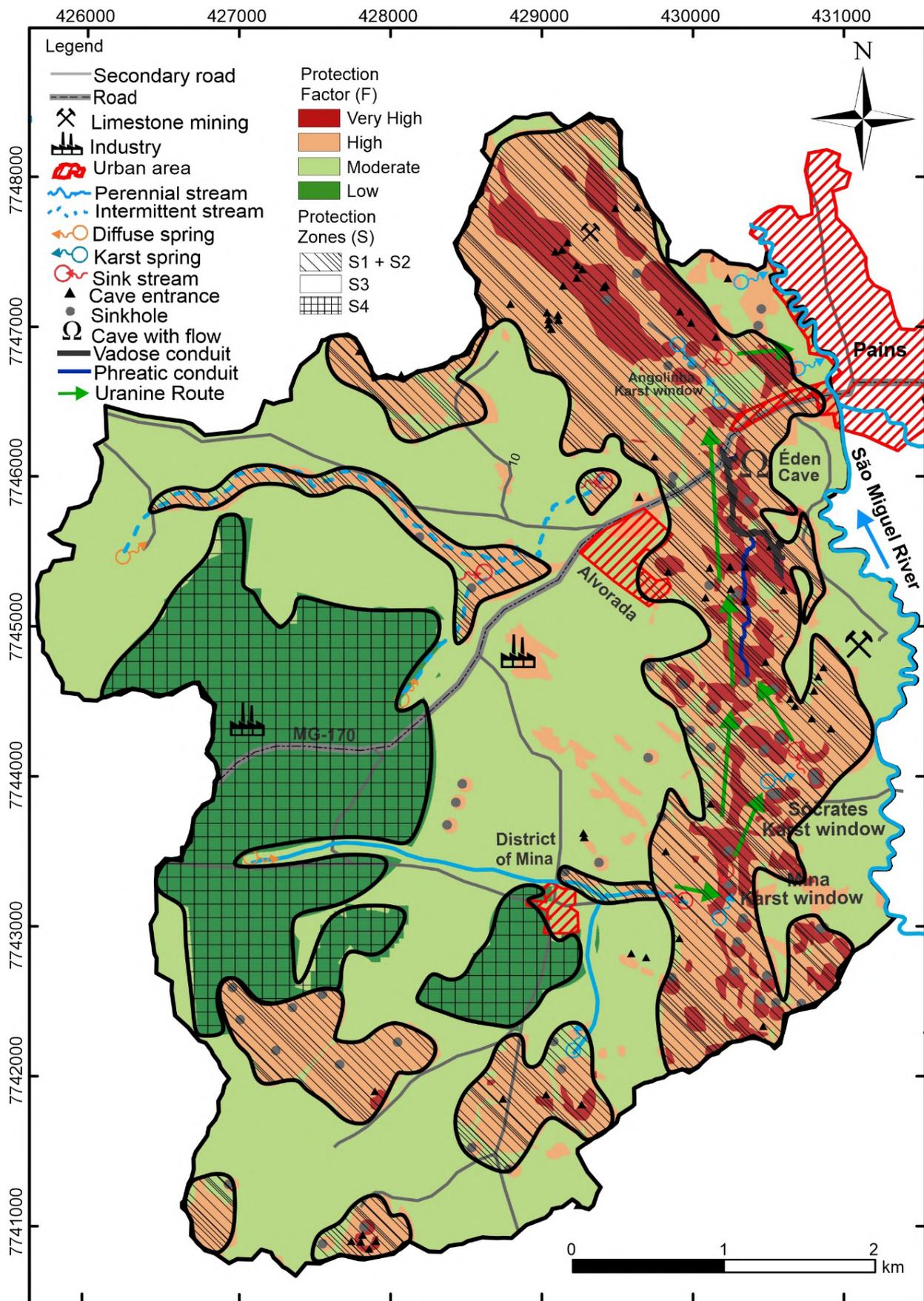


Figure 8 – Protection zoning for the Éden Cave hydrosystem proposed based on karst vulnerability mapping and dye tracer tests.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O hidrossistema da Gruta Édén é complexo tanto do ponto de vista geológico-estrutural quanto hidrodinamicamente devido ao grau de fraturamento/dobramento e deformação tectônica, onde a ação da água e espeleogênese gerou heterogeneidades, como condutos anastomosados, *loops*, lagos subterrâneos, além da maior sinuosidade dos condutos. As heterogeneidades do aquífero refletem diretamente nos padrões geométricos das curvas de restituição e dos parâmetros de fluxo. Os *bypass* ocasionam multifluxos modificando padrões das curvas com vários picos de concentração. A combinação entre lagos subterrâneos e *bypass* aumenta a interação entre zonas móveis e imóveis do fluxo, promovendo um padrão de cauda prolongada das curvas.

A hidrodinâmica do sistema é sensível às variações sazonais climáticas e hidrológicas, constatado pela influência dos parâmetros das curvas e de fluxo com o aumento das vazões durante a estação chuvosa. A recarga predominante é autogênica, via dolinas e sumidouros. Em algumas áreas, a recarga é alogênica e difusa pelo solo e epicarste pouco desenvolvido. A descarga é perene e com fluxo ascendente devido aos padrões de *loops*, sendo que as principais surgências são utilizadas como pontos de abastecimento público.

As áreas de maiores vulnerabilidades deste hidrossistema estão relacionadas com um carste mais desenvolvido e aflorante. As áreas de menores vulnerabilidades estão associadas com um carste menos desenvolvido e de maior cobertura de proteção. Deve-se considerar as variações sazonais dos parâmetros do fluxo durante o mapeamento da vulnerabilidade, uma

CONCLUSIONS

The Édén Cave hydrosystem is complex from both a geological-structural and hydrodynamic point of view due to the degree of fracturing/folding and tectonic deformation. The action of water and speleogenesis has generated heterogeneities such as anastomosed conduits, loops, underground lakes, as well as the greater sinuosity of the conduits. The heterogeneities of the aquifer are directly reflected in the geometric patterns of the breakthrough curves and flow parameters. Bypasses cause multi-flows, modifying curve patterns with several concentration peaks. The combination of underground lakes and bypasses increases the interaction between mobile and immobile flow zones, promoting an extended tailing pattern in the curves.

The system hydrodynamics are sensitive to seasonal climatic and hydrological variations, as can be seen by the influence of the curve and flow parameters with the increase in flows during the rainy season. The predominant recharge is autogenic, via dolines and sinkholes. In some areas, recharge is allogenic and diffuse through the soil and poorly developed epikarst. Discharge is perennial and upward-flowing due to loop patterns, with the main springs being used as public supply points.

The hydrosystem most vulnerable areas are related to more developed and outcropping karst. The areas of lower vulnerability are associated with less developed karst and greater protection coverage. Seasonal variations in flow parameters should be taken into account when mapping vulnerability, since the high dynamics of this hydrosystem have been demonstrated.

Four protection zones were defined: S1 and S2, related to areas of very high and high vulnerability, directly influenced by Édén Cave; S3, asso-

vez que foi demonstrada a alta dinâmica deste hidrossistema.

Quatro zonas de proteção foram definidas: S1 e S2, relacionadas às áreas de muito alta e alta vulnerabilidades, de influência direta da Gruta Éden; S3, associada às áreas de moderada vulnerabilidade; e S4, ligada às de baixa vulnerabilidade. Duas medidas de proteção ambiental são sugeridas: zonas S1 e S2, mais restritivas e de prioridades à proteção ambiental; e zonas S3 e S4, podendo desenvolver atividades humanas sem impacto direto no hidrossistema.

A associação do mapeamento da vulnerabilidade cárstica pelo método EPIK (adaptado) com os testes de traçadores fluorescentes e o mapeamento das feições geomorfológicas e estruturais demonstraram ser uma ferramenta eficaz para compreender a hidrodinâmica e a vulnerabilidade de sistemas complexos. Os produtos gerados podem contribuir para uma melhor gestão ambiental dos recursos hídricos e do patrimônio espeleológico em área cársticas, como é o caso da cidade de Pains.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais da Universidade Federal de Ouro Preto, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências e ao Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID) da UFMG, aos espeleólogos da Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE), ao Espeleogrupo Pains (EPA) em especial ao Lucélio Nativo pelas contribuições relevantes, ao Guano Speleo pela topografia da Gruta Éden, ao Celso Constâncio pela topografia de *drone*, à Coordenação de Aperfeiçoa-

ciated with areas of moderate vulnerability; and S4, linked to areas of low vulnerability. Two environmental protection measures are suggested: zones S1 and S2, which are more restrictive and prioritize environmental protection; and zones S3 and S4, which can develop human activities with no direct impact on the hydrosystem.

The combination of karst vulnerability mapping using the EPIK method (adapted) with fluorescent tracer tests and the mapping of geomorphological and structural features proved to be an effective tool for understanding the hydrodynamics and vulnerability of complex systems. The products generated can contribute to better environmental management of water resources and speleological heritage in karst areas, such as the city of Pains.

ACKNOWLEDGEMENTS

Special thanks to the Graduate Program in Crustal Evolution and Natural Resources of the Federal University of Ouro Preto, the Graduate Program in Geology of the Institute of Geosciences and the Laboratory of Hydrogeological Studies (Laboratório de Estudos Hidrogeológicos - LEHID) of UFMG, the speleologists of the Excursionist and Speleological Society (Sociedade Excursionista e Espeleológica - SEE), the Espeleogrupo Pains (EPA), especially Lucélio Nativo for his relevant contributions, Guano Speleo for the Éden Cave topography, Celso Constâncio for the drone topography, the Coordi-

mento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/Cecav) (Processo nº 02667.000006/2013-00).

nation for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), the National Center for Cave Research and Conservation (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav) (Process no. 02667. 000006/2013-00).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A. Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço Estrutural e Cenários Evolutivos. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. *Bacia do São Francisco Geologia e Recursos Naturais*, Belo Horizonte: SBG/MG, 2001. p. 9-30.

BARBERÁ, J. A.; MUDARRA, M.; ANDREO, B.; DE LA TORRE, B. Regional-scale analysis of karst underground flow deduced from tracing experiments: examples from carbonate aquifers in Malaga province, southern Spain. *Hydrogeology Journal*, v. 26, n. 1, p. 23-40, 2018.

BENISCHKE, R.; GOLDSCHIEDER, N.; SMART, C. Tracer techniques. In: GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. *Methods in karst hydrogeology*. London: Taylor and Francis, p. 147-170, 2007.

BENISCHKE, R. Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. *Hydrogeology Journal*, v. 29, n.1, p. 67-88, 2021.

CADAMURO, L. M. Relatório de Avaliação Qualitativa de Interferências Físicas (Exploração de Água para Consumo Humano, Mineração, Irrigação) na Região da Área da Bacia do São Francisco. IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis, Diretoria de Ecossistemas – Direc, Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas – CECAV, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – Pnud, 45 p. 2007.

DIAS, F. S.; VELÁSQUES, L. N. Hidrogeologia da bacia do rio São Miguel, municípios de Pains e Arcos – MG. In: XII Congresso Brasileiro de águas subterrâneas, 2002. *Anais do XII Congresso Brasileiro de águas subterrâneas*, 2002, v. 1. p. 1-20.

DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK), Practical Guide. Swiss Agency for the Environment. Berne: *Forests and Landscape (SAEFL)*. 1998.

ENDER, A.; GOEPPERT, N.; GOLDSCHIEDER, N. Spatial resolution of transport parameters in a subtropical karst conduit system during dry and wet seasons. *Hydrogeology Journal*, v. 26, n. 7, p. 2241-2255, 2018.

FÉLIX, A. A.; FREITAS JÚNIOR, R. L. *Mapeamento geológico e hidrogeológico da bacia hidrográfica do rio São Miguel – Alto São Francisco, Estado de Minas Gerais*. 2000. 105 f. Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

FERRARI J. A., RIBEIRO, A. A., FERREIRA C. F., CRUZ J. B., REINO J. C. R., PILÓ L. B. *Identificação e Caracterização Hidrológica da Área de Influência da Gruta Do Éden - Pains - MG*. Relatório Técnico, São Paulo, 2018.

FERREIRA, C. F. Fragilidades e impactos ambientais no carste e nas cavernas. In: *Espeleologia e Licenciamento Ambiental*. CRUZ, J. B.; PILÓ, L. B. Brasília-DF, 70p, 2019.

FIELD, M. S. *The QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems*. National Center for Environmental Assessment--Washington Office, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2002.

FORD, D.; WILLIAMS, P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. McMaster University, Canadá; University of Auckland, New Zealand. John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England, v. 1, 2007.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environments agencies. Washington: *The Word Bank*, 2002.

FREITAS, P. M. C. *Estudo de interconexão hidráulica superficial-subterrânea no carste da área periurbana de Pains/MG, utilizando-se traçadores Rodamina WT*. 2009. 101 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2009.

GOEPPERT, N.; GOLDSCHIEDER, N.; BERKOWITZ, B. Experimental and modeling evidence of kilometer-scale anomalous tracer transport in an alpine karst aquifer. *Water Research*, v. 178, p. 115755, 2020.

GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. *Methods in Karst Hydrogeology*. Taylor and Francis. International Contributions to Hydrogeology, 2007.

GOLDSCHIEDER, N. A new quantitative interpretation of the long-tail and plateau-like breakthrough curves from tracer tests in the artesian karst aquifer of Stuttgart, Germany. *Hydrogeology Journal*, v. 16, n. 7, p. 1311-1317, 2008.

GOLDSCHIEDER, N. *et al.* Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, v. 37, n. 1, p. 27-40, 2008.

GOLDSCHIEDER, N. *Hydrogeology and Vulnerability of Karst Systems - Examples from the Northern Alps and Swabian Alp*. PhD thesis, 2002. 229 f. University of Karlsruhe, Karlsruhe, 2002.

GOLDSCHIEDER, N. 2005. Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochifen-Gottesacker. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 98(1), 1-17.

GUTIÉRREZ F, PARISE M, DE WAELE J; JOURDE H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth Science Reviews*, v. 138, p. 61-88, 2014.

KLIMCHOUK, A. B. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. *Acta Carsologica*, v. 44, n. 3, p. 289-313, 2015.

LAUBER, U.; UFRICHT, W.; GOLDSCHIEDER, N. Spatially resolved information on karst conduit flow from in-cave dye tracing. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 18, n. 2, p. 435-445, 2014.

LEIBUNDGUT, A. C.; MALOSZEWSKI, P.; KÜLLS, C. *Tracers in hydrology*. Wiley-Blackwell, 2009.

LENHARE, B. D. *Vulnerabilidade do carste nas cabeceiras dos Rios das Almas, São José de Guapiara (Bacia do Rio Paranapanema) e do Rio Pilões (Bacia do Rio Ribeira de Iguape) na região do Parque Estadual Intervales (PEI), Estado de São Paulo*. 2014. 113f. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2014.

LUCON, T. N. *et al.* Recharge sources and hydraulic communication a karst aquifer, São Miguel watershed, MG, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 100, p. 102591, 2020.

LUCON, T. N.; GALVÃO, P. H. F.; COSTA, A. T. Hidrogeologia. In: CRUZ & PILÓ. *A região cárstica de Pains*. Brasília: Editora, 2022. cap. 2, p. 53-79.

MARÍN, A. I.; ANDREO, B.; MUDARRA, M. Vulnerability mapping and protection zoning of karst springs. Validation by multitracer tests. *Science of the Total Environment*, v. 532, p. 435-446, 2015.

MELO, D. H. C. *Mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos Cársticos: Exemplos das Bacias Hidrográficas dos Rios Verdes, Jacaré e Salitre, Bahia, Brasil*. 2017. 104 f. Tese de doutorado, PGgeologia. Universidade Federal da Bahia, 2017.

MENEGASSE, L. N; GONÇALVES, J. M; FANTINEL, L. M. Disponibilidades hídricas na provincial cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. *Revista águas subterrâneas*, n. 9, p.1-10, 2002.

MEYER, B. O. *Petrologia e geocronologia das fácies carbonáticas da Formação Sete Lagoas em Pains (MG)*. 2018. 256 f. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Ouro Preto, 2018.

MORALES, T. *et al.* Solute transport modelling in karst conduits with slow zones during different hydrologic conditions. *Journal of Hydrology*, v. 390, n. 3-4, p. 182-189, 2010.

MUZZI MAGALHÃES, P. *Análise estrutural qualitativa das rochas do Grupo Bambuí, na porção sudoeste da Bacia do São Francisco*. 1989. 100 f. Dissertação Mestrado Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Ouro Preto, 1989.

PALMER, A. N. *Cave Geology*, Cave Books, Dayton, 2007.

- PEREIRA, D. L.; GALVÃO, P.; LUCON, T.; FUJACO, M. A. Adapting the EPIK method to Brazilian Hydro (geo) logical context of the São Miguel watershed to assess karstic aquifer vulnerability to contamination. *Journal of South American Earth Sciences*, 90, 191-203, 2019.
- PILÓ, L. B. Ambientes Cársticos de Minas Gerais: valor, fragilidade e impactos ambientais decorrentes da atividade humana. *Revista O Carste*, Belo Horizonte, v. 11, n. 3, p. 50-58, 1999.
- RIBEIRO, A.; TROUW, R. A. J.; PACIULLO, F. V. P.; SENRA, A. S.; VALERIANO, C. D. M. *Geologia da Folha Piumhi- SF.23-V-B-II, escala 1:100.000*: nota explicativa. Minas Gerais: UFRJ/CPRM, 50p. Santos, I. 2001. Hidrometria aplicada, capítulo 4. Instituto de tecnologia para o desenvolvimento – LACTEC, Curitiba, p. 119-124, 2008.
- RIBEIRO, D. D. M, NASCIMENTO, S. A. M.; GARCIA, A. J. V. Vulnerabilidade dos Aquíferos Cársticos Sapucari e Maruim, bacia sedimentar de Sergipe-Alagoas. *Águas Subterrâneas*, v. 30, n. 3, p. 375-393, 2016.
- RUBBIOLI, E., AULER, A.; MENIN, D.; BRANDI, R. *Cavernas-Atlas do Brasil Subterrâneo*. Brasília, ICMBio/CECAV. 370p. 2019
- SAADI, A.; MORAIS, M. S.; CARDOSO, G. G. C. *Evolução Morfotectônica e Carstogênese na região de Arcos-Pains-Doresópolis*. In: 2º Simpósio Nacional de Geomorfologia. Florianópolis, 1998.
- SCHNEGG, P. A. An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. In: *Articles of the Geomagnetism Group at the University of Neuchâtel, Groundwater and Human Development*. Neuchâtel. p. 1484-1488, 2002.
- SEE - Sociedade Excursionista e Espeleológica. *Projeto Arcos Pains Espeleologia (PROAPE)*: SEE/DEGEO/EM/UFOP. Ouro Preto: PROAPE, 2012.
- SMART, C. Error and technique in fluorescent dye tracing. In: *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, p. 500-512, 2005.
- STEVANOVIĆ, Z. Characterization of karst aquifer. In: *Karst Aquifers—Characterization and Engineering*. Springer, Cham. p. 47-125, 2015.
- TIMO, M. B. Caracterização geomorfológica da região cárstica Arcos-Pains e de seus sistemas cársticos. *Caderno de Geografia*, 32(68), 191-191, 2022.
- VALERIANO, C. M. The Southern Brasília Belt. In São Francisco Craton, Eastern Brazil, Tectonic genealogy of a miniature continent. In: HEILBRON, M.; CORDANI, U. G.; ALKMIM, F. F.; REIS, H. L. *The São Francisco craton and its margins*. Springer, Cham. p. 321-331, 2019.
- WHITE, W. B. Conceptual models for karstic aquifers. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, v. 5, p. 11-16, 2003.

WORTHINGTON, S. R. H.; FORD, D. C. Self organized permeability in carbonate aquifers. *Groundwater*, v. 47, n. 3, p. 326-336, 2009.

YOUNOS, T.; SCHREIBER, M.; FICCO, K. K. *Karst Water Environment: Advances in Research, Management and Policy*. Springer. v. 68, 2018, 273p.

ZWAHLEN, F. Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers - Final report -, COST Action 620. Luxemburg, 2004.