

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geologia**

Maria Isabel Pereira Teodoro

**HIDRODINÂMICA DAS ZONAS CÁRSTICA E CÁRSTICA-FISSURAL DO  
SISTEMA AQUÍFERO DA FORMAÇÃO SETE LAGOAS POR MEIO DE  
TRAÇADORES CORANTES E DA ANÁLISE DAS ESTRUTURAS RÚPTEIS NA  
REGIÃO DE LAGOA SANTA, MINAS GERAIS**

Nº 221

**BELO HORIZONTE**  
**DATA (20/10/2020)**

Maria Isabel Pereira Teodoro

**HIDRODINÂMICA DAS ZONAS CÁRSTICA E CÁRSTICA-FISSURAL DO  
SISTEMA AQUÍFERO DA FORMAÇÃO SETE LAGOAS POR MEIO DE  
TRAÇADORES CORANTES E DA ANÁLISE DAS ESTRUTURAS RÚPTEIS NA  
REGIÃO DE LAGOA SANTA, MINAS GERAIS**

**Versão final**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Leila Nunes Menegasse Velásquez

Belo Horizonte

2020

T314h  
2020

Teodoro, Maria Isabel Pereira.

Hidrodinâmica das zonas cárstica e cárstica-fissural do sistema de aquífero da Formação Sete Lagoas por meio de traçadores corantes e da análise das estruturas rúpteis na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais [manuscrito] / Maria Isabel Pereira Teodoro. – 2020.

194 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2020.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Inclui bibliografia.

Inclui apêndices.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Hidrodinâmica – Teses. 3. Carste – Lagoa Santa (MG) – Teses. I. Velásquez, Leila Nunes Menegasse. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 556.3(815.1)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**HIDRODINÂMICA DAS ZONAS CÁRSTICA E CÁRSTICA-FISSURAL DO AQUÍFERO SETE LAGOAS  
POR MEIO DE TRAÇADORES CORANTES E DA ANÁLISE DAS ESTRUTURAS RÚPTEIS NA  
REGIÃO DE LAGOA SANTA, MINAS GERAIS**

**MARIA ISABEL PEREIRA TEODORO**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA.

Aprovada em 20 de outubro de 2020, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof. Leila Nunes Menegasse Velásquez - Orientadora  
UFMG

  
Prof. Rodrigo Sérgio de Paula  
UFMG

  
Prof. Rinaldo Afrânio Fernandes  
VALE

Belo Horizonte, 20 de outubro de 2020.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter me dado força e coragem para superar os desafios.

Com pesar, me limitarei a citar poucos nomes, mas concedendo a devida referência àqueles não mencionados, lembrando-os que são igualmente importantes.

À minha orientadora Leila Menegasse pela confiança, compreensão, carinho, bondade e pela sabedoria compartilhada comigo, que foram determinantes na concretização desse meu sonho.

Aos meus pais, Cici e Vicente, pelo amor, apoio e paciência durante essa jornada e por entenderem minha ausência em alguns momentos.

Ao engenheiro Peter Fleming por todo o companheirismo, disponibilidade e empenho nos trabalhos de campo e de laboratório. Aos demais funcionários do CDTN, em especial a Paulo Rodrigues, Presley e Ricardo.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade/Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - ICMBio/CECAV, pelo financiamento do *Projeto de Adequação e Implantação de uma Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais*, processo FUNDEP/GERDAU/UFMG Nº 22.317, coordenado pela Profa. Dra. Leila Velásquez.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – APQ 02049-14, pelo apoio financeiro a parte do projeto.

À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, ao Instituto Mineiro de Gestão de Água – IGAM e ao Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos bolsistas, mestrandos, doutorandos do projeto pelo companheirismo, em especial a Rodrigo, Carol, Gabi, Pedro e Isabela. Ao Luís Felipe pelo incentivo e apoio nos trabalhos de campo e às minhas grandes amigas Gabi e Ana pela torcida de sempre.

Ao Matheus pela motivação e companheirismo e a toda a minha família pelas orações, em especial aos meus queridos primos Rafael e Virgínia por todo incentivo e amor.

Ao Instituto de Geociências – UFMG e seus professores que contribuíram com minha formação e aos funcionários do Programa de Pós-Graduação, em especial William, que sempre esteve disponível para nos auxiliar.

À equipe da Hidrovia por compartilhar comigo toda a experiência em estudos com traçadores, em especial Bruno, Dora, Paulinho, Gisele, Carlinhos, Ludevino e Laila.

A meus amigos da Arcadis e Progen/Vale, em especial a Babi, Rafi, Sandrine, Fê, Vinicius, Malu, Juan e Carlos por possibilitarem que eu me dedicasse ao mestrado.

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas contribuições.

## RESUMO

A área estudada localiza-se 30 km a norte de Belo Horizonte e inclui dentro de seus limites a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa. A Formação Sete Lagoas é a principal unidade aflorante, configurando uma geomorfologia cárstica diversa, caracterizada por *canyons*, vales cegos, dolinas, sumidouros e cavernas. Em subsuperfície, uma rede de condutos forma aquíferos cársticos que abrigam importantes reservas hídricas, que vêm sofrendo riscos qualitativos e quantitativos face a acentuada pressão da expansão demográfica e industrial da região. Empregando-se a técnica de injeção de traçadores corantes, procurou-se estabelecer as interconexões hidráulicas, as condições hidrodinâmicas das rotas de fluxo, as configurações da recarga, circulação e descarga na porção superior do aquífero. Foram executados dez ensaios quali-quantitativos utilizando Fluoresceína e Rodamina WT. Resultados positivos para interconexões hídricas foram observados em sete ensaios, desvendando-se a proveniência de 68,3%, 13,0%, 70,2%, 41,3% das descargas nas principais surgências da área: Gordura, Samambaia, Engenho e Mocambo, respectivamente. As velocidades médias aparentes calculadas para o fluxo de água nas rotas avaliadas variaram de  $8,90 \times 10^{-3}$  m/s a  $4,49 \times 10^{-2}$  m/s e, considerando-se o fator de sinuosidade da rota, de  $1,34 \times 10^{-2}$  m/s a  $6,74 \times 10^{-2}$  m/s, o que evidencia a alta velocidade dos fluxos. Considerando as interconexões diretas, onde mais de 85% da massa de corante injetada foi recuperada, observa-se um zoneamento espacial das velocidades, de modo que os maiores valores ocorrem na região norte da área - contribuições da Surgência Gordura, os valores intermediários ocorrem na região sul - contribuições do córrego Samambaia e as menores velocidades na porção central - contribuições da Surgência Mocambo. A partir da medição das vazões nos pontos de injeção e de monitoramento, do tempo de residência e da porcentagem de massa de traçador recuperada, calcularam-se os volumes do aquífero para as rotas investigadas, que variaram de 1512,81 m<sup>3</sup> a 38.246,4 m<sup>3</sup> e os diâmetros dos condutos, que variaram de 0,63 m a 2,40 m. As interconexões apresentam majoritariamente sentidos de fluxo para o setor leste, principalmente nas direções N40°-60°E e N80°-90°E, em direção ao nível de base regional, o Rio das Velhas. A avaliação da vazão nos poços profundos associados a lineamentos morfoestruturais também evidenciou a importância dessas mesmas direções no condicionamento da circulação hídrica subterrânea, de forma que as maiores vazões dos poços estão relacionadas às direções N67,5°-90°E (mediana de 52,59 m<sup>3</sup>/h e média de 98,16 m<sup>3</sup>/h), N270°-292,5°W (mediana de 23,23 m<sup>3</sup>/h e média de 38,71 m<sup>3</sup>/h) e N22,5°-45°E (mediana de 15,6 m<sup>3</sup>/h e média de 52,76 m<sup>3</sup>/h). As direções preferencias de fluxo obtidas

tanto para a porção superior do aquífero quando inferior apresentam-se bem marcadas pelos lineamentos morfoestruturais, fraturas, acamamento e paleodutos, o que evidencia o forte controle estrutural no condicionamento do fluxo subterrâneo da região.

**Palavras Chave:** Hidrogeologia cárstica; traçadores corantes; interconexões hidráulicas; análise estrutural; APA Carste de Lagoa Santa.



## ABSTRACT

The studied area is located 30 km north of Belo Horizonte and includes within its limits the Environmental Protection Area Carste of Lagoa Santa. The Sete Lagoas Formation is the main outcrop unit, configuring a diverse karst geomorphology, characterized by canyons, blind valleys, dolines, sinkholes and caves. On the subsurface, a pipe network forms karst aquifers that shelter important water reserves, which have been suffering qualitative and quantitative risks due to the intense pressure of the demographic and industrial expansion of the region. Employing the dye tracer injection technique, it has been an attempt to establish the hydraulic interconnections, the hydrodynamic conditions of the flow path and the recharge, circulation and discharge configurations in the upper portion of the aquifer. Ten qualitative and quantitative assays were performed using Fluorescein and Rhodamine WT. Positive results for water interconnections were observed in seven tests, revealing the origin of 68.3%, 13.0%, 70.2%, 41.3% of the discharge in the main springs of the area: Gordura, Samambaia, Engenho and Mocambo, respectively. The apparent average flow velocity of the water in the evaluated routes ranged from  $8.90 \times 10^{-3}$  m/s to  $4.49 \times 10^{-2}$  m/s, and, considering the sinuosity factor of the route, from  $1.34 \times 10^{-2}$  m/s to  $6.74 \times 10^{-2}$  m/s, which shows the high velocity of the flows. Considering the direct interconnections, where more than 85% of the injected dye mass was recovered, there is a spatial zoning of the velocities, in such form so that the highest values occur in the northern region of the area - contributions from Gordura spring, the intermediate values occur in the southern region - contributions from Samambaia stream and the lowest velocities in the central portion - contributions from Mocambo spring. From the measurement of the flow rates at the injection and monitoring points, the mean residence time and the percentage of tracer mass recovered, the aquifer volumes for the investigated routes were calculated, which ranged from 1512.81 m<sup>3</sup> to 38,246.4 m<sup>3</sup> and the diameters of the conduits, which ranged from 0.63 m to 2.40 m. The interconnections present mostly directions of flow to the east sector, mainly in the directions N40°-60°E and N80°-90°E, towards the regional base level, the Rio *das Velhas* river. The evaluation of the flow in the wells associated with morphostructural lineaments also evidenced the importance of these same directions in the conditioning of the underground water circulation, so that the largest flows of the deep wells are related to the N67,5°-90°E directions (median of 52.59 m<sup>3</sup>/h and average of 98.16 m<sup>3</sup>/h), N270°-292,5°W (median of 23.23 m<sup>3</sup>/h and average of 38.71m<sup>3</sup>/h) and N22,5°-45°E (median of 15.6m<sup>3</sup>/h and average of 52.76m<sup>3</sup> / h). The preferred flow directions obtained for both the upper and lower portions of the aquifer are well marked by

the morphostructural lineaments, fractures, bedding and paleoducts, which show the strong structural control in the conditioning of the underground flow in the region.

**Key words:** Karst hydrogeology; dye tracers; hydraulic interconnections; structural analysis; APA Karst of Lagoa Santa.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo, limite da APA Carste Lagoa Santa e municípios. Fonte: Teodoro et. al., 2019.....	18
Figura 2 - Relação esquemática entre disponibilidade de CO <sub>2</sub> , as discontinuidades e a dissolução com o aumento da profundidade. Fonte: adaptado de Williams (1983).....	21
Figura 3 - Ilustração esquemática do sistema aquífero cárstico caracterizado pelas recargas autigênica e alogênica, infiltração pontual (sumidouros) e difusa e porosidades/permeabilidade através da matriz, fraturas e condutos. Fonte: Goldscheider & Drew (2007).	23
Figura 4 - Representação da equação de Bernoulli para o fluxo de fluidos viscosos reais através de um tubo com variação da seção transversal. Legenda: E – Energia total; H – Pressão piezométrica; p <sub>1</sub> , p <sub>2</sub> , p <sub>3</sub> - pressão do fluido nas seções transversais 1, 2 e 3 respectivamente. ρ – densidade do fluido; g – aceleração da gravidade; v – velocidade do fluxo; z – elevação. α – coeficiente de perda hidráulica. Adaptado de Goldscheider & Drew (2007). .....	25
Figura 5 - Espectro de excitação (λ=491 nm no pico), espectro de emissão (λ=516 nm no pico) e espectro de varredura síncrona da Fluoresceína. Fonte: de Leibundgut et al. (2009). .	29
Figura 6 – Fórmula estrutural para a Uranina (fluoresceína) e a Rodamina WT. Fonte: adaptado de Leibundgut et al. (2009). .....	29
Figura 7 – Variações da intensidade de fluorescência para valores de pH distintos considerando os principais traçadores fluorescentes, com destaque para a fluoresceína e a rodamina WT, marcados em verde e vermelho, respectivamente. Fonte: adaptado de Leibundgut et al. (2009), depois de Smart & Smith (1976) e Kass (1998). .....	30
Figura 8 – Decaimento da intensidade de fluorescência causada por exposição à luz para os principais traçadores fluorescentes (1 – Piranina; 2 – Fluoresceína; 3 – Eosina; 4 – Naftionato; 5 – Rodamina WT, 6 – Sulforodamina B; 7 – Aminorodamina G), com destaque para a Fluoresceína e Rodamina WT, marcados em verde e vermelho, respectivamente. Fonte: adaptado de Behrens (1982); Wernli (1982) apud Leibundgut et al. (2009).....	31
Figura 9 – Precipitação diária para o período de outubro/2017 a setembro/2018 e indicação das datas das injeções dos traçadores em cada um dos ensaios realizados. Fonte dos dados pluviométricos: SIAGAS - Estação Pluviométrica Pedro Leopoldo (código: 1944009). .....	35
Figura 10 – Hidrografia, hipsometria da área de estudo, com destaque para os principais córregos e sub-bacias hidrográficas e conexões mapeadas e inferidas por Auler (1994). .....	38

Figura 11 – Diagrama de roseta dos eixos principais de 393 depressões cársticas da área de estudo. Fonte: modificado de Amaral (2018).	39
Figura 12 – Diagrama estratigráfico da Bacia Bambuí, com as principais unidades de preenchimento da bacia em Minas Gerais. Fonte: Kuchenbecker et al. (2016).	40
Figura 13 - Área de estudo no contexto geotectônico do Cráton do São Francisco (Fonte: adaptado de Alkimim, 2004), coluna estratigráfica (Fonte: adaptao de Pessoa, 2005) mapa e perfil geológico da área de estudo (Fonte: adaptado de Ribeiro et al., 2016).	42
Figura 14 – Mapa dos pontos de injeção e monitoramento. Notas: Cada ensaio é identificado por uma cor. Pontos monitorados em mais de um ensaio são identificados pelas cores dos respectivos ensaios. Fonte: Teodoro, <i>et al.</i> (2019).	53
Figura 15 – Injeção dos traçadores fluorescentes. A) Injeção de Rodamina WT na Gruta do Sumidouro (ID-01; Ensaio 1); B) Injeção de Fluoresceína no Piezômetro Cerca Grande P4 (ID-12; Ensaio 02); C) Injeção de fluoresceína na Janela Cárstica Cocho D'Água (ID-25; Ensaio 3); D) Injeção de Rodamina WT na Gruta da água Fria (ID-24; ensaio 3); E) Injeção de fluoresceína no piezômetro próximo à Lagoa do Santo Antônio (ID-27; Ensaio 4); F) Injeção de Rodamina WT na Gruta do Morro Redondo (ID-32; Ensaio 5).	54
Figura 16 - Injeção dos traçadores fluorescentes. A) Injeção de Rodamina WT na gruta do Zé Irene (ID-37; Ensaio 6); B) Injeção de Rodamina WT na lagoa do Bom Jardim (ID-40; Ensaios 7 e 8); C) Injeção de Fluoresceína no sumidouro Palmeiras (ID-41; Ensaios 7 e 8); D) Injeção de Rodamina WT no sumidouro Bebidas (ID-44; Ensaio 9); E) Injeção de Fluoresceína no sumidouro Goiabeiras (ID-43; Ensaio 9); F) Injeção de Fluoresceína na gruta da Lapa vermelha (ID-52; Ensaio 10).	55
Figura 17 - Instrumentos empregados no monitoramento da fluorescência das águas. A) Frascos para a coleta de carvão ativado (direita) e água (esquerda); B) Amostrador automático ISCO 3700; C) Sachê com carvão ativado; D) Fluorímetro para medição contínua em campo (GGUN-FL30) específico para águas superficiais; E) Fluorímetro para medição contínua em campo (GGUN- FL24) empregado em águas superficiais e poços; F) Espectrofotômetro Hitachi F-2700. Fonte: modificado de Teodoro et al. (2019).	58
Figura 18 – Modelo de curvas de passagem e recuperação de traçador fluorescente e tempos de chegada do traçador, baseada na interconexão Lapa Vermelha – Samambaia.	59
Figura 19 – Métodos de medição de vazão. A) Medição de vazão no córrego Goiabeiras utilizando-se o micromolinetete; B) Medição de vazão na Gruta da Lagoa pelo método volumétrico.	61

Figura 20 – Tipologia de condutos cársticos e parâmetros hidráulicos. Fonte: modificado de Atkinson et al. (1973) e Gaspar (1987) por Hidrovia (2018). .....	62
Figura 21 – Fotolineamentos morfoestruturais e poços tubulares considerados na avaliação principais direções de lineamentos morfoestruturais condicionantes do fluxo subterrâneo. ...	66
Figura 22 - Vazão de estabilização dos poços (m <sup>3</sup> /h) versus distância do lineamento mais próximo (m) e correlações de Pearson; A) – Considerando todos os poços da área. Em relação ao lineamento mais próximo, poços posicionados a uma distância de: B) – Até 50 metros; (C) – Até 100 metros; D) – Até 150 metros; E) – Até 200 metros; F) – Até 250 metros; G) – Até 300 metros. ....	67
Figura 23 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 1.....	68
Figura 24 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 2.....	70
Figura 25 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 3.....	73
Figura 26- Resultados das avaliações quantitativas para as rotas Janela Cárstica Cocho D'água (ID-25) – Surgência Engenho (ID-26), Gruta da Água Fria (ID-24) – Surgência Engenho (ID-26) e Gruta da Água Fria (ID-24) – Janela Cárstica Cocho D'água (ID-25). Legenda: * No cálculo das velocidades e volume do aquífero considerou-se o tempo tm.....	74
Figura 27 - Representação esquemática da conexão Cocho d'água – Engenho, com indicação do diâmetro médio do conduto. As linhas pontilhadas representam as pequenas contribuições hídricas. ....	75
Figura 28 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 4.....	76
Figura 29 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 5.....	78
Figura 30 - Resultados das avaliações quantitativas para a conexão hidráulica Gruta Morro Redondo (ID-32) – Surgência Mocambo (ID-21). ....	80
Figura 31 – Representação esquemática das conexões Morro Redondo – Poções e Poções - Mocambo.....	81
Figura 32 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 6.....	82
Figura 33 - Resultados das avaliações quantitativas para a conexão hidráulica Gruta Morro Redondo (ID-32) – Surgência Mocambo (ID-21). ....	84
Figura 34 - Representação esquemática das conexões Zé Irene – Mocambo, Morro Redondo – Poções – Mocambo (Ensaio 5). ....	85
Figura 35 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento dos Ensaios 7 e 8.....	86
Figura 36 - Resultados das avaliações quantitativas para as conexões hidráulicas Palmeira (ID-41) – Mocambo (ID-21) e Lagoa Bom Jardim (ID-40) – Mocambo e representação em mapa das interconexões hidráulicas. Nota: Ressalta-se que as conexões entre Palmeiras (ID-	

41)/Lagoa Bom Jardim (ID-40) e os pontos ID-15, ID-18 e ID-20 foram obtidas somente nos ensaios 7/8 realizados em março/2018. ....	89
Figura 37 - Representação esquemática das conexões obtidas na Bacia Palmeiras-Jaguara através dos ensaios 7, 8, 5 e 6, com indicação dos diâmetros médios dos condutos. As linhas pontilhadas representam as pequenas contribuições. ....	91
Figura 38 - Localização dos pontos de injeção e monitoramento do Ensaio 9. ....	92
Figura 39 - Resultados das avaliações quantitativas para as conexões hidráulicas Bebidas (ID-44) – Gordura (ID-38), Goiabeiras (ID-43) – Gordura, Bebidas – Gruta da Lagoa (ID-45), Goiabeiras – Gruta da Lagoa e representação em mapa das interconexões hidráulicas. Legenda: * No cálculo das velocidades considerou-se o tempo final de monitoramento; ---- Parâmetro não calculado.....	94
Figura 40 – Representação esquemática das conexões obtidas na Bacia do Gordura, com indicação do diâmetro médio dos condutos. As linhas pontilhadas representam pequenas contribuições hídricas. ....	95
Figura 41 - Localização dos pontos de injeção e monitoramento do Ensaio 10. ....	96
Figura 42 - Resultados das avaliações quantitativas para a conexão hidráulica Gruta Lapa Vermelha (ID – 52) – Surgência Samambaia (ID-53).....	98
Figura 43 - Representação esquemática da conexão Gruta Lapa Vermelha – Samambaia, obtida, com indicação do diâmetro médio do conduto. ....	99
Figura 44 - Resultados das conexões hídricas confirmadas. Cada ensaio é identificado por uma cor distinta. Pontos monitorados em mais de um ensaio são identificados pelas cores dos respectivos ensaios. A) Todas as conexões hídricas confirmadas. B) Enfoque na injeção do Sumidouro Goiabeiras. C) Enfoque nas injeções na Gruta da Água Fria e na Janela Cárstica Cocho D’água. Fonte: Teodoro et. al., 2019. Nota: Ressalta-se que as conexões entre Palmeiras (ID-41)/Lagoa Bom Jardim (ID-40) e os pontos ID-15, ID-18 e ID-20 foram obtidas somente nos ensaios 7/8 realizados em março/2018.....	100
Figura 45 – Compilação das proveniências das principais surgências da área. A) Surgência Gordura; B) Surgência Mocambo; C) Surgência Samambaia; D) Surgência Engenho. ....	103
Figura 46 - Compilação dos destinos dos principais sumidouros da área. A) Sumidouro Goiabeiras; B) Sumidouro Bebidas; C) Gruta Lapa Vermelha; D) Janela Cárstica Cocho D’água; E) Gruta da Água Fria; F) Gruta Zé Irene; G) Sumidouro Palmeira; H) Lagoa Bom Jardim; I) Gruta Morro Redondo.....	103
Figura 47 – Comparação entre os volumes de água obtidos para as principais interconexões avaliadas. ....	106

Figura 48 - Curvas de passagem e recuperação das principais conexões hídricas obtidas, representadas nas cores dos ensaios. A) Conexão Goiabeiras – Gordura; B) Conexão Bebidas Gordura; C) Conexão Lapa Vermelha – Samambaia. D) Conexão Cocho D’água – Engenho; E) Conexão Zé Irene – Mocambo; F) Conexão Palmeiras – Mocambo; G) Conexão Bom Jardim – Mocambo; H) Conexão Morro Redondo – Mocambo. Fonte: Teodoro et. al., 2019. ....	107
Figura 49 - Mapa das bacias hidrogeológicas do aquífero superior delimitado pela topografia e pelos estudos com traçadores corantes. ....	107
Figura 50 – Diagrama de roseta dos lineamentos para diferentes comprimentos, considerando: A) Todos os comprimentos de lineamentos; B) Lineamentos de 0 a 282 metros; C) Lineamentos de 283 a 410 metros; D) Lineamentos de 411 a 640 metros; E) Lineamentos maiores que 640 metros. ....	108
Figura 51 - A) Estereograma dos planos de acamamento; B) Diagrama de roseta dos sentidos dos mergulhos e (C) dos strikes dos planos de acamamento; D) Estereograma dos planos de foliação; E) Diagrama de roseta do sentido dos mergulhos e (F) dos strikes dos planos de foliação. Fonte: dados levantados pela autora, Vieira (2015), Ribeiro et al. (2016), Lima et al. (2018), Andrade & Amorin (2018) e Magalhães & Silva (2018). ....	110
Figura 52 - A) Estereograma dos planos de fraturas; B) Diagrama de roseta dos sentidos dos mergulhos e (C) dos strikes dos planos de fraturas; D) Estereograma e E) diagrama de roseta dos trends dos paleodutos. Fonte: dados levantados pela autora, Vieira (2015), Ribeiro et al. (2016), Lima et al. (2018), Andrade & Amorin (2018) e Magalhães & Silva (2018). ....	111
Figura 53 – Diagrama de roseta das direções das interconexões hidráulicas mapeadas. ....	112
Figura 54 - Vazão dos poços associados às direções dos fotolineamentos. A) Boxplots das vazões para cada direção considerada; B) Diagrama de roseta das direções dos lineamentos em associação com as medianas das vazões de estabilização observadas em cada direção. Notas: As vazões outliers de 720 m <sup>3</sup> /h e 396 m <sup>3</sup> /h referentes aos azimutes de 67,5° - 90° e 292,5-315, respectivamente, foram retiradas da imagem A para melhor adequação da escala de apresentação. ....	115
Figura 55 – Poços localizados a uma distância de até 200 metros dos lineamentos morfoestruturais, coloridos de acordo com a direção destes. ....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos traçadores segundo Ford & Williams (2007). .....	27
Tabela 2 - Dados de excitação, emissão, limites de detecção e tendência de sorção para os principais traçadores fluorescentes. ....	28
Tabela 3 – Pontos envolvidos nos ensaios de conexão hídrica e método de coleta para detecção dos traçadores fluorescentes. No método intitulado “Fluorímetro” as medidas dos valores das concentrações são automáticas. ....	49
Tabela 4 - Data da execução e massa de corante injetada em cada ensaio.....	56
Tabela 5 – Métodos e datas das medições de vazão em cada um dos pontos monitorados para análises qualitativas. ....	60
Tabela 6 – Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 1. ....	69
Tabela 7 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 2. ....	71
Tabela 8 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 3. ....	73
Tabela 9 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 4. ....	77
Tabela 10 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 5. ....	79
Tabela 11 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 6. ....	83
Tabela 12 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente nos Ensaios 7 e 8. ....	88
Tabela 13 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 9. ....	93
Tabela 14 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 10. ....	97
Tabela 15 - Compilação das interconexões hidráulicas obtidas nos ensaios realizados e resultados quantitativos. ....	101
Tabela 16 - Compilação das principais direções das estruturas e dos ensaios realizados. ....	113
Tabela 17- Estatística descritiva das vazões (m <sup>3</sup> /h) dos poços para cada direção de lineamento associado.....	114



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Apresentação .....	17
1.2 Objetivos e Justificativa.....	18
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	19
2.1 Conceito do Carste .....	19
2.1.1 Formação do Carste .....	20
2.1.2 Geomorfologia do Carste.....	21
2.1.3 Aquífero Cárstico .....	22
2.2 Aplicação de traçadores corantes no estudo de intercomunicação hidráulica no carste	26
2.2.1 Traçadores corantes fluorescentes .....	28
2.3 Estudos desenvolvidos na região e a aplicação de traçadores fluorescentes .....	32
2.4 Histórico e contextualização do projeto .....	34
3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA .....	35
3.1 Clima, Vegetação e Geomorfologia .....	35
3.2 Hidrografia .....	39
3.3 Geologia Regional e Local .....	39
3.4 Geologia Estrutural.....	42
3.5 Hidrogeologia.....	43
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1 Descrição dos ensaios executados .....	46
4.2 Avaliação do background de fluorescência das águas.....	53
4.3 Injeção dos traçadores corantes .....	53
4.4 Monitoramento de recuperação dos traçadores e análise dos resultados.....	56
4.4.1 Amostragem da água .....	56
4.4.2 Análises qualitativas .....	57
4.4.3 Análises quantitativas .....	59
4.4.3.1 Parâmetros hidráulicos e geométricos .....	61
4.5 Análises de estruturas e suas relações com a circulação hídrica subterrânea.....	64
4.5.1 Análise de fotolineamentos .....	64
4.5.2 Análise de acamamentos, foliações, fraturas, paleodutos e eixos principais das depressões .....	64
4.5.3 Análise da influência das estruturas rúpteis no fluxo do meio cárstico superior ...	65
4.5.4 Análise da vazão dos poços profundos em função da direção dos lineamentos.....	65
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
5.1 Resultados dos ensaios com traçadores corantes.....	68
5.1.1 Ensaio 1 – Injeção na Gruta do Sumidouro.....	68

5.1.2 Ensaio 2 – Injeção nos piezômetros Cerca Grande P1 e P4 .....	70
5.1.3 Ensaio 3 – Injeção na Gruta da Água Fria e na Janela Cárstica Cocho d’Água.....	72
5.1.4 Ensaio 4 – Injeção nos piezômetros próximos à Lagoa do Santo Antônio .....	75
5.1.5 Ensaio 5 – Injeção na Gruta do Morro Redondo .....	78
5.1.6 Ensaio 6 – Injeção na Gruta Zé Irene .....	81
5.1.7 Ensaio 7 e 8 – Injeção no Sumidouro Palmeira e Lagoa do Bom Jardim.....	85
5.1.8 Ensaio 9 – Injeção nos sumidouros Goiabeiras e Bebidas .....	91
5.1.9 Ensaio 10 – Injeção na Gruta Lapa Vermelha .....	95
5.1.10 Compilação e discussão dos resultados quali-quantitativos dos ensaios realizados .....	99
5.2 Resultados das análises estruturais no condicionamento dos fluxos subterrâneos.....	108
5.2.1 Resultados das compilações das estruturas .....	108
5.2.2 Influência das estruturas no fluxo hídrico do meio cárstico superior.....	112
5.2.3 Resultados das análises da vazão dos poços profundos em função dos fotolineamentos .....	114
6. CONCLUSÕES .....	117
7. RECOMENDAÇÕES.....	118
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	119
APÊNDICE A – Pontos de monitoramento .....	130
APÊNDICE B – Artigo Científico .....	137
APÊNDICE C – Ensaio 1 .....	153
APÊNDICE D – Ensaio 2.....	157
APÊNDICE E – Ensaio 3 .....	162
APÊNDICE F – Ensaio 4 .....	167
APÊNDICE G – Ensaio 5.....	171
APÊNDICE H – Ensaio 6.....	175
APÊNDICE I – Ensaio 7 e 8 .....	179
APÊNDICE J – Ensaio 9 .....	186
APÊNDICE K – Ensaio 10.....	191

# 1. INTRODUÇÃO

## *1.1 Apresentação*

Este trabalho é resultado de estudos nos âmbitos da hidrogeologia e hidrodinâmica cárstica da região da APA Carste de Lagoa Santa - MG, a partir da aplicação de traçadores corantes. A pesquisa está vinculada ao “Projeto de Adequação e Implantação de uma Rede de Monitoramento de Águas subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco, Aplicado à área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais”, financiado pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) por meio do Centro Nacional de Pesquisas e Conservação de Cavernas (CECAV), coordenado e executado por docentes do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

A região de estudo está localizada na porção central do estado de Minas Gerais, 30 km a norte de Belo Horizonte e possui área total de aproximadamente 50.492 ha que englobam os 35.600 ha da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa. Além disso, abrange integralmente o município de Confins e parte dos municípios de Lagoa Santa, Vespasiano, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Prudente de Morais e Funilândia, conforme apresentado na Figura 1.

Do ponto de vista geológico, a região está inserida na porção sul do Cráton do São Francisco onde afloram os litotipos pelíticos e carbonáticos do Grupo Bambuí. Estes configuram uma das regiões brasileiras mais importantes em termos de paisagem cárstica carbonática e conformam um sistema aquífero cárstico-fissural de extrema importância para o abastecimento da porção norte da região metropolitana de Belo Horizonte.

A região sofre acentuada expansão demográfica, abrigando uma população de aproximadamente 311.584 mil habitantes (IBGE, 2010), e vem sendo objeto de investimentos de grande porte, nos setores industrial, minerário, agrícola, turístico e habitacional. Manchas urbanas cobrem 15% da área, incluindo o Aeroporto Internacional de Confins, que corresponde ao 4º aeroporto mais movimentado do País (ANAC, 2019). Tais fatores implicam num crescente comprometimento dos recursos naturais, particularmente dos hídricos subterrâneos. Associa-se a isso o fato de 100% do abastecimento de água de cinco dos sete municípios abrangidos proverem da água subterrânea (Tayer, 2016).

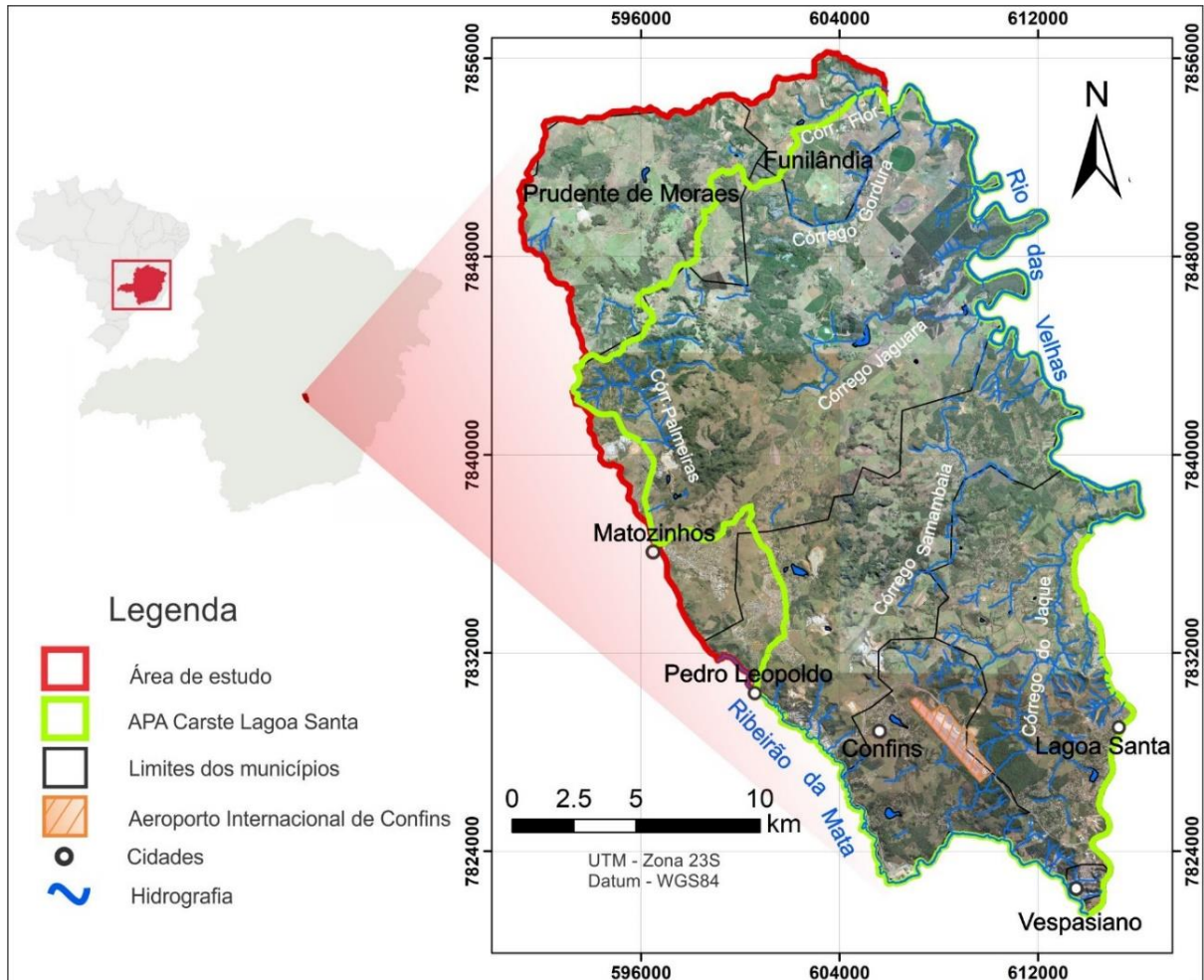


Figura 1 - Localização da área de estudo, limite da APA Carste Lagoa Santa e municípios. Fonte: Teodoro *et. al.*, 2019.

Aquíferos cársticos são naturalmente mais vulneráveis quando comparados a outros sistemas naturais, demandando uma avaliação diferenciada dos seus aspectos hidrogeológicos e hidrológicos. Nesse contexto, alguns questionamentos nortearam essa pesquisa: Qual a proveniência das surgências mais caudalosas? Qual o padrão dos fluxos subterrâneos? Existem fatores estratigráfico/estruturais que os controlam? Para responder tais questões, realizaram-se nessa pesquisa o mapeamento das interconexões subterrâneas e a caracterização hidrodinâmica dos fluxos, por meio do uso de traçadores corantes, associando tais fatores ao arcabouço estrutural, estratigráfico e geomorfológico da área.

## 1.2 Objetivos e Justificativa

O objetivo geral dessa pesquisa foi a caracterização dos fluxos de água subterrânea circulantes na zona cárstica superior do sistema aquífero Bambuí, pela aplicação de traçadores

fluorescentes, e dos fluxos inferiores da zona cárstico-fissural a partir da análise das vazões de poços tubulares associadas a estruturas geológicas rúpteis abertas, na região da APA Carste de Lagoa Santa, MG.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Aplicação e difusão de técnicas fluorimétricas em laboratório e campo;
- Caracterizar as rotas dos traçadores fluorescentes quanto à proveniência, velocidade, direção, sentido, estrutura dos condutos e volume de água armazenado.
- Avaliar a relação das direções dos traçadores com os parâmetros: lineamentos fotointerpretados, fraturas, acamamento, eixos principais das depressões e dutos de dissolução do exocarste.
- Delimitar horizontalmente compartimentos aquíferos, com base nos resultados obtidos a partir da aplicação do método de traçadores corantes;
- Avaliar a relação das direções dos lineamentos com a capacidade de produção dos poços tubulares profundos.

Por meio desse estudo, vinculado ao “Projeto de Adequação e Implantação de uma Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa”, pretende-se contribuir para um melhor entendimento dos aquíferos cárstico e cárstico-fissural da região e assim dar subsídios para um gerenciamento sustentável e eficiente dos recursos hídricos.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

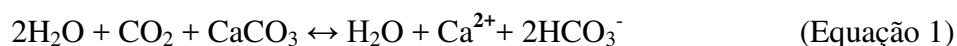
### ***2.1 Conceito do Carste***

O termo carste é usado para descrever um estilo característico de paisagens, contendo cavidades, dolinas, vales cegos, surgências caudalosas e extensos sistemas aquíferos, desenvolvidos pela combinação da alta solubilidade das rochas, principalmente de calcários e dolomitos, e de uma porosidade secundária bem desenvolvida. Esses terrenos ocupam cerca de 20% da superfície terrestre e os aquíferos cársticos contribuem com 25% do abastecimento mundial de água (Goldscheider & Drew, 2007; Ford & Williams, 2007).

### 2.1.1 Formação do Carste

Rochas que são quimicamente solúveis são conhecidas como “rochas cársticas”, sendo os carbonatos os maiores representantes destas (Goldscheider & Drew, 2007). Os carbonatos são originados principalmente em ambientes marinhos plataformais rasos (<30 m de profundidade) (Ford & Williams, 2007), de águas quentes, a partir da precipitação direta e também pelo acúmulo de fragmentos de organismos ricos em cálcio, como conchas, corais e moluscos (Cambier, 2011). Mineralogicamente essas rochas são compostas por mais de 50% de minerais carbonatados (principalmente os polimorfos calcita e aragonita -  $\text{CaCO}_3$  - e a dolomita -  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  -, mas também podem conter argila e diferentes formas de quartzo (Llopis, 1970; Goldscheider & Drew, 2007).

O processo dissolutivo dessas rochas denomina-se carstificação e é controlado principalmente pela circulação de águas ácidas pela presença de  $\text{CO}_2$  dissolvido. Essas águas reagem em contato com o calcário formando o bicarbonato de cálcio (solúvel), conforme apresentado na equação 1 (Goldscheider & Drew, 2007):



Ressalta-se ainda a importância da existência de porosidade secundária bem desenvolvida no processo de carstificação, uma vez que apenas a solubilidade da rocha é insuficiente para a evolução do carste (White, 2003). Além disso, a tendência é que o processo de dissolução diminua com a profundidade (Milanović, 2004), em decorrência da diminuição da disponibilidade de gás carbônico e da quantidade e extensão das descontinuidades (Williams, 1983), conforme exemplificado na Figura 2.

Assim, com a evolução do processo dissolutivo, uma série de vazios são formados nas zonas vadosa e freática. Estes são progressivamente organizados dentro de uma estrutura conhecida como Sistema de Condutos ou Rede Cárstica. A configuração desse sistema/rede pode mudar com o tempo, uma vez que condutos podem colapsar, serem preenchidos por sedimentos ou aqueles saturados (freáticos) se transformarem em insaturados (vadosos) e vice-versa (Goldscheider & Drew, 2007).

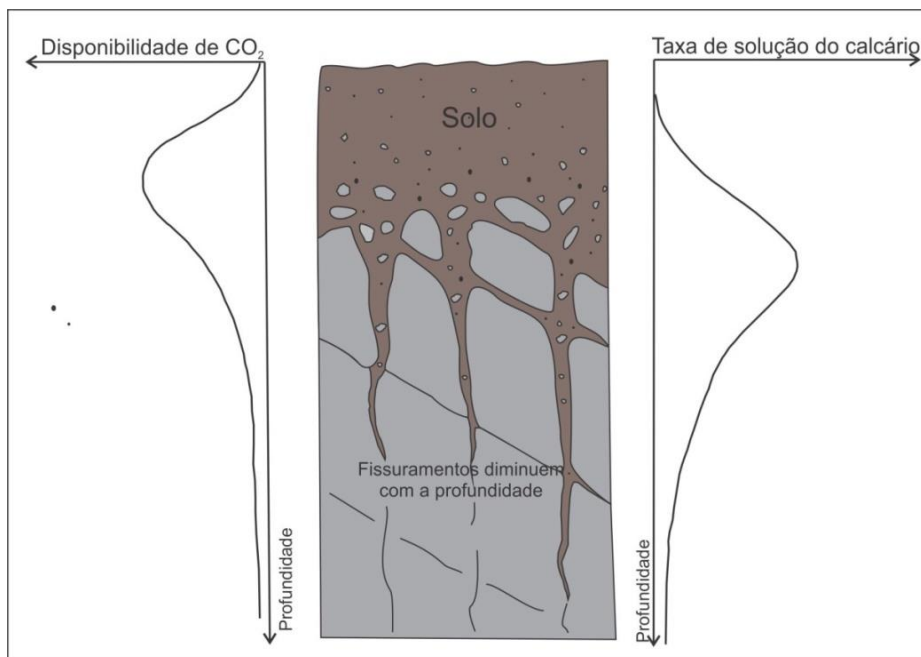


Figura 2 - Relação esquemática entre disponibilidade de  $\text{CO}_2$ , as discontinuidades e a dissolução com o aumento da profundidade. Fonte: adaptado de Williams (1983).

### 2.1.2 Geomorfologia do Carste

Associado ao processo de dissolução de rochas, o relevo cárstico apresenta uma morfologia específica, caracterizada pela presença de dolinas, vales cegos, cavernas, condutos, canais, sumidouros, paredões e lapiás, além de drenagem predominantemente subterrânea. Esse conjunto de feições constitui a geomorfologia cárstica que pode ser compartimentada em três domínios inter-relacionados entre si: exocarste (superfície), epicarste (sub-superfície) e endocarste (meio subterrâneo) (Piló, 2000; Ford & Williams, 2007).

#### *Exocarste*

Os principais representantes do exocarste correspondem às dolinas, que são as depressões fechadas, circulares ou elípticas formadas na superfície em função da dissolução de rochas solúveis, normalmente em subsuperfície (Piló, 2000). As dolinas podem ser comparadas a unidades hidrográficas elementares, tais como as bacias hidrográficas, uma vez que direcionam e convergem as águas de escoamento superficial para os mínimos altimétricos (talvegues), sendo essas absorvidas por recarga difusa ou drenadas para os sistemas de condutos subterrâneos (recarga concentrada) através dos sumidouros (Piló, 1998; Braga, 2014). A coalescência de dolinas próximas entre si dá origem às uvalas e a progressiva conjugação de dolinas e uvalas gera os Poljés (Lladó, 1970). Estes evoluem particularmente

pela dissolução de suas bordas, devido ao barramento ou inibição dos processos de rebaixamento do relevo (vetor vertical) (Piló, 2000) e, de forma geral, tem formatos alongados na direção preferencial da circulação da água subterrânea (Freitas, 2009).

Vales cegos também são feições típicas e correspondem a vales que deixaram de funcionar em consequência de uma carstificação mais profunda (Silva, 2008). A água superficial desaparece ao fluir para o interior de sumidouros, seguindo por condutos, fendas e galerias subterrâneas (White, 1988).

O relevo cárstico é ainda constituído por maciços rochosos, paredões, torres e cones de blocos que correspondem aos remanescentes rochosos dos processos de dissolução diferencial da rocha. Essas feições podem se apresentar marcadas por furos, sulcos ou saliências irregulares que variam de alguns milímetros a poucos metros e denominam-se lapiás (Piló, 2000).

#### *Epicarste*

Situa-se na sub-superfície e corresponde à camada superficial de material mais intemperizado entre a rocha subjacente e o solo (Ferreira & Uagoda, 2019). É o setor chave para a dissolução dos carbonatos, por sua relação tão próxima à principal fonte de CO<sub>2</sub>, o solo (Bakalowicz, 2013), e possui a função principal de armazenamento de água e concentração de fluxo (Goldscheider & Drew, 2007).

#### *Endocarste*

Corresponde à zona mais profunda do carste e compreende as cavernas e condutos subterrâneos e seus depósitos químicos, clásticos e orgânicos (Piló, 2000). Segundo Ford e Williams (1989) a gênese das feições do endocarste está principalmente atrelada à atitude estrutural da rocha (geometrias planares e lineares) e suas relações com a área de recarga e descarga hídrica.

### **2.1.3 Aquífero Cárstico**

Os aquíferos cársticos possuem muitas características que os diferem daqueles formados pelos outros tipos de rocha. No geral apresentam forte heterogeneidade e anisotropia relacionada à diversificada distribuição dos condutos (Worthington & Ford, 2009) o que ocasiona grande variação dos parâmetros hidráulicos, como permeabilidade,



transmissividade e condutividade hidráulica, além de anomalias na direção de fluxo em relação ao nível de base regional (Milanović, 2004; Manoel Filho, 2008).

A recarga dos aquíferos pode ser autogênica, quando as águas são provenientes da própria área cárstica; e alogênica quando advinda de áreas não-cársticas adjacentes. As recargas autogênicas são geralmente difusas, através dos solos sobrejacentes e das fissuras das rochas, apesar da camada do epicarste também funcionar como um concentrador de fluxo para os condutos (Figura 3). As recargas alogênicas ocorrem tipicamente através de sumidouros que correspondem aos pontos de recarga mais susceptíveis à entrada de contaminantes para o sistema (Figura 3) (Goldscheider & Drew, 2007).

Existem três tipos de permeabilidade e porosidade nos aquíferos cársticos, sendo que os campos de fluxo operam através de cada uma delas em diferentes escalas (Figura 3) (White, 2003): permeabilidade da matriz (ou porosidade primária); permeabilidade das fraturas (ou porosidade secundária) e permeabilidade dos condutos (ou porosidade terciária). Os valores de permeabilidade são oriundos de ensaios de campo específicos. No entanto, devido ao fato desses ensaios servirem apenas para a determinação da condutividade hidráulica nas vizinhanças do poço testado, são necessárias múltiplas amostragens para que sejam representativas de todo o aquífero (Pessoa, 2005). Vale ressaltar que a condutividade hidráulica obtida não possui significado físico real para o caso do fluxo nos condutos, tendo em vista estes não corresponderem a um meio poroso ideal conforme o considerado na Lei de Darcy (Goldscheider & Drew, 2007).

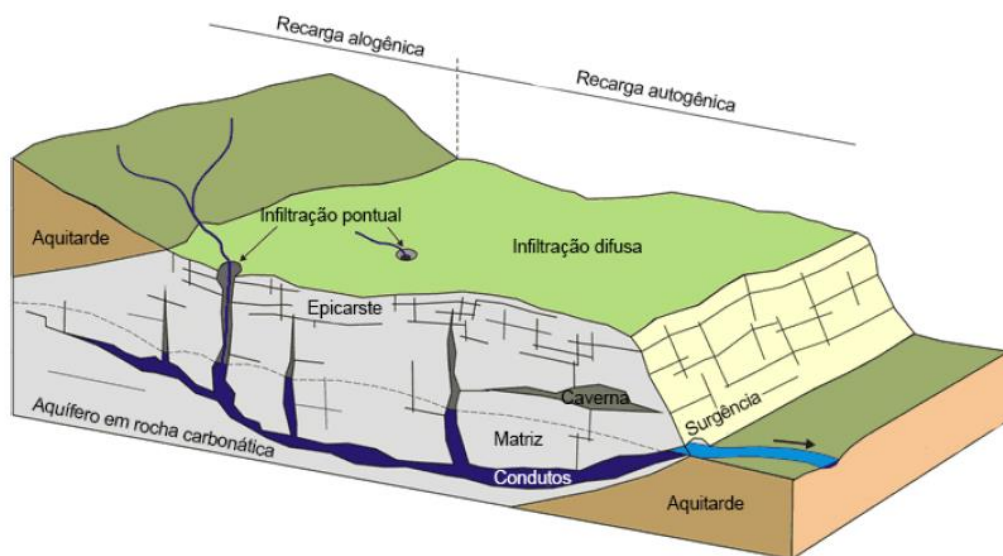


Figura 3 - Ilustração esquemática do sistema aquífero cárstico caracterizado pelas recargas autogênica e alogênica, infiltração pontual (sumidouros) e difusa e porosidades/ permeabilidade através da matriz, fraturas e condutos. Fonte: Goldscheider & Drew (2007).

A transmissividade corresponde à capacidade do meio em transmitir a água e, em termos práticos, é obtida do produto entre a condutividade hidráulica e a espessura saturada do aquífero. Contudo, para os aquíferos cársticos essa relação é mais complexa, tendo em vista que as propriedades transmissivas dos condutos e canais são bem superiores às da matriz do aquífero (Goldscheider & Drew, 2007).

Em função da grande heterogeneidade dos aquíferos cársticos, as velocidades das águas subterrâneas variam em muitas ordens de magnitude (Ford & Williams, 2007; Goldscheider & Drew, 2007). Os fluxos nos condutos são rápidos (frequentemente > 100 m/h) e no geral turbulentos, enquanto que as velocidades na matriz são muito menores (Goldscheider & Drew, 2007). Traçadores tem sido amplamente utilizados em aquíferos cársticos não-confinados para medir as velocidades da água subterrânea e seus tempos de residência. Traçadores injetáveis são empregados para avaliar os tempos de residência entre sumidouros e surgências, através de condutos, enquanto os traçadores ambientais para estimar os tempos gerais de residência do aquífero. No geral, os traçadores ambientais fornecem valores cerca de cem vezes maiores que as estimativas obtidas pelos traçadores injetados. Esses resultados discrepantes estão associados à tripla permeabilidade dos aquíferos cársticos, em que a matriz da rocha fornece quase todo o armazenamento, mas apresenta longos tempos de residência, enquanto os canais fornecem um pequeno armazenamento, contabilizam a maior parte do fluxo e têm curtos tempos de residência (Worthington, 2007). Worthington (1999) compilou dados de 2.877 ensaios com traçadores injetáveis e obteve uma média de 1.770 m/d para a velocidade aparente entre sumidouros e ressurgências em aquíferos cársticos por todo o mundo.

Considerando-se a dinâmica hídrica subterrânea num ambiente de tripla porosidade, as leis que regem os tipos de fluxo devem ser distintas entre si. O fluxo que ocorre na matriz segue o regime laminar, obedecendo a lei de Darcy (Freeze & Cherry, 1979). Nas fraturas, a abertura e a espessura são os parâmetros mais frequentemente utilizados nas equações de fluxo de fratura única, enquanto o espaçamento entre as fraturas e suas orientações são empregados para o cálculo do fluxo através de um conjunto de fraturas. Contudo, na escala de campo, essas características físicas não são facilmente traduzidas em equações de fluxo, tendo em vista a complexidade da distribuição tridimensional desses parâmetros, principalmente em profundidade (Goldscheider & Drew, 2007).

O fluxo através dos condutos e canais é geralmente descrito pela equação de Bernoulli para fluidos viscosos reais, conforme apresentado na Figura 4. Considerando um mesmo tubo,

a Energia total do fluxo ( $E$ ) diminui ao longo do sentido do mesmo, em função das perdas de energia no trajeto, enquanto a pressão piezométrica ( $H$ ) pode aumentar ou diminuir em função da seção transversal do tubo. Sendo assim, é possível que a interpretação da potenciometria a partir dos níveis d'água em dois piezômetros que interceptem um mesmo conduto, em pontos com seções transversais distintas, indique erroneamente o sentido do fluxo (Goldscheider & Drew, 2007), conforme evidenciado na Figura 4.

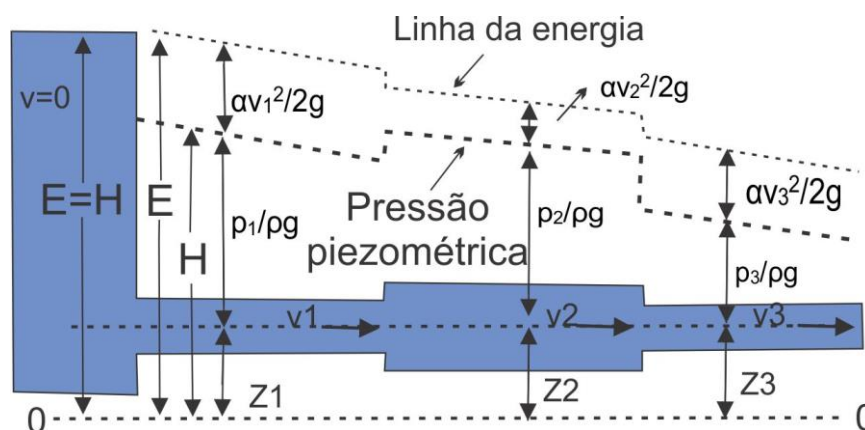


Figura 4 - Representação da equação de Bernoulli para o fluxo de fluidos viscosos reais através de um tubo com variação da seção transversal. Legenda: E – Energia total; H – Pressão piezométrica;  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  - pressão do fluido nas seções transversais 1, 2 e 3 respectivamente.  $\rho$  – densidade do fluido;  $g$  – aceleração da gravidade;  $v$  – velocidade do fluxo;  $z$  – elevação.  $\alpha$  – coeficiente de perda hidráulica. Adaptado de Goldscheider & Drew (2007).

Existem ainda complicações adicionais ao se tentar avaliar o fluxo através de condutos (Goldscheider & Drew, 2007): (1) um mesmo conduto pode apresentar tanto fluxo sob pressão quanto com a superfície livre; (2) uma vez que as paredes dos condutos são, no geral, ásperas, um coeficiente de rugosidade deve ser acrescido na equação geral do fluxo; (3) o fluxo pode ser tanto laminar quanto turbulento em um mesmo conduto a depender da velocidade, área de seção transversal e rugosidade das paredes. As irregularidades que causam os fluxos turbulentos são matematicamente descritas através do número de Reynolds e do fator de fricção.

A descarga dos aquíferos cársticos geralmente ocorre através de um pequeno número de surgências com vazões elevadas que podem apresentar variadas formas (nascente de condutos, nascentes difusas, nascentes emersas) e distintas taxas de descarga. Essas descargas correspondem a uma composição de toda água que se move através do aquífero e por esse motivo são locais ideais para medição das vazões, aspectos hidroquímicos e monitoramento de contaminantes (White, 2002; 2003).

Os aquíferos cársticos são mais vulneráveis à contaminação em relação a outros aquíferos em função das características de seu sistema hidrológico (Ford & Williams, 2007). Nesse contexto, o sistema caracteriza-se por apresentar solos, no geral, pouco espessos, concentração do fluxo na zona do epicarte através de fraturas alargadas e condutos, além da ocorrência de recarga pontual por meio de sumidouros, os quais favorecem a entrada e o rápido transporte dos poluentes, bem como sua dispersão por longas distâncias (Goldscheider & Drew, 2007). Há também ocorrência de carstes cobertos, caracterizados por espessas coberturas pedológicas, como o de Lagoa Santa, em que as rochas pelíticas associadas aos calcários são as responsáveis, em maior parte, pela produção de espessos perfis de solos (Piló, 2000).

## ***2.2 Aplicação de traçadores corantes no estudo de intercomunicação hidráulica no carste***

Os traçadores são empregados em estudos hidrológicos e hidrogeológicos para obter informações sobre o movimento da água e o transporte de contaminantes, além da verificação de conexões (Käss, 1998).

No carste, testes com traçadores combinados com observações geológicas e hidrológicas correspondem a importantes métodos para delinear as proveniências das nascentes cársticas, mesmo em ambientes com complexidade topográfica e geológica e muitas vezes inacessíveis (Goldscheider, 2005).

Esses testes são geralmente empregados para identificação da rede de condutos ativos, ou seja, que transmitem a água subterrânea (Benischke *et al.*, 2007). As velocidades do fluxo podem ser calculadas caso seja conhecida a distância do trajeto e o tempo de trânsito do traçador. Dados do traçador conjuntamente às medições dos fluxos podem também ser utilizados para estimar a área da seção transversal dos condutos, bem como seus volumes. Além disso, o padrão da evolução das concentrações dos traçadores ao longo do tempo fornece indícios sobre a configuração e estrutura dos condutos (Smart, 1988).

Técnicas de interpretação mais avançadas permitem a quantificação de parâmetros relevantes de transporte de contaminantes, como dispersividade, retardo e degradação, bem como a caracterização das interações conduto-matriz (Geyer *et al.*, 2007; Massei *et al.*, 2006).

Segundo Ford & Williams (2007) os traçadores podem ser classificados em (Tabela 1):

Tabela 1 - Classificação dos traçadores segundo Ford &amp; Williams (2007).

<b>Classificação dos traçadores</b>	<b>Tipo de traçador</b>
Artificiais	Corantes
	Sais
Particulados	Esporos
	Microesferas fluorescentes
	Bacteriófagos
Naturais	Microrganismos
	Íons em solução
	Isótopos ambientais
Pulsos	Pulsos naturais de descarga, solutos e sedimentos
	Pulsos gerados artificialmente

A escolha do traçador a ser empregado dependerá dos objetivos do estudo e das possibilidades técnico-analíticas disponíveis (Genthner, 2001). De modo geral, para que o traçador seja considerado ideal, espera-se que obedeça às seguintes condições, de acordo com IAEA (1966) e Bedmar (1972):

- ✓ Ser química e biologicamente estável, não devendo ser oxidado ou reduzido, nem entrar em decomposição durante o período da aplicação;
- ✓ Não deve mostrar interação com os materiais sólidos do meio (adsorção, absorção, troca iônica – no caso de traçadores iônicos);
- ✓ A quantidade de traçador a ser usada em uma experiência não deve modificar de forma significativa as características físico-químicas naturais do meio, tais como: densidade, viscosidade e temperatura. Nesse contexto, não deve poluir a água nem o aquífero;
- ✓ Apresentar boas características de dispersão e difusão no meio e boa solubilidade na água;
- ✓ Não ser sensível a variações de pH e de temperatura do meio;
- ✓ No meio, não se deve ter quantidades detectáveis de traçador a ser adicionado, ou em concentrações que interfiram nos resultados;
- ✓ Deve ser utilizável em pequenas quantidades, ou seja, apresentar fator de diluição bastante elevado e detectável em pequenas concentrações;
- ✓ Deve ser de baixo custo, de fácil manipulação e inócuo para os seres vivos.

### 2.2.1 Traçadores corantes fluorescentes

Os corantes artificiais, por apresentarem muitas das propriedades descritas no tópico anterior, correspondem aos principais traçadores empregados nos testes em sistemas cársticos (Field *et al.*, 1995).

Dentro desse grupo destacam-se os traçadores fluorescentes, que são amplamente utilizados em função da sua alta solubilidade, baixo limite de detecção (Tabela 2), fácil manuseio e análise, além de apresentarem níveis de toxicidade muito baixos em comparação a outros traçadores (Ayub, 1998; Benischk, 1989; Leibundgut *et al.*, 2009).

Tabela 2 - Dados de excitação, emissão, limites de detecção e tendência de sorção para os principais traçadores fluorescentes.

Traçador	Excitação máxima $\lambda$ (nm)	Emissão máxima $\lambda$ (nm)	Intensidade de fluorescência relativa	Limite de detecção (mg/m <sup>3</sup> )	Solubilidade (g/l; 20°C)	Sensibilidade a luz	Tendência à sorção <sup>1</sup>
Fluoresceína	491	516	100	0,001	300	Alta	Muito baixa
Rodamina WT	561	586	10	0,02	3 a 20	Muito baixa	Moderada
Naftionato	325	420	18	0,2	240	Alta	Muito baixa
Piranina	455	510	18	0,06	350	Alta	Baixa
Eosina	515	440	11,4	0,01	300	Muito alta	Baixa
Amidorodamina G	530	555	32	0,005	3	Baixa	Moderada
Rodamina B	555	575	9,5	0,02	3 a 20	Baixa	Alta
Sulfurorodamina B	564	583	7	0,03	10 (10°C)	Baixa	Moderada

Fonte: modificado de Field (1999) e Leibundgut *et al.*, 2009.

A fluorescência é a propriedade que algumas substâncias possuem de modificar o comprimento de onda da radiação eletromagnética que incide sobre elas, emitindo radiação distinta da incidente. O fenômeno baseia-se no fato de que energia emitida pela fonte é absorvida por um elétron, que passa do estado fundamental para o estado excitado; este elétron ao retornar para o estado fundamental libera a energia em excesso através de luz (fluorescência). Esse fenômeno é transitório, uma vez que só ocorre enquanto a fonte está ativa (Bandow, 1950; Bau *et al.*, 1971).

Cada substância fluorescente apresenta comprimentos de onda de excitação e de emissão característicos, como apresentado na Figura 5 e na Tabela 2. Nesse contexto, a técnica para identificação do traçador em amostras de água pode ser a partir da varredura do espectro de emissão, excitação ou a combinação de ambos na varredura síncrona.

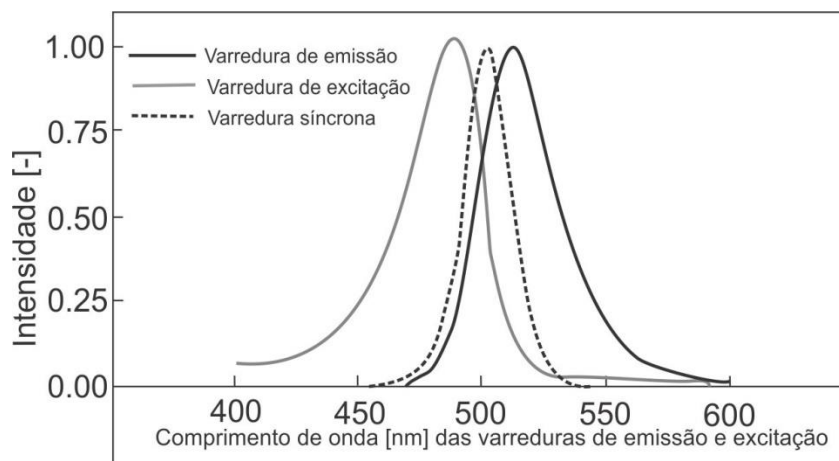


Figura 5 - Espectro de excitação ( $\lambda=491$  nm no pico), espectro de emissão ( $\lambda=516$  nm no pico) e espectro de varredura síncrona da Fluoresceína. Fonte: de Leibundgut *et al.* (2009).

### Características químicas e físicas dos traçadores fluorescentes

A explicação química para o comportamento fluorescente de um composto é a estrutura orgânica do anel com ligações duplas (Bandow, 1950; Hadi *et al.*, 1997), como exemplificado na fórmula estrutural da Rodamina WT e Fluoresceína (Figura 6), sendo estes os traçadores empregados na realização dos estudos. Se a estrutura química do composto for destruída, a fluorescência é também perdida, sendo que a deterioração pode ser causada pela luz do sol, reações químicas ou degradação biológica (Leibundgut *et al.*, 2009).

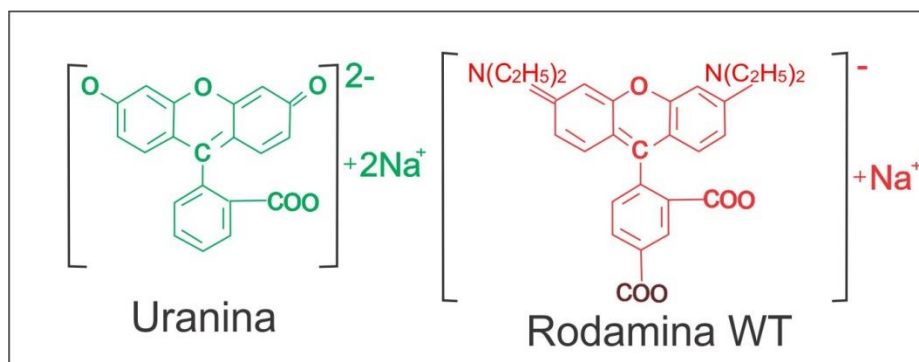


Figura 6 – Fórmula estrutural para a Uranina (fluoresceína) e a Rodamina WT. Fonte: adaptado de Leibundgut *et al.* (2009).

A solubilidade dos traçadores na água é um dos principais requisitos a ser levado em consideração na escolha do corante adequado. Ela é dependente tanto do pH quanto da temperatura, de modo que quanto maior os valores destes, maior a solubilidade (Leibundgut *et al.*, 2009). Na Tabela 2 são apresentadas as solubilidades para os principais traçadores corantes a uma temperatura de 20°C. A solubilidade da Fluoresceína (300 g/l) é considerada alta enquanto da Rodamina WT (3-20 g/l) é considerada baixa.

A intensidade da emissão fluorescente depende das propriedades físicas do corante e é diretamente proporcional à intensidade da luz incidente e à concentração do mesmo, e inversamente proporcional à temperatura (Leibundgut *et al.*, 2009). Essa propriedade influencia o limite de detecção típico de cada traçador (Tabela 2).

Variações no pH também afetam as análises, sobretudo considerando-se a utilização da Fluoresceína e a Piranina que são muito sensíveis a valores de pH abaixo da faixa da maioria das águas naturais. Por outro lado, as Rodaminas são menos sensíveis e geralmente não apresentam problemas analíticos em águas naturais, conforme apresentado na Figura 7.

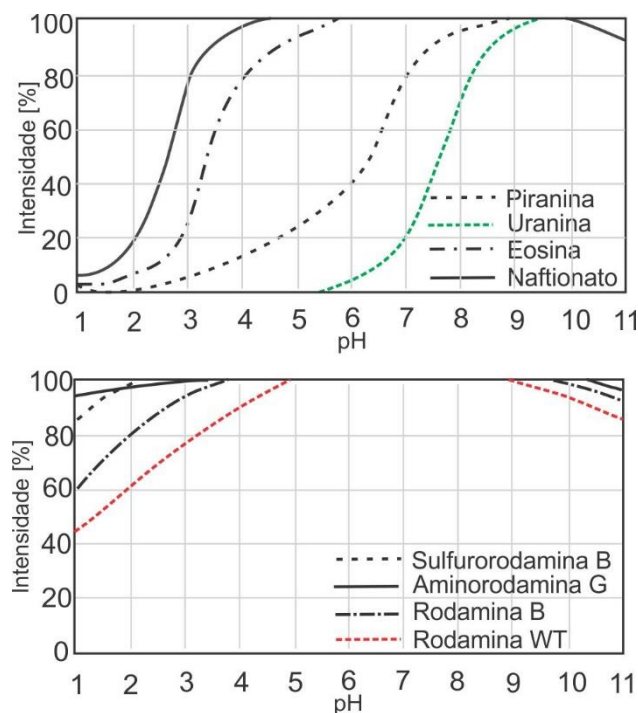


Figura 7 – Variações da intensidade de fluorescência para valores de pH distintos considerando os principais traçadores fluorescentes, com destaque para a fluoresceína e a rodamina WT, marcados em verde e vermelho, respectivamente. Fonte: adaptado de Leibundgut *et al.* (2009), depois de Smart & Smith (1976) e Kass (1998).

Quando uma amostra apresentar pH abaixo do limite crítico, o problema pode ser facilmente resolvido a partir do tamponamento da solução em laboratório. Contudo, para os casos de experimentos *in situ* o pH da amostra deve ser medido durante a detecção da fluorescência e então, se necessário, correções devem ser aplicadas (Leibundgut *et al.*, 2009).

Variações no pH também controlam a sorção dos traçadores fluorescentes, de modo que quanto maior o pH, menor a sorção (Leibundgut *et al.*, 2009). Em alguns meios mais ácidos, como por exemplo, em regiões pantanosas, o fenômeno da sorção é mais intenso e pode inclusive ocasionar falsos negativos, conforme discutido por Leibundgut (1974) e



Behrens *et al.* (1982). Ademais, uma primeira indicação do comportamento de um traçador em relação à sorção pode ser fornecida pela solubilidade do composto, de forma que quanto maior a solubilidade do traçador, menor sua sorção (Leibundgut *et al.*, 2009). Ressalta-se que o decaimento da fluorescência, em função da sorção (adsorção e absorção), deve ser levado em conta principalmente nos testes com traçadores onde a presença de sedimentos em suspensão é elevada ou onde a drenagem subterrânea atravessa longos trechos em contato com solos e argilas (Genthner, 2001).

A exposição à luz apresenta um efeito irreversível sobre a fluorescência, uma vez que degrada as moléculas dos compostos (Leibundgut *et al.*, 2009). A intensidade da fluorescência é inversamente proporcional ao tempo de exposição (Figura 8), assim como a taxa de degradação em relação à concentração do traçador fluorescente, ou seja, quanto maior a concentração do traçador, menor a degradação em função à exposição à luz (Leibundgut, 1974). Isso ocorre uma vez que em altas concentrações as moléculas do composto são protegidas, na maior parte da solução, da luz incidente em função da alta absorção desta próxima à superfície (Leibundgut, 1978 *apud* Leibundgut *et al.*, 2009). Em função dessa sensibilidade, as amostras devem ser cobertas e somente expostas no momento da análise em laboratório. Na Tabela 2 são apresentadas as sensibilidades em relação à exposição à luz para os principais traçadores fluorescentes.

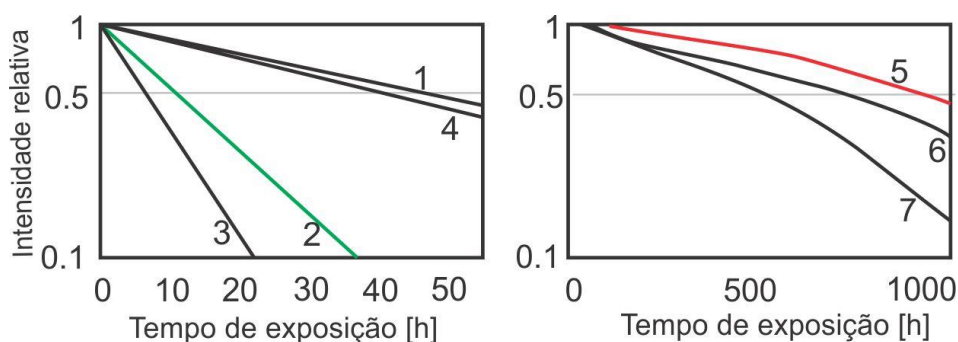


Figura 8 – Decaimento da intensidade de fluorescência causada por exposição à luz para os principais traçadores fluorescentes (1 – Piranina; 2 – Fluoresceína; 3 – Eosina; 4 – Naftionato; 5 – Rodamina WT, 6 – Sulforodamina B; 7 – Aminorodamina G), com destaque para a Fluoresceína e Rodamina WT, marcados em verde e vermelho, respectivamente. Fonte: adaptado de Behrens (1982); Wernli (1982) *apud* Leibundgut *et al.* (2009).

Os traçadores corantes podem ser rapidamente decompostos em consequência da oxidação e de outras alterações químicas. Nessa perspectiva, águas tratadas com cloro e ozonização não devem ser utilizadas nos ensaios (Wilson, 1986). Além disso, degradações microbianas também podem ocorrer em águas naturais e em amostras, como apresentados nos trabalhos de Behrens (1986) e Kass (1998). Em função desses fatores, especialmente para

águas cársticas e poluídas, é recomendado que as amostras sejam analisadas o mais rápido possível (Leibundgut *et al.*, 2009).

Pelo fato de algumas substâncias naturais tais como musgos, fitoplânctons e algumas algas também apresentarem uma fluorescência no mesmo comprimento de onda dos traçadores, quando analisadas, é importante conhecer o *background* da fluorescência da água da região, antes que os testes sejam iniciados (Ford & Williams, 1989).

Cada injeção de um traçador artificial em um sistema hidrológico é, em certo ponto, uma contaminação do corpo d'água em questão. No entanto, planejando-se corretamente os ensaios, as quantidades de traçador aplicadas são mínimas, e por esse motivo, as “contaminações” são geralmente toleráveis (Leibundgut *et al.*, 2009). Nesse contexto, o cálculo da massa de corante a ser injetado deve sempre ser baseado nas concentrações do traçador que se espera encontrar na água.

### ***2.3 Estudos desenvolvidos na região e a aplicação de traçadores fluorescentes***

Sob o ponto de vista geológico, os primeiros trabalhos da região datam do século XIX, através dos estudos do paleontólogo dinamarquês, Peter Lund. Segundo Burmeister (1853 *apud* Auler, 1994), entre 1835 e 1844 Lund explorou aproximadamente 1000 cavidades e foi o primeiro a produzir mapas de cavernas no Brasil.

Com vistas à preservação do meio ambiente, ao planejamento urbano e gestão territorial, vale ressaltar os estudos de cunho investigativo e mapeamento geológico desenvolvidos pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM, por intermédio dos projetos “APA - Carste de Lagoa Santa” (Pessoa & Mourão, 1998) e “Projeto VIDA – Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental” (Ribeiro *et al.*, 2003). Nos âmbitos do Projeto Vida, a espeleologia teve grande aporte de conhecimento através do trabalho de Berbert-Born & Horta (1994) que elaborou um inventário de 299 cavidades na região de Matozinhos e Mocambo - MG.

Dentre os trabalhos voltados para a hidrogeologia cárstica do grupo Bambuí, em domínio regional, destacam-se Silva (1984) e Guerra (1986) que discorreram sobre as influências marcantes dos fatores estruturais e feições cársticas nas avaliações hidrogeológicas na região de Jaíba, no norte de MG e na Chapada de Irecê – BA, respectivamente.

Com foco na região de estudo, Coutard *et al.* (1978) relatou que a água subterrânea na região fluiu tanto ao longo do acamamento dos calcários, quanto através de fraturas, e ainda apresentou uma série de conclusões especulativas sobre as rotas dos fluxos subterrâneos, sem realizar estudos com traçadores corantes. Silva *et al.* (1987) realizou estudo da dinâmica hídrica da região cárstica dos municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos -MG, determinando zonas de recarga e descarga do aquífero. Pessoa (1996) caracterizou hidrogeologicamente a região cárstica de Sete Lagoas – MG e elaborou mapas de vulnerabilidade natural dos aquíferos e de suas potencialidades. Pessoa (2005) valeu-se de um conjunto de procedimentos específicos de investigação hidrogeológica para estudo do comportamento dos aquíferos cársticos na região do entorno de Lagoa Santa – MG. Na área que compreende o Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), em Sete Lagoas - MG, Batista (2009) e Carneiro (2013) realizaram estudos de caracterização hidrogeológica e modelagem hidrogeoquímica, respectivamente. Também na região de Sete Lagoas - MG, Galvão (2015), aplicando metodologias multidisciplinares integrando geologia, hidrogeologia, geoquímica e isótopos estáveis produziu um modelo hidrogeológico conceitual do aquífero cárstico da região relacionando-o ao desenvolvimento urbano e ao surgimento de problemas geotécnicos.

Dentro dos limites da área de estudo, destacam-se os trabalhos de: Auler (1994) que apresentou uma caracterização hidrogeológica e hidroquímica do carste de Matozinhos- Pedro Leopoldo; Tayer (2016) que fez uma avaliação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero, utilizando o método COP; Amaral (2018) que realizou uma análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas; Vieira (2018) estudou a hidroquímica dos aquíferos; Paula (2019) produziu um modelo conceitual de fluxo dos Aquíferos Pelítico-Carbonáticos da região; Cardoso (2019) estabeleceu os valores de *background* de elementos inorgânicos na água subterrânea e Ribeiro (2020) procedeu a compartimentação dos fluxos a partir dos isótopos  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  e  $^3\text{H}$ . Com exceção do estudo de Auler (1994), os demais estão vinculados ao projeto do IGC/UFMG.

Quanto à utilização de traçadores fluorescentes, no Brasil a técnica vem sendo aplicada desde a segunda metade do século passado. Em 1973 espeleólogos do Grupo Opilões realizaram uma experiência com traçadores fluorescentes ao tentar comprovar conexão no sistema cárstico Angélica-Bezerra, a nordeste de Goiás (Ayub, 1998). Slavec (1976) aplicou fluoresceína para investigar possíveis conexões hídricas no sistema cárstico Lajeado – Bombas, região sudeste do Estado de São Paulo. Silva (1984) fez uso de traçadores

isotópicos e químicos no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, no Norte de Minas Gerais. No município de Iporanga – SP, testes qualitativos e quantitativos, utilizando o traçador fluorescente rodamina-WT, foram realizados por Ayub (1998) para estudo dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo e por Genthner (2001) para estudo do sistema cárstico Lajeado-Bombas. Freitas (2009), através da aplicação de rodamina-WT em estudo quantitativo, verificou a existência de interconexões hidráulicas no carste de Pains –MG.

Dentro dos âmbitos da área de estudo, Auler (1994) foi o primeiro a apresentar uma série de ensaios qualitativos nas sub-bacias hidrográficas Samambaia e Palmeiras-Mocambo utilizando os traçadores corantes fluoresceína e branqueador óptico. Bacias sub-superficiais de drenagem foram delineadas a partir das rotas de fluxo subterrâneo obtidas. A sudeste da área de estudo, Silva (2003) e Pessoa (2005) fizeram uso dos traçadores corantes fluoresceína e rodamina WT, respectivamente, em ensaios qualitativos e quantitativos, a fim de se verificar rotas de fluxo subterrâneo no entorno da mina Lapa Vermelha, Lagoa Santa – MG.

#### ***2.4 Histórico e contextualização do projeto***

O “Projeto de Adequação e Implantação de uma rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais” originou a partir de um termo de Cooperação Técnica celebrado entre a GERDAU AÇOMINAS e a Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa – FUNDEP, tendo a UFMG como instituição executora, o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV, como órgão fiscalizador, o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN, como parceria executiva e apoio da Companhia de Desenvolvimento de Recursos Naturais – CPRM, do Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM e de empresas.

O projeto teve início em 2015 e ao longo desse período tem abordado diversas temáticas, envolvendo estudos geológicos, geoquímicos, hidroquímicos, isotópicos, hidrológicos, hidrogeológicos, de uso e ocupação do solo e de vulnerabilidade dos aquíferos e ensaios com traçadores corantes que juntos subsidiarão a definição da rede de monitoramento definitiva, prevista para ser finalizada em 2022.

A temática dos ensaios com traçadores corantes teve início em 2016 quando se iniciou o mapeamento dos pontos d’água, sumidouros e das surgências que seriam selecionados para realização dos testes com traçadores corantes. Em parceria com o CDTN e a empresa

Hidrovia – Hidrogeologia e Meio Ambiente, os ensaios foram planejados e iniciaram-se partir de dezembro de 2018.

### 3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA

#### 3.1 *Clima, Vegetação e Geomorfologia*

A região de estudo encontra-se sob o domínio do sistema estacionário denominado Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, que se caracteriza por apresentar um elevado grau de umidade absoluta e temperatura interior elevada, em função da intensa radiação solar incidente. A classificação de Koppen enquadra a região no tipo climático Aw, ou seja, tropical úmido com inverno seco e verão chuvoso (Viana *et al.*, 1998).

De acordo com os dados históricos registrados na Estação Pluviométrica Pedro Leopoldo (código: 1944009 - SIAGAS), a média anual de precipitação, considerando o período de 1980 a 2019, foi de 1269,2 mm, com chuvas concentradas de outubro a março. Ressalta-se que o ano de 2014 apresentou o menor valor para a pluviosidade observado, atingindo apenas 564 mm. Para o período de outubro de 2017 a setembro de 2018, intervalo de execução dos ensaios, a precipitação anual foi de 1220,4 mm, com 93 dias de chuvas distribuídas conforme apresentado na Figura 9.

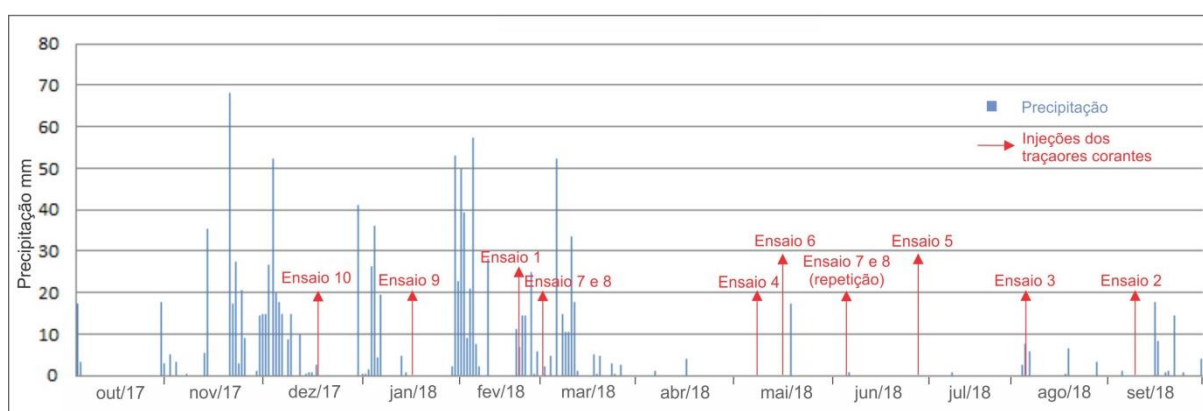


Figura 9 – Precipitação diária para o período de outubro/2017 a setembro/2018 e indicação das datas das injeções dos traçadores em cada um dos ensaios realizados. Fonte dos dados pluviométricos: SIAGAS - Estação Pluviométrica Pedro Leopoldo (código: 1944009).

Segundo Meneses (2003) as tipologias vegetais registradas na região da APA Carste de Lagoa Santa pertencem aos biomas do Cerrado e da Mata Atlântica, em uma situação de transição entre eles. Os representantes fisionômicos identificados pelo autor na área de estudo foram: (1) Floresta Estacional Semidecídua, percebida nas áreas de solos classificados como

férteis ou que tenham armazenamento de água, por exemplo planícies fluviais e dolinas; (2) Floresta Estacional Decídua, desenvolvida em solos rasos, no entorno e nas partes mais altas dos maciços calcários ainda não explorados; (3) Floresta Ciliar, que ocorre ao longo do rio das Velhas; (4) Cerrado, que distribui-se de forma retalhada pela área, sendo muitas vezes encontrado em associação com os pastos ou cultivos; (5) Transição Mata/Cerrado, tipologia atribuída à vegetação que ocorre em área limítrofe ao Aeroporto Internacional Tancredo Neves, onde as espécies de floresta em regeneração (capoeira) e de cerrado se apresentam associadas, dificultando a individualização destas separadamente; (6) Campo, apresenta-se, em geral, associado às áreas de pastagens e (7) Reflorestamento, no geral associado ao plantio de *Eucalyptus sp.* (eucaliptos).

Segundo Herrmann *et al.*, 1998, o relevo da região se divide em dois tipos mais proeminentes: Compartimento Cárstico e Compartimento não Cárstico. O primeiro ocorre entre as altitudes de 800 a 650 metros (Figura 10), predominantemente na porção central da área de estudo, associado aos calcários da Formação Sete Lagoas. É caracterizado pela ocorrência de paredões, desfiladeiros, *canyons*, sumidouros, vales fechados e cegos, dolinas, uvalas e poljés, além de um grande número de cavernas e reentrâncias que são resultado da intersecção dos condutos de drenagens subterrâneas com a superfície do relevo (Berbert-Born, 2002; Herrmann *et al.*, 1998).

O Compartimento não Cárstico é definido pelo relevo desenvolvido nos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena e nas partes compostas por uma espessa camada de sedimentos sobrejacente às formações calcárias. No geral, ocorre a sudeste e nordeste da área de estudo, nas cotas topográficas mais altas (acima de 800 metros) (Figura 10). É caracterizado por colinas com topos alongados e convexos entalhados por um padrão de drenagem dendrítico (Herrmann *et al.*, 1998).

Segundo Amaral (2018) os maiores alongamentos das depressões cársticas predominam nas direções N40°-70°W, seguida de N0°-10°E e N30°-40°E, conforme evidenciado no estereograma da Figura 11.

### **3.2 Hidrografia**

A área está inserida na sub-bacia hidrográfica do rio das Velhas que pertence à bacia do rio São Francisco. Os níveis de base regionais correspondem ao rio das Velhas, que ocorre

no limite leste da área e foi descrito por Paula (2019) como o exutório do sistema, e seu afluente, o ribeirão da Mata, que ocorre no limite sul e sudoeste (Figura 10).

De forma geral a área apresenta uma esparsa rede de drenagem superficial, em função da existência de sumidouros, depressões cársticas e cavernas que drenam a água superficial para o meio subterrâneo, através de condutos e aberturas de dissolução. Nesse contexto, quatro córregos desembocam no rio das Velhas: Jaque, Gordura, Flor e Jaguará, e dois: Palmeiras e Samambaia, desaguam em sumidouros. Limites hidrográficos bordejam duas bacias fechadas: Escrivânia (NW) e Confins (S). Duas bacias (Retiro e Bom Jesus) drenam águas do carste através de surgências para o ribeirão da Mata (Figura 10).

O córrego do Jaque está localizado na porção sudeste da área de estudo e apresenta 17 km de comprimento da direção S-N (Figura 10). Seu curso é contínuo por ocorrer sobre os metacalcários impuros do Membro Pedro Leopoldo (Vieira, 2018), drenando uma área de 59,31 km<sup>2</sup> (Meneses, 2003).

A sub-bacia do córrego Samambaia, localizada na porção centro-leste da área de estudo (Figura 10), é tipicamente cárstica e recebe contribuição de grandes surgências e ressurgências como Samambaia, Engenho, Palestina e Gameleira. Com extensão de cerca de 9,1 km, o curso d'água apresenta orientação SW-NE e desagua na lagoa do Sumidouro (Vieira, 2018). Nessa bacia, algumas conexões hidráulicas já haviam sido confirmadas qualitativamente por Auler (1994), conforme apresentado na Figura 10. O autor ainda especulou que a maior parte das águas que afloram na surgência Samambaia são provenientes da Caverna Lapa Vermelha e dos sumidouros de Paredãozão e Estrada Alta e que a lagoa do Sumidouro conectaria com a surgência Poço Azul (Figura 10).

O córrego Palmeira está localizado a norte de Matozinhos e possui extensão de 5,8 km (Figura 10). O curso d'água segue orientação NW-SE até ser drenado pelo maciço calcário da Cimento Mauá Minerações (Vieira, 2018) e emerge novamente na ressurgência Mocambo, localizada a 5 km a nordeste, conforme apresentado por Auler (1994) (Figura 10).

Auler (1994) também confirmou interconexão hidráulica entre a lagoa do Bom Jardim e a ressurgência do Mocambo (Figura 10). O curso d'água proveniente dessa ressurgência recebe o nome de córrego do Mocambo e percorre cerca de 3 km até a Fazenda Experiência da Jaguará, onde recebe contribuição da surgência homônima. A partir dessa confluência forma-se o córrego Jaguará, que com orientação SW-NE, possui 13,8 km de extensão até desaguar no rio das Velhas (Figura 10).

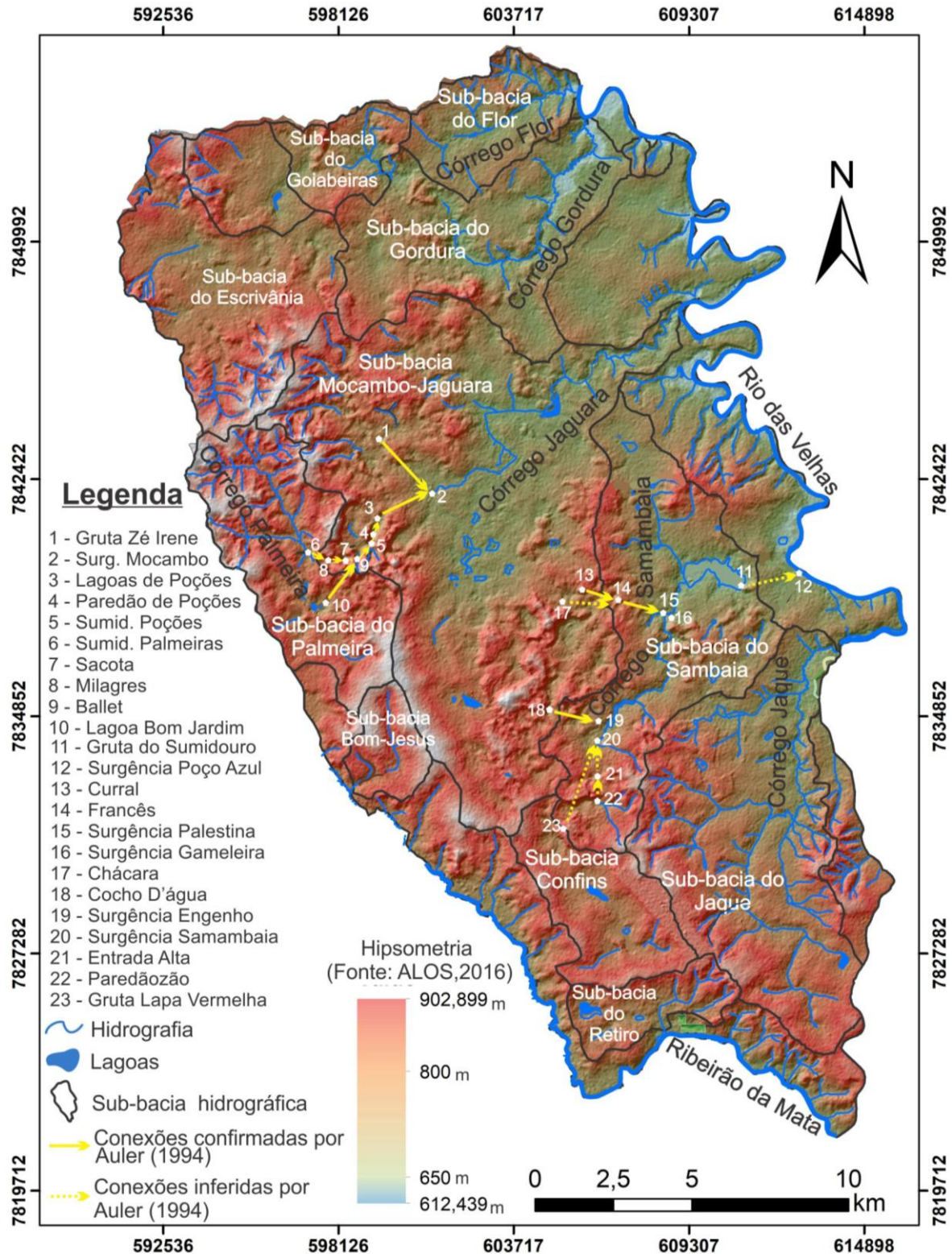


Figura 10 – Hidrografia, hipsometria da área de estudo, com destaque para os principais córregos e sub-bacias hidrográficas e conexões mapeadas e inferidas por Auler (1994).



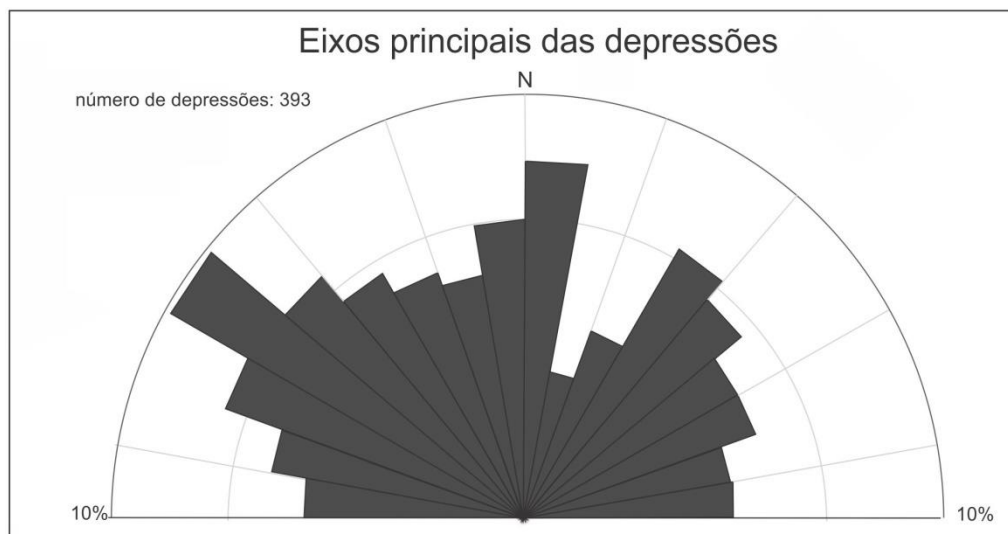


Figura 11 – Diagrama de roseta dos eixos principais de 393 depressões cársticas da área de estudo. Fonte: modificado de Amaral (2018).

Localizado na porção norte da área de estudo, o córrego Gordura possui 11,2 km de extensão e apresenta orientação que varia de NW-SE, W-E e SW-NE, até desaguar no rio das Velhas, no limite dos municípios de Matozinhos e Funilândia (Figura 10) (Meneses, 2003). A maior contribuição hídrica para o córrego provém da surgência Gordura e, de acordo com Viana *et al.* (1998), a sub-bacia em questão pode não representar um sistema hídrico fechado, uma vez que pode haver fluxo de água subterrânea entre ela e as áreas circunvizinhas, assim como observado na sub-bacia do Jaguará.

No extremo norte da área está localizada a sub-bacia do córrego Flor que apresenta área de drenagem de cerca de 16 km<sup>2</sup>. O curso principal possui extensão de 5 km, seguindo a direção de SW-NE (Figura 10), até desaguar no rio das Velhas (Vieira, 2018).

Destaca-se também a alta frequência de lagoas, classificadas na região da APA Carste de Lagoa Santa, por Auler (1994), em três tipos distintos: 1 – Lagoas sobre filitos; 2 – Lagoas tipo dolina; 3 – Lagoas tipo nível d'água do aquífero aflorante. Em geral as lagoas sobre filitos apresentam-se estáveis, enquanto as demais, relacionadas aos calcários, possuem níveis d'água oscilantes, podendo secar em ocasiões específicas.

### ***3.3 Geologia Regional e Local***

A região está inserida na porção sul do Cráton do São Francisco, nos domínios da cobertura sedimentar neoproterozoica do Grupo Bambuí que, geograficamente, cobre uma

área de aproximadamente 300.000 km<sup>2</sup> (Almeida, 1977) ao longo dos estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás.

O Grupo Bambuí representa uma transgressão marinha generalizada sobre o Cráton do São Francisco (Alkmim & Martins-Neto, 2001) e expõe características de bacia intracratônica na base, transicionando para uma bacia de antepaís no topo (Zalan & Romeiro Silva, 2007). É constituído por um pacote de rochas carbonáticas alternadas com siliciclásticas que se subdivide nas formações Jequitaiá/Carrancas (conglomerados), Sete Lagoas (carbonatos), Serra de Santa Helena (siltitos), Lagoa do Jacaré (carbonatos), Samburá (conglomerados e arenitos), Serra da Saudade (siltitos), Jaíba (calcários) e Três Marias (arcósios), de acordo com a evolução das subdivisões estratigráficas propostas por Costa & Branco (1961), Oliveira (1967), Dardenne (1978) e RADAMBRASIL (1982). Posteriormente também foram definidas a Formação Lagoa Formosa (conglomerados e arenitos) por Uhlein *et al.* (2011) e a Formação Gorutuba (brecha, arenito e conglomerado) por Kuchenbecker *et al.* (2016) (Figura 12).

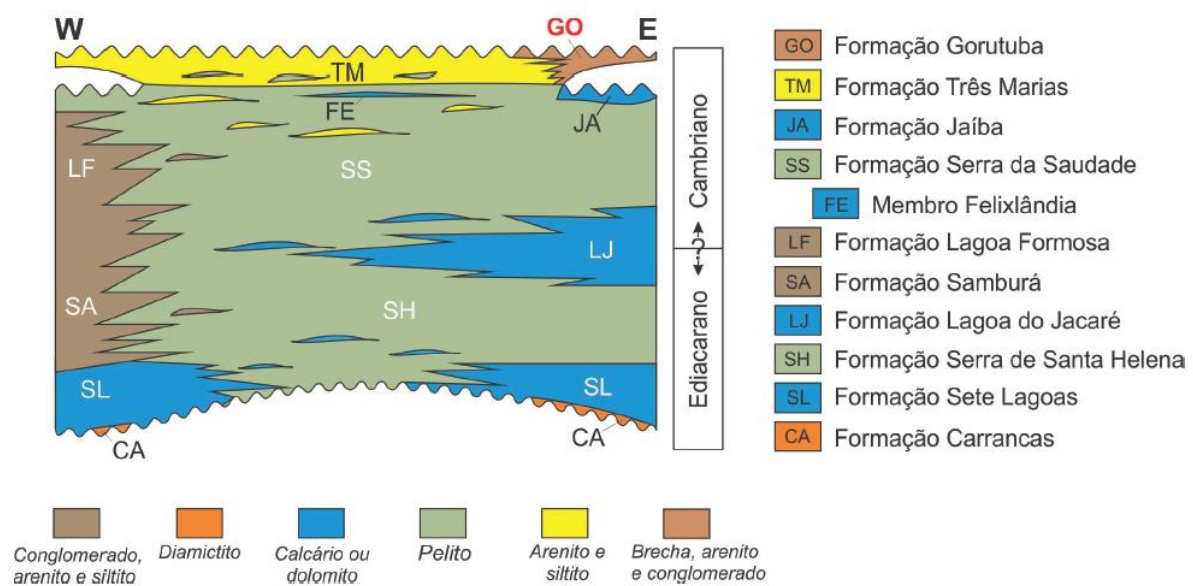


Figura 12 – Diagrama estratigráfico da Bacia Bambuí, com as principais unidades de preenchimento da bacia em Minas Gerais. Fonte: Kuchenbecker *et al.* (2016).

Segundo Ribeiro *et al.* (2003) na área de estudo afloram os litotipos da Formação Sete Lagoas, subdividida por Scholl (1976) nos membros Pedro Leopoldo (metacalcários impuros e silicosos) e Lagoa Santa (metacalcarenitos puros e homogêneos), superpostos pelas rochas siliciclásticas muito finas da Formação Serra de Santa Helena (Figura 13). Tal sequência assenta-se em discordância sobre as rochas metamórficas do Complexo Gnáissico-Migmatítico Arqueano, que aflora com pouca expressão (cerca de 2% da área) próximo ao ribeirão da Mata. São rochas comumente leucocráticas a cinza claro, com muito quartzo e

feldspato, pouca biotita ou quase ausente; granulação variando de fina a grossa, com faixas do tipo “augen-gnaisse”.

A Formação Sete Lagoas ocupa 70% da área, sobretudo na porção central, noroeste e sudoeste. O membro Pedro Leopoldo ocorre em 14,5% da área, aflorando na borda sudoeste, próximo ao ribeirão da Mata, em uma faixa N-S, na porção leste e no extremo norte, próximo a São Bento (Figura 13). Apresenta espessura de 150 metros (Cabral, 1994) e em termos litológicos corresponde a metacalcários impuros, constituídos, principalmente, por calcita, sericita, quartzo e, subordinadamente, sulfetos disseminados. As cores variam de verde escuro, azul acinzentado e bege amarronzado. Predominam fácies de calcissiltitos e calcilitos finamente laminados com frequentes intercalações argilosas terrígenas delgadas (Ribeiro *et al.*, 2003). Em consequência das intercalações pelíticas, as rochas desta unidade apresentam foliação mais pronunciada, assim como lineação de estiramento, clivagens de crenulação, sombras de pressão, mica *fish*, estruturas S-C, além de uma variedade de tipos de dobras: suaves a cerradas e de arraste (Ribeiro *et al.*, 2003).

O Membro Lagoa Santa ocupa 55,5% da área de estudo, aflorando principalmente na porção central e noroeste e como uma estreita faixa a sul (Figura 13). Apresenta espessura de cerca de 100 metros (Cabral 1994) e é formado por rochas carbonáticas puras de coloração cinza escuro, essencialmente calcíticas e com sulfetos disseminados. Predominam fácies calcarenitos, com intercalações de calcissiltitos e calcirruditos (Vieira *et al.*, 1994). A foliação presente nessa unidade se deve ao estiramento dos cristais de calcita, no geral com direção E-W, subparalela ao acamamento. São também comuns veios de calcita, zonas milonitizadas e dobras isoclinais intrafoliais (Ribeiro *et al.*, 2003). As rochas desse membro destacam-se pela elevada capacidade de dissolução e são nelas onde se observa a maior parte das estruturas dissolutivas típicas do cenário cárstico da região.

A Formação Serra de Santa Helena ocupa 25% da área e aflora principalmente nas porções sudeste e nordeste (Figura 13). Ocorre sobreposta à Formação Sete Lagoas e é definida como uma sequência metapelítica, composta por metassiltitos e metargilitos, com colorações bege, laranja, marrom claro e, quando fresco, esverdeado. Apresenta laminação, marcada pela alternância de sericita e quartzo (Ribeiro *et al.*, 2003; Zalán & Romeiro-Silva 2007).

Depósitos sedimentares recentes, envolvendo aluviões, colúvios e coberturas detrito-lateríticas areno-argilosas compõem as Coberturas Cenozóicas que ocupam cerca de 3% da área de estudo, principalmente ao longo dos cursos d'água (Figura 13).

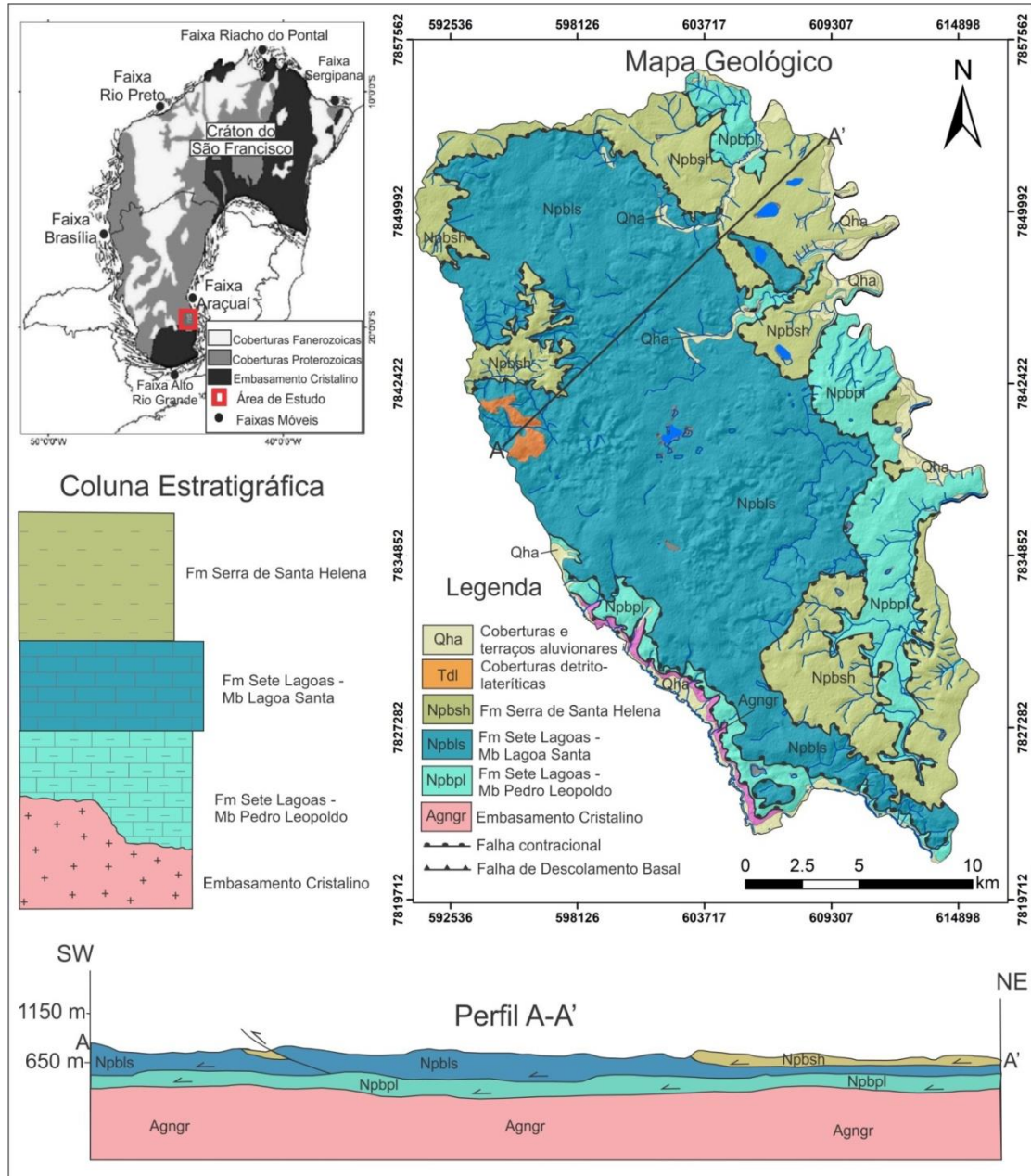


Figura 13 - Área de estudo no contexto geotectônico do Cráton do São Francisco (Fonte: adaptado de Alkimim, 2004), coluna estratigráfica (Fonte: adaptao de Pessoa, 2005) mapa e perfil geológico da área de estudo (Fonte: adaptado de Ribeiro *et al.*, 2016).

### 3.4 Geologia Estrutural

De acordo com Ribeiro *et al.* (2003), as unidades do Grupo Bambuí, na área de pesquisa, apresentam grau de deformação moderado a intenso, restando apenas algumas raras

porções onde a textura e a estrutura sedimentar foram preservadas da deformação. Três fases principais de deformação afetaram as unidades:

- Etapa Extensional E1D - Caracterizada por falhas normais de alto ângulo, com *trend* estrutural NNW-SSE e mergulho para leste, que evoluíram predominantemente durante a sedimentação inicial da sequência pelítico-carbonática do Grupo Bambuí;
- Etapa Compressiva E2Cm, corresponde a mais importante fase e é composta por um sistema de cisalhamento de baixo ângulo, com orientação preferencial N-S. Falhas de empurrão sub-horizontais, zonas de cisalhamento interestratais, dobras e uma foliação com baixo ângulo, com lineações associadas caracterizam esse sistema. Tais estruturas foram nucleadas em resposta a um esforço geral de orientação aproximadamente E-W, que, no entanto, não afetou o embasamento, configurando uma tectônica do tipo epidérmica (*thin-skined*).
- Etapa Extensional E3D, associada a movimentos distensivos que também envolveram o embasamento. Os basculamentos formaram dobras sinformais e antiformais de eixo E-W e falhas de rejeito normal, além de fraturas e lineamentos sobre as rochas do Grupo Bambuí.

### 3.5 Hidrogeologia

Na região da APA Carste de Lagoa Santa predominam os aquíferos cársticos semi-confinados a livres, caracterizados por uma intrincada rede de condutos subterrâneos que estão interconectados a numerosas feições cársticas superficiais, como dolinas, uvalas, cavernas, surgências e sumidouros (Viana *et al.*, 1998).

Levando-se em consideração os aspectos estruturais, litológicos, estratigráficos e morfológicos, quatro unidades hidrogeológicas distintas podem ser reconhecidas para a região em foco:

- Aquífero fraturado do embasamento granito-gnaíssico, apresenta porosidade primária muito reduzida ou inexistente, e porosidade secundária variável. O embasamento cristalino, em relação às unidades muito mais permeáveis sobrepostas, pode ser considerado o limite inferior de fluxo subterrâneo em termos regionais (Paula, 2019);
- Sistema Aquífero Sete Lagoas é formado pelos aquíferos Pedro Leopoldo e Lagoa Santa (Pessoa, 1996), cujo transporte e armazenamento ocorrem principalmente por

meio de dutos e fraturas alargadas. O processo de dissolução está principalmente atrelado à interseção entre os planos de fraturas e a superfície de acamamento (Pessoa, 2005; Peñaranda-Salgado, 2016; Ribeiro *et al.*, 2019). A geoquímica das rochas é também outro fator determinante na formação da porosidade terciária, de modo que o Membro Lagoa Santa é mais susceptível à dissolução em relação ao Membro Pedro Leopoldo, devido aos baixos teores médios de MgO e de resíduo insolúvel (Peñaranda-Salgado, 2016). Paula (2019) definiu dois compartimentos aquíferos nesse sistema: i) um superior, mais carstificado, denominado de compartimento cárstico, contido entre as cotas 638 e 716 metros, caracterizado pela presença de nascentes com vazões mais caudalosas e pela capacidade específica mediana dos poços de 5,9 m<sup>3</sup>/h.m; ii) um compartimento inferior, designado cárstico-fissural, instalado em cotas menores do que 638 m e com capacidade específica mediana de 2,6 m<sup>3</sup>/h.m.

- Aquitardo Santa Helena, com baixa permeabilidade, mas capacidade de armazenamento relativamente elevada. Possui porosidade fissural pouco desenvolvida, o que deve propiciar baixos valores de condutividade hidráulica.
- Aquífero de Cobertura que inclui aluviões, cangas e lateritas. Situa-se majoritariamente na zona não saturada, onde parte da recarga dos aquíferos subjacentes é processada. (Hidrovia, 2018).

Tendo em vista a importância das estruturas na conformação do carste e do fluxo subterrâneo, a análise estrutural da região também foi foco dos estudos de muitos autores. De acordo com Ribeiro *et al.* (2016) e Paula (2019), no aquífero Sete Lagoas a maior parte dos fluidos migra através de feições de dissolução, que caracterizam a porosidade terciária. Para esses autores a porosidade terciária está associada aos planos de acamamento carstificados e é também condicionada pela intercessão das fraturas sub-horizontais com as de alto ângulo.

Silva *et al.* (1987) indica a presença de padrão de juntas produzidos no Evento Brasileiro com atitudes N-10E/28SE e N50E/69SE. As análises de Ribeiro *et al.* (2019) evidenciam na área de estudo a preponderância de fraturas nas direções N10°-30°E e N80°-90°W e feições de dissolução na direção N70°-90°W, com caimento suave para leste. Os autores ainda destacam a importância das fraturas de alto ângulo para os fluxos do sistema cárstico, que apresenta sentido preferencial de oeste para leste. Peñaranda-Salgado (2016) obteve para a região de Sete Lagoas-MG três direções teóricas preferenciais de geração de condutos: N20E; N40E e N80W.

Para Velásquez *et al.* (2018), considerando a área de estudo, a interseção de fraturas de direção E-W com fraturas sub-horizontais condicionam a dissolução dos carbonatos e formação de dutos, por onde a água subterrânea se desloca. Segundo esses autores, nas áreas onde o fluxo subterrâneo se dá predominantemente por condutos, a direção principal é N80-90W, no sentido do Rio das Velhas. No entanto, o sistema de “fluxo difuso” prevalece na região, no qual o deslocamento de água subterrânea ocorre nas direções de fraturas NE e NW dos metacalcários, preferencialmente nas direções N0-10E, N10-30E e N10-90W. Essas fraturas possuem pequena capacidade de armazenamento e transmissividade, mas favorecem a recarga do aquífero quando expostas.

A recarga do aquífero cárstico da região, segundo Galvão (2015) é limitada ao período chuvoso, entre outubro a março e de acordo com Paula (2019) ocorre de 4 formas: i) infiltração direta em maciços calcários fraturados sem vegetação; ii) infiltração direta em maciços calcários cobertos com vegetação; iii) difusa através dos solos e/ou metapelitos; iv) escoamento interno, através de dolinas, com ou sem sumidouros.

A zona de descarga desse sistema aquífero ocorre junto ao rio das velhas (Pessoa, 1996) seja por meio de córregos formados pelas ressurgências cársticas da área, seja pelas descargas subterrâneas diretas do aquífero para dentro desse curso de água (Paula, 2019).

#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Duas abordagens metodológicas foram empregadas nesse estudo, uma visando a investigação dos fluxos subsuperficiais relativos ao meio cárstico superior, bem como a sua conexão com o meio aquífero cárstico-fissural profundo, e outra com o propósito de se avaliar especificamente os fluxos profundos em relação às estruturas rúpteis.

Na primeira abordagem, foram realizadas injeções manuais de traçadores corantes, em um ou dois pontos com fluxo corrente de água (sumidouro, piezômetro, caverna e lagoas com drenagem de fundo por dutos), seguido dos monitoramentos quantitativos automático (fluorímetro), semiautomático (coletor automático) e manual (coleta simples), bem como do monitoramento qualitativo (carvão ativado) em pontos hipotéticos da passagem dos traçadores corantes (surgências cársticas, poços profundos e piezômetros). Ressalta-se que se priorizou a realização dos testes no período da seca, uma vez que fluxos superficiais e hipodérmicos, comumente gerados no período chuvoso, inviabilizariam a realização de avaliações quantitativas.

Na segunda abordagem foram realizados estudos estatísticos da vazão dos poços profundos em função das direções das estruturas rúpteis.

Foram selecionados os traçadores corantes Fluoresceína e Rodamina WT, amplamente utilizados em estudos de hidrologia cárstica e de conexão hídrica, em função das altas solubilidade e detectabilidade (limite de 0,001 µg/L para a Fluoresceína e 0,02 µg/L para Rodamina WT; Leibundgut *et al.*, 2009), fácil manuseio e baixos níveis de toxicidade, conforme apresentado no item 2.2.1. Dentre doze injeções realizadas, a Rodamina WT foi empregada em sete e a Fluoresceína em cinco, conforme apresentado na Tabela 3. Quando em um mesmo ensaio eram realizadas injeções em locais distintos, empregaram-se os dois traçadores de modo a avaliar as conexões e contribuições hídricas de cada ponto de injeção.

A proposição dos testes com traçadores fluorescentes teve como ponto de partida o levantamento de dados existentes de estudos geológicos e hidrogeológicos anteriores, sobretudo o trabalho de Auler (1994), além do mapeamento de feições cársticas (sumidouros, surgências, cavidades) e poços tubulares que se apresentavam propícios à circulação hídrica no endocarste. A partir desse levantamento selecionaram-se 56 pontos englobados em 10 ensaios distintos (Tabela 3 e Figura 14). As descrições dos pontos dos ensaios executados se encontram detalhadas a seguir (item 4.1).

#### ***4.1 Descrição dos ensaios executados***

O planejamento dos ensaios foi precedido pelo reconhecimento da área em campo e pela interpretação de imagens de satélite. Esta etapa, bem como os ensaios em campo, foram realizados em parceria com empresa Hidrovia e com o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN.

Os ensaios estão representados na Tabela 3 e Figura 14, onde cada um é identificado com uma cor típica.

O Ensaio E1 reuniu dez pontos localizados a nordeste do aeroporto de Confins, próximo ao rio das Velhas (Figura 14). O ponto de injeção escolhido foi a Gruta do Sumidouro (ID-1) e os pontos selecionados para monitoramento localizam-se nas margens do rio das Velhas (Surgência Lagoa da Mata, ID-02, Surgência Poço Azul, ID-03 e Surgência Olho D'água, ID-04), nas proximidades do córrego Samambaia (surgências Gameleira, ID-5, Palestina I, ID-6 e Palestina II, ID-7), além de dois poços da Copasa (ID-9 e ID-10) e um no condomínio Quintas da Lagoa (ID-08). O monitoramento com coleta manual de água e carvão



ativado foi realizado em todos os pontos, um coletor automático foi instalado no Poço Azul e um fluorímetro no poço Quintas da Lagoa.

O Ensaio E2 foi composto por dezesseis pontos localizados a leste e nordeste de Mocambeiro (Figura 14). A injeção foi programada em dois piezômetros localizados próximos ao Parque Estadual de Cerca Grande: piezômetros Cerca Grande P1 (ID-11) e P4 (ID-12). Os pontos de monitoramento se concentraram na região do vale do Mocambo, nas proximidades do Parque Estadual de Cerca Grande (piezômetros Cerca Grande ID-14 e ID-13, poços Fz. Sto. Antônio Cerca Grande ID-15 e ID-16 e pontos ID-22 e ID-23 na gruta Santo Antônio), na região da Fazenda Jaguará (Lagoa Maciço Jaguará, ID-17, Surgência Jaguará, ID-18, Poço Jaguará, ID-19, Lago Sucuri, ID-20 e Surgência Mocambo, ID-21) e a leste de Mocambeiro, englobando as surgências Palestina I (ID-6), II (ID-7) e Gameleira (ID-5). O monitoramento com coleta manual de água e carvão ativado foi realizado em todos os pontos, coletores automáticos foram instalados nas surgências Palestinas I e II e fluorímetros na surgência Jaguará e Gruta Santo Antônio P1.

O Ensaio E3 englobou 3 pontos, sendo dois destes selecionados para a injeção: Gruta Água Fria (ID-24) e a Janela Cárstica Cocho d'Água (ID-25), localizados na bacia do Jaguará (Figura 14). Os pontos de monitoramento foram a Surgência Engenho (ID-26) e a Janela Cárstica Cocho d'Água (ID-25), monitorados por coletor automático e fluorímetro, respectivamente, além da coleta manual e carvão ativado instalado em ambos.

Para o Ensaio E4 foram selecionados oito pontos posicionados dentro dos limites do município de Pedro Leopoldo, na porção sudoeste da área de estudo (Figura 14). A injeção foi programada em dois piezômetros (ID-27), localizados próximo à lagoa Santo Antônio, na bacia Mocambo/Jaguará. Os pontos de monitoramento estão posicionados na bacia do Samambaia (Surgência Mocambo, ID-26), bacia do Bom Jesus (Surgência Sítio Santo Antônio, ID-28), bacia do Ribeirão da Mata (Surgência Cauê, ID-29 e Surgência Antônio Augusto, ID-30) e bacia Mocambo/Jaguará (Gruta da Água Fria, ID-24, Janela Cárstica Cocho D'água, ID-25, e Poço Fz. Lagoa Funda, ID-31). O monitoramento com coleta manual de água e carvão ativado foi realizado em todos os pontos, um coletor automático foi instalado na surgência Engenho e um fluorímetro na Janela Cárstica Cocho D'água.

O Ensaio E5 reuniu dezesseis pontos na região de Mocambeiro (Figura 14). O ponto de Injeção foi a gruta Morro Redondo (ID-32), a nordeste de Matozinhos. Os pontos de monitoramento posicionam-se a leste da gruta Morro Redondo, envolvendo as surgências

Mocambo (ID-21) e Jaguará (ID-18), Poço Sr. Afonso (ID-33), Lagoa Fluminense (ID-35), piezômetros Cerca Grande (ID-11, ID-12, ID-13, ID-14), Lagoa Maciço Jaguará (ID-17), Poço Fz. Vista Alegre (ID-36), poços Fz. Sto. Antônio Cerca Grande PT1 (ID-15) e PT-2 (ID-16), gruta Sto Antônio P1 (ID-22) e P2 (ID-23) e Lago Sucuri (ID-20), com exceção de Poções (ID-34) que está localizada a noroeste da gruta. O monitoramento com coleta manual de água e carvão ativado foi realizado em todos os pontos, um coletor automático foi instalado na surgência Mocambo e um fluorímetro na Surgência Jaguará.

O Ensaio E6 englobou treze pontos a norte de Mocambo (Figura 14). O ponto de injeção foi a Gruta Zé Irene (ID-37), no município de Prudente de Moraes. Os pontos de monitoramento posicionam-se a sudeste da gruta, englobando as surgências Mocambo (ID-21) e Jaguará (ID-18), piezômetros Cerca Grande (ID-11, ID-12, ID-13, ID-14), Lagoa Maciço Jaguará (ID-17), poços Fz. Sto. Antônio Cerca Grande PT1 (ID-15) e PT-2 (ID-16), Lago Sucuri (ID-20), com exceção da surgência Gordura (ID-38) e o Poço Zé Irene (ID-39), que estão localizados a nordeste da gruta. O monitoramento com coleta manual de água e carvão ativado foi realizado em todos os pontos, um coletor automático foi instalado na surgência Mocambo e fluorímetros nas surgências Jaguará e Gordura.

O Ensaio E7 e o Ensaio E8 reuniram dezoito pontos, sendo selecionados para injeção o sumidouro da Lagoa Bom Jardim (ID-40) e o sumidouro do córrego Palmeiras (ID-41) (Figura 14). Dada a proximidade dos pontos de injeção, e a maioria dos pontos de monitoramento serem comuns, os ensaios 7 e 8 foram executados simultaneamente. Os pontos de monitoramento, localizados em Matozinhos e a norte de Mocambo, envolveram as surgências Mocambo (ID-21) e Jaguará (ID-18), Gruta Morro Redondo (ID-32), poços Sr. Afonso (ID-33) e da Copasa em Matozinhos (ID-42), Lagoa Fluminense (ID-35), piezômetros Cerca Grande (ID-11, ID-12, ID-13, ID-14), Lagoa Maciço Jaguará (ID-17), Poço Fz. Vista Alegre (ID-36), poços Fz. Sto. Antônio Cerca Grande PT1 (ID-15) e PT-2 (ID-16), Lago Sucuri (ID-20), Sumidouro Poções (ID-34) e Lagoa Bom Jardim (ID-40). O monitoramento com coleta manual de água e carvão ativado foi realizado em todos os pontos, um coletor automático foi instalado na surgência Mocambo e um fluorímetro na surgência Jaguará.

O Ensaio 9 incluiu dez pontos localizados a sul de Funilândia, norte da área de estudo (Figura 14). Para o ensaio foram propostos dois pontos de injeção: Sumidouro Goiabeiras (ID-43) e Sumidouro Bebidas (ID-44). Sete pontos de monitoramento localizam-se ao longo da direção NW-SE, seguindo o alinhamento dos maciços calcários e de lagoas cársticas (Surgência Gordura, ID-38, Montante Veredas, ID-46, Gruta da Lagoa, ID-45, Sumidouro

Goiabeiras, ID-43, Surgência Goiabeiras, ID-50, Goiabeiras Braço Esquerdo, ID-49 e Dolina Goiabeiras, ID-51) e dois pontos situam-se afastados desses, nas margens da lagoa de São Bento (Cabeceira Flor I, ID-48 e II, ID-47). O monitoramento com coleta manual de água e carvão ativado foi realizado em todos os pontos, um coletor automático foi instalado na Gruta da Lagoa e um fluorímetro na surgência Gordura.

O Ensaio 10 investigou a circulação hídrica a norte do aeroporto de Confins e no entorno da Gruta da Lapa Vermelha (Figura 14). Ao todo foram selecionados dez pontos. O ponto de injeção foi a Gruta Lapa Vermelha (ID-52), localizada na bacia de Confins. Os pontos de monitoramento estão posicionados na bacia Samambaia (surgências Samambaia, ID-53, Engenho, ID-26, Palestina I, ID-6, Palestina II, ID-7, Gameleira ID-5 e Janela Cárstica Cocho D'água, ID-25), na bacia Confins (Caixa d'água da Mina, ID-54) e na bacia do Jaque (poços Confins ID-56 e Confins Jorrante, ID-55). O monitoramento com coleta manual de água e carvão ativado foi realizado em todos os pontos, um coletor automático foi instalado na surgência Engenho e fluorímetros na surgência Samambaia e no poço Confins Jorrante.

Tabela 3 – Pontos envolvidos nos ensaios de conexão hídrica e método de coleta para detecção dos traçadores fluorescentes. No método intitulado “Fluorímetro” as medidas dos valores das concentrações são automáticas.

ID	Ensaio	Ponto	Método de coleta	UTM E (X)	UTM N (Y)	Cota Z (m)
1	E01	<b>Gruta do Sumidouro</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>610955</b>	<b>7838934</b>	<b>646</b>
2	E01	Surgência Lagoa da Mata	Manual /Carvão Ativado	613217	7839218	653
3	E01	Surgência Poço Azul	Manual/Coletor Automático/Carvão Ativado	612947	7839367	653
4	E01	Surgência Olho D'água	Manual/ Carvão Ativado	612993	7840664	636
5	E01	Surgência Gameleira	Manual/ Carvão Ativado	608452	7838099	662
6	E01	Surgência Palestina I	Manual/ Carvão Ativado	608603	7838121	661
7	E01	Surgência Palestina II	Manual/ Carvão Ativado	608583	7838168	664
8	E01	Quintas da Lagoa	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	612946	7837569	705
9	E01	Poço E1 - Fidalgo Copasa	Manual/Carvão Ativado	608756	7840195	666
10	E01	Poço C01 - Fidalgo Copasa	Manual/Carvão Ativado	608980	7839815	674
11	E02	<b>Piezômetro Cerca Grande P1</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>603868</b>	<b>7839762</b>	<b>743</b>
12	E02	<b>Piezômetro Cerca Grande P4</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>606328</b>	<b>7840743</b>	<b>814</b>
5	E02	Surgência Gameleira	Manual/ Carvão Ativado	608452	7838099	662
6	E02	Surgência Palestina I	Manual/Coletor Automático/Carvão Ativado	608603	7838121	661
7	E02	Surgência Palestina II	Manual/Coletor Automático/Carvão Ativado	608583	7838168	664
13	E02	Piezômetro Cerca Grande P6	Manual/ Carvão Ativado	605271	7840760	709
14	E02	Piezômetro Cerca Grande P5	Manual/ Carvão Ativado	606582	7841213	791
15	E02	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	Manual/ Carvão Ativado	602867	7841131	624
16	E02	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	Manual/ Carvão Ativado	604865	7841341	638

ID	Ensaio	Ponto	Método de coleta	UTM E (X)	UTM N (Y)	Cota Z (m)
17	E02	Lagoa Maciço Jaguará	Manual/ Carvão Ativado	604388	7843944	659
18	E02	Surgência Jaguará	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	603591	7844335	659
19	E02	Poço Jaguará	Manual/ Carvão Ativado	605169	7844919	654
20	E02	Lago Sucuri	Manual/ Carvão Ativado	604690	7844354	656
21	E02	Surgência Mocambo	Manual/ Carvão Ativado	601679	7842655	689
22	E02	Gruta Sto Antônio P1	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	606960	7842731	690
23	E02	Gruta Sto Antônio P2	Manual/Carvão Ativado	606960	7842731	690
24	<b>E03</b>	<b>Gruta Água Fria</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>604681</b>	<b>7834636</b>	<b>730</b>
25	<b>E03</b>	<b>Janela cárstica Cocho D'água</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>604828</b>	<b>7834927</b>	<b>711</b>
25	E03	Janela cárstica Cocho D'água	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	604828	7834927	711
26	E03	Surgência Engenho	Manual/Coletor Automático/Carvão Ativado	606428	7834617	694
27	<b>E04</b>	<b>PZs próximos a Lagoa Sto Antônio</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>602843</b>	<b>7835138</b>	<b>737</b>
25	E04	Janela cárstica Cocho D'água	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	604828	7834927	711
24	E04	Gruta Água Fria	Manual/ Carvão Ativado	604753	7834702	729
28	E04	Surgência Sítio Sto Antônio	Manual/ Carvão Ativado	599455	7833028	728
29	E04	Surgência Cauê	Manual/ Carvão Ativado	602993	7830211	740
30	E04	Surgência Antônio Augusto	Manual/ Carvão Ativado	603665	7828841	726
31	E04	Poço Fz. Lagoa Funda	Manual/ Carvão Ativado	603318	7832114	819
26	E04	Surgência Engenho	Manual/Coletor Automático/Carvão Ativado	606428	7834617	694
32	<b>E05</b>	<b>Gruta Morro Redondo</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>599826</b>	<b>7839622</b>	<b>725</b>
21	E05	Surgência Mocambo	Manual/Coletor Automático/Carvão Ativado	601679	7842655	689
18	E05	Surgência Jaguará	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	603591	7844335	659
33	E05	Poço Sr. Afonso	Manual/ Carvão Ativado	601639	7839355	687
34	E05	Sumidouro Poções	Manual/ Carvão Ativado	599263	7840407	705
35	E05	Lagoa Fluminense	Manual/ Carvão Ativado	602477	7840065	667
11	E05	Piezômetro Cerca Grande P1	Manual/ Carvão Ativado	603868	7839762	743
13	E05	Piezômetro Cerca Grande P6	Manual/ Carvão Ativado	603868	7839762	709
12	E05	Piezômetro Cerca Grande P4	Manual/ Carvão Ativado	603868	7839762	814
14	E05	Piezômetro Cerca Grande P5	Manual/ Carvão Ativado	603868	7839762	791
17	E05	Lagoa Maciço Jaguará	Manual/ Carvão Ativado	604388	7843944	659
36	E05	Poço Fz. Vista Alegre	Manual/ Carvão Ativado	603868	7839762	711
15	E05	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	Manual/ Carvão Ativado	602867	7841131	624
16	E05	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	Manual/ Carvão Ativado	604865	7841341	638
22	E05	Gruta Sto Antônio P1	Manual/ Carvão Ativado	606960	7842731	690
23	E05	Gruta Sto Antônio P2	Manual/ Carvão Ativado	606960	7842731	690
20	E05	Lago Sucuri	Manual/ Carvão Ativado	604690	7844354	656
37	<b>E06</b>	<b>Gruta Zé Irene</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>599476</b>	<b>7843640</b>	<b>692</b>
21	E06	Surgência Mocambo	Manual/Coletor Automático/Carvão Ativado	601679	7842655	689
18	E06	Surgência Jaguará	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	603591	7844335	659
38	E06	Surgência Gordura	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	601795	7850545	653
20	E06	Lago Sucuri	Manual/ Carvão Ativado	604690	7844354	656

ID	Ensaio	Ponto	Método de coleta	UTM E (X)	UTM N (Y)	Cota Z (m)
17	E06	Lagoa Maciço Jaguará	Manual/ Carvão Ativado	604388	7843944	659
15	E06	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	Manual/ Carvão Ativado	602867	7841131	624
16	E06	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	Manual/ Carvão Ativado	604865	7841341	638
11	E06	Piezômetro Cerca Grande P1	Manual/ Carvão Ativado	603801	7841131	743
12	E06	Piezômetro Cerca Grande P4	Manual/ Carvão Ativado	606328	7840743	814
14	E06	Piezômetro Cerca Grande P5	Manual/ Carvão Ativado	606582	7841213	791
13	E06	Piezômetro Cerca Grande P6	Manual/ Carvão Ativado	605271	7840760	709
39	E06	Poço Zé Irene	Manual/ Carvão Ativado	600024	7844414	719
<b>40</b>	<b>E07/8</b>	<b>Lagoa Bom Jardim</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>597653</b>	<b>7838380</b>	<b>719</b>
<b>41</b>	<b>E07/8</b>	<b>Sumidouro Palmeiras</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>597262</b>	<b>7840276</b>	<b>724</b>
32	E07/8	Gruta Morro Redondo	Manual/ Carvão Ativado	599826	7839622	725
35	E07/8	Lagoa Fluminense	Manual/ Carvão Ativado	602477	7840065	667
33	E07/8	Poço Sr. Afonso	Manual/ Carvão Ativado	603591	7844335	687
15	E07/8	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	Manual/ Carvão Ativado	602867	7841131	624
16	E07/8	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	Manual/ Carvão Ativado	604865	7841341	638
11	E07/8	Piezômetro Cerca Grande P1	Manual/ Carvão Ativado	603868	7839762	743
12	E07/8	Piezômetro Cerca Grande P4	Manual/ Carvão Ativado	606328	7840743	814
14	E07/8	Piezômetro Cerca Grande P5	Manual/ Carvão Ativado	606582	7841213	791
13	E07/8	Piezômetro Cerca Grande P6	Manual/ Carvão Ativado	605271	7840760	709
36	E07/8	Poço Fz. Vista Alegre	Manual/ Carvão Ativado	602082	7840776	711
42	E07/8	Poço Copasa Matozinhos	Manual/ Carvão Ativado	595681	7837321	764
40	E07/8	Lagoa Bom Jardim	Manual/ Carvão Ativado	597653	7838380	719
21	E07/8	Surgência Mocambo	Manual/Coletor Automático/Carvão Ativado	601679	7842655	689
34	E07/8	Sumidouro Poções	Manual/Carvão Ativado	599263	7840407	705
18	E07/8	Surgência Jaguará	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	603591	7844335	659
17	E07/8	Lagoa Maciço Jaguará	Manual/ Carvão Ativado	604388	7843944	659
20	E07/8	Lago Sucuri	Manual/ Carvão Ativado	604690	7844354	656
<b>43</b>	<b>E09</b>	<b>Sumidouro Goiabeiras</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>600078</b>	<b>7851993</b>	<b>657</b>
<b>44</b>	<b>E09</b>	<b>Sumidouro Bebidas</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>597495</b>	<b>7849934</b>	<b>684</b>
38	E09	Surgência Gordura	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	601795	7850545	653
45	E09	Gruta da Lagoa	Manual/Coletor Automático/Carvão Ativado	601816	7850694	651
46	E09	Montante Veredas	Manual/ Carvão Ativado	601614	7851254	652
47	E09	Cabeceira do Flor II	Manual/ Carvão Ativado	602328	7853383	664
48	E09	Cabeceira do Flor I	Manual/ Carvão Ativado	602479	7853354	664
49	E09	Goiabeira Braço Esquerdo	Manual/ Carvão Ativado	600136	7852096	656
50	E09	Surgência Goiabeiras	Manual/ Carvão Ativado	599335	7852441	668
51	E09	Dolina Goiabeiras	Manual/ Carvão Ativado	600171	7852001	656
43	E09	Sumidouro Goiabeiras	Manual/ Carvão Ativado	600078	7851993	657
<b>52</b>	<b>E10</b>	<b>Gruta Lapa Vermelha</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>605231</b>	<b>7830928</b>	<b>728</b>
53	E10	Surgência Samambaia	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	606391	7833945	705
26	E10	Surgência Engenho	Manual/Coletor Automático/Carvão Ativado	606428	7834617	694

ID	Ensaio	Ponto	Método de coleta	UTM E (X)	UTM N (Y)	Cota Z (m)
54	E10	Caixa D'água da Mina	Manual/ Carvão Ativado	605452	7830960	824
25	E10	Janela cárstica Cocho D'água	Manual/ Carvão Ativado	604828	7834927	711
6	E10	Surgência Palestina I	Manual/ Carvão Ativado	608603	7838121	661
55	E10	Poço Confin Jorrante	Manual/Fluorímetro/Carvão Ativado	609354	7830421	745
56	E10	Poço Confin	Manual/ Carvão Ativado	609278	7830365	752
7	E10	Surgência Palestina II	Manual/ Carvão Ativado	608583	7838168	664
5	E10	Surgência Gameleira	Manual/ Carvão Ativado	608452	7838099	662

Notas: ID- Identificação; Coordenadas em WGS84, zona 23S. Fonte: adaptado de Teodoro, *et al.* (2019).

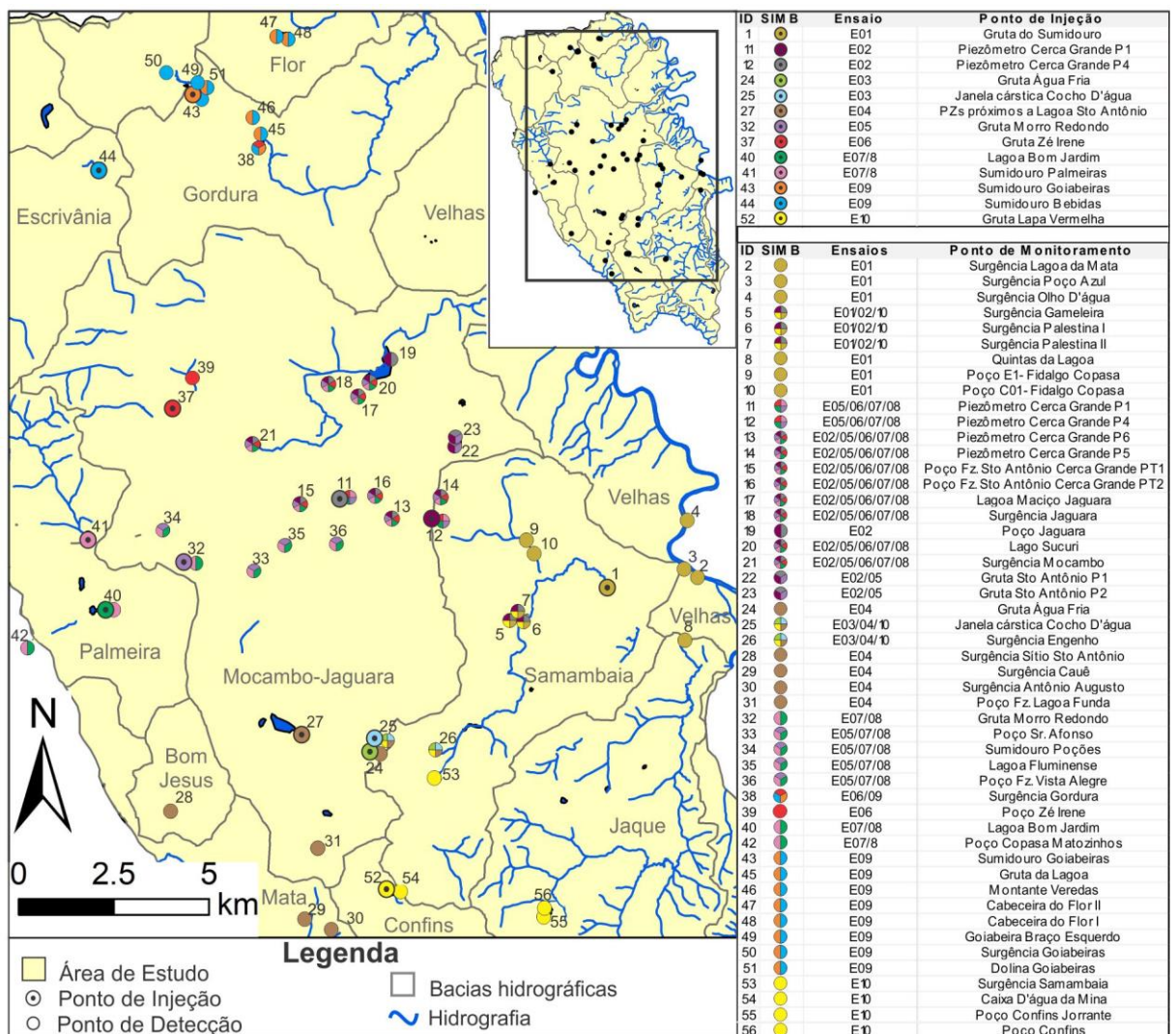


Figura 14 - Mapa dos pontos de injeção e monitoramento. Notas: Cada ensaio é identificado por uma cor. Pontos monitorados em mais de um ensaio são identificados pelas cores dos respectivos ensaios. Fonte: Teodoro, *et al.* (2019).

## ***4.2 Avaliação do background de fluorescência das águas***

Com intuito de evitar a interpretação de falsos positivos, previamente à execução de cada um dos ensaios, realizaram-se estudos dos valores de *background* para avaliação da fluorescência natural das águas que constituem o ambiente de estudo.

A avaliação de *background* compreendeu as etapas de coleta de amostras em campo nos pontos que seriam monitorados em cada ensaio, análise laboratorial e interpretação dos resultados.

Os dados de *background* gerados foram avaliados especialmente nas faixas dos picos dos espectros de excitação da Fluoresceína e Rodamina WT. Esses valores foram posteriormente comparados com os resultados das amostras coletadas após a aplicação dos corantes fluorescentes.

Apesar de cada ponto possuir um valor de *background* específico, para efeito da apresentação dos resultados, em cada ensaio adotou-se como valor de referência do *background* a curva do espectro de excitação do ponto que apresentou os resultados mais elevados para a fluorescência durante a campanha de *background*.

## ***4.3 Injeção dos traçadores corantes***

Os pontos escolhidos para a injeção dos traçadores fluorescentes foram sumidouros, cursos d'água no interior de cavidades, lagoas drenadas por condutos ativos e piezômetros, conforme apresentado na Figura 15 e Figura 16.



Figura 15 – Injeção dos traçadores fluorescentes. A) Injeção de Rodamina WT na Gruta do Sumidouro (ID-01; Ensaio 1); B) Injeção de Fluoresceína no Piezômetro Cerca Grande P4 (ID-12; Ensaio 02); C) Injeção de fluoresceína na Janela Cárstica Cocho D'Água (ID-25; Ensaio 3); D) Injeção de Rodamina WT na Gruta da água Fria (ID-24; ensaio 3); E) Injeção de fluoresceína no piezômetro próximo à Lagoa do Santo Antônio (ID-27; Ensaio 4); F) Injeção de Rodamina WT na Gruta do Morro Redondo (ID-32; Ensaio 5).





Figura 16 - Injeção dos traçadores fluorescentes. A) Injeção de Rodamina WT na gruta do Zé Irene (ID-37; Ensaio 6); B) Injeção de Rodamina WT na lagoa do Bom Jardim (ID-40; Ensaio 7 e 8); C) Injeção de Fluoresceína no sumidouro Palmeiras (ID-41; Ensaio 7 e 8); D) Injeção de Rodamina WT no sumidouro Bebidas (ID-44; Ensaio 9); E) Injeção de Fluoresceína no sumidouro Goiabeiras (ID-43; Ensaio 9); F) Injeção de Fluoresceína na gruta da Lapa vermelha (ID-52; Ensaio 10).

A quantidade de corante a ser injetada em cada ensaio foi estimada, de forma que garantisse concentrações suficientes para serem detectadas e que ao mesmo tempo não causassem riscos para saúde humana, nem danos ambientais. A Equação 2, adaptada por Pessoa (2005) de Kilpatrick & Cobb (1985), demonstra as variáveis consideradas no cálculo realizado para estimativa, de forma que a massa de corante a ser injetada,  $M_i$  [M], leva em consideração a vazão no ponto de amostragem,  $Q$  [ $L^3/t$ ], a distância retilínea entre o ponto de

injeção e detecção,  $d$  [L], a velocidade aparente da água subterrânea,  $v$  [L/t] e a concentração máxima do corante que se espera no ponto de amostragem,  $C_p$  [M/L<sup>3</sup>].

$$M_i = 1,338 \cdot 10^{-3} \frac{Q(d,1,5)}{v} C_p \quad (\text{Equação 2})$$

A Tabela 4 apresenta as datas de injeção dos traçadores fluorescentes, bem como a massa de corante injetada, tendo por base as estimativas realizadas para a vazão e para a velocidade aparente da água subterrânea em cada ensaio.

Tabela 4 - Data da execução e massa de corante injetada em cada ensaio.

Ensaio	Corante	Ponto de Injeção	ID	Data/Hora	Concentração do Corante (%)	Volume injetado	Massa injetada
E1	Rodamina WT	Gruta do Sumidouro	ID-1	21/02/2018 15:51	0.2	3L	600 g
E2	Rodamina WT	Piezômetro Cerca Grande P1	ID-11	10/09/2018 16:20	0.2	6L	1.200g
E2	Fluoresceína	Piezômetro Cerca Grande P4	ID-12	10/09/2018 18:00	0.4	4L	1.600g
E3	Rodamina WT	Gruta Água Fria	ID-24	06/08/2018 14:50	0.2	2L	400g
E3	Fluoresceína	Janela Cárstica Cocho d'Água	ID-25	06/08/2018 14:20	0.4	1L	400g
E4	Fluoresceína	Piezômetros próximos à lagoa do Santo Antônio	ID-27	08/05/2018 15:20	0.4	2L	800g
E5	Rodamina WT	Gruta Morro Redondo	ID-32	26/06/2018 12:10	0.2	4L	800g
E6	Rodamina WT	Gruta Zé Irene	ID-37	15/05/2018 11:00	0.2	3L	600g
E7	Rodamina WT	Lagoa Bom Jardim	ID-40	02/03/2018 16:10	0.2	6L	1.200 g
E8	Fluoresceína	Sumidouro Palmeiras	ID-41	02/03/2018 16:50	0.4	5L	2.000 g
E7 (Repetição)	Rodamina WT	Lagoa Bom Jardim	ID-40	04/06/2018 14:10	0.2	3L	600 g
E8 (Repetição)	Fluoresceína	Sumidouro Palmeiras	ID-41	04/06/2018 15:00	0.4	4L	1.600 g
E9	Fluoresceína	Sumidouro Goiabeiras	ID-43	16/01/2018 16:55	0.4	6L	2.400 g
E9	Rodamina WT	Sumidouro Bebidas	ID-44	16/01/2018 13:46	0.2	3L	600 g
E10	Fluoresceína	Gruta Lapa Vermelha	ID-52	19/12/2017 18:50	0.4	1L	400 g

#### ***4.4 Monitoramento de recuperação dos traçadores e análise dos resultados***

Os pontos de monitoramento de recuperação dos traçadores foram surgências, lagoas, piezômetros e poços de produção em operação, conforme apresentado no APÊNDICE A.

##### ***4.4.1 Amostragem da água***

Três métodos de amostragem foram empregados:

- Amostragem discreta - consistiu na coleta de amostras de água em pontos selecionados, em frequências pré-estabelecidas, de forma manual, utilizando-se frascos ambar de 30 ml (Figura 17-A), ou amostradores automáticos modelo ISCO 3700 (Figura 17-B), nesse caso com coletas programadas em intervalos de 1 ou 2 horas. A coleta manual foi realizada em todos os pontos monitorados, inclusive previamente à realização dos ensaios para avaliação do *background*, enquanto a utilização dos amostradores automáticos foi restrita a pontos determinados, conforme apresentado na Tabela 3.
- Amostragem integrativa - nesse tipo de amostragem há acúmulo de traçador durante o período de tempo monitorado. Utilizou-se, para isso, carvão ativado granulado, que permite a adsorção do corante fluorescente durante a passagem do fluxo. A liberação do mesmo ocorre a partir da aplicação de uma substância eluente em laboratório, sendo então possível avaliar a presença do corante na solução (Käss, 1998). O carvão ativado, com granulometria entre 8 a 12 mesh, foi aplicado dentro de sachês permeáveis (Figura 17-C) em todos os pontos de monitoramento, (Tabela 3), de forma que permanecessem sob fluxo perene, inclusive previamente à realização dos ensaios para avaliação do *background*. As amostras de carvão coletadas foram armazenadas em frascos de plástico de 60 ml (Figura 17-A), etiquetados e com registro do dia e hora da coleta.
- Amostragem contínua – consistiu na leitura da concentração do traçador fluorescente em curtos intervalos de tempo (10 minutos) nos locais onde existia fluxo hídrico contínuo (Tabela 3). Para isso foram empregados fluorímetros de campo modelo GGUN-FL30 (Figura 17-D) e GGUN-FL24 (Figura 17-E), específicos para águas superficiais e subterrâneas, respectivamente.

#### **4.4.2 Análises qualitativas**

As amostras de água coletadas manualmente e as de carvão ativado foram transportados até o laboratório para serem analisadas no espectrofotômetro de fluorescência da marca HITACHI, modelo F-2700 (Figura 17-F). Nesse caso as análises foram qualitativas, uma vez que só se avaliou as interconexões hidráulicas sem determinar os parâmetros hidrodinâmicos das rotas do fluxo.

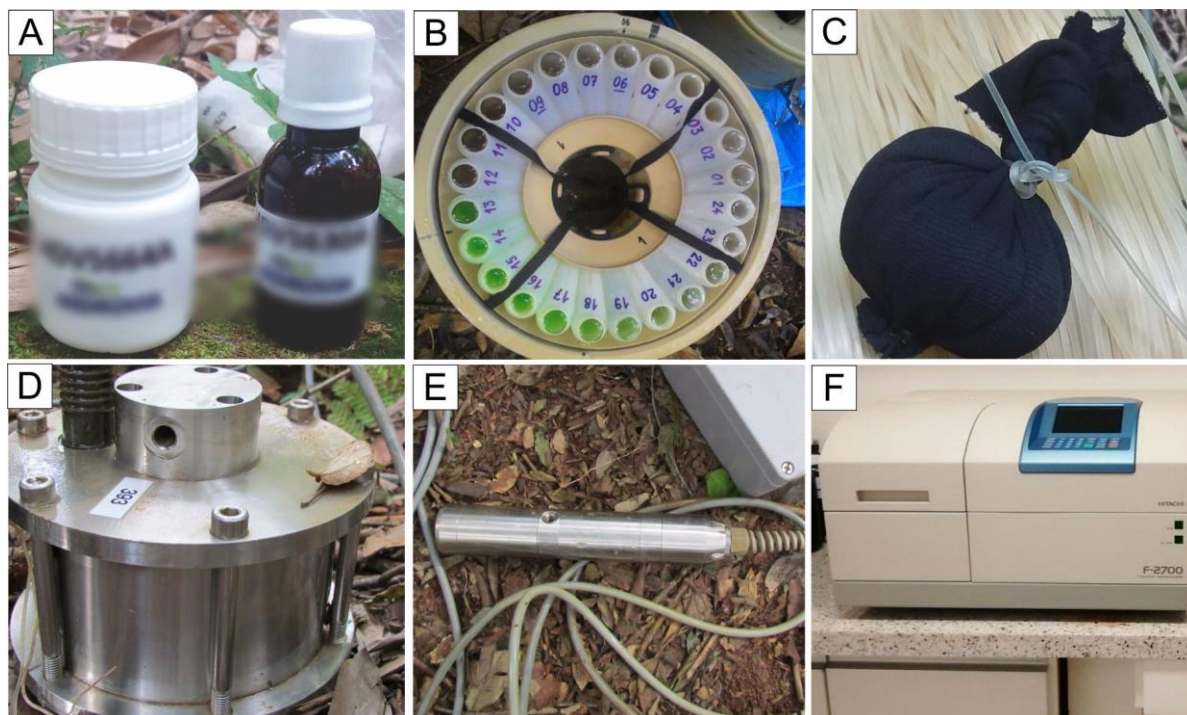


Figura 17 - Instrumentos empregados no monitoramento da fluorescência das águas. A) Frascos para a coleta de carvão ativado (direita) e água (esquerda); B) Amostrador automático ISCO 3700; C) Sachê com carvão ativado; D) Fluorímetro para medição contínua em campo (GGUN-FL30) específico para águas superficiais; E) Fluorímetro para medição contínua em campo (GGUN- FL24) empregado em águas superficiais e poços; F) Espectrofotômetro Hitachi F-2700. Fonte: modificado de Teodoro *et al.* (2019).

Para as amostras de água realizou-se o tamponamento da solução com KOH, de modo a evitar falsos negativos para amostras com valor de pH abaixo do limite crítico de 5,5 (Figura 7), sobretudo para a fluoresceína. Já o carvão foi seco a 150°C e depois lhe foi adicionado uma solução eluente de 5% de KOH em etanol, por 10 minutos, para liberar as substâncias adsorvidas para a fase líquida.

Cerca de 3 a 4 ml de água ou da solução de extração do carvão foram colocadas em uma cubeta transparente de quartzo. No interior do espectrômetro uma lâmpada de Xenônio fornece a energia para a excitação do material. A luz emitida propaga-se através de um prisma, atravessa a amostra contida na cubeta de quartzo e chega até um detector para a leitura da fluorescência. O equipamento permite a aquisição dos espectros de excitação e de emissão.

A interpretação qualitativa dos resultados positivos para a Fluoresceína e Rodamina WT partiu da identificação de picos de intensidade de fluorescência nos comprimentos de onda de excitação característicos para essas substâncias e posterior comparação com resultados prévios obtidos na campanha de *background*.

#### 4.4.3 Análises quantitativas

As análises quantitativas foram realizadas empregando-se os dados obtidos pelos fluorímetros de campo, que mediram a concentração do corante *in situ*, e pelos coletores automáticos, cujas concentrações foram medidas em laboratório. A partir dos valores de concentração, traçaram-se as curvas de passagem expressas em concentração (C) versus tempo (Figura 18), para cada conexão confirmada.

A partir da vazão dos pontos de detecção,  $Q$  [ $L^3/t$ ], e dos dados de concentração sequencial,  $C$  [ $M/V$ ], traçaram-se as curvas de recuperação dos corantes, que expressam a massa de traçador recuperada ao longo do tempo,  $M_R$  [ $M$ ] (Figura 18), por intermédio da Equação 3, baseada em Mull *et al.* (1988).

$$M_R = \int_{t=0}^{\infty} (Q \cdot C) dt \quad (\text{Equação 3})$$

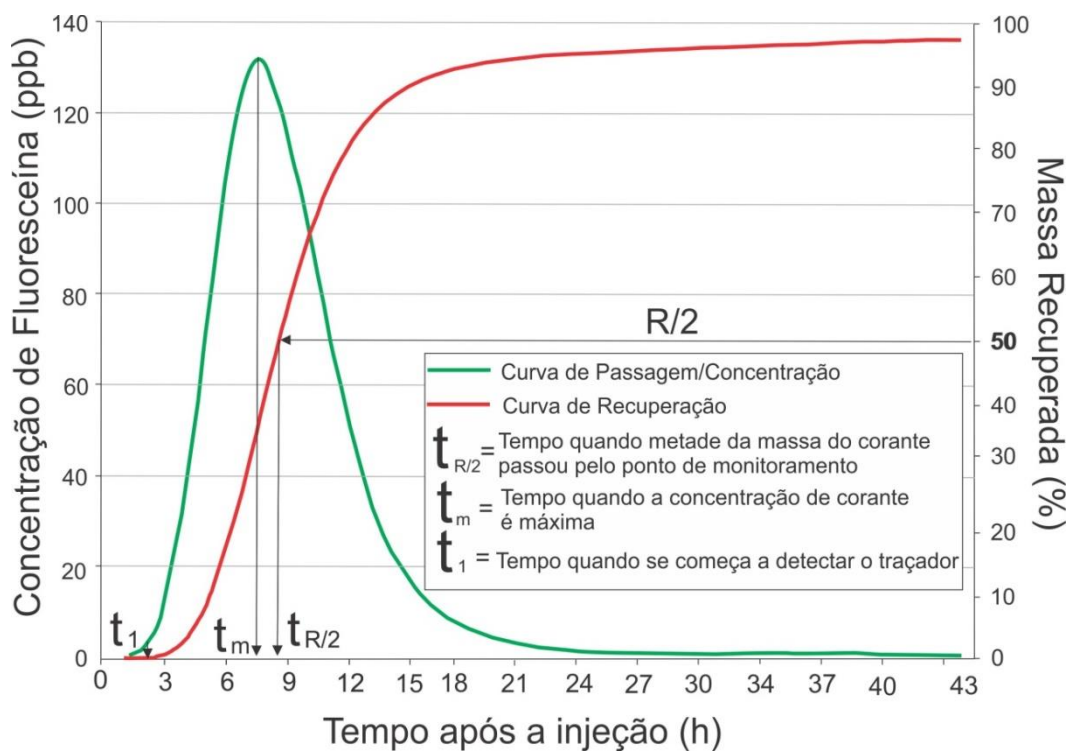


Figura 18 – Modelo de curvas de passagem e recuperação de traçador fluorescente e tempos de chegada do traçador, baseada na interconexão Lapa Vermelha – Samambaia.

A análise das curvas de passagem e recuperação permitiu inferir os parâmetros hidráulicos de cada rota investigada.

A partir da % da massa de corante recuperada,  $M_R\%$  [%], ao longo do tempo e da vazão no ponto de injeção,  $q$  [ $L^3/t$ ], e de detecção,  $Q$  [ $L^3/t$ ], avaliou-se a porcentagem na vazão “Q” proveniente da vazão “q” ( $q \xrightarrow{\%} Q$ ), pela Equação 4.

$$q \xrightarrow{\%} Q = \frac{100 \cdot q \cdot M_{R\%}}{Q} \quad (\text{Equação 4})$$

A quantificação das vazões nos pontos de injeção e detecção foi realizada utilizando-se o micromolinete e também o método volumétrico, conforme indicado na Tabela 5. Para o ensaio 7 e 8 as medidas das vazões foram afetadas pelas chuvas que ocorreram durante a realização do ensaio executado em março/2018 (Figura 9). Por esse motivo, o mesmo foi repetido em junho/2018.

Tabela 5 – Métodos e datas das medições de vazão em cada um dos pontos monitorados para análises qualitativas.

Ponto	ID	Ensaio	Data	Método
Gruta Santo Antônio P1	22	E2	12/09/2018	Volumétrico
Surgência Jaguará	18	E2	11/09/2018	Micromolinete
Surgência Palestina I	6	E2	03/09/2018	Micromolinete
Surgência Palestina II	7	E2	03/09/2018	Micromolinete
Gruta Água Fria	24	E3	04/09/2018	Volumétrico
Janela Cárstica Cocho D'água	25	E3	04/09/2018	Micromolinete
Surgência Engenho	26	E3	04/09/2018	Micromolinete
Surgência Engenho	26	E4	08/05/2018	Micromolinete
Janela Cárstica Cocho D'água	25	E4	08/05/2018	Micromolinete
Surgência Mocambo	21	E5	18/06/2018	Micromolinete
Surgência Mocambo	21	E6	14/05/2018	Micromolinete e Volumétrico
Surgência Gordura	38	E6	14/05/2018	Micromolinete
Surgência Jaguará	18	E6	14/05/2018	Micromolinete
Gruta Zé Irene	37	E6	01/10/2018	Micromolinete
Sumidouro Palmeira	40	E7 e E8	04/08/2018	Micromolinete
Lagoa Bom Jardim*	41	E7 e E8	18/07/1991	-
Surgência Mocambo	21	E7 e E8	05/03/2018	Micromolinete
Sumidouro Poços	34	E7 e E8	05/03/2018	Micromolinete
Surgência Mocambo	21	E7 e E8	18/06/2018	Micromolinete
Sumidouro Bebidas	44	E9	16/01/2018	Micromolinete
Gruta da Lagoa	45	E9	16/01/2018	Volumétrico
Sumidouro Goiabeiras	43	E9	16/01/2018	Micromolinete
Surgência Gordura	38	E9	16/01/2018	Micromolinete
Gruta da Lagoa	45	E9	28/11/2017	Volumétrico
Sumidouro Goiabeiras	43	E9	28/11/2017	Micromolinete
Surgência Gordura	38	E9	28/11/2017	Micromolinete
Poço Confins Jorrante	55	E10	19/12/2017	Volumétrico

Ponto	ID	Ensaio	Data	Método
Gruta Lapa vermelha	52	E10	19/12/2017	Micromolinete
Surgência Samambaia	53	E10	19/12/2017	Micromolinete
Surgência Engenho	26	E10	19/12/2017	Micromolinete

Legenda: \* Dados de Pessoa e Mourão (1998).

O molinete é projetado para girar quando impulsionado pelo fluxo de água. A partir do registro do número de rotações da hélice do molinete em função do tempo é possível calcular a velocidade da corrente fluvial. Como as velocidades variam ao longo da largura de um córrego, realizam-se várias leituras ao longo de uma seção transversal (Figura 19-A). A integração do produto da velocidade pela área da seção é a vazão do córrego.

No método volumétrico emprega-se um recipiente de volume conhecido e um cronômetro para contagem do tempo correspondente de enchimento (Figura 19-B). São tomadas pelos menos três medidas para obter uma média. Em seguida a vazão é calculada dividindo o volume armazenado no recipiente pelo tempo médio de enchimento.

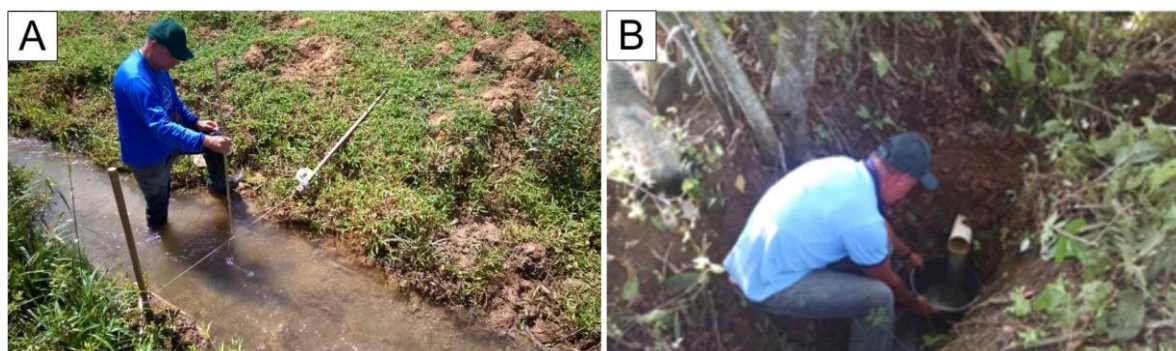


Figura 19 – Métodos de medição de vazão. A) Medição de vazão no córrego Goiabeiras utilizando-se o micromolinete; B) Medição de vazão na Gruta da Lagoa pelo método volumétrico.

#### 4.4.3.1 Parâmetros hidráulicos e geométricos

##### Qualidade da recuperação do traçador ( $A_i$ )

O índice  $A_i$ , definido por Sukhodolov *et al.* (1997 *apud* Field, 1999), exprime a qualidade de recuperação do traçador após a realização dos testes, e é calculado conforme apresentado na equação 5, em que  $M_i$  [M] corresponde à massa de corante injetada e  $M_R$  [M] a massa de corante recuperada.

$$A_i = \frac{M_i - M_R}{M_i} \quad (\text{Equação 5})$$

As alterações e/ou interações dos corantes ao longo do transporte, bem como a tipologia dos condutos cársticos influencia os valores de  $A_i$ , conforme apresentado na Figura 20. O valor de  $A_i$  igual a zero indica que toda massa de corante injetada foi recuperada. Valores positivos de  $A_i$  indicam que a massa recuperada foi menor do que a injetada. Tal resultado evidencia uma possível perda dos traçadores para outras rotas, mas também pode ser decorrência de oscilações nas vazões que não foram consideradas nos cálculos. Valores negativos de  $A_i$  indicam que a massa recuperada foi maior do que a injetada, evidenciando uma possível contaminação, ou também variações na vazão não consideradas nos cálculos.

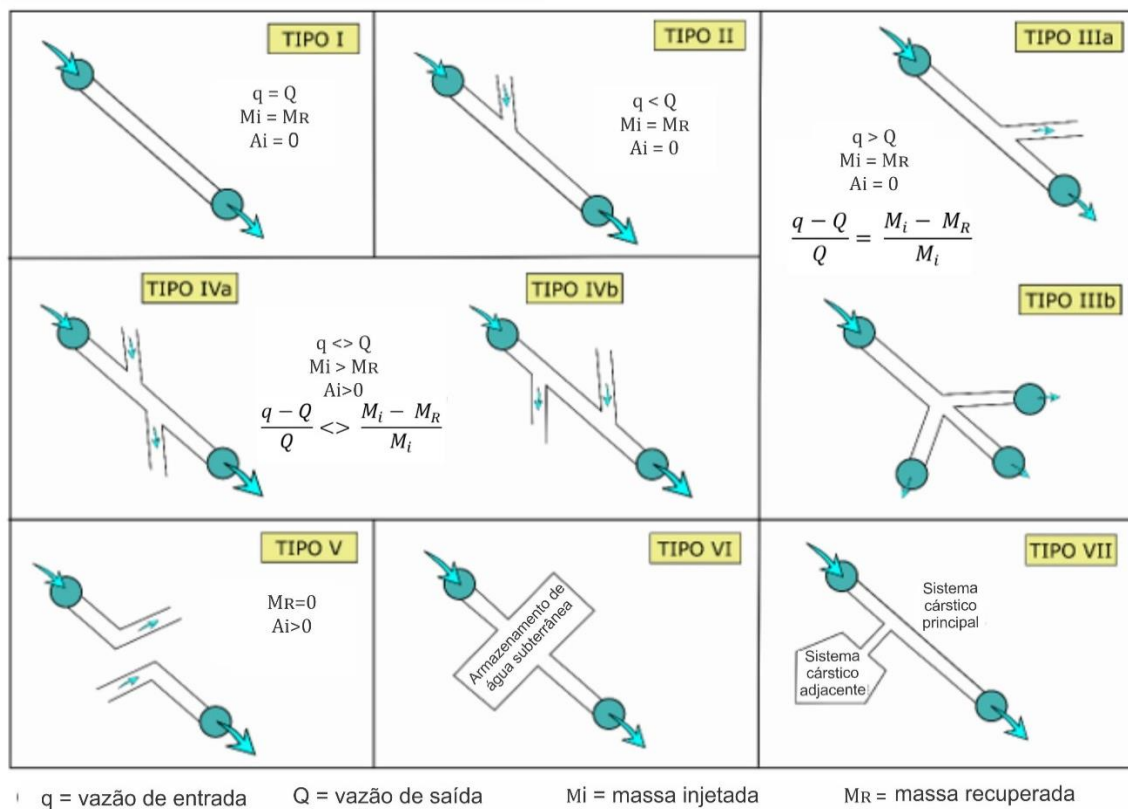


Figura 20 – Tipologia de condutos cársticos e parâmetros hidráulicos. Fonte: modificado de Atkinson *et al.* (1973) e Gaspar (1987) por Hidrovia (2018).

#### *Tempo de trânsito ou tempo de residência no aquífero ( $t_{R/2}$ )*

Corresponde ao tempo requerido para que a nuvem de corante possa se deslocar do ponto de injeção ao ponto de amostragem. Como a nuvem de corante se dispersa ao longo de seu deslocamento pelo aquífero, emprega-se nesse cálculo o tempo em que 50% da massa do corante tenha sido recuperada ( $t_{R/2}$ ; Figura 18). Normalmente, o centro de massa não equivale ao pico da concentração máxima da curva de passagem, em função das assimetrias apresentadas pelas curvas.



### *Velocidade média aparente*

Segundo Goldscheider *et al.* (2008), uma boa aproximação do valor médio da velocidade do fluxo pode ser obtida pela Equação 6, em que  $d$  [L] é a distância retilínea, entre o ponto de injeção e detecção e  $t_{R/2}$  [t] é o tempo em que metade da massa do corante foi recuperada no ponto de detecção. Porém, essa velocidade “ $v$ ” é aparente, visto que não se considera a trajetória real do fluxo.

$$v = \frac{d}{t_{R/2}} \quad (\text{Equação 6})$$

### *Sinuosidade da rota de fluxo*

A partir da compilação de dados de diversas cavidades cársticas no mundo, Worthington (1991) assumiu um fator de sinuosidade ( $S$ ) de 1,5 para o cálculo da distância percorrida pela água,  $X_S$  [L], (Equação 7), e que foi adotado neste estudo.

$$X_S = S \cdot d \quad (\text{Equação 7})$$

Uma aproximação da velocidade real do fluxo no sistema pode ser obtida substituindo, na Equação 6, o valor de  $d$  [L] por  $X_S$  [L].

### *Volume do aquífero para a rota investigada*

O volume  $V$  [L<sup>3</sup>] da rota investigada pode ser estimado com base nos valores de vazão do ponto de injeção -  $q$  [L<sup>3</sup>/t] -, na porcentagem de massa recuperada  $M_R\%$  [%] e no tempo de residência do traçador -  $t_{R/2}$  [t] - utilizando-se a Equação 8, adaptada de Atkinson *et al.* (1973).

$$V = q \cdot \frac{M_R}{M_i} \cdot t_{R/2} \quad (\text{Equação 8})$$

### *Área da Seção Transversal do Conduto*

Empregando-se o volume da rota investigada -  $V$  [L<sup>3</sup>] – e a distância sinuosa –  $X_S$ [L] é possível estimar a área da seção transversal do conduto  $A$  [L<sup>2</sup>] (Equação 9), considerando que este se encontra completamente preenchido pela água (freático) (Field, 1999).

$$A = \frac{V}{X_S} \quad (\text{Equação 9})$$

### *Diâmetro do Conduto*

Considerando-se um conduto cilíndrico, é possível calcular o diâmetro do referido canal –  $D_c$  [L] a partir da área da seção transversal  $A$  [L<sup>2</sup>], conforme apresentado na Equação 10.

$$D_c = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (\text{Equação 10})$$

## ***4.5 Análises de estruturas e suas relações com a circulação hídrica subterrânea***

Para interpretação dos resultados das interconexões adotou-se o modelo hidrogeológico conceitual de Paula (2019) que considera a existência de dois compartimentos aquíferos: i) superior, cárstico e altamente produtivo, investigado no presente estudo através da realização ensaios com traçadores; ii) inferior, cárstico-fissural e menos produtivo, avaliado aqui através da análise da vazão dos poços profundos em função da direção dos fotolineamentos.

### ***4.5.1 Análise de fotolineamentos***

Empregando a ferramenta AzimuthFinder acoplada ao Programa ArcGis® extraiu-se os azimutes dos lineamentos morfoestruturais traçados em baixos estruturais por Ribeiro *et al.* (2016) e Amaral (2018) na área de estudo e considerando uma extrapolação de 3 km das suas bordas.

Para se avaliar a influência dos comprimentos dos lineamentos nos azimutes, procedeu-se a análise considerando quatro agrupamentos de comprimentos: 0-282 metros, 283-410 metros, 411-640 metros e >640 metros, selecionados a partir do primeiro, segundo (mediana) e terceiro quartis dos dados. Os diagramas de roseta foram construídos por meio do software OpenStereo.

### ***4.5.2 Análise de acamamentos, foliações, fraturas, paleodutos e eixos principais das depressões***

Realizou-se a medição de fraturas, acamamentos e paleodutos nos afloramentos visitados durante a execução dos ensaios com os traçadores fluorescentes. Foram também

compilados dados estruturais dos trabalhos de Vieira (2015), Ribeiro *et al.* (2016), Lima *et al.* (2017), Andrade & Amorin (2018) e Magalhães & Silva (2018), além dos dados de eixos principais das depressões mapeadas por Amaral (2018), sendo todos esses trabalhos realizados no interior da área de estudo. Assim, um total de 734 medidas de paleodutos, 1889 de fraturas, 397 de acamamento e 393 de eixos principais de depressões foram analisadas através de estereogramas e diagramas de roseta construídos por intermédio do *software OpenStereo*.

#### ***4.5.3 Análise da influência das estruturas rúpteis no fluxo do meio cárstico superior***

Para avaliação dos sentidos das intercoxões hidráulicas, em associação aos dados estruturais levantados, traçaram-se seguimentos de retas entre os pontos de injeção e de detecção e, empregando-se a ferramenta AzimuthFinder acoplada ao Programa ArcGis®, extraiu-se os azimutes de tais seguimentos.

#### ***4.5.4 Análise da vazão dos poços profundos em função da direção dos lineamentos***

Com o objetivo de avaliar as principais direções de lineamentos morfoestruturais condicionantes do fluxo subterrâneo profundo, procedeu-se uma análise da correlação entre a vazão dos poços com o azimute dos lineamentos morfoestruturais da região.

Para isso foram empregados 1.843 fotolineamentos em baixos estruturais traçados por membros da equipe do projeto e 346 poços tubulares (Figura 21) disponibilizados pelo Sistema de Informações de Água Subterrânea (SIAGAS), Companhia de Saneamento Básico de Minas Gerais (COPASA), Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) através da Superintendência Regional de Meio Ambiente (SUPRAM) e pela empresa HIDROPOÇOS LTDA. Esses fotolineamentos encontram-se no interior do limite da área estudada acrescentada de um buffer de 3 km.

Para essa análise o primeiro passo foi avaliar a distância entre cada poço e o lineamento mais próximo através da ferramenta *near* do *software* ArcGis, que calcula a menor distância entre um ponto e a reta mais próxima. Em seguida os valores das variáveis “vazão de estabilização (m<sup>3</sup>/h)” e “distância entre o poço e o lineamento mais próximo (m)” foram plotados em um gráfico de dispersão para avaliação da correlação entre os mesmos (Figura 22-A).

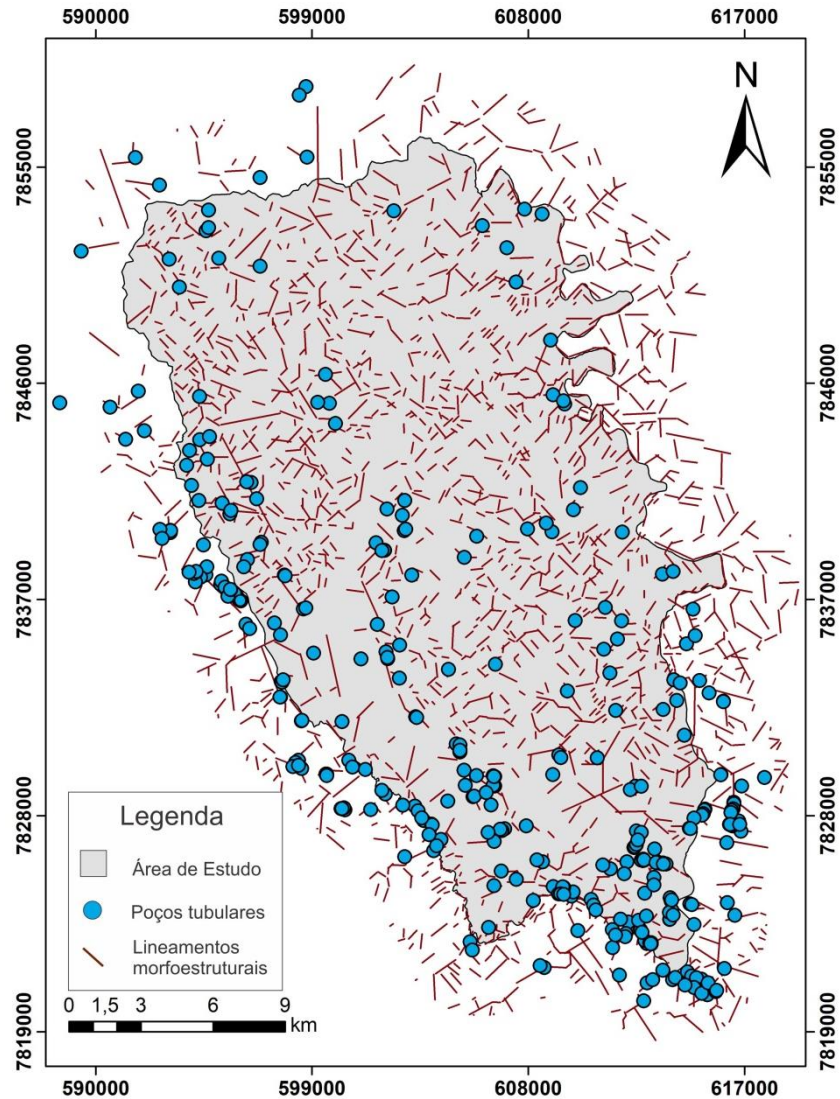


Figura 21 – Fotolocalizações morfoestruturais e poços tubulares considerados na avaliação principais direções de lineamentos morfoestruturais condicionantes do fluxo subterrâneo.

Para definição da distância máxima em que um lineamento ainda poderia influenciar nas vazões dos poços, coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) e gráficos de dispersão foram gerados considerando a vazão de estabilização e as distâncias entre poços e lineamentos de 0-50 m, 0-100 m, 0-150 m, 0-200 m, 0-250 m e 0-300 m, conforme apresentado na Figura 22-B a 20-G. Até 200 metros de distância as correlações entre a vazão e a distância são fracas e positivas, o que pode estar associado às imprecisões no traçado dos lineamentos e aos mergulhos das estruturas associadas a eles. A partir de 250 m a correlação apesar de fraca, passa ser negativa, indicando que a distância entre os poços e os lineamentos passou a influenciar negativamente a vazão. Por esse motivo, nessa avaliação adotaram-se apenas poços posicionados até 200 metros de distância do lineamento mais próximo, o que ocasionou na seleção de 234 poços.

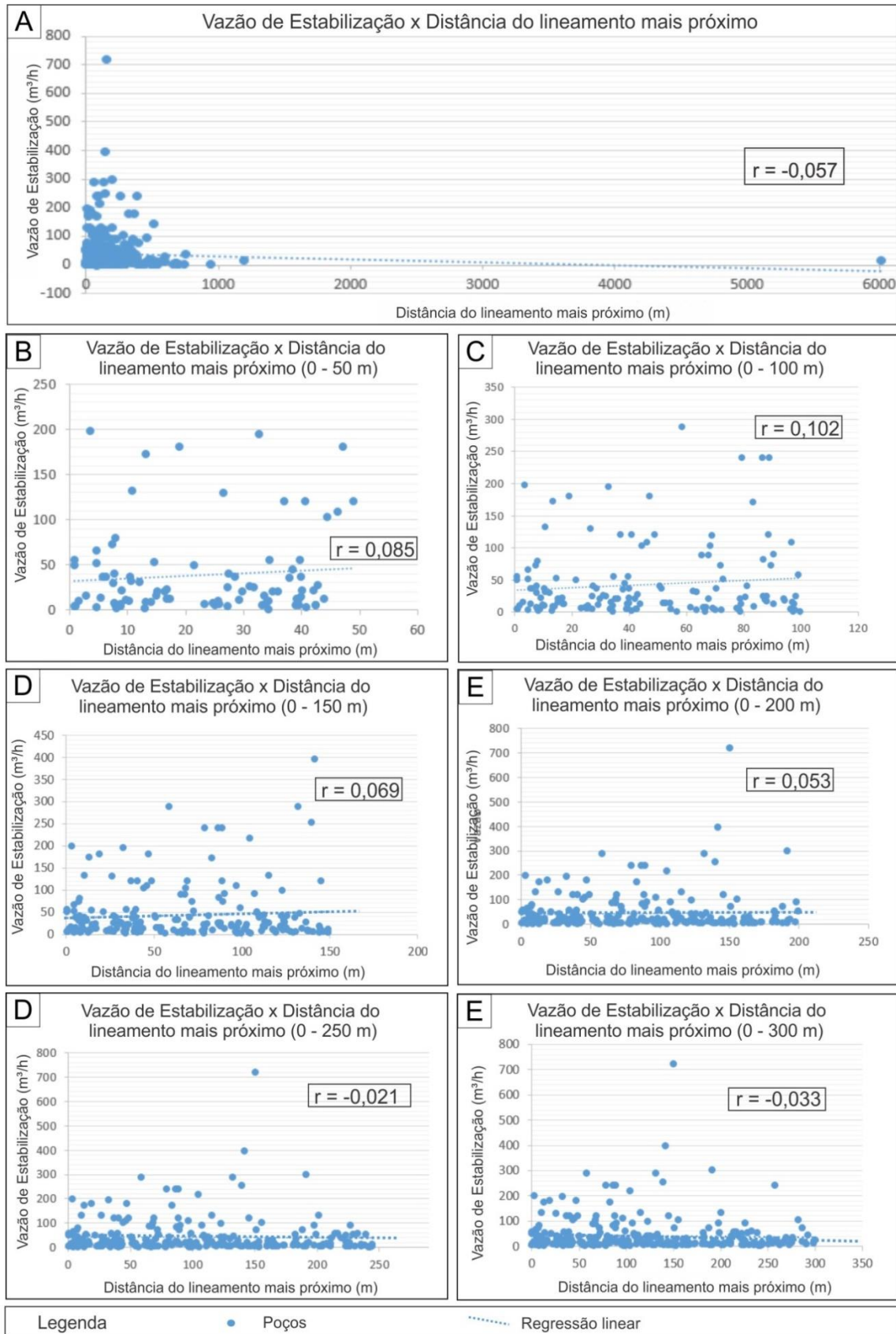


Figura 22 - Vazão de estabilização dos poços ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) versus distância do lineamento mais próximo (m) e correlações de Pearson; A) – Considerando todos os poços da área. Em relação ao lineamento mais próximo, poços posicionados a uma distância de: B) – Até 50 metros; (C) – Até 100 metros; D) – Até 150 metros; E) – Até 200 metros; F) – Até 250 metros; G) – Até 300 metros.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Resultados dos ensaios com traçadores corantes

A compilação dos resultados está exposta no artigo científico Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais, publicado em 2019 na revista *Águas Subterrâneas* e apresentado no APÊNDICE B. O detalhamento dos resultados será apresentado nos itens a seguir:

#### 5.1.1 Ensaio 1 – Injeção na Gruta do Sumidouro

O Ensaio 1 foi realizado a partir da injeção de 600 g do traçador Rodamina WT na Gruta do Sumidouro em 21/02/2018 às 15h51min. Foram monitorados nove pontos de água, localizados no entorno da lagoa do Sumidouro e próximos ao rio das Velhas (Tabela 3 e Figura 23), de modo que a maior e menor distância medida linearmente entre o ponto de injeção e os pontos de monitoramento são respectivamente: 2.640 m (Gameleira) e 1.960 m (Poço Azul) (Tabela 6).

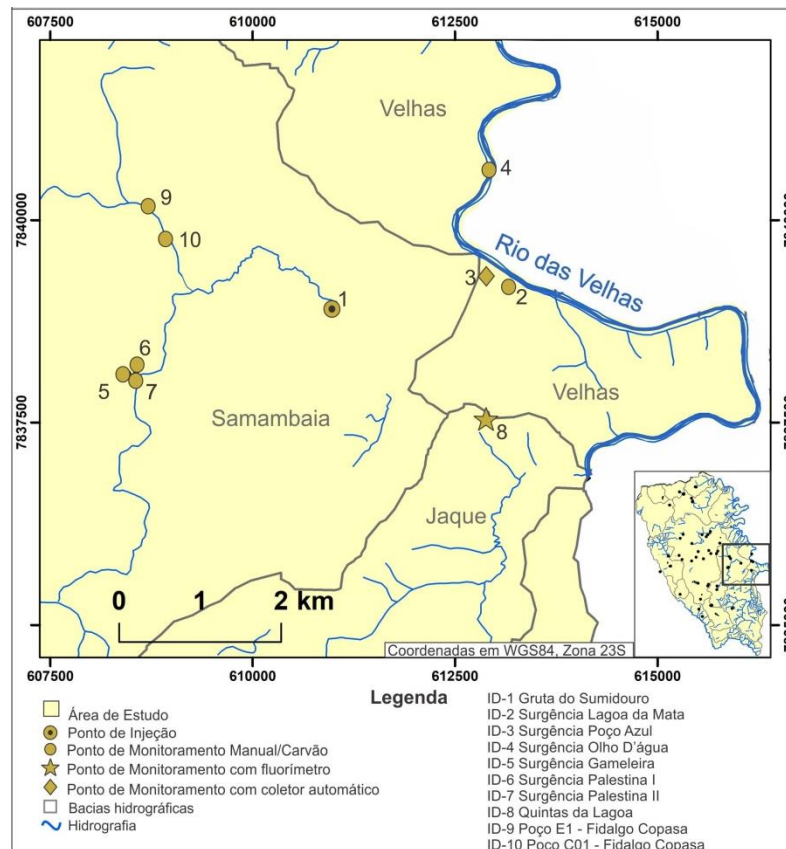


Figura 23 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 1.

### *Avaliação do Background*

Os resultados estudo prévio de *background* realizado em 20 e 21/02/2018 são apresentados no APÊNDICE C e evidenciaram valores baixos de intensidade de fluorescência nos pontos monitorados.

### *Análises qualitativas e quantitativas*

Após a injeção foram realizadas duas campanhas para coleta manual de água e carvão em todos os pontos: a primeira em 23/02/2018 e a segunda em 03 e 04/04/2018. O coletor automático monitorou o Poço Azul (ID-3) por 45 horas e o fluorímetro o poço do condomínio Quintas da Lagoa (ID-08) por 48 horas. No entanto, em nenhum dos nove pontos monitorados houve detecção do traçador Rodamina WT, conforme evidenciado na Tabela 6 e APÊNDICE C.

Tabela 6 – Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 1.

<b>ID</b>	<b>Ponto de Injeção/Monitoramento</b>	<b>Distância do ponto de injeção (m)</b>	<b>Resultado da avaliação qualitativa</b>
<b>1</b>	<b>Gruta do Sumidouro</b>	n.a.	n.a
2	Surgência Lagoa da Mata	2230	(-)
3	Surgência Poço Azul	1960	(-)
4	Surgência Olho D'água	2610	(-)
5	Surgência Gameleira	2640	(-)
6	Surgência Palestina I	2500	(-)
7	Surgência Palestina II	2490	(-)
8	Quintas da Lagoa	2400	(-)
9	Poço E1 - Fidalgo Copasa	2550	(-)
10	Poço C01 - Fidalgo Copasa	2190	(-)

Legenda: Em **negrito** ponto de injeção; (+) resultado positivo; (-) resultado negativo; n.a. não se aplica.

### *Discussões*

Auler (1994) especulou a conexão entre a Gruta do Sumidouro e a surgência Poço Azul, não confirmada no presente estudo. Nesse cenário, três hipóteses podem ser consideradas para os resultados negativos obtidos no Ensaio 1: 1) a descarga da Gruta do Sumidouro ocorre através de alguma surgência ao longo da calha do rio das Velhas; 2) a descarga da Gruta do Sumidouro representa alguma conexão mais profunda e 3) o tempo de residência do aquífero para as rotas avaliadas é maior que o tempo monitorado. A comprovação da primeira hipótese demandaria a injeção de uma grande quantidade de corante, levando-se em consideração a diluição que ocorreria no rio das Velhas em função de

sua elavada vazão. Tal procedimento poderia também comprometer o abastecimento de água do distrito de Fidalgo, caso os corantes atingissem os poços de bombeamento da Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA, o que inviabilizou a execução do mesmo. Apesar do ensaio ter tido influência de chuvas, conforme demonstrado na Figura 9, não espere-se que estas tenham diluído os corantes a ponto de não serem detectados.

### 5.1.2 Ensaio 2 – Injeção nos piezômetros Cerca Grande P1 e P4

O Ensaio 2 foi realizado a partir da injeção de 1200 g de Rodamina WT e 1600 g de Fluoresceína em dois piezômetros localizados nas proximidades do Parque Estadual Cerca Grande, em 10/09/2019, às 16h20min e 18h, respectivamente. Logo após a aplicação dos traçadores foi adicionada uma porção de água para lavar a tubulação dos piezômetros e facilitar a introdução dos traçadores no sistema. Foram monitorados quatorze pontos localizados a leste e nordeste de Mocambo, com instalação de dois fluorímetros e dois coletores automáticos (Tabela 3 e Figura 24).

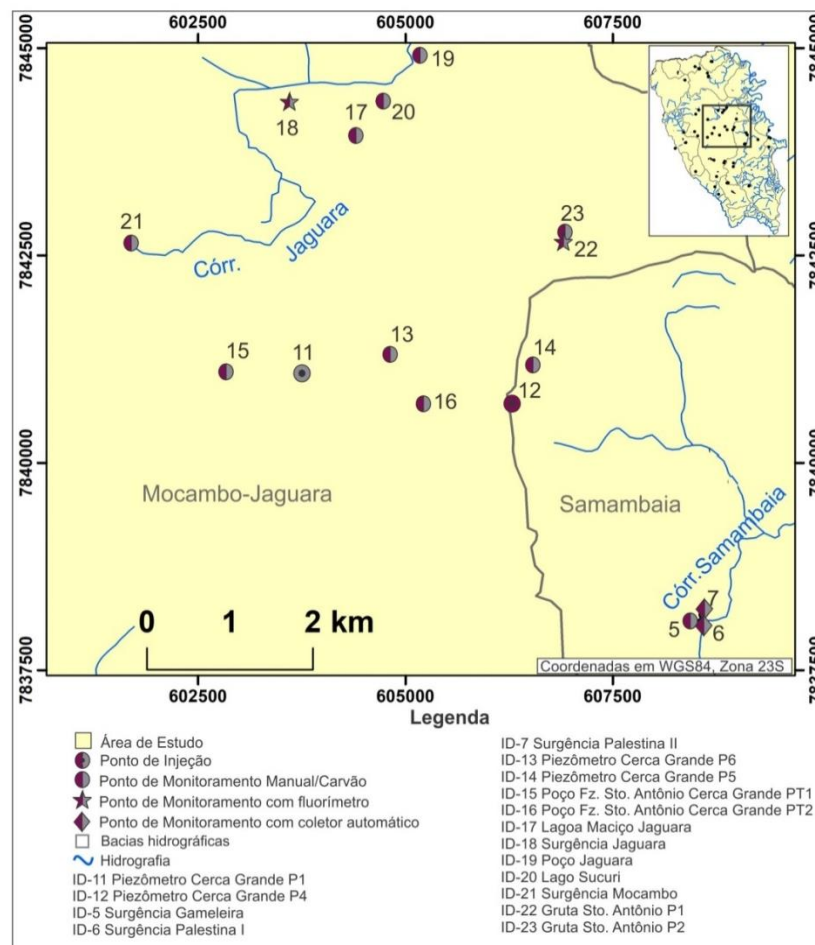


Figura 24 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 2.



### *Avaliação do Background*

Os resultados das avaliações do *background*, com amostras coletadas em 10/09/2018, exibem valores baixos de intensidade de fluorescência nos pontos monitorados, tanto para água quanto carvão, conforme apresentado no APÊNDICE D.

### *Análises qualitativas e quantitativas*

Após a injeção foram realizadas três campanhas, nos dias 11, 13 e 20/09/2018, para coleta manual de água e carvão em todos os pontos monitorados. Coletores automáticos foram instalados nas surgências Palestina I (ID-6) e II (ID-7), de modo que as coletas foram realizadas de hora em hora entre os dias 10 e 14/09/2018. Fluorímetros de campo monitoraram a Surgência Jaguará (ID-18) e Gruta Santo Antônio P1 (ID-22), entre os dias 10 e 20/09/2018. As vazões medidas para análise quantitativa são apresentadas na Tabela 7. Contudo, em nenhum dos pontos monitorados houve detecção dos traçadores, conforme evidenciado na Tabela 7 e APÊNDICE D.

Tabela 7 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 2.

ID	Ponto de Injeção/Monitoramento	Distância do ponto de injeção P1 (m)	Distância do ponto de injeção P4 (m)	Vazões (m <sup>3</sup> /s)	Resultado da avaliação qualitativa
<b>1</b>	<b>Piezômetro Cerca Grande P1</b>	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
<b>12</b>	<b>Piezômetro Cerca Grande P4</b>	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
5	Surgência Gameleira	4904	3390	----	(-)
6	Surgência Palestina I	5030	3460	0,013	(-)
7	Surgência Palestina II	5006	3420	0,008	(-)
13	Piezômetro Cerca Grande P6	1720	1060	----	(-)
14	Piezômetro Cerca Grande P5	3080	530	----	(-)
15	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	1700	3480	----	(-)
16	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	1870	1580	----	(-)
17	Lagoa Maciço Jaguará	4260	3760	----	(-)
18	Surgência Jaguará	4620	4520	0,470	(-)
19	Poço Jaguará	5370	4370	----	(-)
20	Lago Sucuri	4720	3990	----	(-)
21	Surgência Mocambo	3640	5000	----	(-)
22	Gruta Sto Antônio P1	4290	2090	0,000455	(-)
23	Gruta Sto Antônio P2	4290	2090	----	(-)

Legenda: Em **negrito** pontos de injeção; (+) resultado positivo; (-) resultado negativo; (n.a) não se aplica. (----) não medido.

### *Discussões*

As injeções em piezômetros apresentam um dificultador extra para mapear os fluxos subterrâneos, uma vez que não se tem a certeza de estar interceptando um conduto ativo. Nesse cenário, três hipóteses podem ser consideradas para os resultados negativos obtidos no Ensaio 2: 1) nenhum conduto ativo foi interceptado e por isso o traçador não entrou no sistema, mesmo injetando-se água; 2) os piezômetros interceptam condutos ativos, mas que não se conectam com os pontos monitorados; 3) o tempo de residência do aquífero para as rotas avaliadas é maior que o tempo monitorado.

#### ***5.1.3 Ensaio 3 – Injeção na Gruta da Água Fria e na Janela Cárstica Cocho d'Água***

O Ensaio 3 consistiu na investigação entre as conexões hídricas do sistema Gruta Água Fria, Janela Cárstica Cocho d'Água e Surgência Engenho. Em 06/08/2018, foram injetados, às 14h20min, 400g de Fluoresceína na Janela Cárstica Cocho d'Água (ID-25) e, às 14h50min, 400 g de Rodamina WT na Gruta da Água Fria (ID-24). Os pontos de monitoramento foram a Surgência Engenho (ID-26) e a Janela Cárstica Cocho d'Água (ID-25), onde foram instalados um coletor automático e um fluorímetro, respectivamente (Tabela 3 e Figura 25).

#### *Avaliação do Background*

Os resultados das avaliações do *background*, com amostras coletadas em 06/08/2018, exibem valores baixos de intensidade de fluorescência nos pontos monitorados, tanto para água quanto carvão, conforme apresentado no APÊNDICE E.

#### *Análises qualitativas*

Após a injeção foram realizadas três campanhas, nos dias 07, 08 e 10/08/2018, para coleta manual de água e carvão nos dois pontos monitorados. Resultados positivos foram obtidos nesses pontos, evidenciando as conexões hídricas Gruta da Água Fria – Surgência do Engenho, Gruta da Água Fria – Janela Cárstica Cocho D'água e Janela Cárstica Cocho D'água – Surgência do Engenho, conforme apresentado na Tabela 8 e APÊNDICE E.

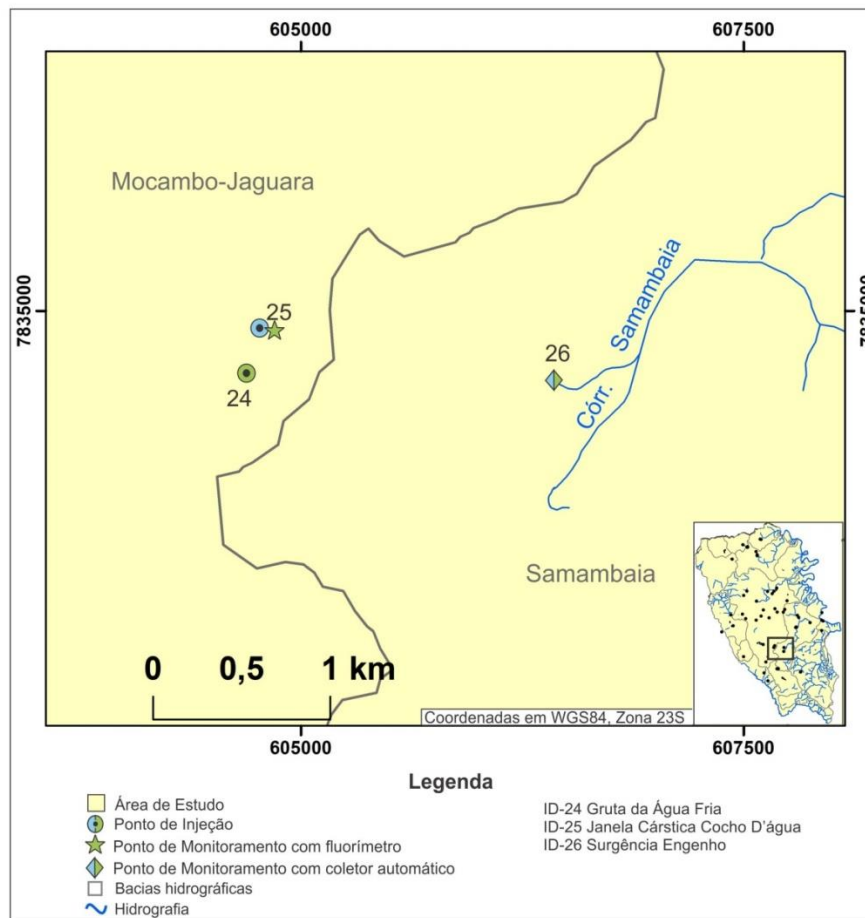


Figura 25 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 3.

Tabela 8 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 3.

ID	Ponto de Injeção/Monitoramento	Distância da Gruta da Água Fria (m)	Distância da Janela cárstica Cocho D'água (m)	Vazões (m³/s)	Resultado da avaliação qualitativa para Rodamina WT	Resultado da avaliação qualitativa para Fluoresceína
24	<b>Gruta da Água Fria</b>	n.a.	n.a.	0,000089	n.a	n.a.
25	<b>Janela Cárstica Cocho D'água</b>	250	n.a.	0,085	(+)	n.a.
26	Surgência Engenho	1680	1649	0,121	(+)	(+)

Legenda: Em **negrito** pontos de injeção; (+) resultado positivo; (-) resultado negativo; (n.a) não se aplica; (----) não medido.

### Análises quantitativas

Um coletor automático foi instalado na Surgência Engenho (entre às 15h do dia 06/08/18 e às 14h do dia 10/08/2018, com medições a cada hora) e um fluorímetro na Janela Cárstica Cocho D'água (entre às 12h do dia 06/08/2018 e 12h de 10/08/2018, com medições a cada 10 min). As curvas de passagem e recuperação para as conexões Janela Cárstica Cocho

D'água – Surgência Engenho, Gruta da Água Fria – Surgência Engenho e Gruta da Água Fria - Janela Cárstica Cocho D'água são apresentadas no APÊNDICE E. Os resultados das avaliações quantitativas são apresentados na Figura 26 e as vazões medidas para tal avaliação na Tabela 8.

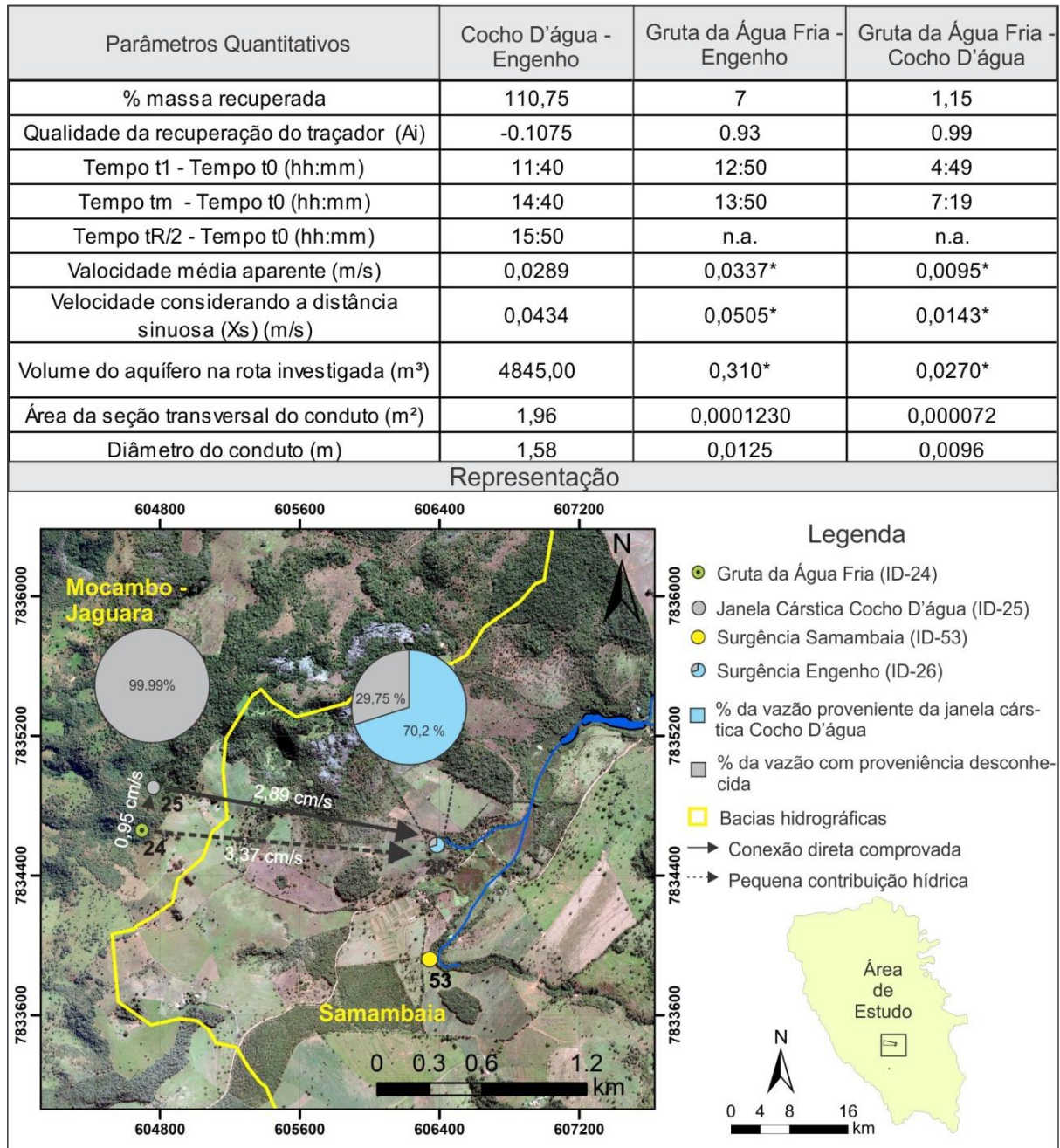


Figura 26- Resultados das avaliações quantitativas para as rotas Janela Cárstica Cocho D'água (ID-25) – Surgência Engenho (ID-26), Gruta da Água Fria (ID-24) – Surgência Engenho (ID-26) e Gruta da Água Fria (ID-24) – Janela Cárstica Cocho D'água (ID-25). Legenda: \* No cálculo das velocidades e volume do aquífero considerou-se o tempo tm.

A Janela Cárstica Cocho D'água contribuiu com 70,2% da vazão na Surgência do Engenho (Figura 26), enquanto a Gruta da Água Fria contribuiu com apenas 0,0514% da vazão

para esse ponto. Além disso, somente 0,0012% da vazão na Janela Cárstica Cocho D'água provém da Gruta da Água Fria.

### *Discussões*

Os testes com traçadores realizados no Ensaio 3 evidenciaram interconexões subterrâneas entre as sub-bacias Mocambo/Jaguara e Samambaia, comprovadas pelas conexões hidráulicas Cocho d'Água – Engenho, Gruta da Água Fria – Engenho (Figura 26).

As curvas observadas são caracterizadas por picos únicos de concentração (APÊNDICE E) e a partir destas elaborou-se a representação esquemática das interconexões (Figura 27), sendo os condutos classificados como do Tipo II (vide Figura 20). Para a conexão Cocho D'água – Engenho o diâmetro médio do conduto foi de 1,58 m e o volume do aquífero para a rota de 4.845,00 m<sup>3</sup>, enquanto as conexões Gruta da Água Fria – Cocho d'Água e Gruta da Água Fria - Engenho apresentam contribuições hídras ínfimas, provavelmente por fissuras.

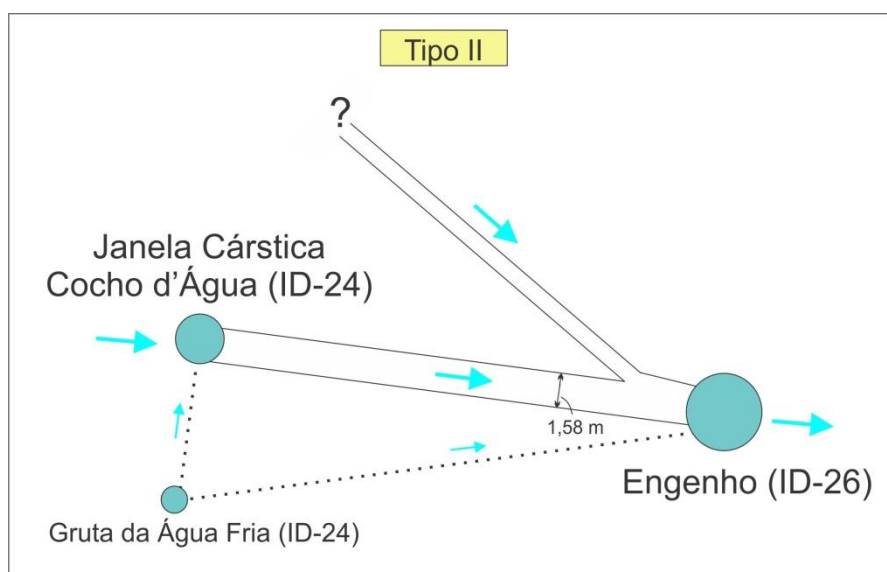


Figura 27 - Representação esquemática da conexão Cocho d'água – Engenho, com indicação do diâmetro médio do conduto. As linhas pontilhadas representam as pequenas contribuições hídras.

#### **5.1.4 Ensaio 4 – Injeção nos piezômetros próximos à Lagoa do Santo Antônio**

O Ensaio 4 teve como objetivo a avaliação de conexão hídrica entre o aquífero da região de Lagoa do Santo Antônio com surgências e poço no entorno, totalizando 7 pontos de monitoramento (Tabela 3 e Figura 28). Para isso, injetou-se 800 g de Fluoresceína em dois piezômetros localizados nas proximidades da Lagoa do Santo Antônio, em 08/05/2018, às

15h20min. Em seguida, para facilitar a introdução do traçador no sistema, adicionaram-se aproximadamente mil litros de água em cada piezômetro, com auxílio de um caminhão pipa.

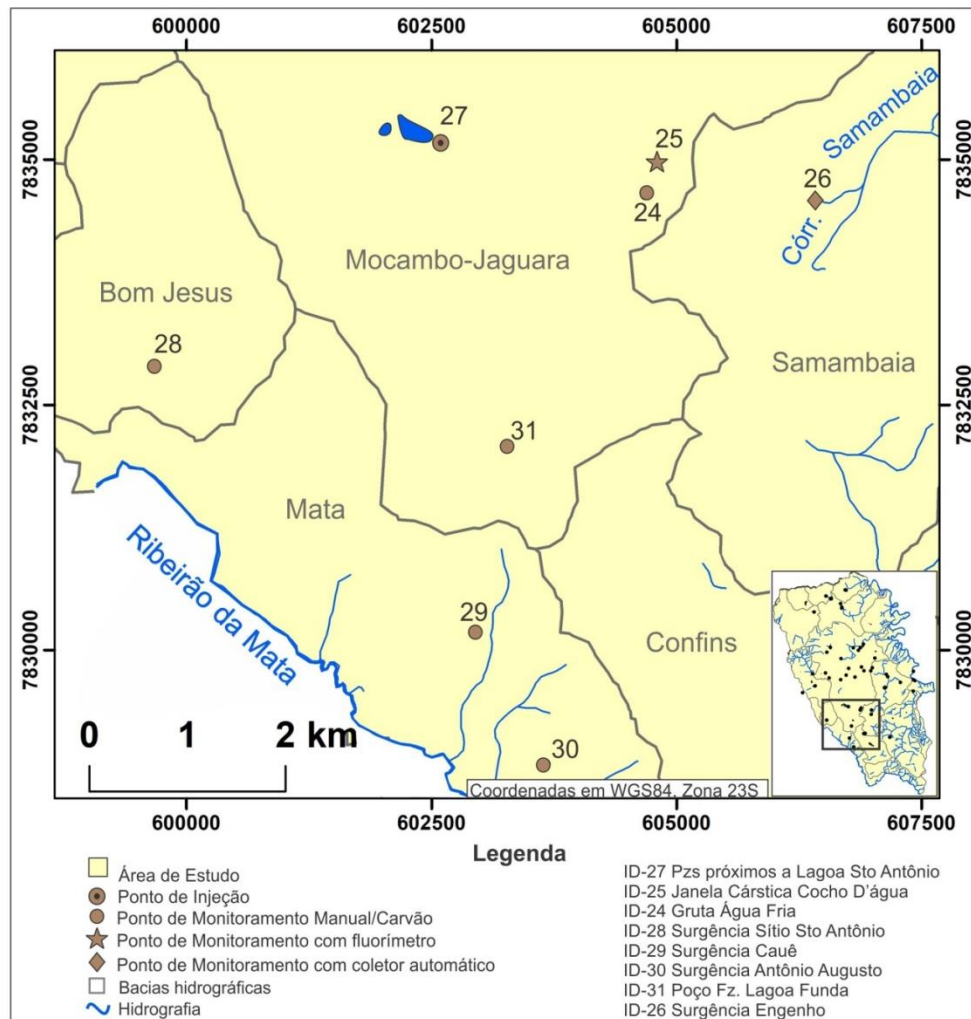


Figura 28 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 4.

#### *Avaliação do Background*

Os resultados da avaliação do *background*, com amostras coletadas em 07/05/2018, exibem, no geral, valores baixos de intensidade de fluorescência nos pontos monitorados (APÊNDICE F). No entanto, para as amostras de água, duas curvas apresentaram picos de intensidade de fluorescência isolados nos comprimentos de onda de 460 nm (Surgência Sítio Santo Antônio ID-28) e 495 nm (Poço Fazenda Lagoa Funda ID-31), mas que não possuem indícios de traçadores utilizados neste estudo.

#### *Análises qualitativas e quantitativas*

Após a injeção foram realizadas três campanhas, nos dias 09, 11 e 21/05/2018, para coleta manual de água e carvão em todos os pontos monitorados. Um coletor automático foi

instalado na Surgência Engenho (ID-26), de modo que as coletas de água começaram às 13h00 do dia 08/05/18, e terminaram no dia 11/05/18 às 11h00, com medições a cada hora nas primeiras 24 horas e após esse período a cada duas horas. Um fluorímetro de campo foi instalado no ponto de monitoramento Janela Cárstica Cocho D'água (ID-25). A sua instalação ocorreu no dia 08/05/18 e o monitoramento ocorreu até o dia 11/05/18, com medições de concentração realizadas a cada 10 minutos.

Os resultados obtidos, principalmente das amostras de carvão, são similares à análise de background, e não evidenciam curvas características de detecção da Fluoresceína, conforme mostrado na Tabela 9 e APÊNDICE F.

Tabela 9 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 4.

ID	Ponto de Injeção/Monitoramento	Distância do ponto de injeção (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Resultado da avaliação qualitativa
<b>27</b>	<b>PZs próximos a Lagoa Sto Antônio</b>	n.a.	n.a.	n.a.
25	Janela cárstica Cocho D'água	2210	0,1	(-)
24	Gruta Água Fria	2190	----	(-)
28	Surgência Sítio Sto Antônio	3850	----	(-)
29	Surgência Cauê	5020	----	(-)
30	Surgência Antônio Augusto	6420	----	(-)
31	Poço Fz. Lagoa Funda	3180	----	(-)
26	Surgência Engenho	3850	0,164	(-)

Legenda: Em **negrito** pontos de injeção; (+) resultado positivo; (-) resultado negativo; (n.a) não se aplica. (----) não medido.

### Discussões

Segundo informações dos moradores locais, a Lagoa do Santo Antônio apresentava um sumidouro em sua borda sudeste, junto a um paredão de calcário, que foi posteriormente aterrado para manutenção do nível da lagoa. Considerando-se a orientação dos paleodutos da região, bem como do acamamento e proximidade, esperava-se que tal sumidouro se conectasse com as surgências posicionadas a leste (Janela Cárstica Cocho d'Água, Gruta da água Fria e Surgência do Engenho).

A estratégia da injeção de traçadores nos piezômetros posicionados nas imediações da Lagoa do Santo Antônio seria interceptar o fluxo preteramente alimentado pela lagoa do Santo Antônio. No entanto, a partir dos resultados negativos obtidos, três hipóteses podem ser consideradas: 1) nenhum conduto ativo foi interceptado e o traçador não entrou no sistema, mesmo injetando-se água; 2) os piezômetros interceptam condutos ativos, mas que não se

conectam com os pontos monitorados; 3) o tempo de residência do aquífero para as rotas avaliadas é maior que o tempo monitorado.

### 5.1.5 Ensaio 5 – Injeção na Gruta do Morro Redondo

O Ensaio 5 consistiu na injeção de 800 g de Rodamina WT na Gruta do Morro Redondo (ID-32) às 12h10min do dia 26/06/2018. A Gruta Morro Redondo é uma cavidade com desnível vertical de aproximadamente 75 metros, e no fundo há um rio subterrâneo onde o traçador foi aplicado. Para acessar o local foi necessário utilizar técnicas verticais. Foram monitorados 16 pontos, envolvendo surgências, lagoas, piezômetros na região de Mocambo, com destaque para as surgências Mocambo (ID-21) e Jaguará (ID-18), onde se realizaram monitoramento quantitativo (Tabela 3 e Figura 29).

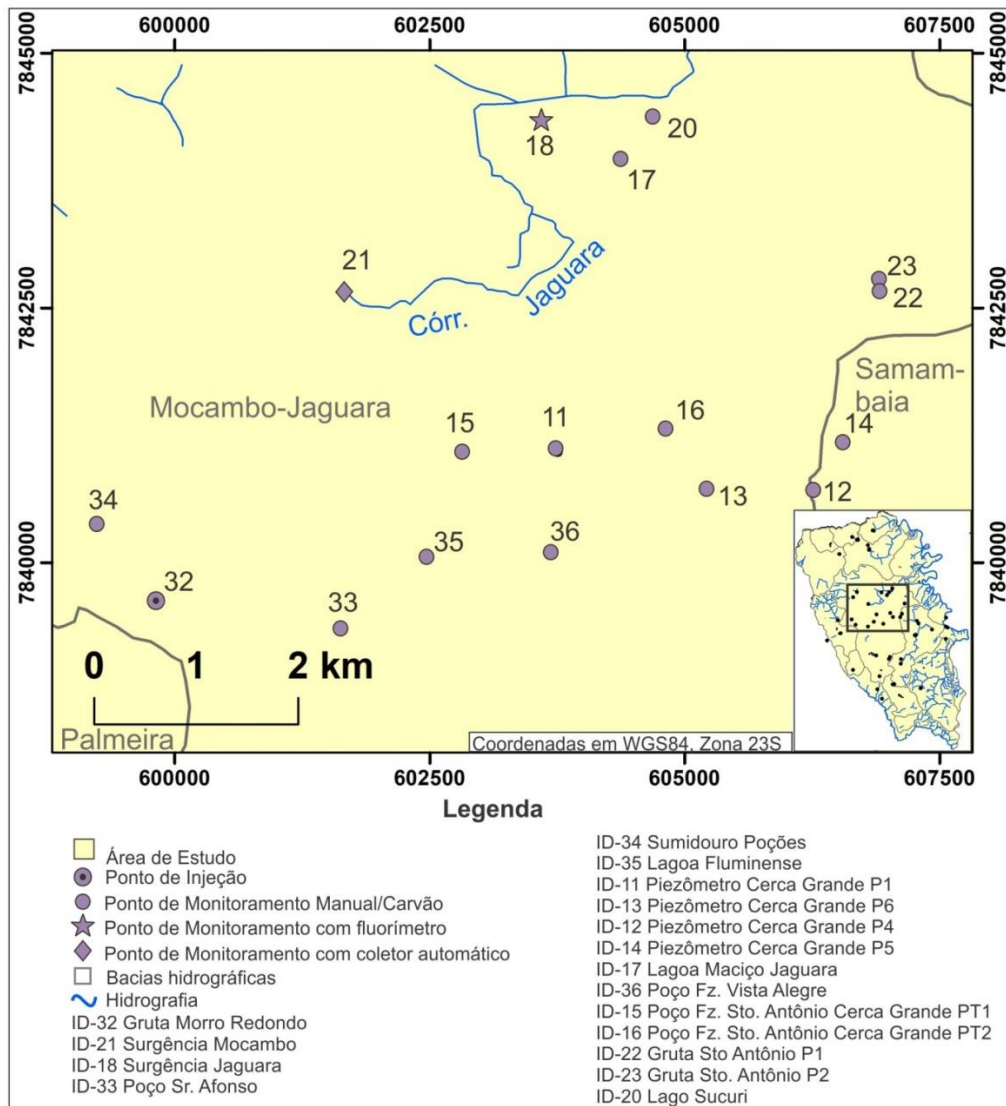


Figura 29 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 5.



### *Avaliação do Background*

Os resultados das avaliações de *background*, com amostras coletadas em 06/08/2018, exibem valores baixos de intensidade de fluorescência, com exceção das amostras do Piezômetro Cerca Grande P4, que apresentaram maior intensidade de fluorescência em relação às demais e, por esse motivo, foram avaliadas separadamente, conforme apresentado no APÊNDICE G.

### *Análises qualitativas*

Após a injeção foram realizadas três campanhas, nos dias 27/06/2018, 29/06/2018 e 03/07/2018, para coleta manual de água e carvão nos pontos monitorados. Resultados positivos foram obtidos na Surgência Mocambo (ID-21) e em Poções (ID-34), evidenciando as conexões hídricas Gruta do Morro Redondo – Surgência Mocambo, Gruta Morro Redondo – Poções, conforme apresentado na Tabela 10 e no APÊNDICE G.

Tabela 10 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 5.

ID	Ponto de Injeção/Monitoramento	Distância do ponto de injeção (m)	Vazão (m³/s)	Resultado da avaliação qualitativa para Rodamina WT
<b>32</b>	<b>Gruta Morro Redondo</b>	n.a.	----	(-)
21	Surgência Mocambo	3546	0,731	(+)
18	Surgência Jaguará	6030	----	(-)
33	Poço Sr. Afonso	1830	----	(-)
34	Sumidouro Poções	960	----	(+)
35	Lagoa Fluminense	2690	----	(-)
11	Piezômetro Cerca Grande P1	4000	----	(-)
13	Piezômetro Cerca Grande P6	5510	----	(-)
12	Piezômetro Cerca Grande P4	6550	----	(-)
14	Piezômetro Cerca Grande P5	6890	----	(-)
17	Lagoa Maciço Jaguará	6280	----	(-)
36	Poço Fz. Vista Alegre	2470	----	(-)
15	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	3340	----	(-)
16	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	5270	----	(-)
22	Gruta Sto Antônio P1	7720	----	(-)
23	Gruta Sto Antônio P2	7720	----	(-)
20	Lago Sucuri	6790	----	(-)

Legenda: Em **negrito** ponto de injeção; (+) resultado positivo; (-) resultado negativo; (n.a) não se aplica. (----) não medido.

### Análises quantitativas

Um coletor automático foi instalado na Surgência Mocambo (entre os dias 26/06/2018 e 01/07/2018, com medições a cada hora) e um fluorímetro na Surgência Jaguará (entre os dias 25/06/2018 a 03/07/2018, com medições a cada 10 minutos). As curvas de passagem e recuperação para a conexão Gruta Morro Redondo – Surgência Mocambo e a evidência da ausência de conexão entre Morro Redondo e a surgência Jaguará são apresentadas no APÊNDICE G. A Figura 30 apresenta os resultados das avaliações quantitativas da conexão Gruta Morro Redondo – Surgência Mocambo.

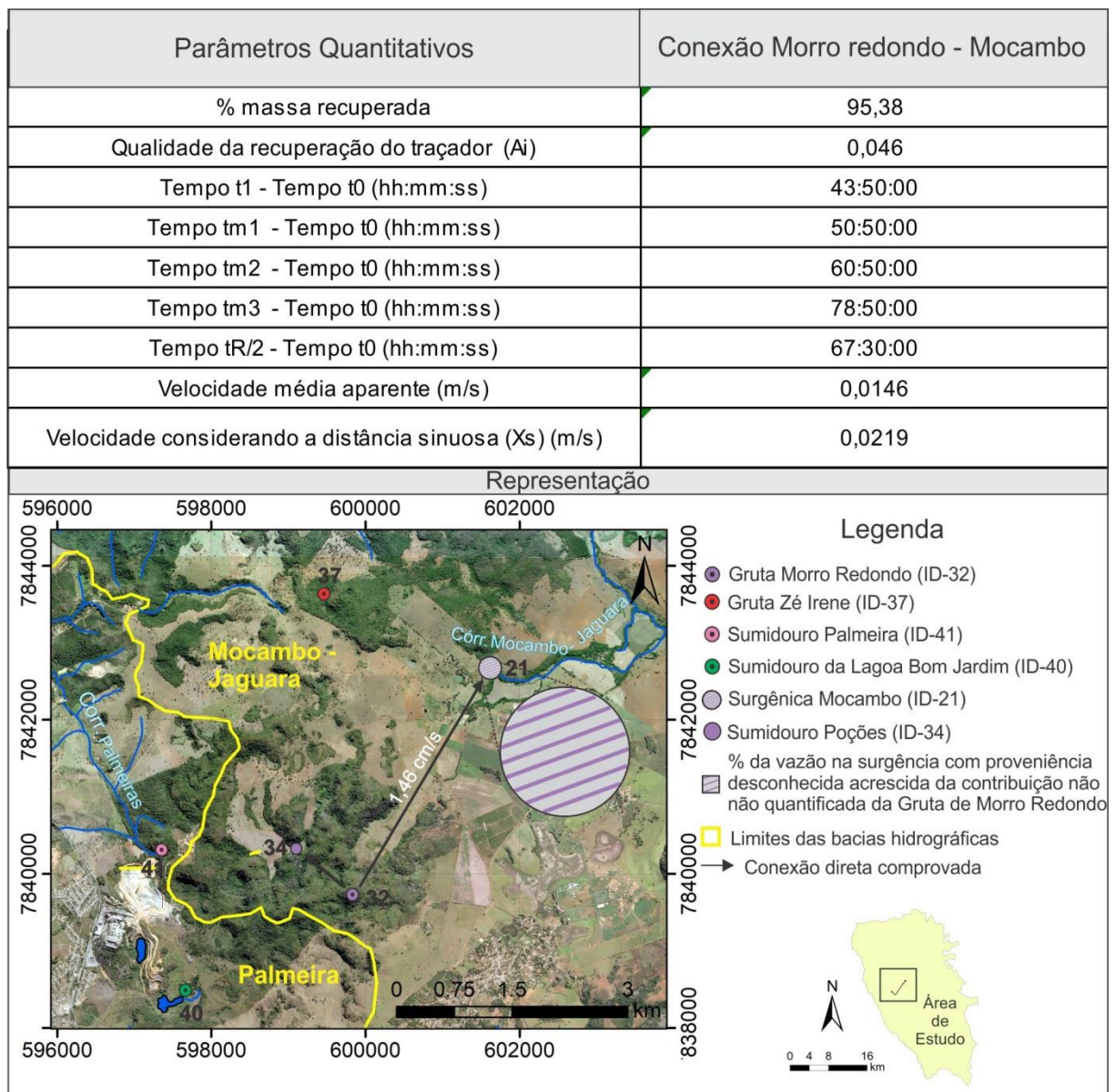


Figura 30 - Resultados das avaliações quantitativas para a conexão hidráulica Gruta Morro Redondo (ID-32) – Surgência Mocambo (ID-21).

Ressalta-se que não foi possível avaliar o volume do aquífero, a área da seção transversal e o diâmetro do conduto para a rota Morro Redondo – Surgência Mocambo, nem a

contribuição da vazão na Surgência Mocambo, uma vez que, por questões logísticas, não se mediu a vazão na Gruta do Morro Redondo.

### *Discussões*

Foi comprovada a conexão Morro Redondo – Mocambo, testada anteriormente por Auler (1994), mas com resultado negativo. A ocorrência dos múltiplos picos de concentração na curva de passagem (APÊNDICE G) pode estar tanto associada às bifurcações nos condutos, quanto à retenção do corante em algum trecho do percurso. A Figura 31 apresenta uma representação esquemática considerando a primeira hipótese, sendo os condutos classificados como do Tipo II e VII (vide Figura 20).

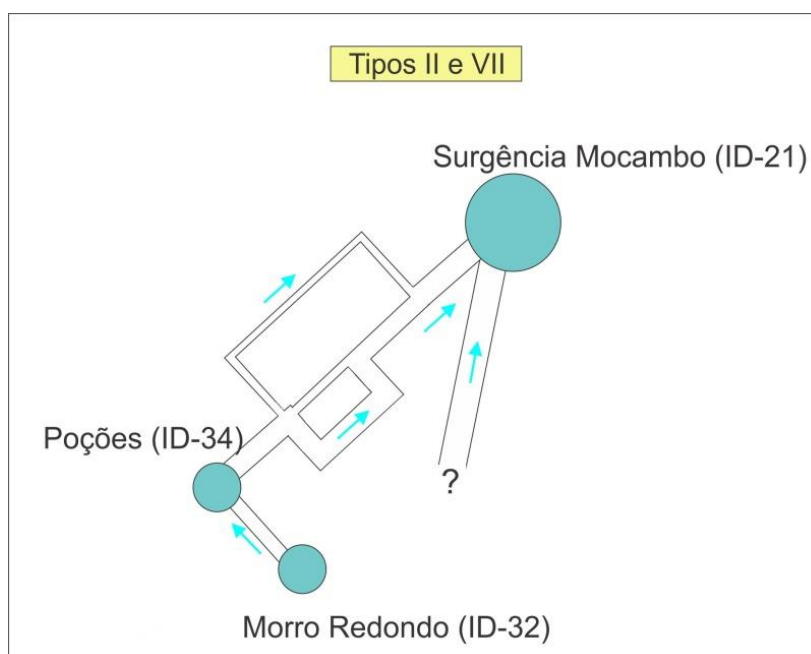


Figura 31 – Representação esquemática das conexões Morro Redondo – Poções e Poções - Mocambo.

### **5.1.6 Ensaio 6 – Injeção na Gruta Zé Irene**

O Ensaio 6 consistiu na injeção de 600 g de Rodamina WT na Gruta Zé Irene (ID-37) às 11h00 do dia 15/05/2018. A gruta está localizada no município de Matozinhos e se caracteriza por uma janela cárstica por onde a água surge e, após alguma dezena de metros, infiltra novamente. Foram monitorados doze pontos, envolvendo surgências, piezômetros, poços de bombeamento, com destaque para as surgências Mocambo (ID-21), Jaguará (ID-18) e Gordura (ID-38), por deterem alta vazão, conforme apresentado na Tabela 3 e Figura 32.

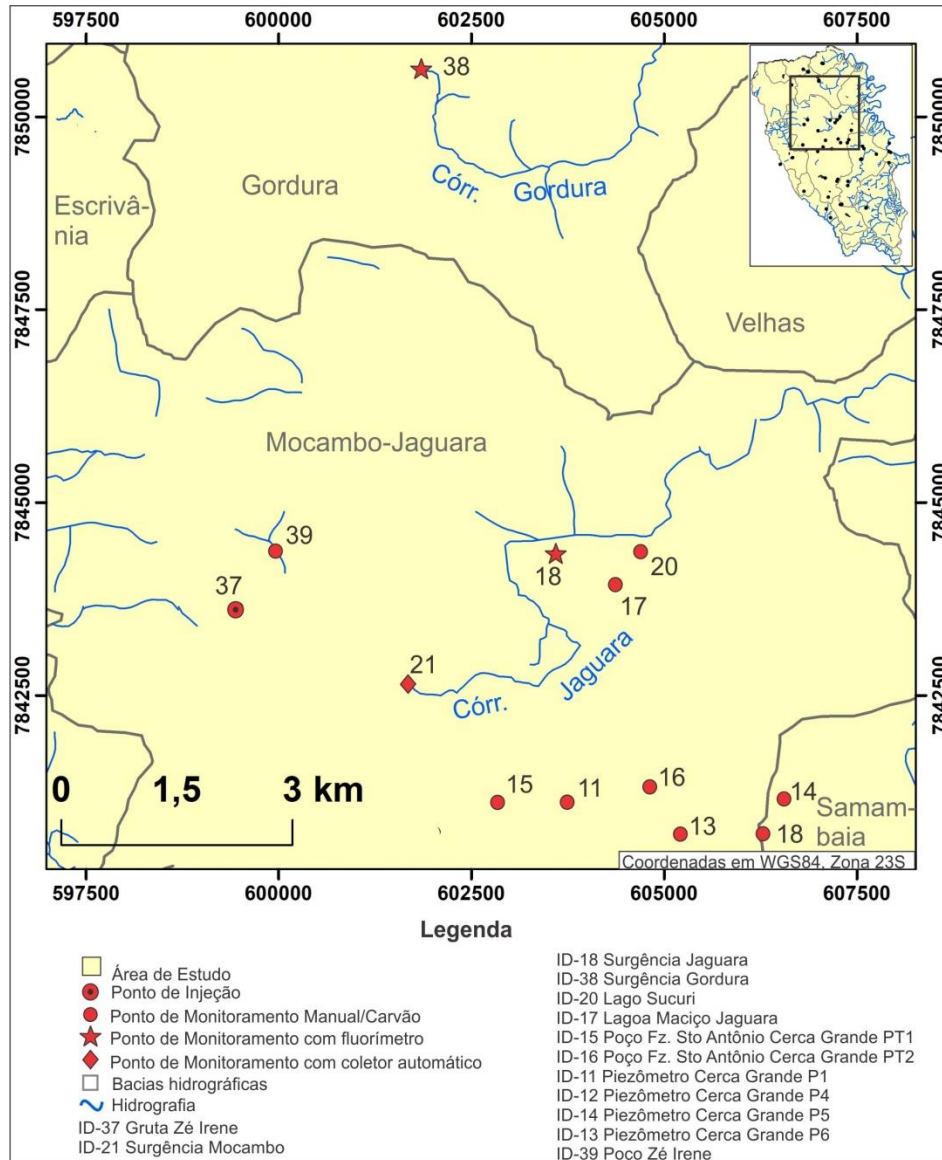


Figura 32 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento do Ensaio 6.

### *Avaliação do Background*

Os resultados das avaliações de *background*, com amostras coletadas em 14 e 15/05/2018, exibem valores baixos de intensidade de fluorescência, não indicando a presença de nenhum traçador utilizado nesse projeto, tanto para água quanto carvão, conforme pode ser observado no APÊNDICE H.

### *Análises qualitativas*

Após a injeção foram realizadas duas campanhas, nos dias 16 e 18/05/2018, para coleta manual de água e carvão nos pontos monitorados. Resultados positivos foram obtidos somente na Surgência Mocambo (ID-21), na amostra de carvão ativado de 16/05/2018,

evidenciando a conexão hidráulica Gruta Zé Irene – Surgência Mocambo, conforme apresentado na Tabela 11 e no APÊNDICE H.

Tabela 11 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 6.

ID	Ponto de Injeção/Monitoramento	Distância do ponto de injeção (m)	Vazões (m <sup>3</sup> /s)	Resultado da avaliação qualitativa para Rodamina WT
<b>37</b>	<b>Gruta Zé Irene</b>	n.a.	0,128	n.a.
21	Surgência Mocambo	2413	0,8216	(+)
18	Surgência Jaguará	4230	0,963	(-)
38	Surgência Gordura	7280	1119	(-)
20	Lago Sucuri	5310	----	(-)
17	Lagoa Maciço Jaguará	4970	----	(-)
15	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	4220	----	(-)
16	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	5860	----	(-)
11	Piezômetro Cerca Grande P1	5870	----	(-)
12	Piezômetro Cerca Grande P4	7440	----	(-)
14	Piezômetro Cerca Grande P5	7510	----	(-)
13	Piezômetro Cerca Grande P6	6470	----	(-)
39	Poço Zé Irene	950	----	(-)

Legenda: Em **negrito** ponto de injeção; (+) resultado positivo; (-) resultado negativo; (n.a) não se aplica. (----) não medido.

### *Análises quantitativas*

Um coletor automático foi instalado na Surgência Mocambo (entre os dias 15/05/2018 e 18/05/2018, com medições a cada hora) e fluorímetros nas surgências Jaguará (entre os dias 14/05/2018 a 18/05/2018, com medições a cada 10 minutos) e Gordura (entre os dias 15/05/2018 a 18/05/2018, com medições a cada 10 minutos). As curvas de passagem e recuperação para a conexão Gruta Zé Irene – Surgência Mocambo e a ausência de conexão hidráulica entre a Gruta Zé Irene e as surgências Jaguará e Gordura são apresentadas no APÊNDICE H. Os resultados das avaliações quantitativas da conexão Zé Irene - Mocambo são apresentados na Figura 33 e as vazões medidas para tal avaliação na Tabela 11.

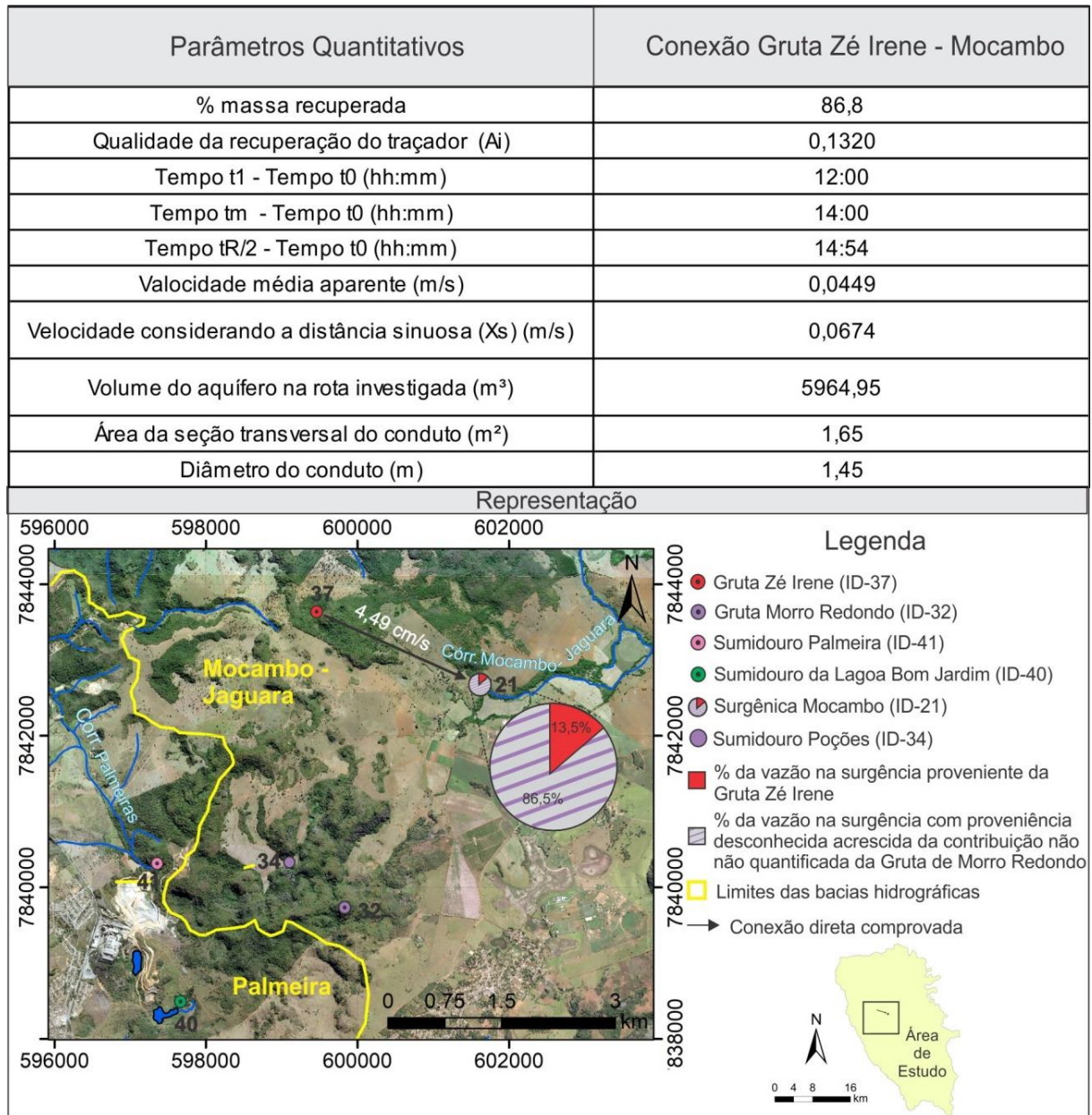


Figura 33 - Resultados das avaliações quantitativas para a conexão hidráulica Gruta Morro Redondo (ID-32) – Surgência Mocambo (ID-21).

A Gruta Zé Irene contribuiu com 13,5% (Figura 33) da vazão na Surgência do Mocambo.

### Discussão

A curva observada para a conexão Zé Irene – Mocambo caracteriza-se por um pico único de concentração (A), sendo o conduto classificado como do Tipo II, conforme representado esquematicamente na Figura 34. A partir dos cálculos realizados o diâmetro médio do conduto e o volume do aquífero para a rota investigada foram 1,45 m e 5964,95 m<sup>3</sup>, respectivamente.

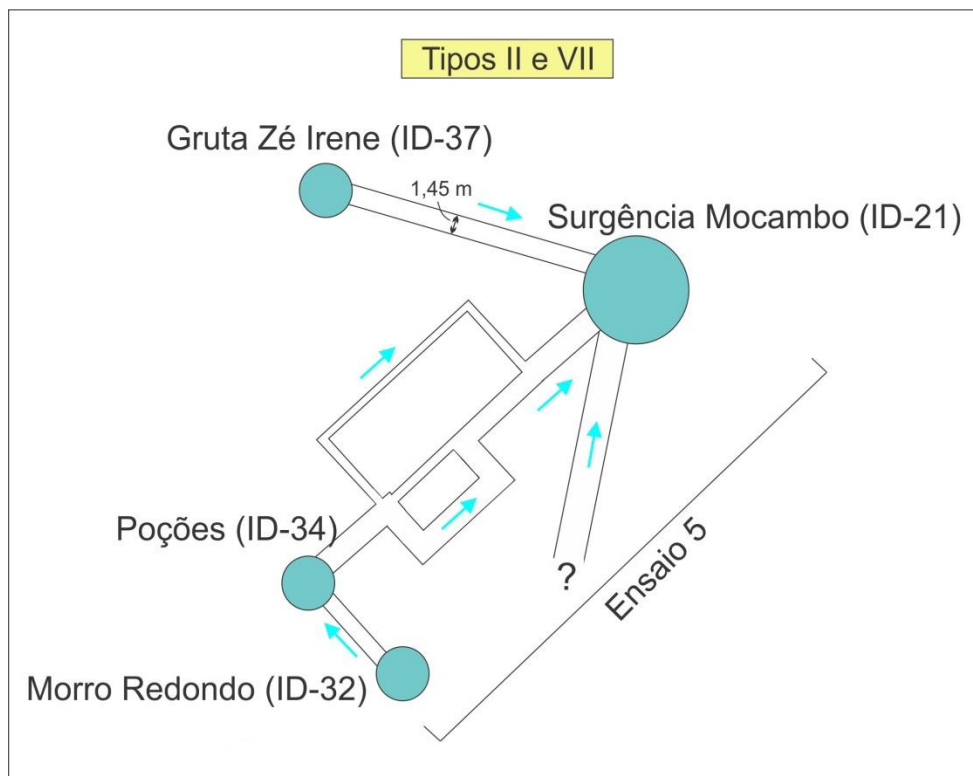


Figura 34 - Representação esquemática das conexões Zé Irene – Mocambo, Morro Redondo – Poções – Mocambo (Ensaio 5).

### 5.1.7 Ensaios 7 e 8 – Injeção no Sumidouro Palmeira e Lagoa do Bom Jardim

Os ensaios 7 e 8 correspondem às injeções no Sumidouro Palmeiras e Lagoa do Bom Jardim, respectivamente. Tais ensaios foram realizados em duas épocas distintas: o primeiro em março de 2018 e o segundo em junho de 2018. A repetição dos ensaios foi necessária em razão de fortes chuvas ocorridas durante o primeiro teste (Figura 9), que interferiram no estudo quantitativo. Desta forma, serão apresentados aqui os resultados de ambas as injeções.

Em 02/03/2018, às 16h10min, foram injetados 1200 g de Rodamina WT na Lagoa Bom Jardim (ID-40) e às 16h50min 2000 g de Fluoresceína no Sumidouro Palmeira (ID-41). Na repetição dos ensaios, em 04/06/2018, às 14h10min, foram injetados 600 g de Rodamina WT na Lagoa Bom Jardim (ID-40) e às 15h00min, 1600 g de Fluoresceína no Sumidouro Palmeira (ID-41). Foram selecionados dezessete pontos, em ambos os ensaios, para monitoramento, envolvendo surgências, lagoas, poços e piezômetros, com destaque para as surgências Mocambo (ID-21) e Jaguará (ID-18), nas quais se realizaram o monitoramento quantitativo (Tabela 12 e Figura 35).

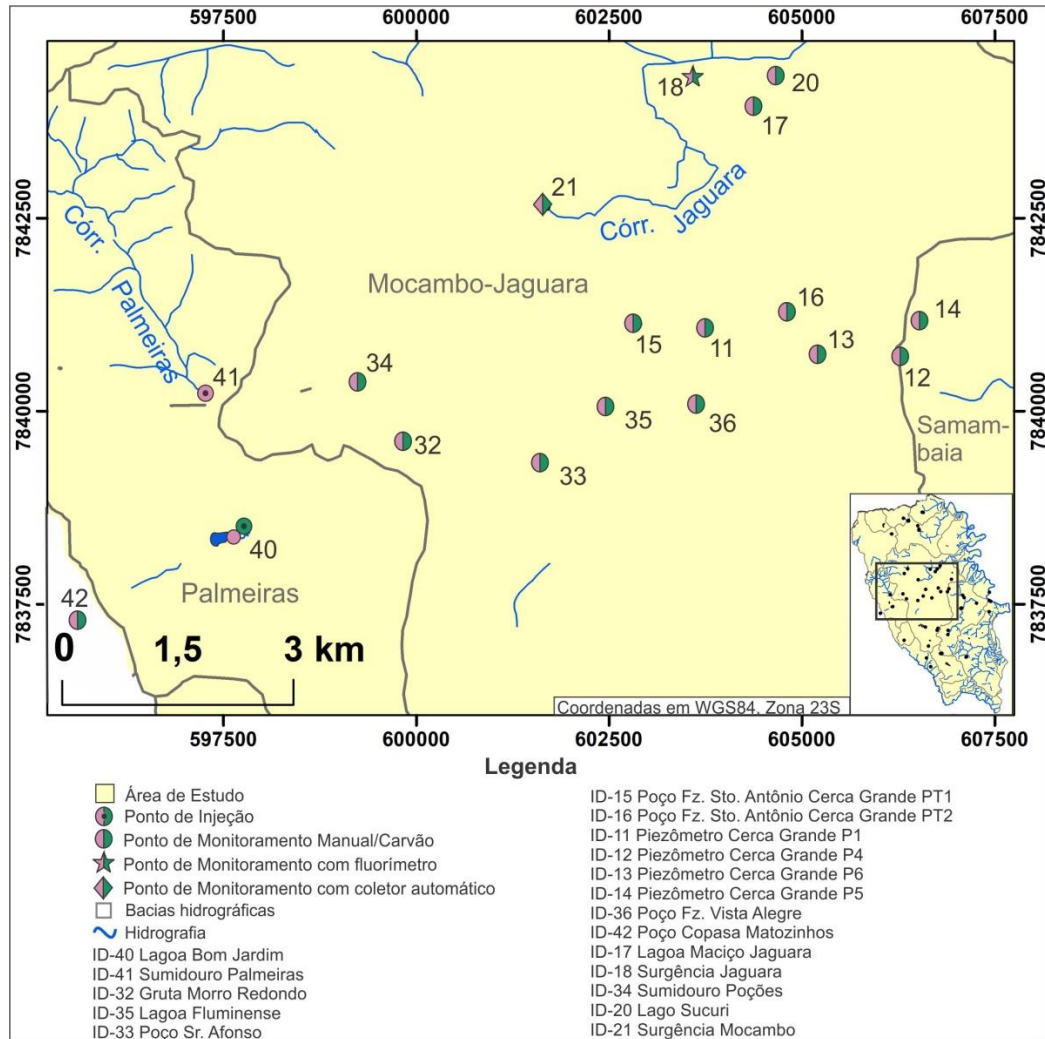


Figura 35 - Localização dos pontos de injeção e de monitoramento dos Ensaios 7 e 8.

### *Avaliação do Background*

Os resultados das avaliações de *background*, com amostras coletadas em 01 e 02/03/2018, para os primeiros ensaios e em 04/06/2018 para a repetição, exibem valores baixos de intensidade de fluorescência, com exceção das amostras do Piezômetro Cerca Grande P4, que apresentou maior intensidade de fluorescência em relação às demais para ambos os ensaios, assim como observado no Ensaio 5, e por esse motivo, foi avaliada separadamente (APÊNDICE I).

### *Análises qualitativas*

Após as primeiras injeções, referentes a março de 2018, foram realizadas três campanhas para coleta de água e carvão nos pontos monitorados, nos dias 05/03/2018, 07/03/2018 e 03/04/2018. Resultados positivos foram obtidos na Surgência Mocambo (ID-21), Surgência Jaguara (ID-18), Lago Sucuri (ID-20) e Poções (ID-34), tanto para



Fluoresceína, quanto Rodamina WT, evidenciando as conexões hidráulicas Palmeira – Mocambo, Palmeira – Jaguará, Palmeira – Sucuri e Palmeira – Poções, assim como Bom Jardim – Mocambo, Bom Jardim – Jaguará, Bom Jardim – Sucuri e Bom Jardim – Poções, conforme apresentado na Tabela 12 e no APÊNDICE I.

Na repetição dos ensaios, em junho de 2018, foram realizadas três campanhas para coleta de água e carvão nos pontos monitorados. Contudo, diferentemente do que observado nas primeiras injeções, resultados positivos foram obtidos somente na Surgência Mocambo (ID-21), tanto para Fluoresceína, quanto Rodamina WT, evidenciando as conexões hidráulicas Palmeira – Mocambo e Bom Jardim – Mocambo, conforme apresentado na Tabela 12 e no APÊNDICE I. Ressalta-se que o Sumidouro Poções (ID-34) não foi monitorado na repetição dos ensaios.

#### *Análises quantitativas*

Tendo em vista as fortes chuvas que ocorreram durante os primeiros ensaios realizados em março de 2018 e que prejudicaram as análises quantitativas, nesse tópico só serão apresentados os resultados dos testes realizados em junho de 2018.

Um coletor automático foi instalado na Surgência Mocambo (entre os dias 04/06/2018 e 11/06/2018, com medições a cada hora) e um fluorímetro na Surgência Jaguará (entre os dias 04/06/2018 a 11/06/2018, com medições a cada 10 minutos). As curvas de passagem e recuperação para a conexão Sumidouro Palmeiras – Surgência Mocambo e Lagoa Bom Jardim – Surgência Mocambo são apresentadas no APÊNDICE I. Os resultados das avaliações quantitativas dessas conexões são apresentados na Figura 36 e as vazões medidas para tal avaliação na Tabela 12. A evidência da ausência de conexão hidráulica entre o Sumidouro Palmeiras e a Lagoa Bom Jardim com a Surgência Jaguará na repetição dos ensaios 7 e 8 é apresentada no APÊNDICE I.

Tabela 12 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente nos Ensaios 7 e 8.

ID	Ponto de Injeção/Monitoramento	Distância do ponto de injeção Palmeira - (m)	Distância do ponto de injeção Bom Jardim(m)	Vazão medida em mar/2018 (m³/s)	Vazão medida em jun/2018 (m³/s)	Resultado da avaliação qualitativa para Fluoresceína em mar/2018	Resultado da avaliação qualitativa para Rodamina WT em mar/2018	Resultado da avaliação qualitativa para Fluoresceína em jun/2018	Resultado da avaliação qualitativa para Rodamina WT em jun/2018
40	<b>Lagoa Bom Jardim</b>	1760	n.a.	----	0,192*	(-)	(-)	(-)	(-)
41	<b>Sumidouro Palmeiras</b>	n.a.	1760	----	0,011**	n.a.	n.a.	n.a	n.a
32	Gruta Morro Redondo	2600	2340	----	----	(-)	(-)	(-)	(-)
35	Lagoa Fluminense	5190	4950	----	----	(-)	(-)	(-)	(-)
33	Poço Sr. Afonso	4430	3950	----	----	(-)	(-)	(-)	(-)
15	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	5600	5670	----	----	(+)***	(+)***	(-)	(-)
16	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	7610	7580	----	----	(-)	(-)	(-)	(-)
11	Piezômetro Cerca Grande P1	6560	6160	----	----	(-)	(-)	(-)	(-)
12	Piezômetro Cerca Grande P4	9000	8780	----	----	(-)	(-)	(-)	(-)
14	Piezômetro Cerca Grande P5	9300	9160	----	----	(-)	(-)	(-)	(-)
13	Piezômetro Cerca Grande P6	7950	7770	----	----	(-)	(-)	(-)	(-)
36	Poço Fz. Vista Alegre	4780	4810	----	----	(-)	(-)	(-)	(-)
42	Poço Copasa Matozinhos	3350	2470	----	----	(-)	(-)	(-)	(-)
21	Surgência Mocambo	5032	5705	0,568	0,731	(+)	(+)	(+)	(+)
34	Sumidouro Poções	1930	2360	0,383	----	(+)	(+)	----	----
18	Surgência Jaguará	7540	8240	----	----	(+)***	(+)***	(-)	(-)
17	Lagoa Maciço Jaguará	8030	8560	----	----	(-)	(-)	(-)	(-)
20	Lago Sucuri	8490	9060	----	----	(+)***	(+)***	(-)	(-)

Legenda: Em **negrito** ponto de injeção; (+) resultado positivo; (-) resultado negativo; (n.a) não se aplica. (----) não medido.

\* Dados de Pessoa e Mourão (1998). Para o ensaio quantitativo, foi possível empregar tal vazão considerando que as maiores vazões de nascentes do carste na região não tiveram grandes variações ao longo do tempo de acordo com Paula (2019). \*\* Vazão medida em 04/06/2018. \*\*\* Indícios de conexão.

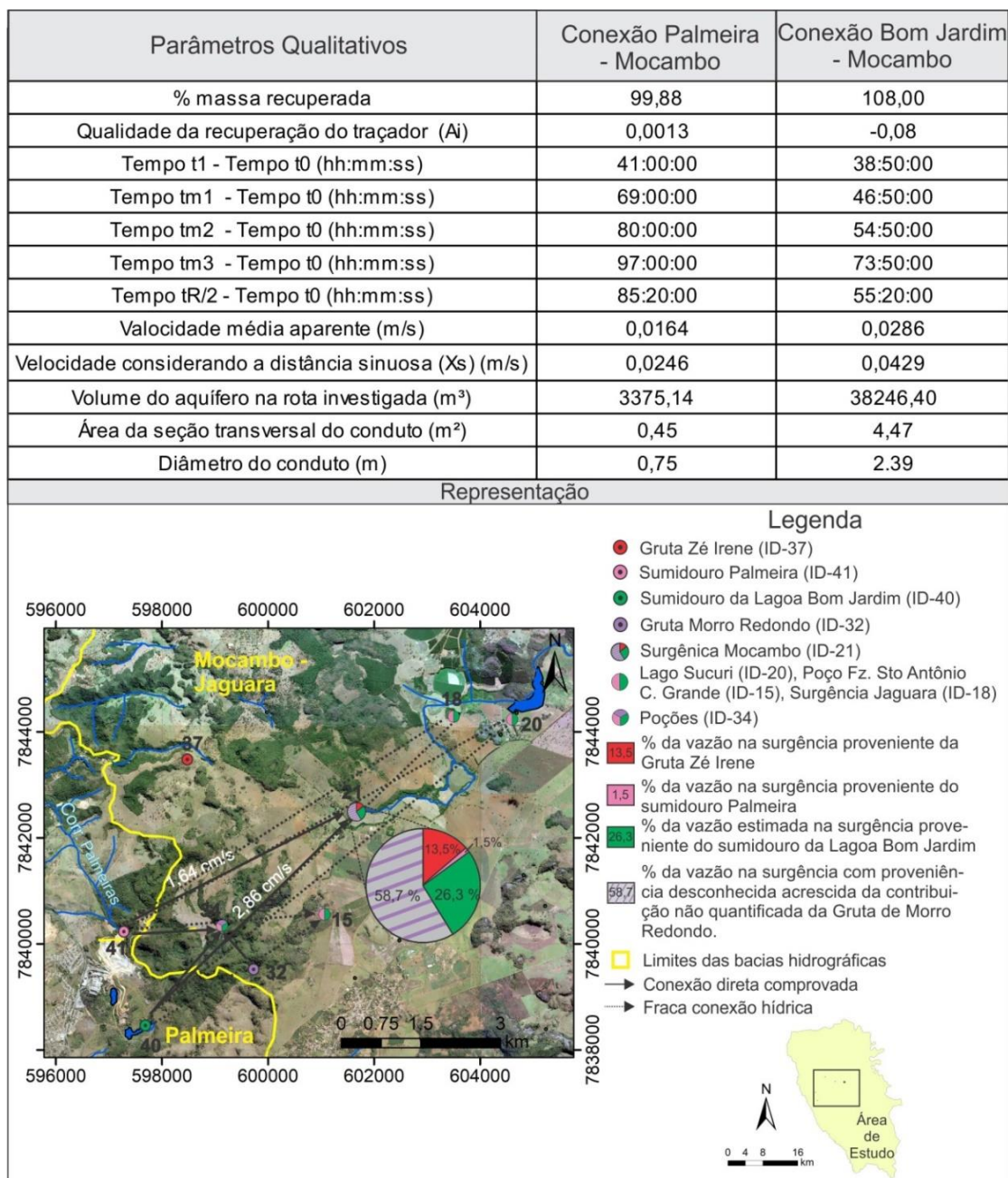


Figura 36 - Resultados das avaliações quantitativas para as conexões hidráulicas Palmeira (ID-41) – Mocambo (ID-21) e Lagoa Bom Jardim (ID-40) – Mocambo e representação em mapa das interconexões hidráulicas. Nota: Ressalta-se que as conexões entre Palmeiras (ID-41)/Lagoa Bom Jardim (ID-40) e os pontos ID-15, ID-18 e ID-20 foram obtidas somente nos ensaios 7/8 realizados em março/2018.

O Sumidouro Palmeira e a Lagoa do Bom Jardim contribuíram com 1,5% e com 26,3% da vazão na Surgência do Mocambo, respectivamente.

### Discussão

Por meio dos ensaios 7 e 8 evidenciou-se a conexão, já anunciada por Auler (1994), entre as sub-bacias Palmeira e Mocambo/Jaguara através das interconexões

hidráulicas do Sumidouro Palmeira e do Sumidouro da Lagoa Bom Jardim, ambos pertencentes à bacia Palmeira, com a Surgência Mocambo, Poções (janela cárstica: surgência e sumidouro), Poço Fazenda Sto. Antônio PT1, Lago Sucuri e a Surgência Jaguará, pertencentes à Bacia Mocambo/Jaguará (Figura 36).

Os resultados dos ensaios realizados nos períodos seco e chuvoso evidenciam a alteração dos limites horizontais e a drenança vertical da bacia hidrogeológica Palmeiras-Jaguará ao longo das estações, de modo que as conexões dos sumidouros Palmeira e Bom Jardim com o Poço Fazenda Sto. Antônio (PT1), o Lago Sucuri e a Surgência Jaguará só foram observadas no ensaio realizado no período chuvoso. Nesse caso, a elevação do nível d'água provoca a reativação de condutos, que se apresentam secos durante o período de estiagem, aumentando assim a área de circulação hídrica subterrânea e também a recarga da porção inferior do aquífero.

As curvas de passagem para as conexões Palmeira – Mocambo e Bom Jardim – Mocambo são caracterizadas por três picos de concentração (APÊNDICE I), assim como observado para a conexão Morro Redondo - Mocambo (APÊNDICE G). Essas curvas são bastante similares, indicando que provavelmente os fluxos percorreram, pelo menos em parte, os mesmos condutos. A ocorrência dos múltiplos picos pode estar tanto associada às bifurcações nos condutos, quanto à retenção do corante em algum trecho do percurso. A Figura 37 apresenta uma representação esquemática, considerando a hipótese da existência de bifurcações nos condutos, sendo esses classificados como do Tipo II e VII (vide Figura 20) e também incluindo as conexões Morro – Redondo Mocambo e Zé Irene – Mocambo, obtidas nos ensaios 5 e 6, respectivamente. Para a conexão Palmeira – Mocambo o diâmetro médio estimado para o conduto foi de 0,75 m e o volume do aquífero para a rota de 2.275,14 m<sup>3</sup>. Para a conexão Bom Jardim – Mocambo o diâmetro médio estimado para o conduto foi de 2,39 m e o volume do aquífero para a rota de 38.246,4 m<sup>3</sup>.

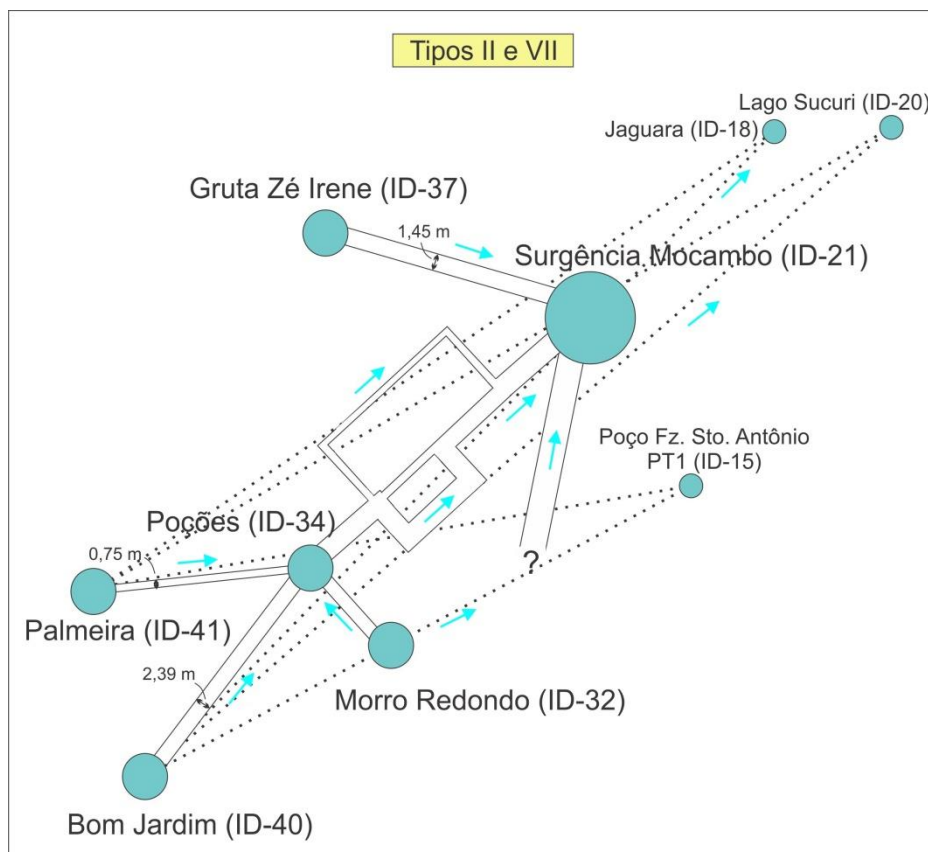


Figura 37 - Representação esquemática das conexões obtidas na Bacia Palmeiras-Jaguara através dos ensaios 7, 8, 5 e 6, com indicação dos diâmetros médios dos condutos. As linhas pontilhadas representam as pequenas contribuições.

### 5.1.8 Ensaio 9 – Injeção nos sumidouros Goiabeiras e Bebidas

Consistiu na injeção de 600 g de Rodamina WT no Sumidouro Bebidas (ID-44) e 2400 g de Fluoresceína no Sumidouro Goiabeiras (ID-43), às 13h46min e 16h55min do dia 16/01/2018, respectivamente. Foram monitorados nove pontos, envolvendo surgências, córregos e dolina, com destaque para as surgências Gordura (ID-38) e Gruta da Lagoa (ID-45), onde se realizaram os monitoramentos quantitativos, conforme apresentado na Tabela 3 e Figura 38. Apesar de o ensaio ter sido realizado durante o período chuvoso, as interferências das chuvas foram baixas, conforme demonstrado na Figura 9, e por esse motivo não houve necessidade de repeti-lo.

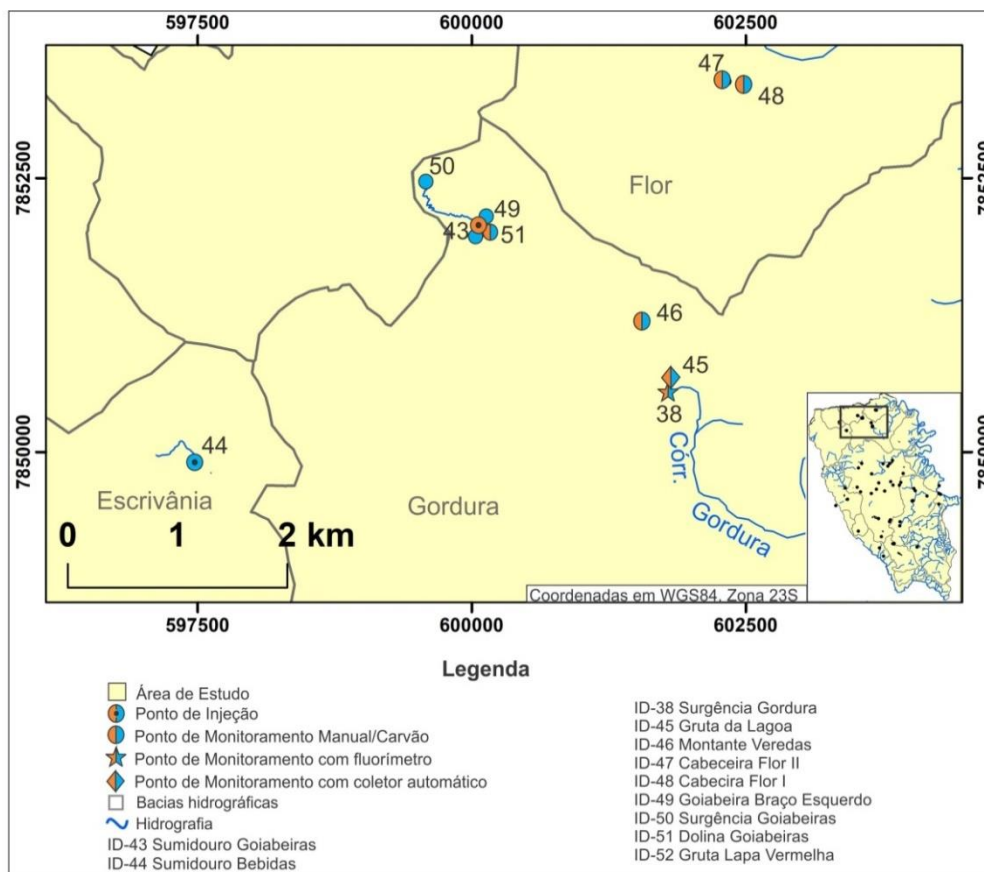


Figura 38 - Localização dos pontos de injeção e monitoramento do Ensaio 9.

### *Avaliação do Background*

Os resultados das avaliações de *background*, com amostras coletadas em 16/01/2018, exibem valores baixos de intensidade de fluorescência, não indicando a presença de nenhum traçador utilizado nesse projeto, tanto para água quanto carvão, conforme apresentado no APÊNDICE J.

### *Análises qualitativas*

Após a injeção foram realizadas três campanhas para coleta de água, nos dias 18 e 19/01/2018 e 18/04/2018, e duas campanhas para coleta de carvão, em 19/01/2018 e 18/04/2018 nos pontos monitorados. Resultados positivos para Rodamina WT e Fluoresceína foram obtidos na Surgência Gordura (ID-38) e na Gruta da Lagoa (ID-45) e somente para Fluoresceína na Dolina Goiabeiras (ID-51), evidenciando as conexões hidráulicas Bebida – Gordura, Bebida – Gruta da Lagoa, Goiabeiras – Gordura, Goiabeiras – Dolina Goiabeiras e Goiabeiras – Gruta da Lagoa, conforme apresentado na Tabela 13 e no APÊNDICE J.

Tabela 13 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 9.

ID	Ponto de Injeção/Monitoramento	Distância do ponto de de Bebida (m)	Distância do ponto de Goiabeiras (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Resultado da avaliação qualitativa para Rodamina WT	Resultado da avaliação qualitativa para Fluoresceína
43	<b>Sumidouro Goiabeiras</b>	3300	n.a.	0,283	(-)	n.a.
44	<b>Sumidouro Bebidas</b>	n.a.	3300	0,199	n.a.	(-)
38	Surgência Gordura	4344	2246	0,696	(+)	(+)
45	Gruta da Lagoa	4390	2170	0,001749	(+)	(+)
46	Montante Veredas	4330	1710	----	(-)	(-)
47	Cabeceira do Flor II	6000	2710	----	(-)	(-)
48	Cabeceira do Flor I	6110	2820	----	(-)	(-)
49	Goiabeira Braço Esquerdo	3410	120	----	(-)	(-)
50	Surgência Goiabeiras	3170	850	----	(-)	(-)
51	Dolina Goiabeiras	3440	150	----	(-)	(+)

Legenda: Em **negrito** ponto de injeção; (+) resultado positivo; (-) resultado negativo; (n.a) não se aplica. (----) não medido.

#### *Análises quantitativas*

Um fluorímetro foi instalado na Surgência Gordura (entre os dias 17/01/2018 e 19/01/2018, com medições a cada 10 minutos) e um coletor automático na Gruta da Lagoa (entre os dias 17/01/2018 a 19/01/2018, com medições a cada 1 hora). As curvas de passagem e recuperação para as conexões Bebida – Gordura, Goiabeiras – Gordura Bebida – Gruta da Lagoa e Goiabeiras – Gruta da Lagoa são apresentadas no APÊNDICE J. Os resultados das avaliações quantitativas dessas conexões são apresentados na Figura 39 e as vazões medidas para tal avaliação na Tabela 13. Ressalta-se que não foi possível observar as curvas de passagem completas dos traçadores a partir do monitoramento realizado na Gruta da Lagoa e, por esse motivo, parte das avaliações quantitativas não puderam ser realizadas.

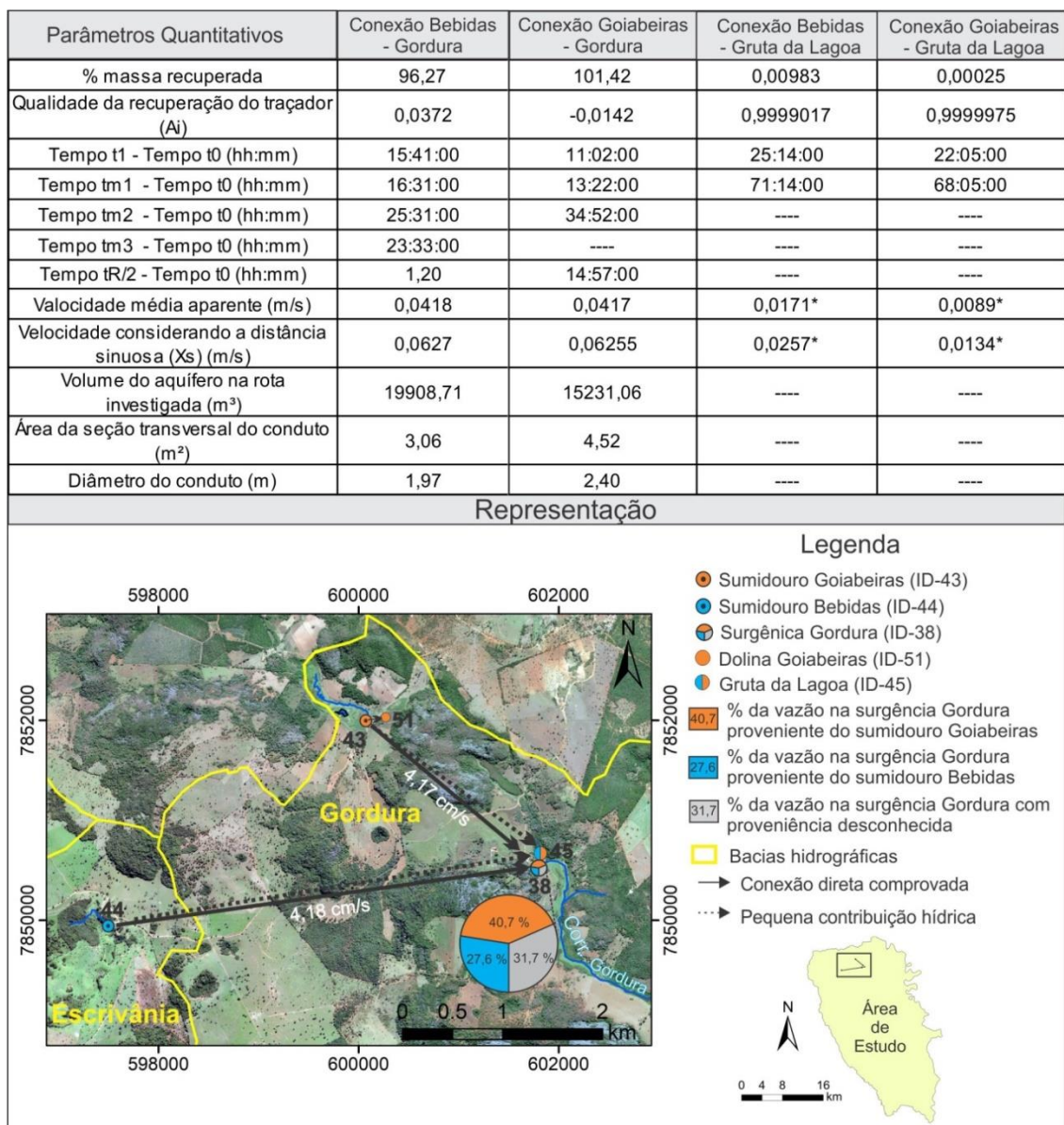


Figura 39 - Resultados das avaliações quantitativas para as conexões hidráulicas Bebidas (ID-44) – Gordura (ID-38), Goiabeiras (ID-43) – Gordura, Bebidas – Gruta da Lagoa (ID-45), Goiabeiras – Gruta da Lagoa e representação em mapa das interconexões hidráulicas. Legenda: \* No cálculo das velocidades considerou-se o tempo final de monitoramento; ---- Parâmetro não calculado.

Ressalta-se que os sumidouros Goiabeiras e Bebida contribuíram com 40,7% e 27,6% da vazão na Surgência Gordura, respectivamente.

### Discussões

Os testes com traçadores realizados no Ensaio 9 evidenciaram conexão subterrâneas entre as sub-bacias Escrivânia e Gordura comprovadas pelas conexões hidráulicas Sumidouro Bebidas (ID-44) – Surgência Gordura (ID-38) e Sumidouro Bebidas (ID-44) - Gruta da Lagoa (ID-45).



Pela análise das curvas de passagem das principais conexões, que são caracterizadas por múltiplos picos de concentração (APÊNDICE J), duas hipóteses podem ser propostas para esse comportamento: (1) a existência de bifurcações nos condutos, onde o fluxo inicial é dividido e a água, a partir desse momento, passa a percorrer caminhos com velocidades distintas. Em certo momento do percurso, a montante do ponto monitorado, os condutos convergem novamente; (2) existência de retenção do corante em algum trecho do percurso, que após algum tempo é remobilizado. A Figura 40 apresenta uma representação esquemática, considerando a hipótese 1, em que os condutos do sistema são classificados como do Tipo II e VII (vide Figura 20). Para a conexão Bebidas – Gordura o diâmetro médio estimado para o conduto foi de 1,97 m e o volume do aquífero para a rota de 19.908,71 m<sup>3</sup>. Para a conexão Goiabeiras – Gordura o diâmetro médio estimado para o conduto foi de 2,4 m e o volume do aquífero para a rota de 15.231,06 m<sup>3</sup>.

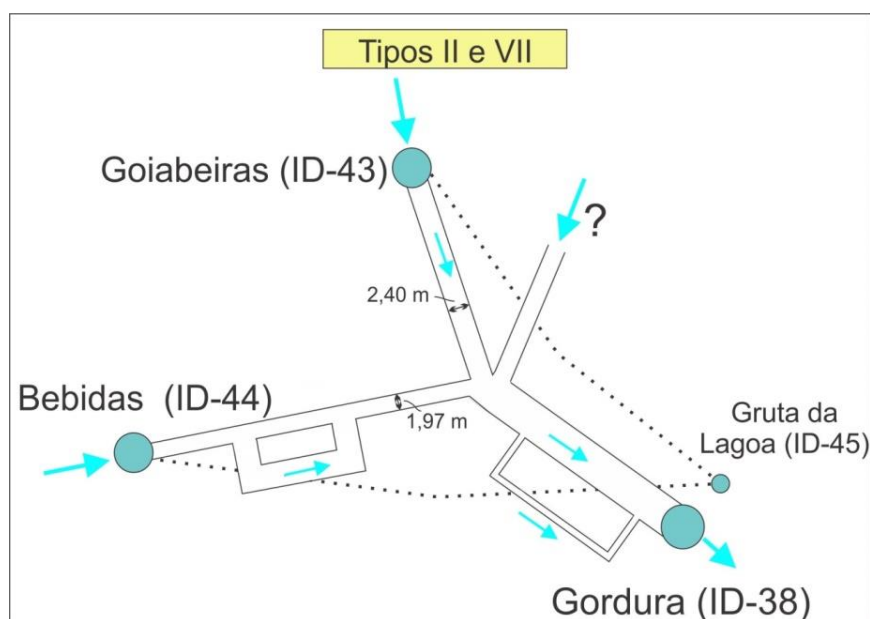


Figura 40 – Representação esquemática das conexões obtidas na Bacia do Gordura, com indicação do diâmetro médio dos condutos. As linhas pontilhadas representam pequenas contribuições hídricas.

### 5.1.9 Ensaio 10 – Injeção na Gruta Lapa Vermelha

O Ensaio 10 contemplou a injeção de 400 g de Fluoresceína na Gruta Lapa Vermelha (ID-52), às 18:50 do dia 19/12/2017. Foram monitorados oito pontos, com destaques para a surgência Samambaia (ID-53) e o Poço Confins Jorrante (ID-55), onde se realizaram os monitoramentos quantitativos, conforme apresentado na Tabela 3 e

Figura 41. Apesar de o ensaio ter sido realizado durante o período chuvoso, as interferências das chuvas foram baixas, conforme demonstrado na Figura 9, e por esse motivo não houve necessidade de repeti-lo.

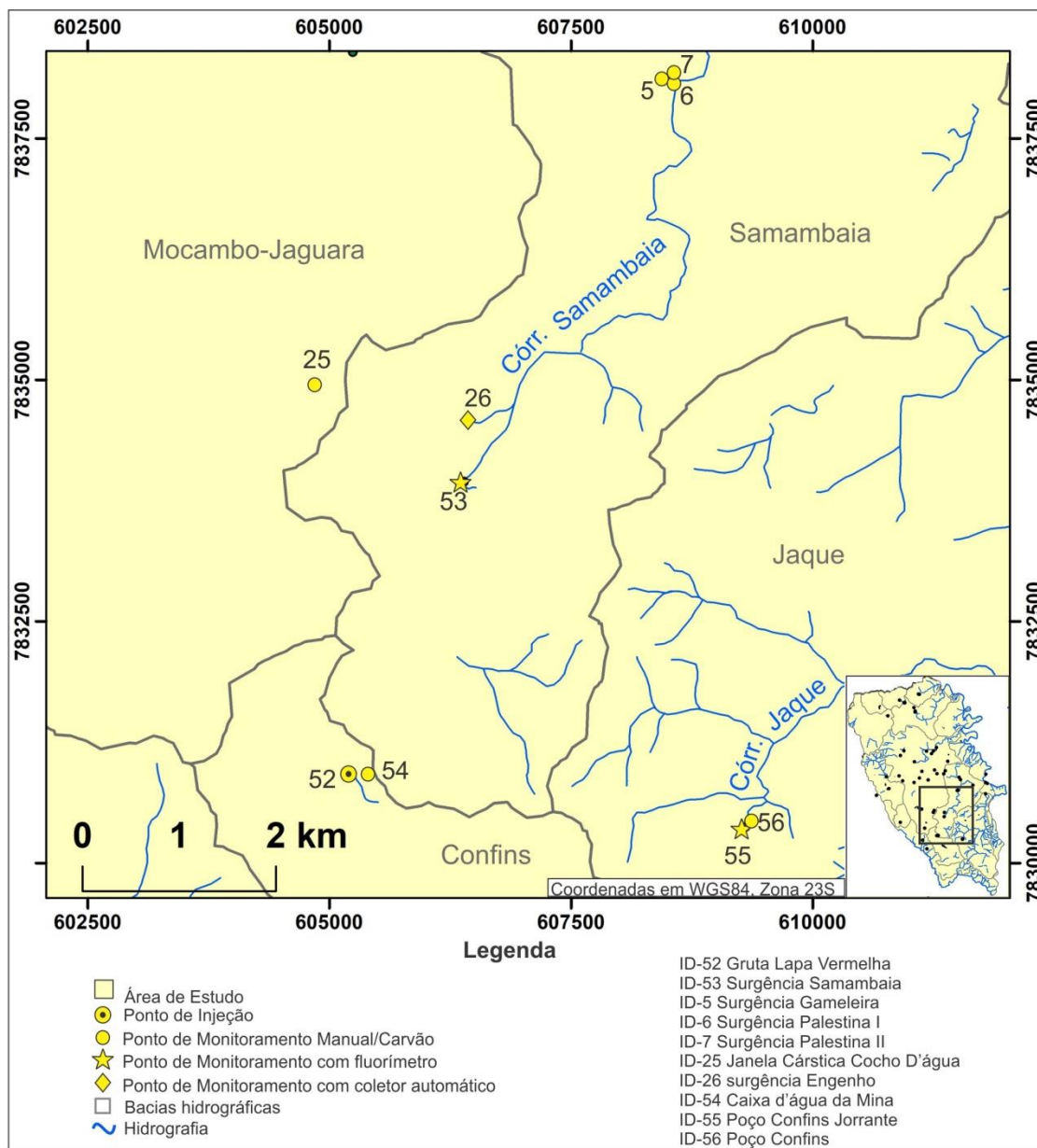


Figura 41 - Localização dos pontos de injeção e monitoramento do Ensaio 10.

### *Avaliação do Background*

Os resultados das avaliações de *background*, com amostras coletadas em 19/12/2017, previamente à injeção do traçador, exibem valores baixos de intensidade de fluorescência, não indicando a presença de nenhum traçador utilizado nesse projeto, tanto para água quanto carvão, conforme pode ser observado no APÊNDICE K.

### *Análises qualitativas*

Após a injeção foram realizadas três campanhas para coleta de água e carvão, nos dias 22/12/2017, 09/01/2018 e 19/01/2018 nos pontos monitorados. Resultados positivos para a Fluoresceína foram obtidos somente na Surgência Samambaia (ID-53), evidenciando a conexão hidráulica Gruta Lapa Vermelha – Samambaia, conforme apresentado na Tabela 14 e no APÊNDICE K.

Tabela 14 - Resultado das avaliações qualitativas realizadas a partir das amostras de água e carvão coletadas manualmente no Ensaio 10.

ID	Ponto de Injeção/Monitoramento	Distância do ponto de injeção (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Resultado da avaliação qualitativa para Fluoresceína
52	<b>Gruta Lapa Vermelha</b>	n.a.	0,015	n.a.
53	Surgência Samambaia	3210	0,113	(+)
26	Surgência Engenho	3820	----	(-)
54	Caixa D'água da Mina	180	----	(-)
25	Janela cárstica Cocho D'água	4000	----	(-)
6	Surgência Palestina I	7940	----	(-)
55	Poço Confins Jorrante	4160	0,00268	(-)
56	Poço Confins	4090	----	(-)
7	Surgência Palestina II	7980	----	(-)
5	Surgência Gameleira	7860	----	(-)

Legenda: Em **negrito** ponto de injeção; (+) resultado positivo; (-) resultado negativo; (n.a) não se aplica. (----) não medido.

### *Análises quantitativas*

Fluorímetros foram instalados na Surgência Samambaia (ID-53) (entre os dias 19/12/2017 e 22/12/2017) e no Poço Confins Jorrante (ID-55) entre os dias 19/12/2017 a 26/12/2017), ambos com medições a cada 10 minutos. As curvas de passagem e recuperação para a conexão Lapa Vermelha – Samambaia e a confirmação da ausência de interconexão hidráulica entre a Lapa Vermelha e o Poço Confins Jorrante estão apresentadas no APÊNDICE K. Os resultados das avaliações quantitativas da conexão Lapa Vermelha – Samambaia são apresentados na Figura 42 e as vazões medidas para tal avaliação na Tabela 14.

A Gruta da Lapa Vermelha contribuiu com 13% da vazão na Surgência Samambaia.

## Discussão

A conexão Lapa Vermelha – Samambaia evidencia interconexão subterrânea entre as sub-bacias Confins e Samambaia (Figura 42). A curva de passagem observada caracteriza-se por um pico único de concentração (APÊNDICE K), sendo o conduto classificado como do Tipo II, com diâmetro médio estimado de 0,63 metros, conforme representado esquematicamente na Figura 43.

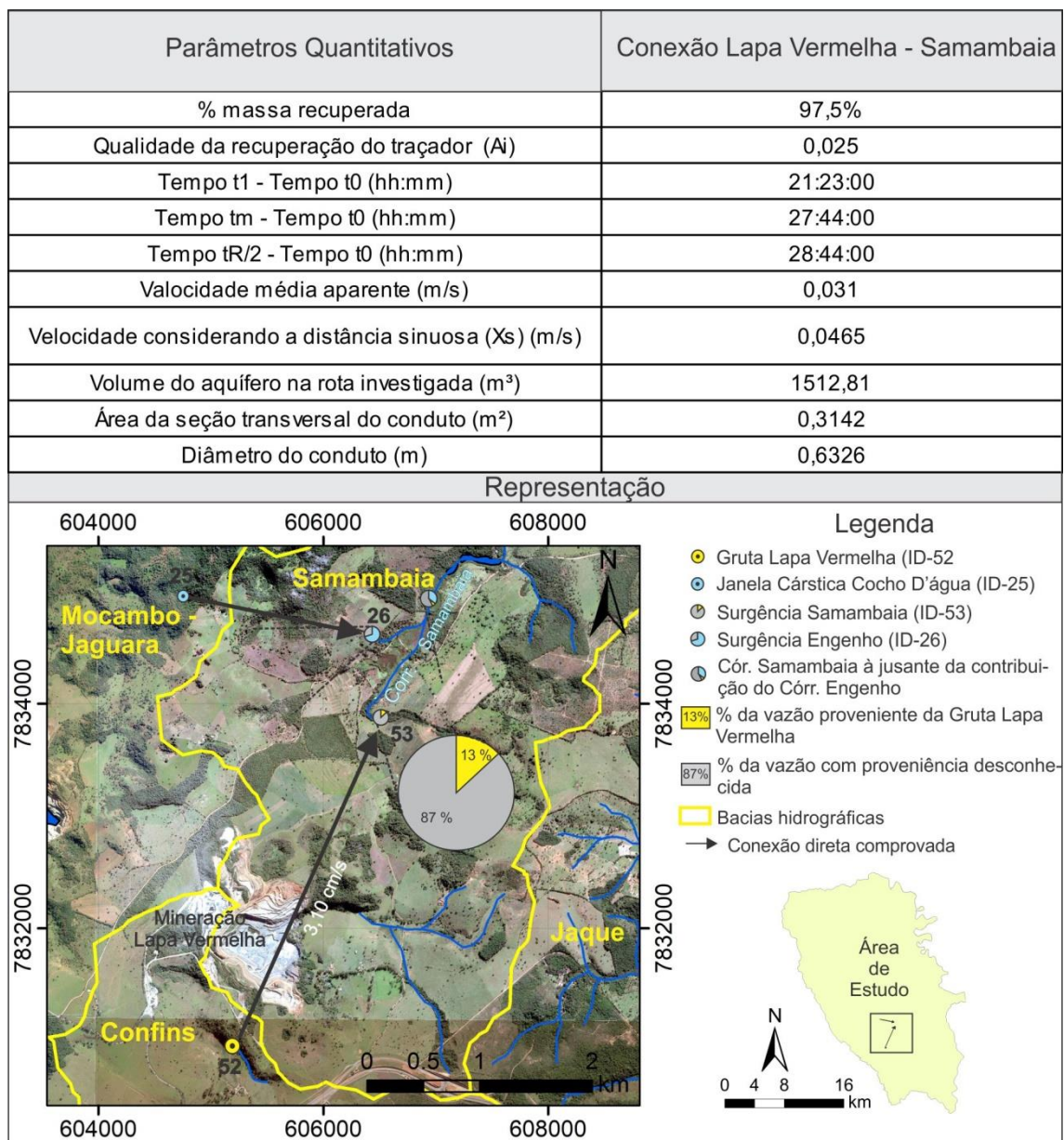


Figura 42 - Resultados das avaliações quantitativas para a conexão hidráulica Gruta Lapa Vermelha (ID – 52) – Surgência Samambaia (ID-53).

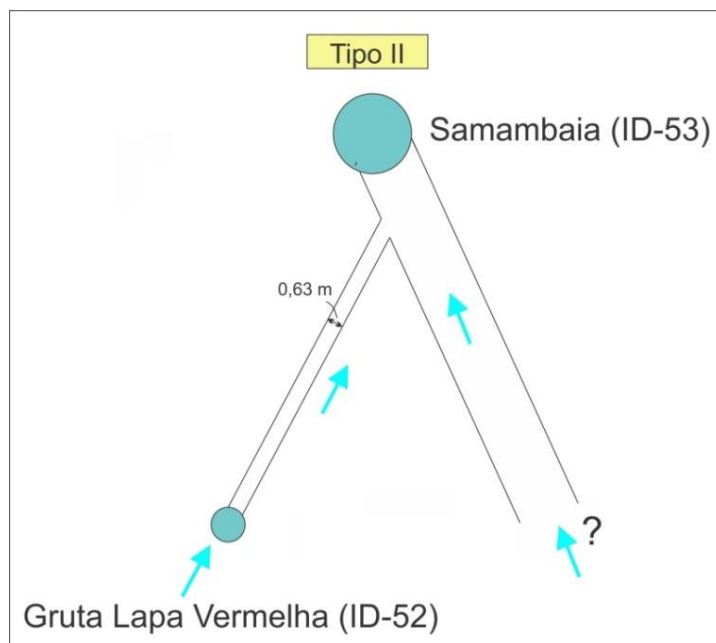


Figura 43 - Representação esquemática da conexão Gruta Lapa Vermelha – Samambaia, obtida, com indicação do diâmetro médio do conduto.

#### ***5.1.10 Compilação e discussão dos resultados quali-quantitativos dos ensaios realizados***

A Figura 44 e a Tabela 15 apresentam a compilação de todos os resultados positivos obtidos para as interconexões hidráulicas, bem como os atributos que caracterizam cada uma destas. A distância e o desnível médio entre os pontos de injeção e de detecção são de 3938 m e 35 m, respectivamente, evidenciando que a maioria das interconexões estão posicionadas no meio cárstico superior. As exceções correspondem às interconexões entre os sumidouros Palmeiras e Bom Jardim e o poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1 que expõem contribuições hídricas pontuais do meio cárstico superior para o profundo.

Em nenhuma surgência obteve-se o fechamento de 100% da proveniência da água (), sendo plausível considerar pelo menos quatro justificativas para esse comportamento: 1) contribuições via fraturas ao longo do trajeto, mesmo que ínfima, já que grande parte destas encontram-se preenchidas por calcita (Galvão, 2015); 2) fenômenos de transporte, como difusão e advecção (Schiesser & Silebi, 1997); 3) perdas para o aquífero profundo e 4) existência de sumidouros contribuintes até então desconhecidos.

Na Figura 46 são apresentados os destinos dos sumidouros ensaiados, de modo que 100% dos destinos dos sumidouros Goiabeiras, Cocho d'Água e Lagoa Bom Jardim foram mapeados.

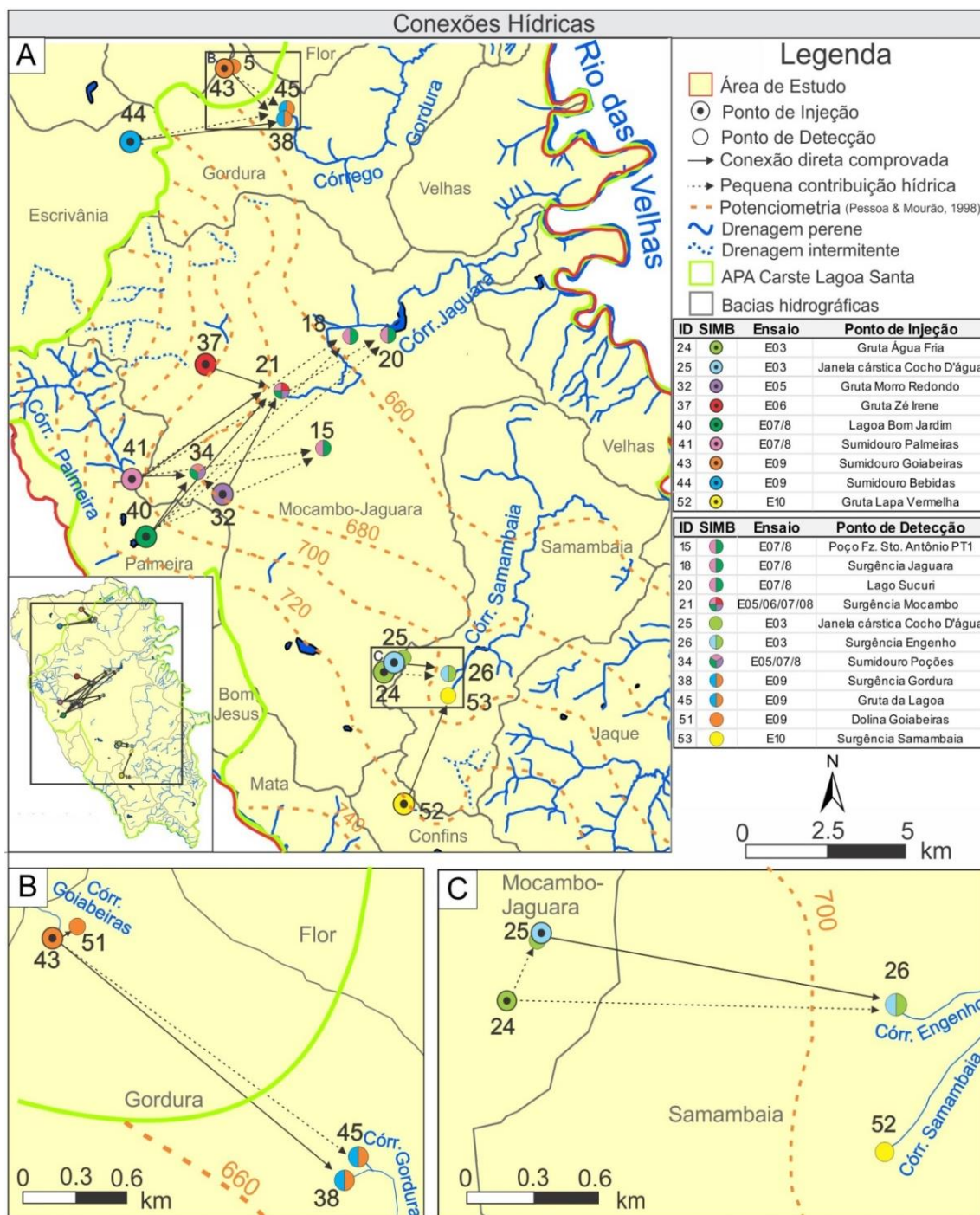


Figura 44 - Resultados das conexões hídricas confirmadas. Cada ensaio é identificado por uma cor distinta. Pontos monitorados em mais de um ensaio são identificados pelas cores dos respectivos ensaios. A) Todas as conexões hídricas confirmadas. B) Enfoque na injeção do Sumidouro Goiabeiras. C) Enfoque nas injeções na Gruta da Água Fria e na Janela Cárstica Cocho D'água. Fonte: Teodoro et. al., 2019. Nota: Ressalta-se que as conexões entre Palmeiras (ID-41)/Lagoa Bom Jardim (ID-40) e os pontos ID-15, ID-18 e ID-20 foram obtidas somente nos ensaios 7/8 realizados em março/2018.

Tabela 15 - Compilação das interconexões hidráulicas obtidas nos ensaios realizados e resultados quantitativos.

Conexão hidráulica	Ensaio	% massa recuperada	Qualidade da recuperação do traçador (Ai)	Velocidade aparente (m <sup>2</sup> /s)	Velocidade considerando o fator de sinuosidade (m <sup>2</sup> /s)	Volume do aquífero na rota investigada (m <sup>3</sup> )	Área da seção transversal do conduto (m <sup>2</sup> )	Diâmetro do Conduto (m)	Direção azimutal da interconexão	Desnível (m)	Distância ponto de injeção-deteção (m)	Mergulho
Janela Cárstica Cocho D'água (ID-24) - Engenho (ID-26)	E3	110,75	-0,1075	0,0289	0,0434	4845	1,96	1,58	102°	17	1649	0,59°
Gruta da Água Fria (ID-24) - Janela Cárstica Cocho D'água (ID-25)	E3	1,15	0,99	0,0095*	0,0143*	0,0270*	0,000072	0,000123	14°	19	250	4,35°
Gruta da Água Fria (ID-24) - Engenho (ID-26)	E3	7	0,93	0,0337*	0,0505*	0,3100*	0,0096	0,0125	98°	36	1680	1,23°
Gruta Morro Redondo (ID-32) - Surgência Mocambo (ID-21)	E5	95,38	0,046	0,0146	0,0219	----	----	----	28°	36	3546	0,58°
Gruta Morro Redondo (ID-32) - Sumidouro Poções (ID-34)	E5	----	----	----	----	----	----	----	330°	20	960	1,19°
Gruta Zé Irene (ID-37) - Surgência Mocambo (ID-21)	E6	86,8	0,132	0,0449	0,0674	5964,95	1,65	1,45	108°	3	2413	0,07°
Sumidouro Palmeiras (ID-41) - Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1 (ID-15)**	E7/8	----	----	----	----	----	----	----	82°	100	5600	1,02°
Lagoa Bom Jardim (ID-40) - Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1 (ID-15)**	E7/8	----	----	----	----	----	----	----	65°	95	5670	0,96°
Sumidouro Palmeiras (ID-41) - Sumidouro Poções (ID-34)**	E7/8	----	----	----	----	----	----	----	90°	19	1930	0,56°
Lagoa Bom Jardim (ID-40) - Sumidouro Poções (ID-34)**	E7/8	----	----	----	----	----	----	----	38°	14	2360	0,34°
Sumidouro Palmeiras (ID-41) - Surgência Jaguará (ID-18)**	E7/8	----	----	----	----	----	----	----	56°	65	7540	0,49°
Lagoa Bom Jardim (ID-40) - Surgência Jaguará (ID-18)**	E7/8	----	----	----	----	----	----	----	46°	60	8240	0,41°
Sumidouro Palmeiras (ID-41) - Lago Sucuri (ID-20)**	E7/8	----	----	----	----	----	----	----	60°	68	8490	0,45°
Lagoa Bom Jardim (ID-40) - Lago Sucuri (ID-20)**	E7/8	----	----	----	----	----	----	----	50°	63	9060	0,40°
Sumidouro Palmeiras (ID-41) - Surgência Mocambo (ID-21)	E7/8R	99,88	0,0013	0,0164	0,0246	2275,14	0,45	0,75	60°	35	5032	0,40°
Lagoa Bom Jardim (ID-40) - Surgência Mocambo (ID-21)	E7/8R	108	-0,08	0,0286	0,0429	38246,4	4,47	2,39	43°	30	5705	0,30°
Sumidouro Goiabeiras (ID-43) - Surgência Gordura (ID-38)	E9	101,42	-0,0142	0,0417	0,06255	15231,06	4,52	2,4	131°	4	2246	0,10°
Sumidouro Bebidas (ID-44) - Surgência Gordura (ID-38)	E9	96,27	0,0372	0,0418	0,0627	19908,71	3,06	1,97	81°	31	4344	0,41°
Sumidouro Goiabeiras (ID-43) - Gruta da Lagoa (ID-45)	E9	0,00025	0,9999975	0,0089***	0,0134***	----	----	----	123°	6	2170	0,16°
Sumidouro Bebida (ID-44) - Gruta da Lagoa (ID-45)	E9	0,00983	0,9999017	0,0171***	0,0257***	----	----	----	78°	33	4390	0,43°
Sumidouro Goiabeiras (ID-43) - Dolina Goiabeiras (ID-51)	E9	----	----	----	----	----	----	----	70°	1	150	0,38°
Gruta Lapa Vermelha (ID-52) - Surgência Samambaia (ID-53)	E10	97,5	0,025	0,031	0,0465	1512,81	0,3142	0,6326	22°	23	3210	0,41°

LEGENDA: \* No cálculo das velocidades e volume do aquífero considerou-se o tempo tm; \*\*Índícios de interconexão; \*\*\* No cálculo das velocidades considerou-se o tempo final de monitoramento; E7/8R - Repetição dos ensaios 7 e 8.

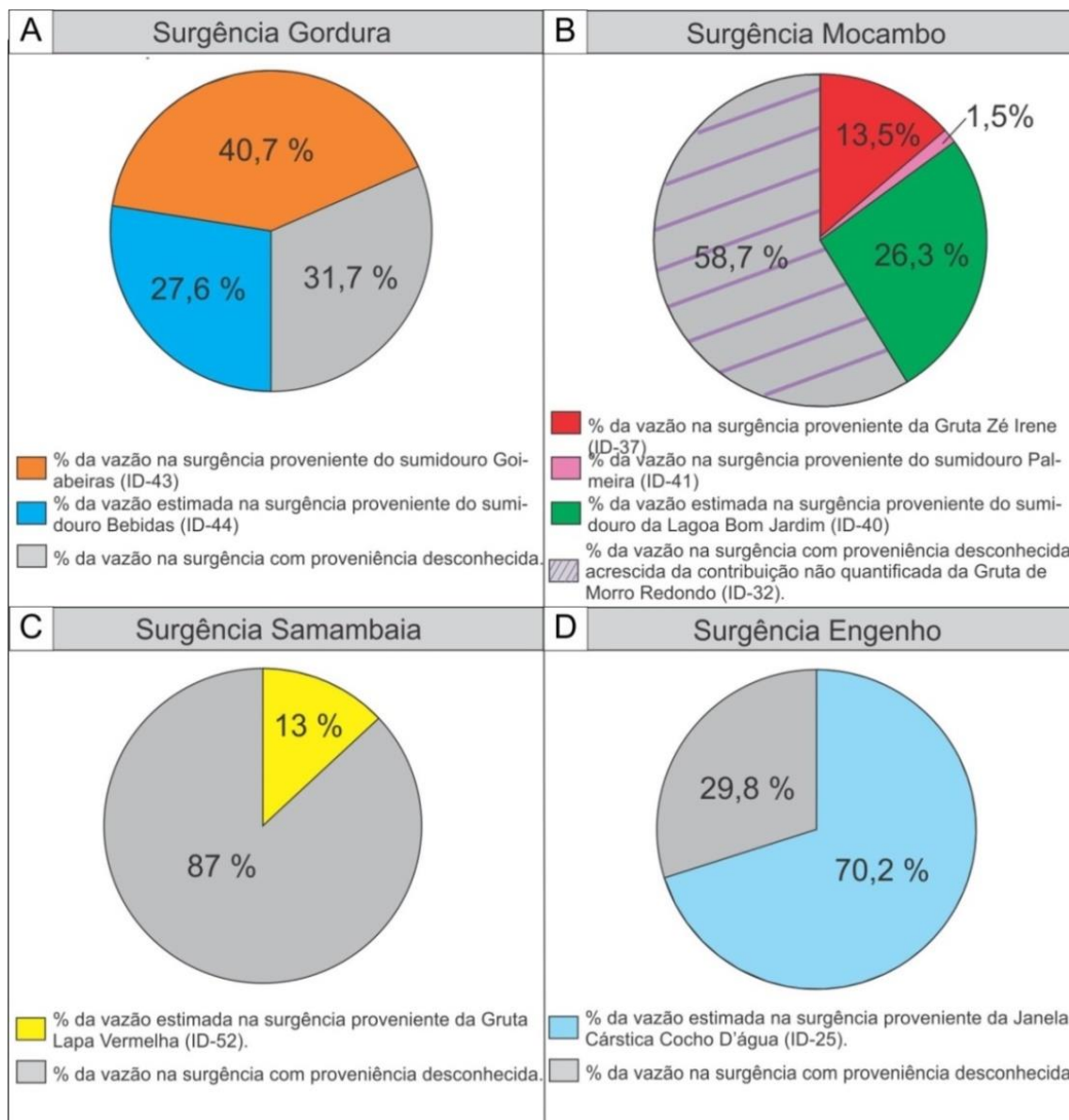


Figura 45 – Compilação das proveniências das principais surgências da área. A) Surgência Gordura; B) Surgência Mocambo; C) Surgência Samambaia; D) Surgência Engenho.

Considerando as interconexões com recuperação de corante acima de 85%, os diâmetros médios dos condutos variaram de 2,4 m (conexão Goiabeiras - Gordura) a 0,63 m (conexão Lapa Vermelha - Samambaia), com mediana de 1,58 m. Os volumes variaram de 38.246,4 m<sup>3</sup> (conexão Bom Jardim - Mocambo) a 1512,81 m<sup>3</sup> (conexão Lapa Vermelha - Samambaia), com mediana de 5964,95 m<sup>3</sup>, como pode ser observado na . A somatória dos volumes calculados corresponde a 0,15% do volume anual de recarga aquífera, considerando a área de estudo de 505 km<sup>2</sup> e recarga aquífera de 119 mm estimada por Paula e Velásquez (2019) para o ano hidrológico de 2016/2017.

Para o caso das interconexões Gruta da Água Fria - Cocho D'água e Gruta da Água Fria - Engenho, em que as porcentagens de recuperação de corante foram 1,15 %



e 7,00%, respectivamente, os diâmetros médios dos condutos foram 0,000123 m e 0,0125 m e os volumes das rotas 0,0270 m<sup>3</sup> e 0,3100 m<sup>3</sup>, respectivamente, indicando provavelmente fluxos através de fraturas.

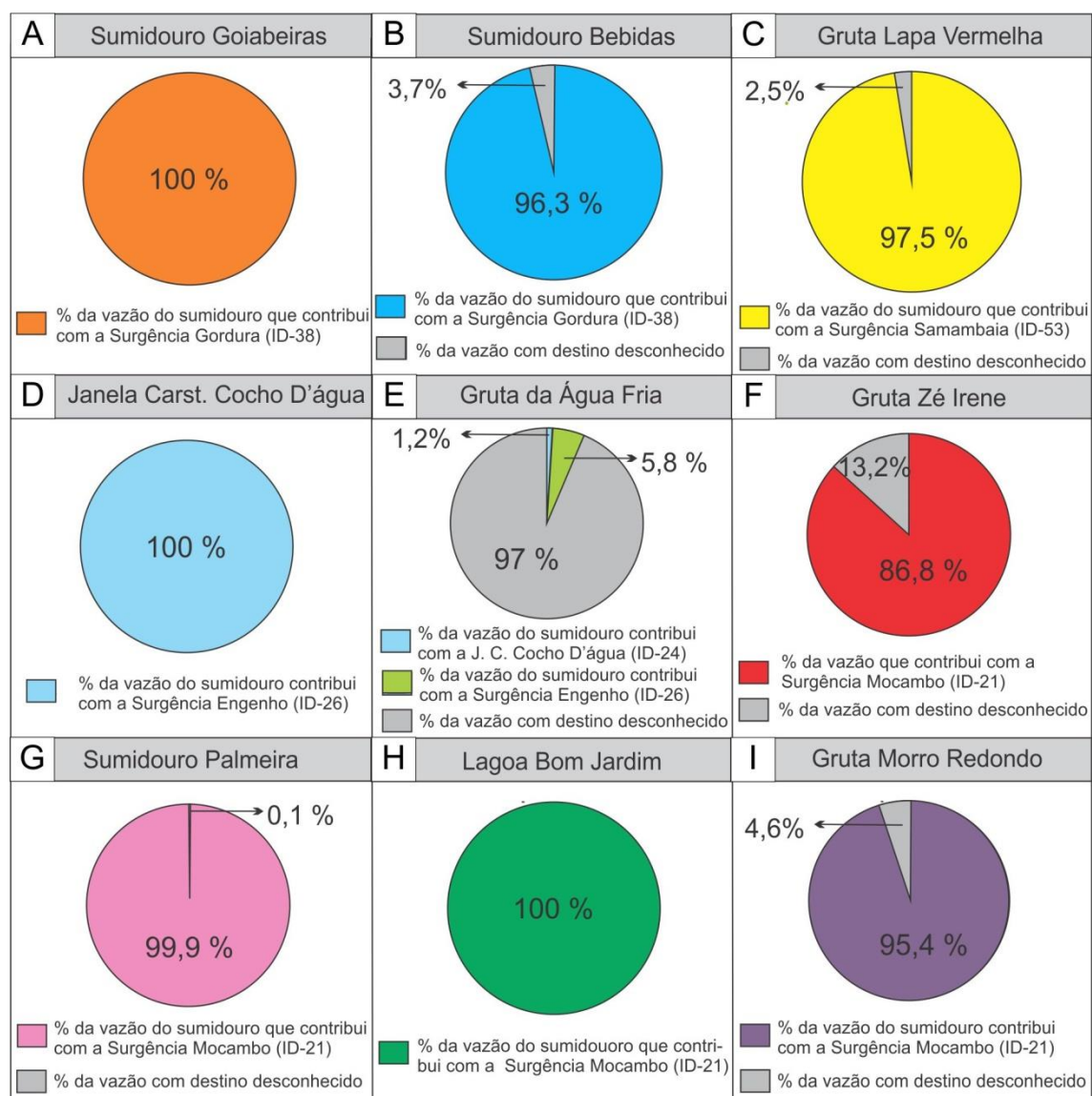


Figura 46 - Compilação dos destinos dos principais sumidouros da área. A) Sumidouro Goiabeiras; B) Sumidouro Bebidas; C) Gruta Lapa Vermelha; D) Janela Cárstica Cocho D'água; E) Gruta da Água Fria; F) Gruta Zé Irene; G) Sumidouro Palmeira; H) Lagoa Bom Jardim; I) Gruta Morro Redondo.

As curvas de passagem e recuperação das principais conexões são apresentadas na . A maior parte destas evidenciou a existência de bifurcações nas rotas dos fluxos e/ou porções de retenção do corante.

Considerando-se somente os ensaios onde foram obtidas as curvas de passagem completas, as velocidades médias aparentes calculadas dos fluxos variaram de  $9,5 \times 10^{-3}$  m/s (Conexão Gruta da Água Fria – Janela Cárstica Cocho D'água) a  $4,49 \times 10^{-2}$  m/s

(Conexão Zé Irene – Mocambo), concordantes com as observadas em vários locais do mundo em ambientes cársticos, que no geral variam de  $2 \times 10^{-2}$  m/s a  $5 \times 10^{-2}$  m/s (Worthington, 1991), com valor médio de  $2,04 \times 10^{-2}$  m/s (Worthington, 1999).

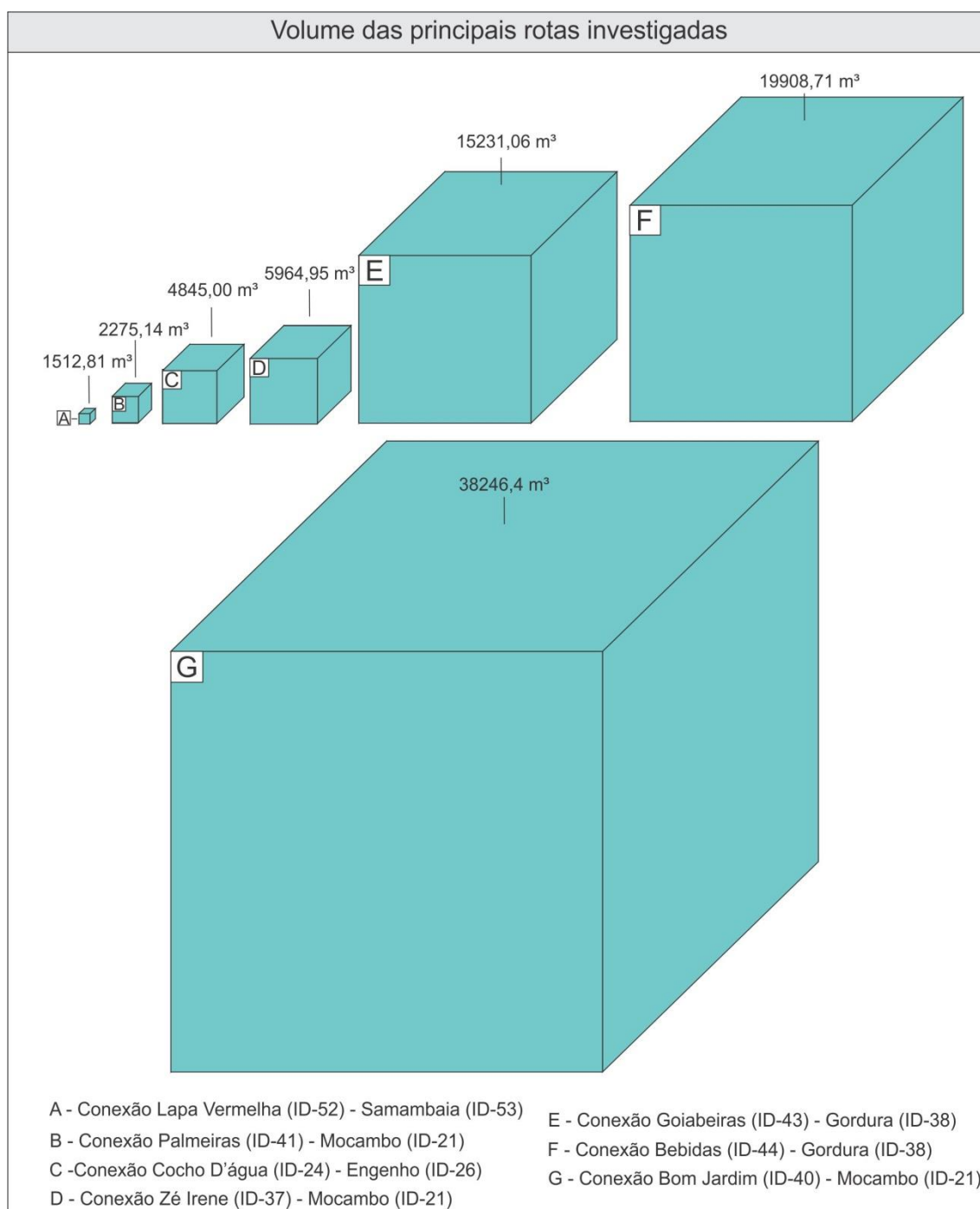


Figura 47 – Comparação entre os volumes de água obtidos para as principais interconexões avaliadas.

Considerando as interconexões diretas, onde mais de 80% da massa de corante injetada foi recuperada, observa-se um zoneamento espacial das velocidades, que são

relativamente homogêneas dentro de cada domínio de contribuição hídrica. Os maiores valores de velocidade “v” ocorrem na região norte da área - contribuições da Surgência Gordura ( $4,17 \times 10^{-2}$  m/s e  $4,18 \times 10^{-2}$  m/s). As velocidades intermediárias ocorrem na região sul da área - contribuições do córrego Samambaia ( $2,89 \times 10^{-2}$  m/s e  $3,10 \times 10^{-2}$  m/s) e as menores velocidades na porção central da área - contribuições da Surgência Mocambo ( $1,46 \times 10^{-2}$  m/s,  $1,64 \times 10^{-2}$  m/s e  $2,86 \times 10^{-2}$  m/s), exceto a conexão Zé Irene-Mocambo ( $4,49 \times 10^{-2}$  m/s).

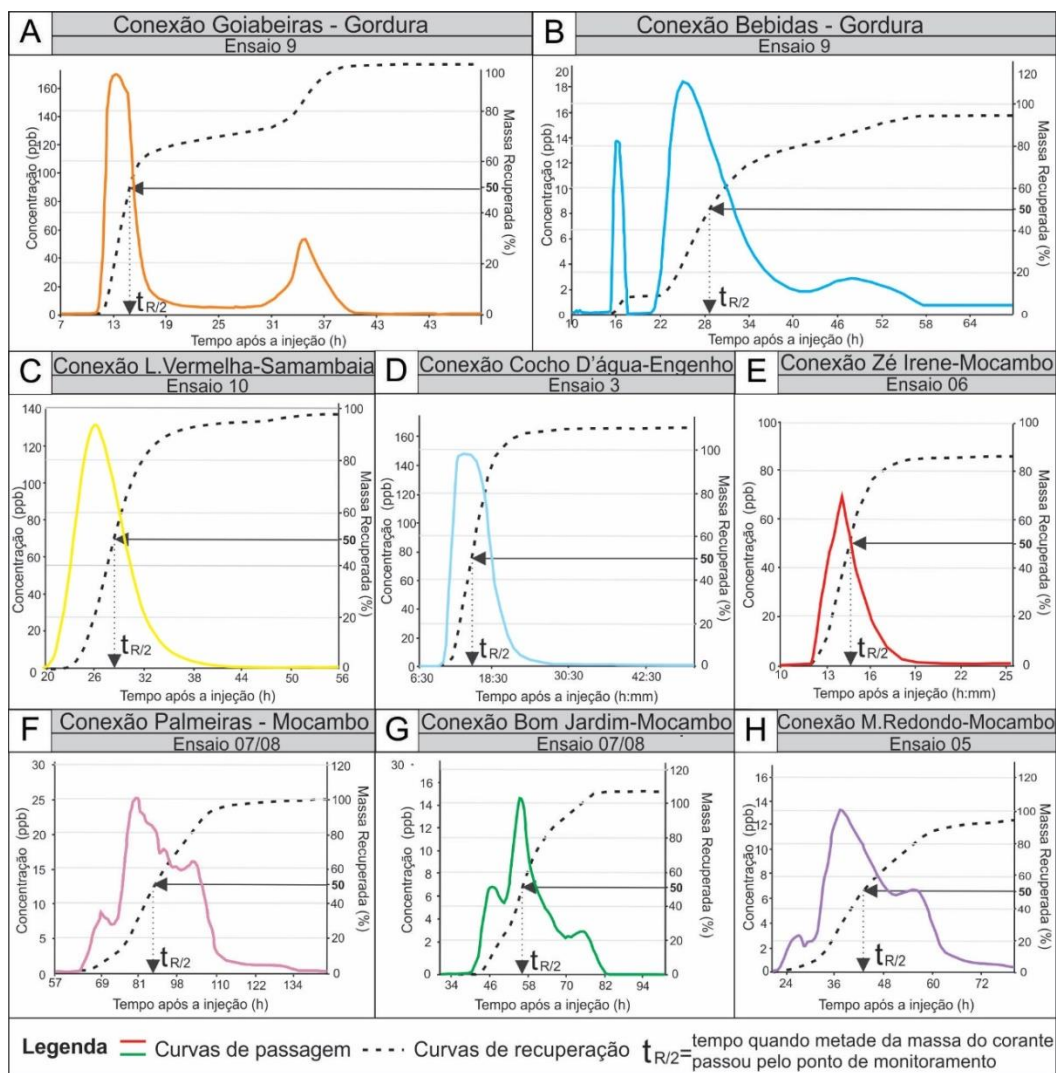


Figura 48 - Curvas de passagem e recuperação das principais conexões hídricas obtidas, representadas nas cores dos ensaios. A) Conexão Goiabeiras – Gordura; B) Conexão Bebidas Gordura; C) Conexão Lapa Vermelha – Samambaia. D) Conexão Cocho D’água – Engenho; E) Conexão Zé Irene – Mocambo; F) Conexão Palmeiras – Mocambo; G) Conexão Bom Jardim – Mocambo; H) Conexão Morro Redondo – Mocambo. Fonte: Teodoro et. al., 2019.

Dentre as principais características dos terrenos cársticos, destaca-se o fato das

drenagens superficiais não coincidirem exatamente aos sistemas de drenagem subterrânea, o que dificulta a demarcação das áreas de captação de aquíferos cársticos (Palmer, 1991). Esse fato é corrente no presente estudo, conforme mostrado na Figura 49, a qual ilustra a definição dos limites das bacias hidrogeológicas para o compartimento superior do aquífero cárstico a partir dos testes com traçadores realizados, observando-se as conexões subterrâneas entre as sub-bacias hidrográficas:

- Escrivânia e Gordura, através das interconexões hidráulicas do sumidouro Bebidas, pertencente à sub-bacia Escrivânia, e as surgências Gordura e Gruta da Lagoa, pertencentes à sub-bacia Gordura, obtidas no ensaio 9.
- Palmeiras e Mocambo/Jaguara, através das interconexões hidráulicas do Sumidouro Palmeiras e do Sumidouro da Lagoa Bom Jardim, ambos pertencentes à bacia Palmeira, com as surgências Mocambo, Poções, Poço Fazenda Sto. Antônio PT1, Lago Sucuri e a Surgência Jaguara, pertencentes à Bacia Mocambo/Jaguara. Estas interconexões foram obtidas nos ensaios 7 e 8.
- Mocambo/Jaguara e Samambaia, confirmada pelas interconexões Gruta da Água Fria (Bacia Mocambo/Jaguara) – Engenho (Bacia Samambaia) e Cocho D'água (Bacia Mocambo/Jaguara) - Engenho (Bacia Samambaia), obtidas no ensaio 3.
- Confins e Samambaia, confirmada pela interconexão hidráulica Lapa Vermelha (Bacia Confins) – Surgência Samambaia (Bacia Samambaia), obtida no ensaio 10.

## ***5.2 Resultados das análises estruturais no condicionamento dos fluxos subterrâneos***

Sabe-se que os fluxos no meio anisotrópico cárstico-fissural ocorrem preferencialmente ao longo das fraturas dissolvidas, falhas, acamamentos e dutos, e também que os lineamentos morfoestruturais são indicadores, em superfície, daquelas discontinuidades. Assim, apresentam-se os resultados estatísticos dessas estruturas fotointerpretadas (lineamentos morfoestruturais) e medidas em campo (fraturas, foliação, acamamento e paleodutos).

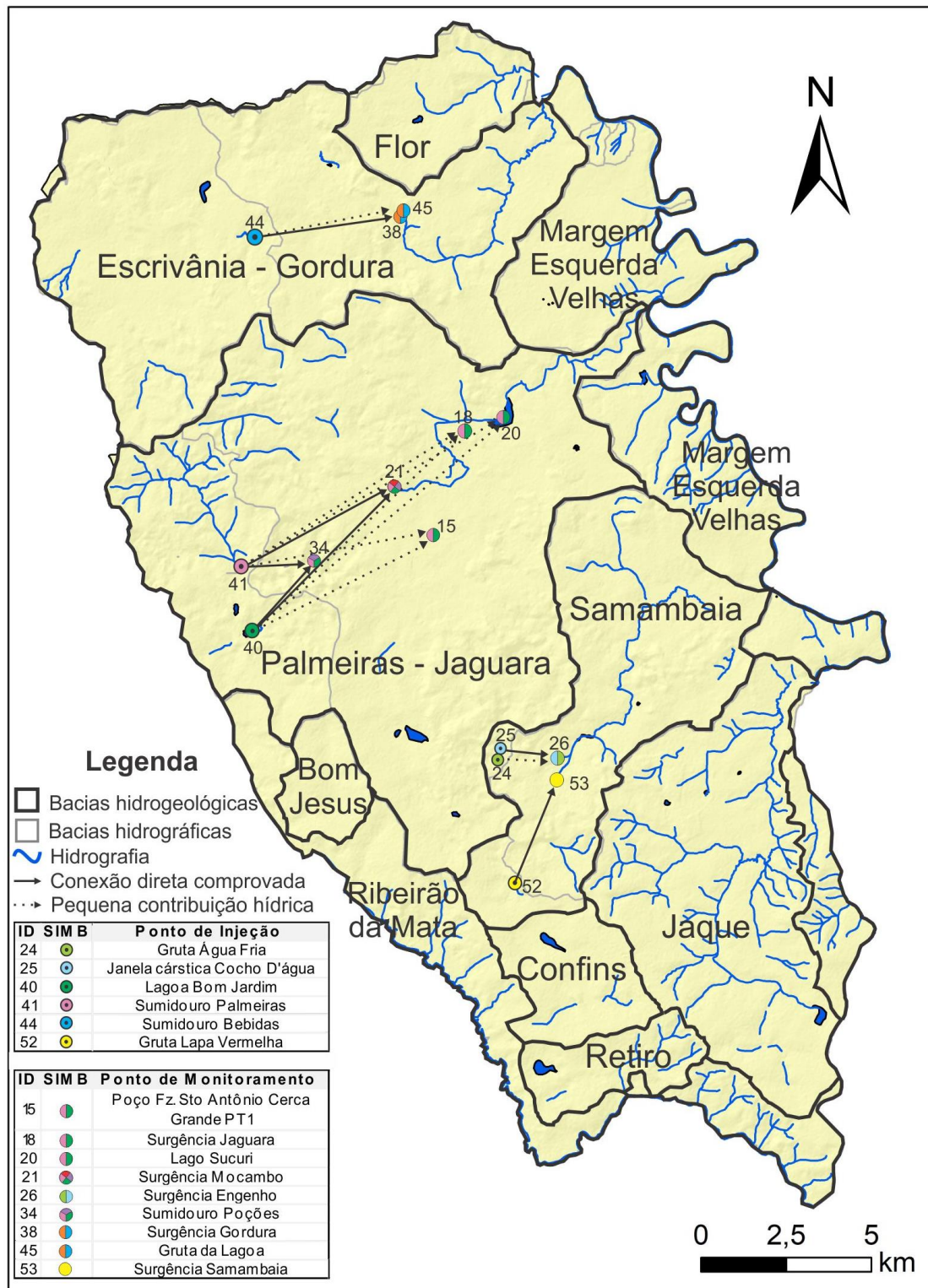


Figura 49 - Mapa das bacias hidrogeológicas do aquífero superior delimitado pela topografia e pelos estudos com traçadores corantes.

### 5.2.1 Resultados das compilações das estruturas

Na Figura 21 foram apresentadas as distribuições das direções dos fotolineamentos.

De modo geral, nota-se uma predominância das direções N30-60E, seguida de N30-60W e E-W (Figura 50A). As direções N30-60E e E-W prevalecem nos lineamentos mais curtos, de 0 a 282 metros (Figura 50-B), enquanto o número das direções NW cresce com o aumento do comprimento dos lineamentos (Figura 50-C, D e E). Esses lineamentos mais longos na direção NNW estão provavelmente associados às falhas normais de alto ângulo, com trend estrutural NNW-SSE, da primeira fase de deformação (Etapa Extensional), geradas pelas diferenças topográficas (*horsts e grabens*) no assoalho da bacia e que estão relacionadas à sedimentação inicial da sequência pelítico-carbonática do Grupo Bambuí, de acordo com Ribeiro *et al.* (2003).

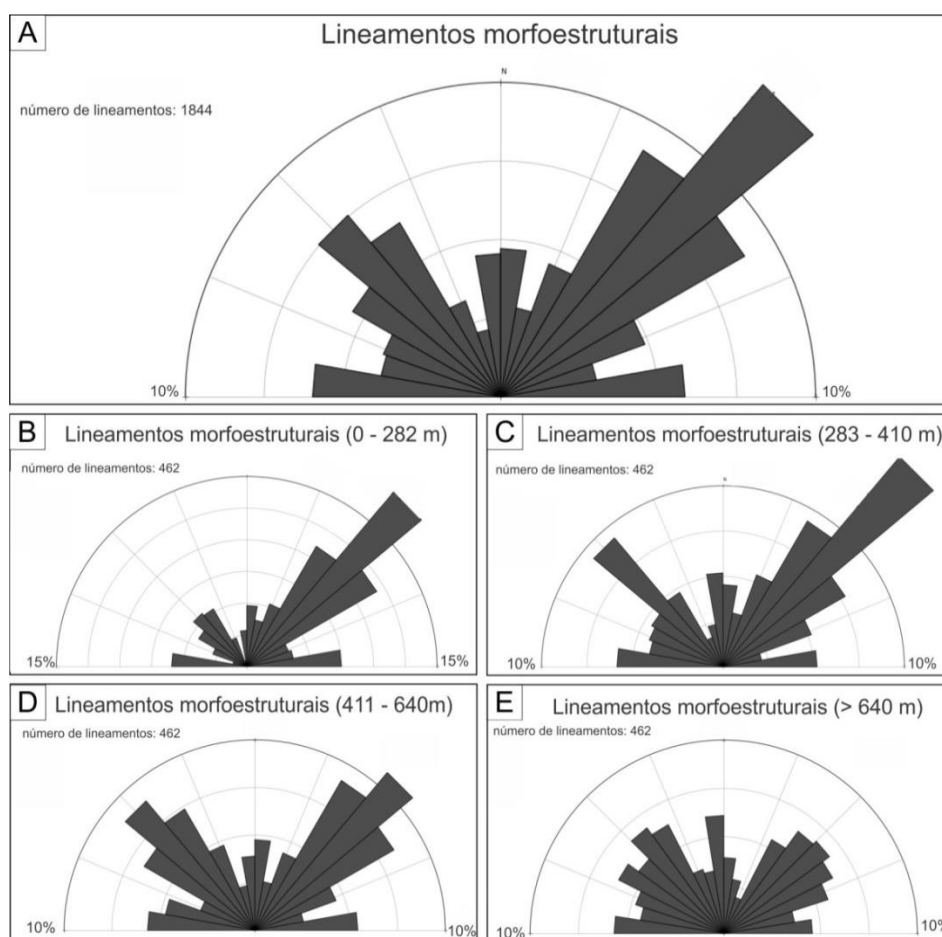


Figura 50 – Diagrama de roseta dos lineamentos para diferentes comprimentos, considerando: A) Todos os comprimentos de lineamentos; B) Lineamentos de 0 a 282 metros; C) Lineamentos de 283 a 410 metros; D) Lineamentos de 411 a 640 metros; E) Lineamentos maiores que 640 metros.

Na Figura 51 e Figura 52 são apresentadas os estereogramas e diagramas de roseta de acamamentos, foliações, fraturas e paleodutos. O acamamento apresenta baixos ângulos de mergulho, majoritariamente nos sentidos S80°-90°E, seguido de N80°-90°E (Figura 51A e B). As foliações predominantes são paralelas ao acamamento (Figura 51D e E) e marcadas pelo estiramento de minerais produzidos por deslizamentos interestratais associados aos esforços de direção E-W do evento Brasileiro.

Apesar da grande variabilidade nas atitudes das fraturas, observa-se uma predominância daquelas sub-horizontais (Figura 52A), coincidentes, na maior parte das vezes, com os planos de acamamento, o que explica a maior ocorrência de sentidos de mergulhos para S80°-90°E (Figura 52 B). Destacam-se também, em ordem decrescente de frequência, as direções N20°-30°E, N10°-20°W e E-W (Figura 52 C).

Há predominância de paleodutos com baixos ângulos de mergulho (Figura 52 D), nos sentidos S80°-90°E, N80°-90°E e S70°-80°E (Figura 52 E), o que evidencia o forte controle do acamamento e das fraturas sub-horizontais no condicionamento da carstificação da região, conforme já apontado por Galvão *et al.* (2015), Peñaranda-Salgado (2016) e Ribeiro *et al.* (2019).

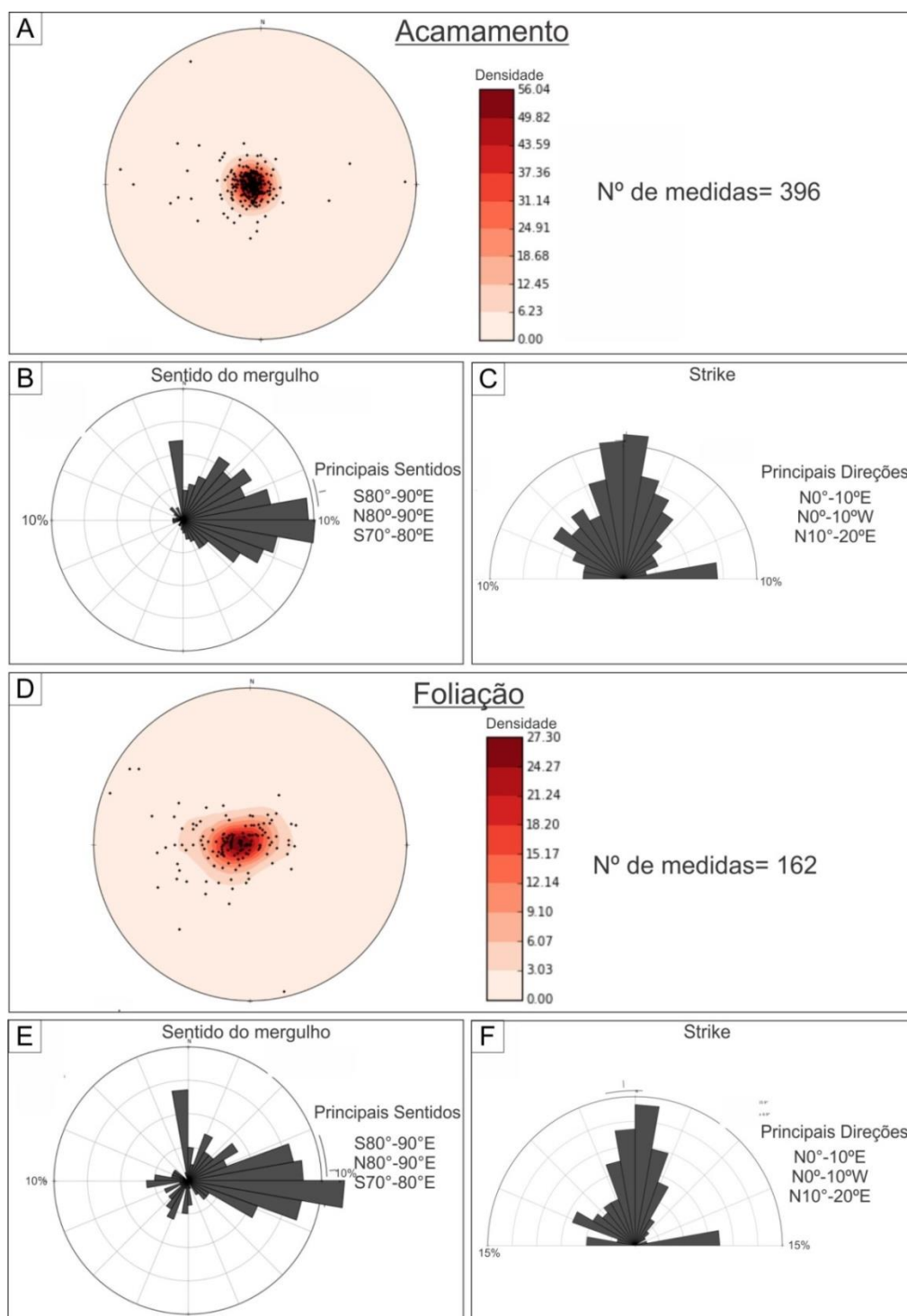


Figura 51 - A) Estereograma dos planos de acamamento; B) Diagrama de roseta dos sentidos dos mergulhos e (C) dos strikes dos planos de acamamento; D) Estereograma dos planos de foliação; E) Diagrama de roseta do sentido dos mergulhos e (F) dos strikes dos planos de foliação. Fonte: dados levantados pela autora, Vieira (2015), Ribeiro *et al.* (2016), Lima *et al.* (2018), Andrade & Amorin (2018) e Magalhães & Silva (2018).



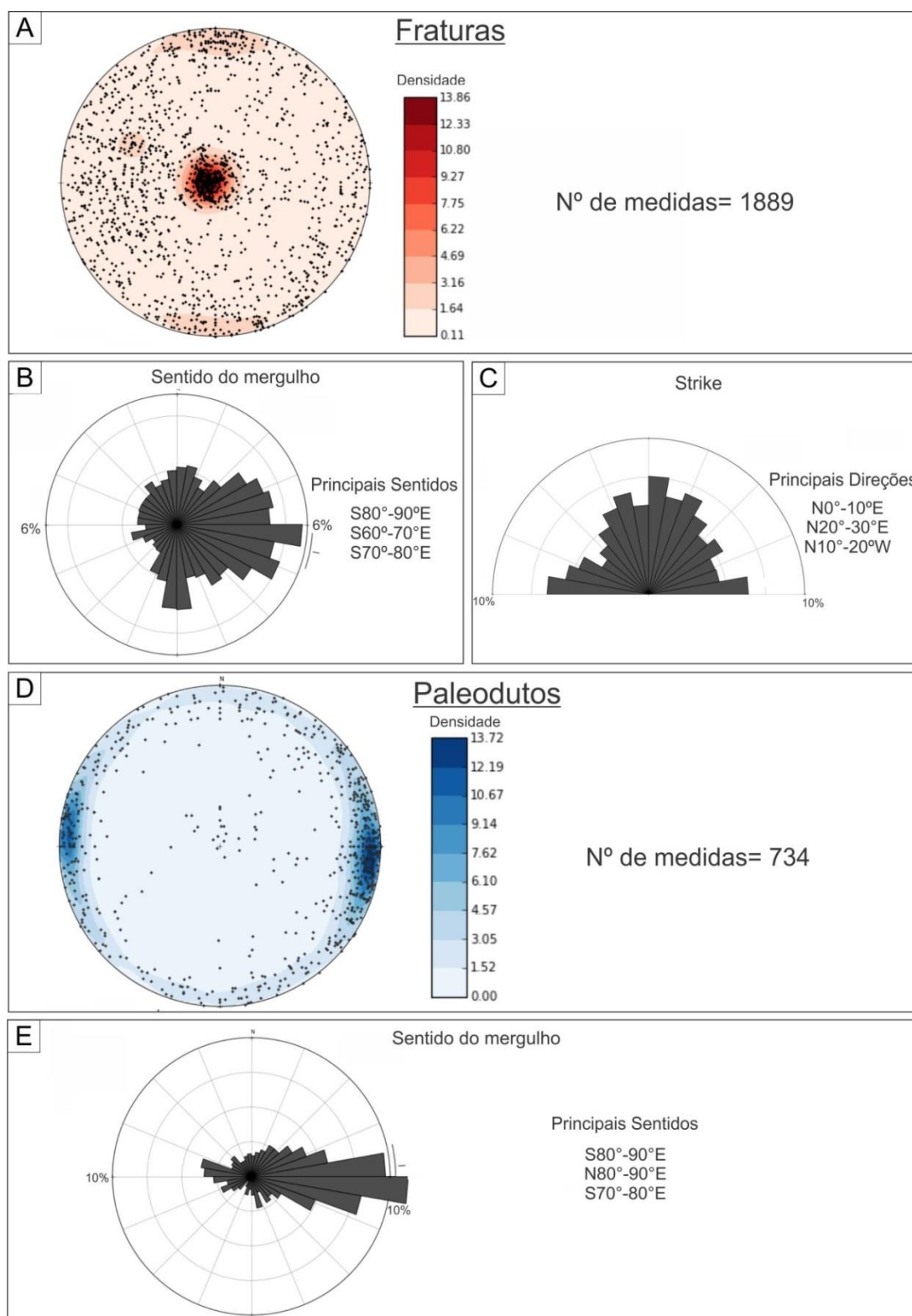


Figura 52 - A) Estereograma dos planos de fraturas; B) Diagrama de roseta dos sentidos dos mergulhos e (C) dos strikes dos planos de fraturas; D) Estereograma e E) diagrama de roseta dos *trends* dos paleodutos. Fonte: dados levantados pela autora, Vieira (2015), Ribeiro *et al.* (2016), Lima *et al.* (2018), Andrade & Amorin (2018) e Magalhães & Silva (2018).

### 5.2.2 Influência das estruturas no fluxo hídrico do meio cárstico superior

A Figura 53 apresenta o estereograma e diagrama de roseta com os sentidos das interconexões hidráulicas obtidas a partir dos ensaios realizados. Predominam interconexões com mergulhos suaves nos sentidos N40°-70°E, N80°-90°E, N20°-30°E e S70°-80E, em direção ao nível de base regional, o Rio das Velhas.

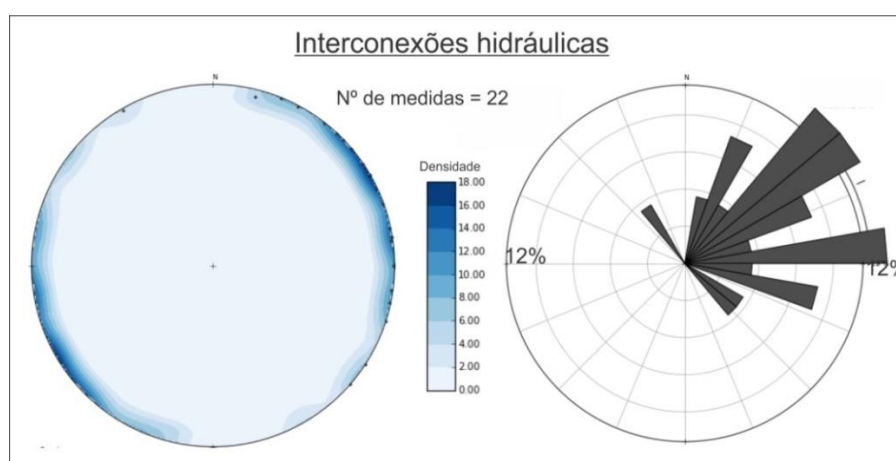


Figura 53 – Diagrama de roseta das direções das interconexões hidráulicas mapeadas.

A Tabela 16 exhibe as principais direções interconexões hidráulicas bem como aquelas obtidas para cada uma das estruturas avaliadas.

A maior parte das interconexões possui sentido de fluxo para o quadrante nordeste, que também se apresenta bem marcado pelas direções dos lineamentos morfoestruturais, sentidos de mergulho de acamamento, direções de fraturas e também pelas direções dos eixos principais das depressões (Tabela 16). De modo mais específico, as principais direções de interconexão hidráulica N40°-60°E apresentam forte correspondência com os lineamentos morfoestruturais (Figura 50 e Tabela 16), enquanto as direções N80°-90°E associam-se aos sentidos dos mergulhos do acamamento e da foliação, que predominam nos sentidos N80°-90°E e S80°-90°E (Figura 51), com mergulhos suaves, bem como dos paleodutos, cujos trends também predominam nessas direções (Figura 52E).

Tais resultados evidenciam o importante papel do acamamento, em associação com as fraturas/lineamentos morfoestruturais, no condicionamento da carstificação e, por consequência, no controle do fluxo subterrâneo do meio cárstico superior da região, conforme já apontado por Coutard *et al.* (1978), Pessoa (2005) e Worthington (2005), Galvão *et al.* (2015), Peñaranda-Salgado (2016); Ribeiro *et al.*, (2019).

Tabela 16 - Compilação das principais direções das estruturas e dos ensaios realizados.

Lineamentos morfoestruturais (direção)*	Eixos principais de depressões (direção)**	Acamamentos (sentido do mergulho)***	Foliações (sentido do mergulho)***	Faturas (direção)***	Paleodutos (trend)***	Direção das interconexões hidráulicas
0°-10°	0°-10°	0°-10°	0°-10°	0°-10°	0°-10°	0°-10°
10°-20°	10°-20°	10°-20°	10°-20°	10°-20°	10°-20°	10°-20°
20°-30°	20°-30°	20°-30°	20°-30°	20°-30°	20°-30°	20°-30°
30°-40°	30°-40°	30°-40°	30°-40°	30°-40°	30°-40°	30°-40°
40°-50°	40°-50°	40°-50°	40°-50°	40°-50°	40°-50°	40°-50°
50°-60°	50°-60°	50°-60°	50°-60°	50°-60°	50°-60°	50°-60°
60°-70°	60°-70°	60°-70°	60°-70°	60°-70°	60°-70°	60°-70°
70°-80°	70°-80°	70°-80°	70°-80°	70°-80°	70°-80°	70°-80°
80°-90°	80°-90°	80°-90°	80°-90°	80°-90°	80°-90°	80°-90°
90°-100°	90°-100°	90°-100°	90°-100°	90°-100°	90°-100°	90°-100°
100°-110°	100°-110°	100°-110°	100°-110°	100°-110°	100°-110°	100°-110°
110°-120°	110°-120°	110°-120°	110°-120°	110°-120°	110°-120°	110°-120°
120°-130°	120°-130°	120°-130°	120°-130°	120°-130°	120°-130°	120°-130°
130°-140°	130°-140°	130°-140°	130°-140°	130°-140°	130°-140°	130°-140°
140°-150°	140°-150°	140°-150°	140°-150°	140°-150°	140°-150°	140°-150°
150°-160°	150°-160°	150°-160°	150°-160°	150°-160°	150°-160°	150°-160°
160°-170°	160°-170°	160°-170°	160°-170°	160°-170°	160°-170°	160°-170°
170°-180°	170°-180°	170°-180°	170°-180°	170°-180°	170°-180°	170°-180°
180°-190°	180°-190°	180°-190°	180°-190°	180°-190°	180°-190°	180°-190°
190°-200°	190°-200°	190°-200°	190°-200°	190°-200°	190°-200°	190°-200°
200°-210°	200°-210°	200°-210°	200°-210°	200°-210°	200°-210°	200°-210°
210°-220°	210°-220°	210°-220°	210°-220°	210°-220°	210°-220°	210°-220°
220°-230°	220°-230°	220°-230°	220°-230°	220°-230°	220°-230°	220°-230°
230°-240°	230°-240°	230°-240°	230°-240°	230°-240°	230°-240°	230°-240°
240°-250°	240°-250°	240°-250°	240°-250°	240°-250°	240°-250°	240°-250°
260°-270°	260°-270°	260°-270°	260°-270°	260°-270°	260°-270°	260°-270°
270°-280°	270°-280°	270°-280°	270°-280°	270°-280°	270°-280°	270°-280°
280°-290°	280°-290°	280°-290°	280°-290°	280°-290°	280°-290°	280°-290°
290°-300°	290°-300°	290°-300°	290°-300°	290°-300°	290°-300°	290°-300°
300°-310°	300°-310°	300°-310°	300°-310°	300°-310°	300°-310°	300°-310°
310°-320°	310°-320°	310°-320°	310°-320°	310°-320°	310°-320°	310°-320°
320°-330°	320°-330°	320°-330°	320°-330°	320°-330°	320°-330°	320°-330°
330°-340°	330°-340°	330°-340°	330°-340°	330°-340°	330°-340°	330°-340°
340°-350°	340°-350°	340°-350°	340°-350°	340°-350°	340°-350°	340°-350°
350°-360°	350°-360°	350°-360°	350°-360°	350°-360°	350°-360°	350°-360°

LEGENDA: As principais direções/sentidos estão marcadas em rosa, com o grau de importância decrescente das tonalidades mais fortes para as mais fracas.\* Dados de Ribeiro *et al.* (2016) e Amaral (2018); \*\*Dados de Amaral (2018); \*\*\*: dados da autora, Vieira (2015), Ribeiro *et al.* (2016), Lima *et al.* (2018), Andrade & Amorin (2018) e Magalhães & Silva (2018).

### 5.2.3 Resultados das análises da vazão dos poços profundos em função dos fotolineamentos

A Tabela 17 e a Figura 54A apresentam os valores máximos, mínimos, médios, medianas e quartis da vazão dos poços associados a lineamentos (Figura 55) em função da direção destes.

Notam-se vazões mais elevadas para as orientações próximas ao E-W, com valores medianos de 52,59 m<sup>3</sup>/h, nas direções 67,5° - 90° e 23,23 m<sup>3</sup>/h nas direções 270° - 292,5°. As direções entre 22,5°-45°, apesar de apresentarem mediana de 15,6 m<sup>3</sup>/h, também merecem destaque em função do valor da média de 52,76 m<sup>3</sup>/h e do elevado número de poços com altas vazões (*outliers* conforme apresentado na Figura 54A). Os menores valores são observados nas direções 315° - 337,5°, seguido das direções 292,5° - 315° e 0° - 22,5°, com medianas de 12,47 m<sup>3</sup>/h, 12,60m<sup>3</sup>/h e 13,80 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

Tabela 17- Estatística descritiva das vazões (m<sup>3</sup>/h) dos poços para cada direção de lineamento associado.

Azimutes	Número de poços	Vazão máxima (m <sup>3</sup> /h)	Vazão mínima (m <sup>3</sup> /h)	Média (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /h)	Mediana (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /h)
0°-22,5°	9	88,00	1,93	23,89	5,00	13,80	40,00
22,5° - 45°	44	300,00	2,34	<b>52,76</b>	<b>9,02</b>	15,60	36,00
45°-67,5°	30	288,00	0,40	45,06	4,95	18,51	46,09
67,5° - 90°	22	720,00	5,29	<b>98,16</b>	<b>9,06</b>	<b>52,59</b>	<b>119,10</b>
270° - 292,5°	38	180,00	0,67	38,71	<b>8,65</b>	<b>23,23</b>	<b>67,09</b>
292,5° - 315°	22	396,00	0,80	43,65	6,00	12,60	51,76
315° - 337,5°	35	240,12	0,80	26,05	7,54	12,47	32,00
337,5° - 360°	34	132,00	2,00	28,25	5,13	20,00	36,00

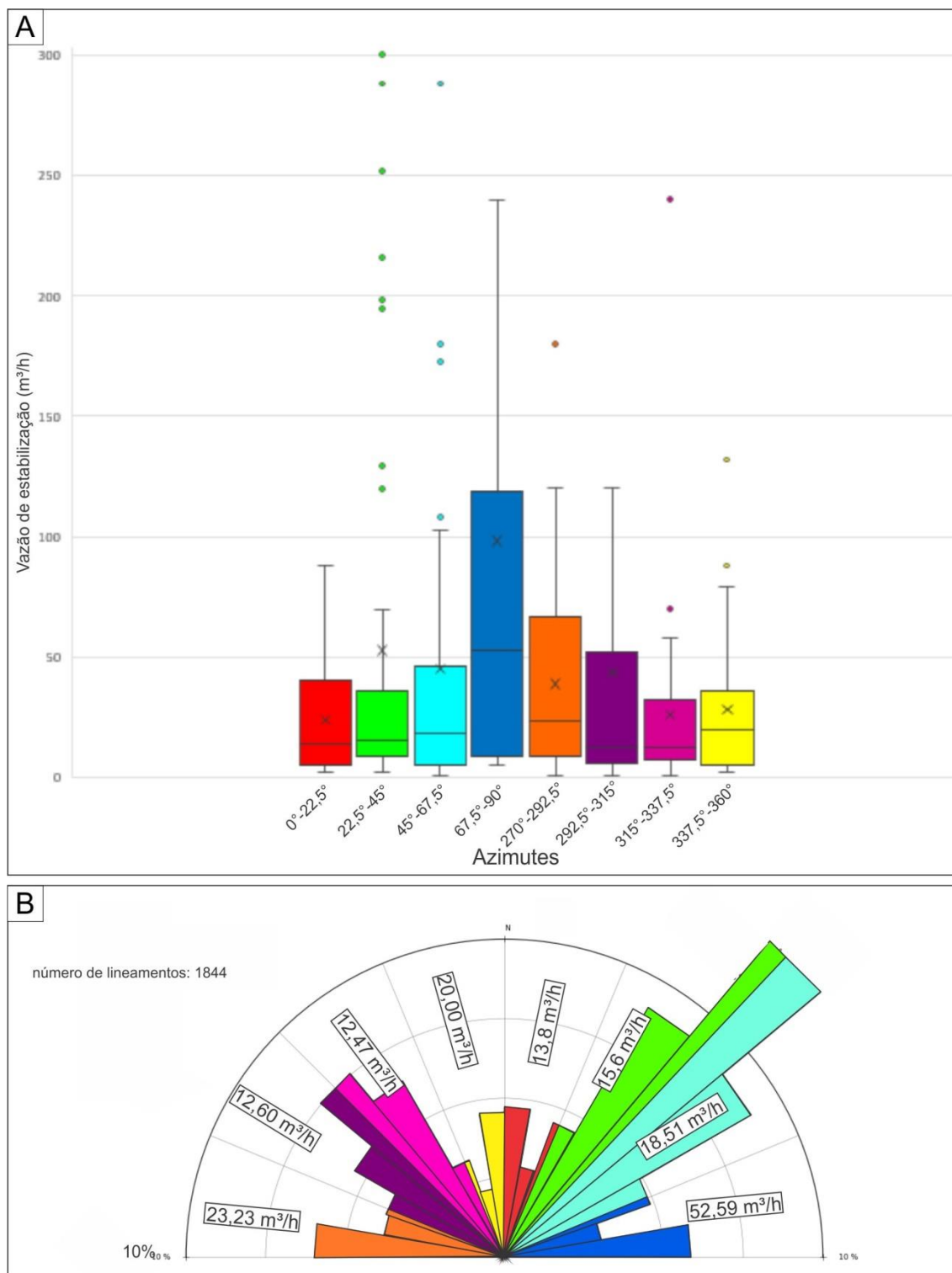


Figura 54 - Vazão dos poços associados às direções dos fotolineamentos. A) *Boxplots* das vazões para cada direção considerada; B) Diagrama de roseta das direções dos lineamentos em associação com as medianas das vazões de estabilização observadas em cada direção. Notas: As vazões *outliers* de 720 m<sup>3</sup>/h e 396 m<sup>3</sup>/h referentes aos azimutes de 67,5° - 90° e 292,5-315°, respectivamente, foram retiradas da imagem A para melhor adequação da escala de apresentação.

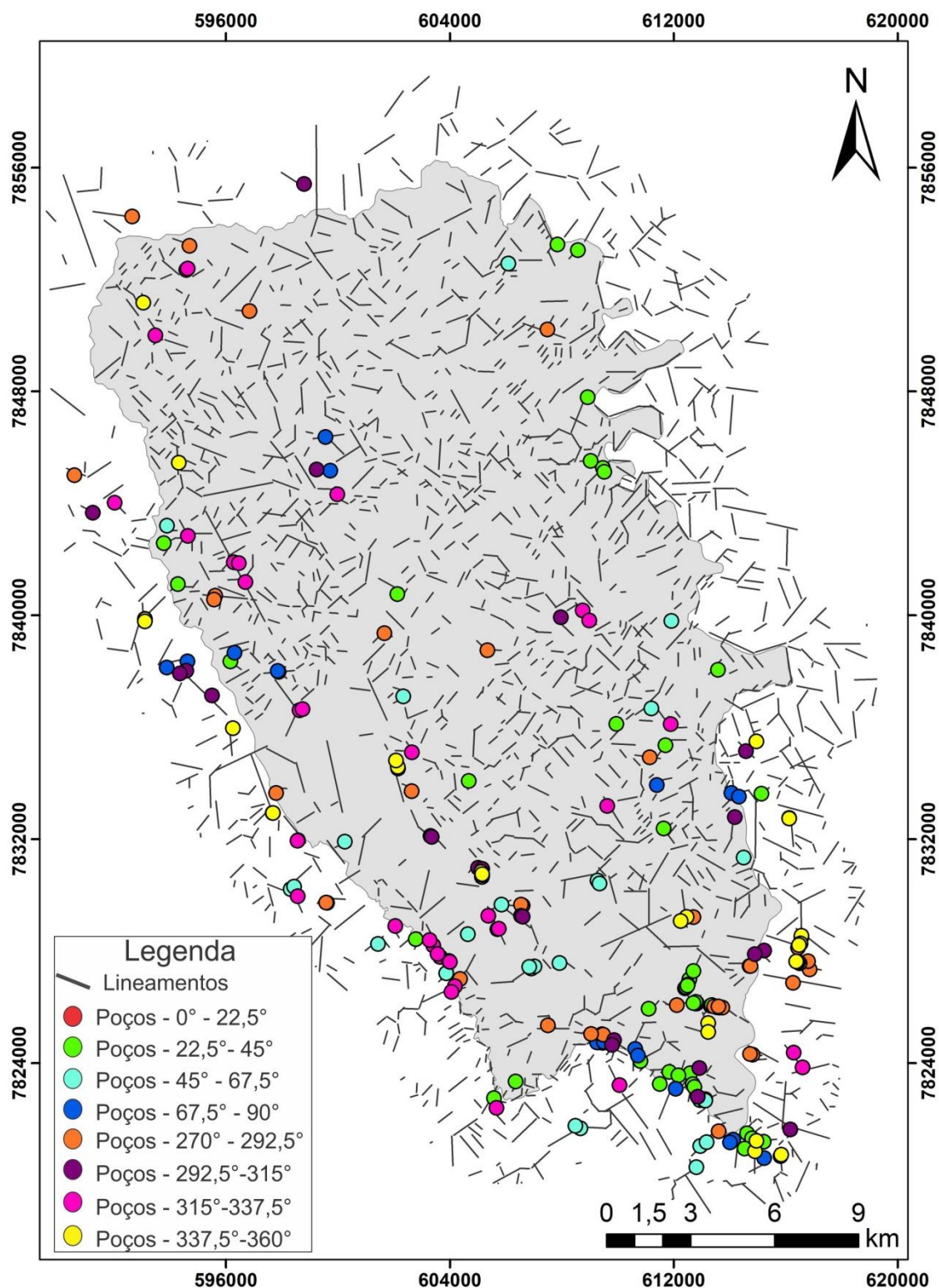


Figura 55 – Poços localizados a uma distância de até 200 metros dos lineamentos morfoestruturais, coloridos de acordo com a direção destes.

As vazões mais elevadas para os poços associados aos lineamentos de direções E-W e ENE-WSW podem ser resultado da configuração estrutural impressa na Etapa Compressiva E2Cm, com esforço geral de orientação aproximadamente E-W (Ribeiro *et al.* 2003). As fraturas E-W, paralelas ao sigma 1 tendem a ser mais abertas e, portanto,

mais condutivas do que aquelas N-S, perpendiculares ao vetor principal, o que é confirmado pelas vazões nos poços. Os paleodutos também ocorrem predominantemente na direção E-W o que evidencia a importância desta na circulação hídrica subterrânea da região.

As direções NNW apesar de se apresentarem bem marcadas nos lineamentos morfoestruturais e estarem provavelmente associadas às falhas normais de alto ângulo da primeira fase de deformação (etapa extensional), relacionam-se às menores vazões dos poços. Esse fato pode estar relacionado à sobreposição da estruturação Brasileira (Etapa Compressiva) que possivelmente reativou as estruturas pretéritas NNW, fechando-as.

## 6. CONCLUSÕES

Ensaio quali-quantitativos com traçadores corantes foram realizados na APA Carste Lagoa Santa e entornos. Um total de 22 resultados positivos para interconexões hídricas foram obtidos e abrangeram as sub-bacias definidas pelos córregos Palmeiras, Mocambo/Jaguara, Samambaia e Gordura.

Por intermédio dos ensaios quantitativos desvendou-se a proveniência de 68,3%, 13,0%, 70,2%, 41,3% das vazões nas surgências Gordura, Samambaia, Engenho e Mocambo. As velocidades médias aparentes ( $v$ ) calculadas para o fluxo de água nas rotas avaliadas variaram de  $8,90 \times 10^{-3}$  m/s a  $4,49 \times 10^{-2}$  m/s. Empregando-se no cálculo de velocidade a distância  $X_s$ , calculada a partir do fator de sinuosidade  $S$ , os valores obtidos variaram de  $1,34 \times 10^{-2}$  m/s a  $6,27 \times 10^{-2}$  m/s.

Considerando as interconexões diretas, onde mais de 85% da massa de corante injetada foi recuperada, observou-se um zoneamento espacial das velocidades, de modo que os maiores valores ocorrem na região norte da área - contribuições da Surgência Gordura, os valores intermediários ocorrem na região sul - contribuições do córrego Samambaia e as menores velocidades na porção central - contribuições da Surgência Mocambo. Para essas interconexões os volumes do aquífero variaram de  $1512,81 \text{ m}^3$  a  $38.246,4 \text{ m}^3$  e os diâmetros dos condutos, de 0,63 m a 2,40 m.

As interconexões hidráulicas apresentam majoritariamente sentido de fluxo para o setor leste, principalmente nos sentidos de  $N40^\circ-60^\circ E$  e  $N80^\circ-90^\circ E$ , em direção ao nível de base regional, o Rio das Velhas. Tais direções apresentam forte controle

estrutural, principalmente do acamamento em associação às fraturas.

A avaliação da vazão nos poços tubulares associados a lineamentos também evidenciou a importância das direções E-W no condicionamento da circulação hídrica subterrânea, de forma que as maiores vazões estão relacionadas às direções N80°-90°E (mediana de 52,59 m<sup>3</sup>/h), seguida das direções N80°-90°W (mediana de 23,23 m<sup>3</sup>/h). As direções entre 22,5°-45°, apesar de apresentarem mediana de 15,6 m<sup>3</sup>/h, também merecem destaque em função do valor da média de 52,76 m<sup>3</sup>/h e do elevado número de poços com altas vazões. Os menores valores são observados nas direções 315° – 337,5°, seguido das direções 292,5° - 315° e 0° – 22,5°, com medianas de 12,47 m<sup>3</sup>/h, 12,60m<sup>3</sup>/h e 13,80 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

A técnica empregada mostrou ser uma importante ferramenta para: i) conhecimento do sentido dos fluxos subterrâneos; ii) quantias das contribuições das fontes originárias; iii) velocidades dos fluxos, diâmetros dos condutos e volumes das rotas investigadas; iv) avaliação da configuração dos condutos a partir das curvas de passagem; v) conexão entre bacias hidrográficas, propiciando uma compartimentação mais consistente das bacias hidrogeológicas e vi) avaliação das principais estruturas e direções no condicionamento do fluxo hídrico subterrâneo.

Tendo em vista a vulnerabilidade natural dos aquíferos carsticos em absorver e em conduzir contaminantes, recomenda-se a preservação das surgências cársticas, mas principalmente dos sumidouros avaliados e suas bacias de captação.

## 7. RECOMENDAÇÕES

Apesar dos resultados obtidos no estudo, ainda existem uma série de questões que não foram respondidas e que poderão ser alvo de novas investigações:

- Realização da injeção de traçadores nos sumidouros Zé Anjo (UTM X 607022,2 e UTM Y 7825053,73 WGS84, Zona 23S) e da Lagoa do Índio (UTM X 606861,97 e UTM Y 7824851,07 WGS84, Zona 23S), localizados a sul da Lagoa dos Mares, município de Pedro Leopoldo e monitoramento qualitativo nas lagoas da proximidade e quantitativo na Surgência Moinho Velho/Retiro (UTM X 608999,47 e UTM Y 7825317,73 WGS84, Zona 23S).
- Mapeamento de sumidouros para investigação da proveniência de importantes surgências como Poço Azul (ID-3), Palestina I e II (ID-6 e 7), Jaguará (ID-18),



Janela Cárstica Cocho D'água (ID-25), Surgência Cauê (ID-29), Lagoa Bom Jardim (ID-40), Goiabeiras (ID-50) e Surgência do Bebida/Leo (UTM X 597495 e UTM Y 7849934 WGS84, Zona 23S).

- Gerar um modelo numérico de fluxo, levando-se em consideração os parâmetros hidrodinâmicos obtidos no presente estudo.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alkmim, F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações Almeidianas ao delimita-lo. In: Mantesso-Neto et al. (eds) Geologia do Continente SulAmericano. Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Becca, p.17-35.

Alkmim, F. F., Martins-Neto, M.A. 2001. A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Martins-Neto, M.A., Pinto, C.P. (Eds.), Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Minerais. SBG/MG, Belo Horizonte, p. 9-30.

Almeida, F. F. M. 1977. O Cráton do São Francisco. Rev. Bras. Geoc., 7: 285-295.

ALOS PALSAR. 2016. Modelo Digital de Elevação com resolução de 12,5 metros. Disponível em: <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/https://search.asf.alaska.edu/> - /. Último acesso em: 29 de julho de 2016.

Amaral, D. G. P. 2018. Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste Lagoa Santa (MG). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. 2019. Indicadores do Mercado de Transporte Aéreo, 2019. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/consulta-interativa/demanda-e-oferta-ranking-de-aeroportos> > Último acesso em: 18 de Janeiro de 2020.

Andrade, I. B., Amorim, J. B. 2018. Mapeamento geológico com ênfase na relação hidráulica entre o complexo granítico-gnáissico com o grupo Bambuí. Trabalho de Graduação. Universidade Federal de Minas Gerais.

- Atkinson, T. C., Smith, D. I., Lavis, J. J., and Whitaker, R. J. 1973. Experiments in tracing underground Waters in limestones. *Journal of Hydrology*, 19: 323-349.
- Auler, A. S. 1994. Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos Pedro Leopoldo Karst, Brazil. Dissertação de mestrado. Western Kentucky University.
- 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. Universidade de São Paulo.
- Bakalowicz, M. 2013. Epikarst processes. In: Shroder, J. , Frumkin, A. (Ed.) (Org.), *Treatise on Geomorphology*. Elsevier Inc, San Diego. 6, p. 164–171.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00100-7>
- Bandow, F. 1950. Lumineszenz. Ergebnisse und Anwendung in Physik, Chemie und Biologie. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft m.b.H., Stuttgart, 255 p.
- Batista, R. C. B. 2009. Caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo (CNPMS) em Sete Lagoas – MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Bau, H., Dorries, U., Zaska, J. 1971. Anwendung der Fluorometrie zur Verteilungsmessung in der Panzenschutztechnik. *Landtech. Forsch.* 19: 93-101.
- Bedmar, A. P. 1972. Isótopos en Hidrologia. Madri, Editorial Alhambra, 328 p.
- Behrens, H. 1982. Verfahren zum quantitativen Nachweis von nebeneinander vorliegenden Fluoreszenztracern. *Beitr. Geol. Schweiz—Hydrologie*. 28: 101-112.
- Behrens, H. 1986. Water tracer chemistry: A factor determining performance and analytics of tracers. In: 5° International Symposium on Underground Water Tracing. Atenas, p. 121–133.
- Benischke R. 1989. *Fluorescent Tracers in Hydrology: principles, instrumentation, physico-chemical, properties, analytics*. Austria, Institute of Hydrogeology & Geothermics-Joanneum Research, 64 p.

- Benischke, R., Goldscheider, N., Smart C.C. 2007. Tracer techniques. In: Goldscheider N. & Drew D. (Eds.). *Methods in Karst Hydrogeology. International Contributions to Hydrogeology*, London, Taylor & Francis, p. 147-170.
- Berbert-Born, M. 2002. Carste de Lagoa Santa, MG - Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: Schobbenhaus, C., Campos, D.A., Queiroz, E.T.; Winge, M.; Berbert-Born, M. (Eds.). *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. 1. Brasília, DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), p. 415-430.
- Berbert-Born, M.L.C., Horta, L.C.S. 1994. Informações básicas para a gestão territorial: espeleologia - inventário das cavidades naturais da região de Matozinhos-Mocambo. Belo Horizonte, CPRM, 121p. (Projeto VIDA, Espeleologia, v.1).
- Braga, L. T. P. 2014. Recarga do tipo Localizada em Ambiente Semiárido: Estudo de Caso em Dolinas da Bacia do rio Verde Grande, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Cabral, J. A. L. 1994. Informações Básicas para a Gestão Territorial – Região de Sete Lagoas e Lagoa Santa, Minas Gerais. CPRM.
- Cambier, P. H. M. M. G. 2011. Simulação computacional tridimensional da formação e evolução de plataformas carbonáticas. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Cardoso, F. A. 2019. Natural Background Levels of inorganic elements in the groundwaters of the Lagoa Santa karst region, Minas Gerais, Brazil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Carneiro, F. A. 2013. Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Costa, M. T., Branco, J. J. R. (1961). Roteiro de excursão Belo Horizonte-Brasília. In: 14º Congresso Brasileiro de Geologia, Florianópolis, SBG, v. 15, p. 9-25.
- Coutard, J. P., Kohler, H. C., Journaux, A. 1978. Comentário do Mapa do Carste. Região de Pedro Leopoldo-Lagoa Santa, MG. Brasil. Laboratoire D'analyse et de

Cartographie des Formations Superficielles de l'université de Caen, et le Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen – France. Escala 1:50.000.

Dardenne, M. A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. 30° Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, SBG, v. 2, p. 597-610.

Ferreira, C. F., Uagoda, R. E. S. 2019. Tipologias do Carste e Classificações de Dolinas: uma revisão. Revista Caminhos de Geografia, 20: 519-537.

<http://dx.doi.org/10.14393/rcg207044169>.

Field, M. S. 1999. The Qtracer program for tracer breakthrough curve analysis for karst and fractured-rock aquifers. Washington, Environmental Protection Agency, 137 p.

Field, M. S., Wilhelm, R. G., Quinlan, J. F., Aley, T. J. 1995. An assessment of the potential adverse properties of fluorescent tracer dyes used for groundwater tracing. Environmental Monitoring and Assessment, 38: 75–96.

Ford, D. C., Williams P. 1989. Karst geomorphology and hydrology. Londres, Unwin Hyman, 601 p.

Ford, D. C.; Williams, P. W. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 562 p.

Freeze, R.A and Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 604 p.

Freitas, P. M. C. 2009. Estudo de intercomunicação hidráulica superficial – subterrânea no carste da área periurbana de Pains/MG, utilizando-se traçador rodamina WT. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.

Galvão, P. H. F. 2015. Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Gaspar, E. 1987. Flowthrough hydrokarstic structures. Modern Trends in Tracer Hydrology. Boca Raton, CRC Press, 2, 137 p.

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.

- Geyer, T., Birk, S., Licha, T., Liedl, R., Sauter, M. 2007. Multitracer test approach to characterize reactive transport in karst aquifers. *Groundwater*, 45: 36-45.
- Goldscheider, N. 2005. Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochifien-Gottesacker. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 98: 1–17.
- Goldscheider, N., Meiman, J., Pronk, M., Smart, C. 2008. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, Bologna, 37: 27-40.
- Goldscheider N. & Drew, D. 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*. International Contributions to Hydrogeology, 26, London, Taylor & Francis, 264 p.
- Guerra, A. M. 1986. *Processo de Carstificação e Hidrogeologia do Grupo Bambuí na Região de Irecê-Ba*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Hadi, S., Leibundgut, C., Friedrich, K., Maloszewski, P. 1997. New fluorescent tracers. In: Kranic A (ed) *Tracer Hydrology*. Balkema, Rotterdam, pp 55–62.
- Herrmann, G., Kohler, H. C., Duarte, J. C., Carvalho, P. G. S. (Org.). 1998. *APA Carste de Lagoa Santa – Gestão Ambiental*. Belo Horizonte, IBAMA/CPRM, 57 p.
- Hidrovia, 2018. *Estudo de conexões hídricas subterrâneas nos aquíferos da região cárstica de Lagoa Santa/MG. Aplicação das Técnicas de Traçadores Corantes*. Relatório Interno – Universidade Federal de Minas Gerais/Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa.
- IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. 1966. *Guide to the Safe Handling of Radioisotopes in Hidrology*. Viena, IAEA, 38 p.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2010. *Informação municipal básica*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama>. Último acesso em: 20 de Dezembro de 2018.
- Käss, W. 1998. *Tracing technique in geohydrology*. Roterdão, Balkema. 592 p.
- Kilpatrick, F.A., Cobb, E.D. 1985. *Measurement of discharge using tracers*. Wasington, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 3, chap. A16, 52 p.

- Kuchenbecker, M.; Atman, D.; Costa, R.D.; Pedrosa-Soares, A.C.; Babinski, M. 2016. A Formação Gorutuba: sedimentação litorânea a continental na margem leste da Bacia Bambuí (MG). *Geologia USP, Série Científica*, 16(2): 67-81.
- Leibundgut, C. 1974. Fluoreszierende Markierfarbstoffe in der Hydrologie. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Bern*. Berne, Mitt. Naturforsch 31: 63–84.
- Leibundgut, C., Maloszewski, P. Kull, C. 2009. *Tracers in Hydrology*. Chichester, JohnWiley & Sons Ltd, 415 p.
- Lima, F. M. F. S.; Fonseca, F.H. R.; Matinaga, L. K. 2017. *Geologia e Hidrogeologia da Bacia Gordura-Escrivânia, MG*. Trabalho de Graduação (Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 84p.
- Lladó, N. L. 1970. *Fundamentos de hidrogeologia cárstica*. Madrid, Editorial Blume.
- Llopis, N. 1970. *Fundamentos de Hidrogeología Kárstica*. Madrid, Editorial Blume, 269 p.
- Magalhães, C. C. C., Silva, T. G. A. 2018. *Mapeamento Hidroestratigráfico dos Aquíferos Cársticos nos Municípios de Matozinhos e Pedro Leopoldo, MG*. Trabalho de Graduação (Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 91p.
- Manoel Filho, J. 2008. Ocorrência das águas subterrâneas. In: Feitosa, F. A. C. e Filho, J. M. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 3ed. Rio de Janeiro, CPRM: LABHID, p.53-75.
- Massei, N., Wang, H. Q., Field, M. S., Dupont, J. P., Bakalowicz, M., Rodet, J. 2006. Interpreting tracer breakthrough tailing in a conduit-dominated karstic aquifer. *Hydrogeology Journal*, 14(6): 849-858.
- Meneses, I. C. R. R. C. 2003. *Análise Geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG*. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- Milanović, P. 2004. *Water resources engineering in karst*. Boca Raton, CRC Press, 330 p.

- Mull, D. S., Liebermann, T. D., Smoot, J. L., Woosley, L. H. 1988. Application of dye-tracing techniques for determining solute transport characteristics of ground water in karst terranes. Atlanta, Environ. Prot. Agency – EPA, 103 p.
- Oliveira, M. A. M. 1967. Contribuição à geologia da parte sul da Bacia do São Francisco e áreas adjacentes. Petrobrás, Série Ciência Técnica-Petróleo, 3: 71-105.
- Palmer, A. N. 1991. Origin and morphology of limestone caves. Bulletin of Geological Society of America, v. 103 (1): 1-21.
- Paula, R. S. 2019. Modelo Conceitual de Fluxo dos Aquíferos Pelíticos-Carbonáticos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Paula, R.S. de, Velásquez, L.N.M. 2019. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Rev. Águas Subterrâneas, 33, 2, 119-133.
- Peñaranda Salgado, J. R. 2016. Condicionamento estrutural e litológico da porosidade cárstica da formação Sete Lagoas, Município de Sete Lagoas (MG). Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.
- Pessoa, P. F. P. 1996. Caracterização hidrogeológica da Região Cárstica de Sete Lagoas, MG: Potencialidades e Riscos. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.
- Pessoa, P. F. P. 2005. Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos da Região de Lagoa Santa, MG. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Pessoa, P. F. P., Mourão, M. A. A. 1998. Levantamento Hidrogeológico. In: IBAMA; CPRM; (Eds.). APA Carste de Lagoa Santa - Meio físico. Belo Horizonte, 36 p. (Série APA Carste de Lagoa Santa - MG).
- Piló, L. B. 1998. Morfologia cárstica e materiais constituintes: Dinâmica e Evolução da Depressão Poligonal Macacos-Baú - Carste de Lagoa Santa, MG. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Piló, L. B. 2000. Geomorfologia cárstica (Revisão de Literatura). Revista Brasileira de Geomorfologia, 1: 88-102.

RadamBrasil. 1982. Folha SD.23: Brasília. Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro, Levantamento de recursos naturais, 29, 644 p.

Ribeiro, G. R. 2020. Compartimentação dos Fluxos do Sistema Hidrogeológico Cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  e  $^3\text{H}$  na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.

Ribeiro, C. G., Meireles, C. G., Lopes, N. H. B., Arcos, R. E. C. 2016. Levantamento geológico estrutural aplicado aos fluxos dos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Trabalho de Graduação (Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 157p.

Ribeiro, J.H., Tuller, M.P., Filho, A.D., Padilha, A.V., Córdoba, C.V. 2003. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais - Relatório final, escala 1:50.000. 2ª ed. Belo Horizonte, CPRM, 54 p.

Ribeiro, C. G., Velásquez, L. N. M., Paula, R. S., Meireles, C. G., Lopes, N. H. B., Arcos, R. E. C., Amaral, D. G. P. 2019. Análise dos fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Águas Subterrâneas*, 33(1): 12-21, 26. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i1.29148>.

Schiesser, W. E, Silebi, C. A. 1997. Computational Transport Phenomena. Numerical Methods for the Solution of Transport Problems. Cambridge, Cambridge University Press.

Schöll, W. U. 1976. Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco. In: 29º Congresso Brasileiro de Geologia. Ouro Preto, Anais, v.2, p. 207-231.

Silva, A. B. 1984. Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Silva, A. B. 2008. Hidrogeologia de Meios Cársticos. In: Feitosa, F. A. C. e Filho, J. M. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3ed, Rio de Janeiro, CPRM/LABHID, p. 153-174.



Silva, A. B. da, Moreira, C.V.R., Auler, A.S. 1987. Estudo da Dinâmica dos recursos hídricos da região cárstica dos municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos. Belo Horizonte, CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. 32p.

Silva, J. C. S. 2003. Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na Região Cárstica de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.

Slavec, P. 1976. Pesquisas do conjunto hidrológico das Areias, Municípios de Iporanga, estado de São Paulo. Espeleo-tema: Reedição Histórica, 8: 16-22.

Smart, C. C. 1988. Artificial tracer techniques for the determination of the structure of conduit aquifers. *Groundwater*, 26(4): 445-453.

Smart, P.L., Smith, D.I. 1976. Water tracing in tropical regions, the use of fluorometric techniques in Jamaica. *J. Hydrol.* 30: 179-195.

Tayer, T. C. 2016. Avaliação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero cárstico da APA de Lagoa Santa, MG, utilizando o método COP. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.

Teodoro, M. I. P., Velásquez, L. N. M., Fleming, P. M, Paula, R. S., Souza, R. T., Doi, B. M. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, 33(4): 392-406. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i4.29532>.

Uhlein, A., Baptista, M. C., Seer, H. J., Caxito, F. A., Uhlein, G. J., Dardenne, M. A. 2011. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): sistema deposicional de leque submarino em Bacia de Ante-País. *Geonomos*, 19(2): 163-172.

Velásquez, L.N.M., Andrade, I.B., Ribeiro, C.G., Amaral, D.G.P., Vieira, L.C.M., Cardoso, F.A., Paula, R.S., Silva, P.H.P., Souza, R.T., Almeida, S.B.S. 2018. Projeto de adequação e implantação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas com cavidades cársticas da Bacia do Rio São Francisco aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Relatório parcial, Processo FUNDEP/GERDAU/UFMG n22.317/Plano de ação nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da bacia do São Francisco. Pan Cavernas do São Francisco.

- Viana, H.S., Kohler, H.C., Tavares, V.P. (Org.). 1998. APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico. Volume I. Belo Horizonte, IBAMA/CPRM, 301p.
- Vieira, L. C. M. 2015. Características da Geologia e Geoquímica do Grupo Bambuí na APA Carste de Lagoa Santa, MG. Trabalho de Graduação (Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 98p.
- Vieira, L. C. M. 2018. Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.
- White, W.B., 1988. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. Nova Iorque. Oxford Univ. Press, 464 p.
- White, W.B. 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*, 65: 85-105.
- White, W.B. 2003. Conceptual models for karstic aquifers. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers* 1, 1, 6p.
- Williams, P. W. 1983. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61: 45–67. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90234-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90234-2)
- Wilson, J. F., Cobb, E. D., Kilpatrick, F.A., 1986. *Fluorometric Procedures for Dye Tracing*. U.S. Geological Survey, Denver, CO.
- Worthington, S. R. H. 1991. *Karst Hydrology of the Canadian Rocky Mountains*. Msc Thesis. McMaster University.
- Worthington, S. R. H. 1999. A comprehensive strategy for understanding flow in carbonate aquifers. In: Palmer, A.N., Palmer, M.V., Sasowsky, I.D. (eds). *Karst modelling*. Symposium proceedings, Charlottesville, Karst Water Institute, Spec Publ 5, p. 30–37.
- Worthington, S. H. R. 2005. Hydraulic and geological factors influencing conduit flow depths. *Caves and Karst Science*, v.31, 123-134.
- Worthington, S. R. H. 2007. Groundwater residence times in unconfined carbonate aquifers. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69: 94-102.
- Worthington, S. R. H., Ford, D. C. 2009. Self-Organized Permeability in Carbonate Aquifers. *Ground Water*, 47: 326-336.

Zalán, P. V., Romeiro-silva, P. C. 2007. Bacia do São Francisco. Boletim de Geociências da Petrobrás, 15: 561-571.

## **APÊNDICE A – Pontos de monitoramento**



Surgência Lagoa da Mata (ID-2)



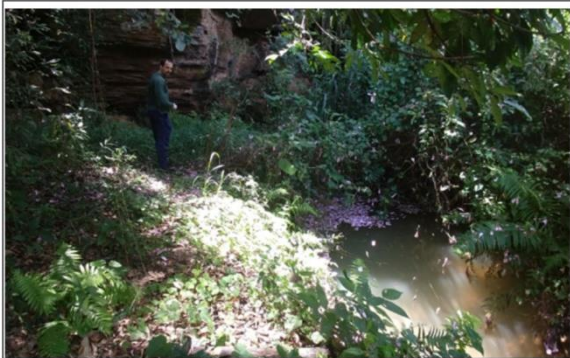
Surgência Poço Azul (ID-3)



Surgência Olho D'água (ID-4)



Surgência Gameleira (ID-5)



Surgência Palestina I (ID-6)



Surgência Palestina II (ID-7)



Poço Quintas da Lagoa (ID-8)



Poço E1 - Fidalgo Copasa (ID-9)



Poço C01 - Fidalgo Copasa (ID-10)



Piezômetro Cerca Grande P6 (ID-13)



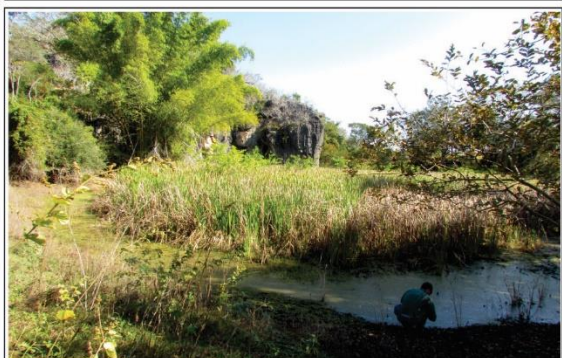
Piezômetro Cerca Grande P5 (ID-14)



Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1 (ID-15)



Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2 (ID-16)



Lagoa Maciço Jaguará (ID-17)



Surgência Jaguará (ID-18)



Poço Jaguará (ID-19)



Lago Sucuri (ID-20)



Surgência Mocambo (ID-21)



Gruta Santo Antônio P1 (ID-22)



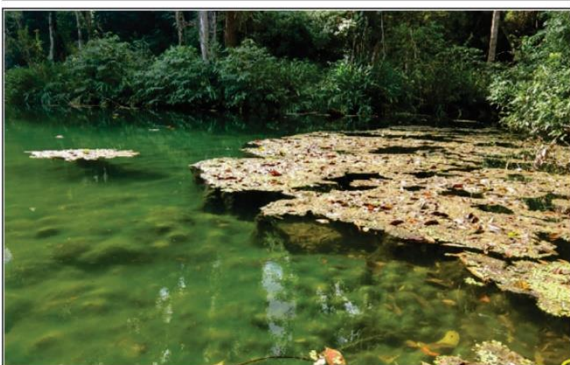
Gruta Água Fria (ID-24)



Janela Cárstica Cocho D'água (ID-25)



Surgência Engenho (ID-26)



Surgência Sítio Santo Antônio (ID-28)



Surgência Cauê (ID-29)



Surgência Antônio Augusto (ID-30)



Reservatório do Poço da Fz. Lagoa Funda (ID-31)



Reservatório do Poço Sr Afonso (ID-33)



Sumidouro Poços (ID-34)



Lagoa Fluminense (ID-35)



Piezômetro Cerca Grande P1 (ID-11)



Piezômetro Cerca Grande P4 (ID-12)



Surgência Gordura (ID-38)





Poço Zé Irene (ID-39)



Piezômetro Gruta Morro Redondo (ID-32)



Lagoa Bom Jardim (ID-40)



Poço Copasa Matozinhos (ID-42)



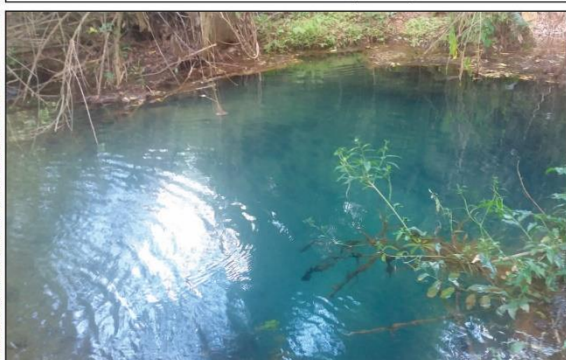
Gruta da Lagoa (ID-45)



Montante Veredas (ID-46)



Goiabeira Braço Esquerdo (ID-49)



Surgência Goiabeiras (ID-50)



Dolina Goiabeiras (ID-51)



Sumidouro Goiabeiras (ID-43)



Surgência Samambaia (ID-53)



Caixa D'água da Mina (ID-54)



Caixa D'água da Mina (ID-54)



Poço Confins (ID-56)

## **APÊNDICE B – Artigo Científico**

## Artigos

# Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais

## Hydrodynamic of the Bambuí Karst Aquifer System, with the use of dye tracers, in the Lagoa Santa region, Minas Gerais

Maria Isabel Teodoro<sup>1</sup>; Leila Nunes Menegasse Velásquez<sup>1</sup>; Peter Marshall Fleming<sup>2</sup>; Rodrigo Sérgio Paula<sup>1</sup>; Rogério Tadeu Souza<sup>1</sup>; Bruno Mamoru Doi<sup>3</sup> ✉

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG

<sup>2</sup> Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CENEN/CDTN), Belo Horizonte, MG

<sup>3</sup> Hidrovia – Hidrogeologia e Meio Ambiente

✉ [mariaisa2107@hotmail.com](mailto:mariaisa2107@hotmail.com), [menegase@yahoo.com.br](mailto:menegase@yahoo.com.br), [pmf@cdtn.br](mailto:pmf@cdtn.br), [rodrigo.spdm@yahoo.com.br](mailto:rodrigo.spdm@yahoo.com.br), [rtssouza1@gmail.com](mailto:rtssouza1@gmail.com), [brunoambiental@yahoo.com.br](mailto:brunoambiental@yahoo.com.br)

### Palavras-chave:

Hidrogeologia cárstica.  
APA Carste de Lagoa Santa.  
Traçadores corantes.  
Interconexões hidráulicas.

### Keywords:

Karst hydrogeology.  
APA Karst of Lagoa Santa.  
Dye tracer.  
Hydraulic interconnections.

Revisado por pares.

Recebido em: 07/04/2019.

Aprovado em: 22/10/2019.

### Resumo

A área estudada localiza-se a 30 km a norte de Belo Horizonte e engloba a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa. A Formação Sete Lagoas é a principal unidade aflorante, configurando uma geomorfologia cárstica diversa, caracterizada por canyons, vales cegos, dolinas e cavernas. Em subsuperfície, uma rede de condutos forma aquíferos cársticos que abrigam importantes reservas hídricas, que vêm sofrendo riscos qualitativos e quantitativos face a acentuada pressão da expansão demográfica e industrial. Empregando-se a técnica de injeção de traçadores corantes, procurou-se estabelecer as interconexões hidráulicas, condições hidrodinâmicas das rotas de fluxo, configurações da recarga, circulação e descarga desses aquíferos. Foram executados dez ensaios quali-quantitativos utilizando Fluoresceína e Rodamina WT. Resultados positivos para interconexões hídricas foram observados em sete ensaios, desvendando-se a proveniência de 68,3%, 13,0%, 70,2%, 41,3% das descargas em quatro surgências. As velocidades médias aparentes variaram de  $9,5 \times 10^{-3}$  m/s a  $4,49 \times 10^{-2}$  m/s e de  $1,43 \times 10^{-2}$  m/s a  $6,27 \times 10^{-2}$  m/s considerando-se o fator de sinuosidade da rota, o que evidencia a alta velocidade dos fluxos.

### Abstract

The study area is located 30 km to the north of Belo Horizonte and encompasses the Environmental Protection Area (APA, in the Portuguese acronym) Karst of Lagoa Santa. The Sete Lagoas Formation is the main outcropping unit, configuring a diverse karst geomorphology, characterized by canyons, blind valleys, dolines and caves. In the subsurface, a network of conduits forms karst aquifers that shelters important water reserves, which have been suffering qualitative and quantitative risks due to the intense pressure of demographic and industrial expansion. Employing the dye tracer injection technique, it has been an attempt to establish the hydraulic interconnections, flowpath hydrodynamic conditions, configurations of recharge, circulation and discharge of these aquifers. Ten qualitative-quantitative assays were executed using the Fluorescein and Rhodamine WT. Positive results for water interconnections were observed in seven assays, revealing the provenance of 68.3%, 13.0%, 70.2%, and 41.3% of the outflows in four springs. The average apparent velocities ranged from  $9.5 \times 10^{-3}$  m/s to  $4.49 \times 10^{-2}$  m/s and  $1.43 \times 10^{-2}$  m/s to  $6.27 \times 10^{-2}$  m/s considering the sinuosity factor of the route, the which evidence the high velocity of the flows.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i4.29532>

## 1. INTRODUÇÃO

O termo carste é usado para descrever um estilo característico de paisagens, contendo cavidades, dolinas, vales cegos e extensos sistemas aquíferos, desenvolvidos por processo de dissolução de rochas. Esses terrenos ocupam cerca de 20% da superfície terrestre e os aquíferos cársticos contribuem com 25% do abastecimento mundial de água (GOLDSCHIEDER; DREW, 2007; FORD; WILLIAMS, 2007).

A norte de Belo Horizonte (MG) localiza-se uma importante região cárstica e patrimônio espeleológico, histórico e cultural do país: a Área de Proteção Ambiental – APA Carste de Lagoa Santa (BERBERT-BORN, 2002). A região vem sendo objeto de investimentos de grande porte, nos setores industrial, minerário, agrícola, turístico e habitacional, implicando num crescente comprometimento dos recursos naturais, particularmente os hídricos. Aquíferos cársticos são naturalmente mais vulneráveis quando comparados a outros sistemas naturais, demandando uma avaliação diferenciada dos seus aspectos

hidrogeológicos e hidrológicos. Alguns questionamentos nortearam esse estudo: Qual a proveniência das surgências mais caudalosas? Qual o padrão dos fluxos subterrâneos? Existem fatores estratigráfico/estruturais que os controlam? A utilização de traçadores corantes tem se mostrado fundamental na investigação hidrogeológica de áreas cársticas (PLATA, 1993). No Brasil, a técnica vem sendo aplicada desde a segunda metade do século passado. Em 1973, espeleólogos empregaram traçadores fluorescentes ao tentar comprovar conexão no sistema cárstico Angélica-Bezerra, Goiás (AYUB, 1998). Silva (1984) usou traçadores isotópicos e químicos em aquíferos cársticos de Jaíba, MG. Em Iporanga – SP, testes qualitativos dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo foram realizados por Ayub (1998) e do sistema Lajeado-Bombas por Slavec (1976) e Genthner (2001). Freitas (2009), em estudo quantitativo, verificou a existência de interconexões hidráulicas no carste de Pains, MG.

A sudeste da área, Silva (2003) e Pessoa (2005) realizaram ensaios qualitativos e quantitativos, constatando rotas de fluxo subterrâneo no entorno da mina Lapa Vermelha, Lagoa Santa. Auler (1994) realizou uma série de ensaios qualitativos com traçadores nas bacias hidrográficas Samambaia e Palmeiras-Mocambo.

Essa pesquisa buscou investigar, por meio de ensaios quantitativos e qualitativos, as interconexões hidráulicas, as condições hidrodinâmicas das rotas de fluxo e as configurações da recarga, circulação e descarga dos aquífero cársticos locais.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

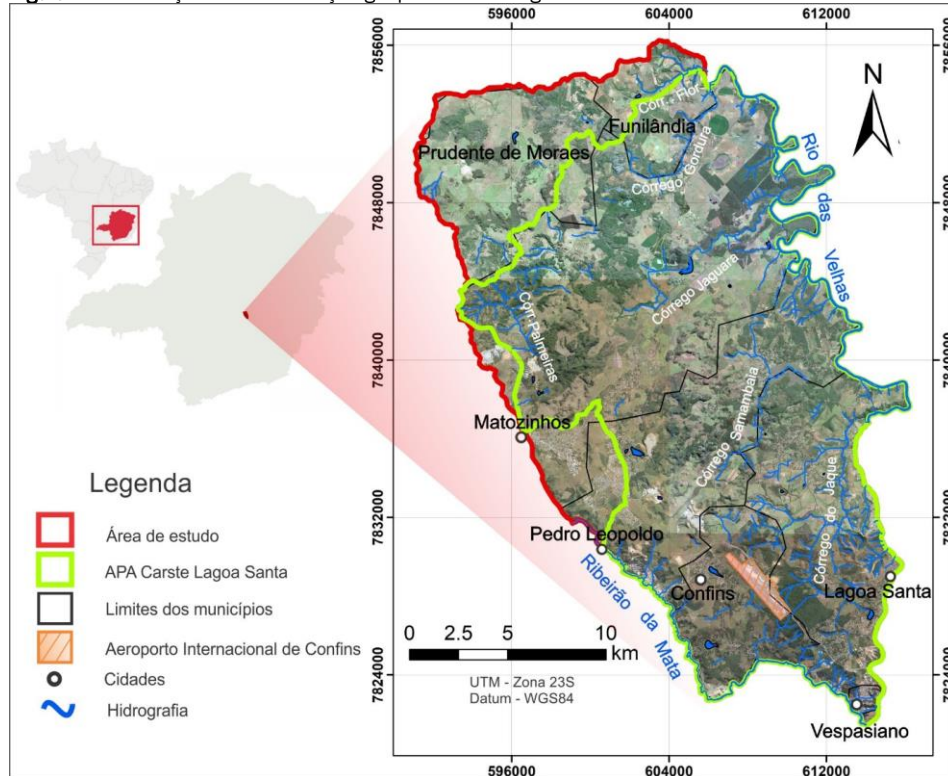
A área estudada localiza-se na porção central do estado de

MG, 30 km a norte de Belo Horizonte, estendendo-se por 504,92 km<sup>2</sup>. Engloba a APA Carste de Lagoa Santa (356 km<sup>2</sup>) e é limitada a leste pelo Rio das Velhas, a sul e oeste pelo Ribeirão da Mata e a norte por divisores de água. Abrange integralmente o município de Confins e parte dos municípios de Lagoa Santa, Vespasiano, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Prudente de Moraes e Funilândia (Figura 1), somando juntos aproximadamente 311.584 mil habitantes (IBGE, 2010). Manchas urbanas cobrem 15% da área, incluindo o Aeroporto Internacional de Confins (Figura 1).

A região é caracterizada por uma típica geomorfologia cárstica com recorrentes paredões, *canyons*, sumidouros, vales cegos e dolinas (BERBERT-BORN, 2002). O armazenamento e fluxo subterrâneo é condicionado principalmente pela rede de condutos parcialmente conectados à superfície por surgências, ressurgências, dolinas e cavernas, já que a permeabilidade da matriz é muito baixa e a porosidade secundária é quase totalmente preenchida por calcita (GALVÃO, 2015).

A precipitação média anual de 1980 a 2016, foi de 1232mm, com chuvas concentradas de outubro a março (INMET, 2019). Hidrologicamente, os níveis de base regionais correspondem ao rio das Velhas, descrito por Paula (2019) como o exutório do sistema, e seu afluente, o Ribeirão da Mata (Figura 1). Seis córregos desembocam no rio das Velhas, de forma direta: Jaque, Gordura, Flor e Jaguará, e de forma indireta: Palmeiras e Samambaia. Limites hidrográficos bordejam duas bacias fechadas: Escrivânia (NW) e Confins (S). Duas bacias (Retiro e Bom Jesus) drenam águas do carste através de surgências para o Ribeirão da Mata. Tal cenário mostra a complexa circulação das águas na área.

Figura 1 - Localização e caracterização geopolítica e hidrográfica da área estudada



Geologicamente, a área está inserida na porção sul do Cráton do São Francisco, sob os domínios da cobertura metasedimentar neoproterozoica do Grupo Bambuí (ALKIMIM; MARTINS-NETO, 2001). Ocorrem os litotipos da Formação Sete Lagoas (BERBERT-BORN, 2002; RIBEIRO et al., 2003), subdividida por Schöhl (1976) nos membros Pedro Leopoldo (inferior; calcários impuros e silicosos) e Lagoa Santa (superior; calcarenitos puros e homogêneos), superpostos pelas rochas siliciclásticas metapelíticas da Fm. Serra de Santa Helena. Essa sequência assenta-se discordantemente sobre as rochas metamórficas arqueanas do Complexo Gnáissico - Migmatítico Belo Horizonte, aflorantes no extremo SW da área.

As unidades locais do Grupo Bambuí apresentam grau de deformação moderado a alto. Ocorrem falhas de empurrão, fraturas, foliação sub-horizontal com lineações associadas, dobras intrafoliais, zonas de cisalhamento intra e interestratais, (RIBEIRO et al., 2003) que, muitas vezes, condicionaram os processos dissolutivos nas rochas gerando a porosidade terciária.

Quatro unidades hidrogeológicas são distinguidas na área, da base para o topo: 1) Aquífero fraturado do embasamento gnáissico; 2) Aquífero Cárstico Sete Lagoas, formado pelos calcários dos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa (PESSOA, 1996), cujo transporte e armazenamento ocorrem principalmente por meio de dutos e fraturas alargadas. Há preponderância de fraturas nas direções N10°-30°E e N80°-90°W e feições de dissolução na direção N70°-90°W (RIBEIRO et al., 2019) e N20°E e N40°E (PEÑARANDA-SALGADO, 2016), com caimento suave para leste. O processo de dissolução está principalmente atrelado à interseção entre os planos de fraturas e a superfície de acamamento (PESSOA, 2005; PEÑARANDA-SALGADO; 2016; RIBEIRO et al., 2019). A geoquímica das rochas é também outro fator determinante na formação da porosidade terciária, de modo que o Membro Lagoa Santa é mais susceptível à dissolução em relação ao Membro Pedro Leopoldo, devido aos baixos teores médios de MgO e de resíduo insolúvel (PEÑARANDA-SALGADO; 2016); 3) Aquífero/Aquitardo Santa Helena; 4) Aquífero de Cobertura, inclui aluviões, colúvios e lateritas, que possuem importante papel na recarga dos aquíferos subjacentes.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Realizaram-se dez ensaios com traçadores corantes visando se caracterizar os fluxos permanentes na zona do endocarste. Além dos dados geológicos, geomorfológicos e estruturais existentes, o planejamento foi apoiado nos estudos qualitativos de Auler (1994), que empregou os traçadores artificiais fluoresceína e branqueador óptico. Novos ensaios foram adicionados, envolvendo 57 pontos (Tabela 1; Figura 2).

Foram selecionados os traçadores corantes Fluoresceína e Rodamina WT, amplamente utilizados em estudos de hidrologia cárstica e de conexão hídrica (MULL et al., 1988), em função das altas solubilidade e detectabilidade (limite de 0,002 µg/L para a Fluoresceína e 0,006 µg/L para Rodamina WT; EPA, 1999), além de uma composição orgânica não contaminante (FIELD et al., 1995).

Os pontos escolhidos para a injeção dos traçadores foram sumidouros, piezômetros e condutos subterrâneos hidrologicamente ativos. Os pontos de monitoramento de recuperação dos traçadores foram surgências, piezômetros e poços de produção em operação. Previamente a cada ensaio instalou-se carvão ativado e realizou-se a coleta manual de água em frascos âmbar de 20 mL nos pontos que seriam monitorados para avaliação fluorescência natural (*background*), evitando-se a interpretação de falsos positivos.

Para a detecção quantitativa dos traçadores nos pontos de monitoramento, foram instalados coletores automáticos (Figura 3A) – com coleta em intervalos de 1 a 2 horas em surgências -, e fluorímetros (Figura 3B e 3C) com medição automática a cada 10 min em surgências e poços tubulares. A detecção qualitativa foi realizada por meio de carvão ativado (Figura 3D e 3E) coletado diariamente durante o ensaio, em surgências, piezômetros e poços tubulares. Para maior confiabilidade dos resultados, também se realizou a coleta manual diária de água em todos os pontos monitorados, usando-se frascos âmbar de 20 mL (Figura 3E).

Tabela 1 - Pontos de injeção e detecção dos ensaios com traçadores corantes

(continua)

ID	Ensaio	Ponto	Injeção/Detecção	UTM E (X)	UTM N (Y)	Cota Z (m)
1	<b>E01</b>	<b>Gruta do Sumidouro</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>610955</b>	<b>7838934</b>	<b>646</b>
2	E01	Surgência Lagoa da Mata	Carvão Ativado	613217	7839218	653
3	E01	Surgência Poço Azul	Coletor Automático	612947	7839367	653
4	E01	Surgência Olho D'água	Carvão Ativado	612993	7840664	636
5	E01	Surgência Gameleira	Carvão Ativado	608452	7838099	662
6	E01	Surgência Palestina I	Carvão Ativado	608603	7838121	661
7	E01	Surgência Palestina II	Carvão Ativado	608583	7838168	664
8	E01	Quintas da Lagoa	Fluorímetro	612946	7837569	705
9	E01	Poço E1 - Fidalgo Copasa	Fluorímetro	608756	7840195	666
10	E01	Poço C01 - Fidalgo Copasa	Fluorímetro	608980	7839815	674
11	<b>E02</b>	<b>Piezômetro Cerca Grande P1</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>603868</b>	<b>7839762</b>	<b>743</b>
12	<b>E02</b>	<b>Piezômetro Cerca Grande P4</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>606328</b>	<b>7840743</b>	<b>814</b>
5	E02	Surgência Gameleira	Carvão Ativado	608452	7838099	662
6	E02	Surgência Palestina I	Coletor Automático	608603	7838121	661
7	E02	Surgência Palestina II	Coletor Automático	608583	7838168	664
13	E02	Piezômetro Cerca Grande P6	Carvão Ativado	605271	7840760	709
14	E02	Piezômetro Cerca Grande P5	Carvão Ativado	606582	7841213	791
15	E02	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	Carvão Ativado	602867	7841131	624
16	E02	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	Carvão Ativado	604865	7841341	638
17	E02	Lagoa Maciço Jaguará	Carvão Ativado	604388	7843944	659
18	E02	Surgência Jaguará	Fluorímetro	603591	7844335	659
19	E02	Poço Jaguará	Carvão Ativado	605169	7844919	654
20	E02	Lago Sucuri	Carvão Ativado	604690	7844354	656
21	E02	Surgência Mocambo	Carvão Ativado	601679	7842655	689
22	E02	Gruta Sto Antônio P1	Fluorímetro	606960	7842731	690
23	E02	Gruta Sto Antônio P2	Carvão Ativado	606960	7842731	690
24	<b>E03</b>	<b>Gruta Água Fria</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>604681</b>	<b>7834636</b>	<b>730</b>
25	<b>E03</b>	<b>Janela cárstica Cocho D'água</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>604828</b>	<b>7834927</b>	<b>711</b>
25	E03	Janela cárstica Cocho D'água	Fluorímetro	604828	7834927	711
26	E03	Surgência Engenho	Coletor Automático	606428	7834617	694
27	<b>E04</b>	<b>PZs próximos a Lagoa Sto Antônio</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>602843</b>	<b>7835138</b>	<b>737</b>
25	E04	Janela cárstica Cocho D'água	Fluorímetro	604828	7834927	711
24	E04	Gruta Água Fria	Carvão Ativado	604753	7834702	729
28	E04	Surgência Sítio Sto Antônio	Carvão Ativado	599455	7833028	728
29	E04	Surgência Cauê	Carvão Ativado	602993	7830211	740
30	E04	Surgência Antônio Augusto	Carvão Ativado	603665	7828841	726
31	E04	Poço Fz. Lagoa Funda	Carvão Ativado	603318	7832114	819
26	E04	Surgência Engenho	Coletor Automático	606428	7834617	694
32	<b>E05</b>	<b>Gruta Morro Redondo</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>599826</b>	<b>7839622</b>	<b>725</b>
21	E05	Surgência Mocambo	Coletor Automático	601679	7842655	689
18	E05	Surgência Jaguará	Fluorímetro	603591	7844335	659
33	E05	Poço Sr. Afonso	Carvão Ativado	601639	7839355	687
34	E05	Sumidouro Poções	Carvão Ativado	599263	7840407	705
35	E05	Lagoa Fluminense	Carvão Ativado	602477	7840065	667
11	E05	Piezômetro Cerca Grande P1	Carvão Ativado	603868	7839762	743
13	E05	Piezômetro Cerca Grande P6	Carvão Ativado	603868	7839762	709
12	E05	Piezômetro Cerca Grande P4	Carvão Ativado	603868	7839762	814
14	E05	Piezômetro Cerca Grande P5	Carvão Ativado	603868	7839762	791
17	E05	Lagoa Maciço Jaguará	Carvão Ativado	604388	7843944	659
36	E05	Poço Fz. Vista Alegre	Carvão Ativado	603868	7839762	711
15	E05	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	Carvão Ativado	602867	7841131	624
16	E05	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	Carvão Ativado	604865	7841341	638
22	E05	Gruta Sto Antônio P1	Carvão Ativado	606960	7842731	690
23	E05	Gruta Sto Antônio P2	Carvão Ativado	606960	7842731	690
20	E05	Lago Sucuri	Carvão Ativado	604690	7844354	656
37	<b>E06</b>	<b>Gruta Zé Irene</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>599476</b>	<b>7843640</b>	<b>692</b>
21	E06	Surgência Mocambo	Coletor Automático	601679	7842655	689
18	E06	Surgência Jaguará	Fluorímetro	603591	7844335	659
38	E06	Surgência Gordura	Fluorímetro	601795	7850545	653
20	E06	Lago Sucuri	Carvão Ativado	604690	7844354	656
17	E06	Lagoa Maciço Jaguará	Carvão Ativado	604388	7843944	659

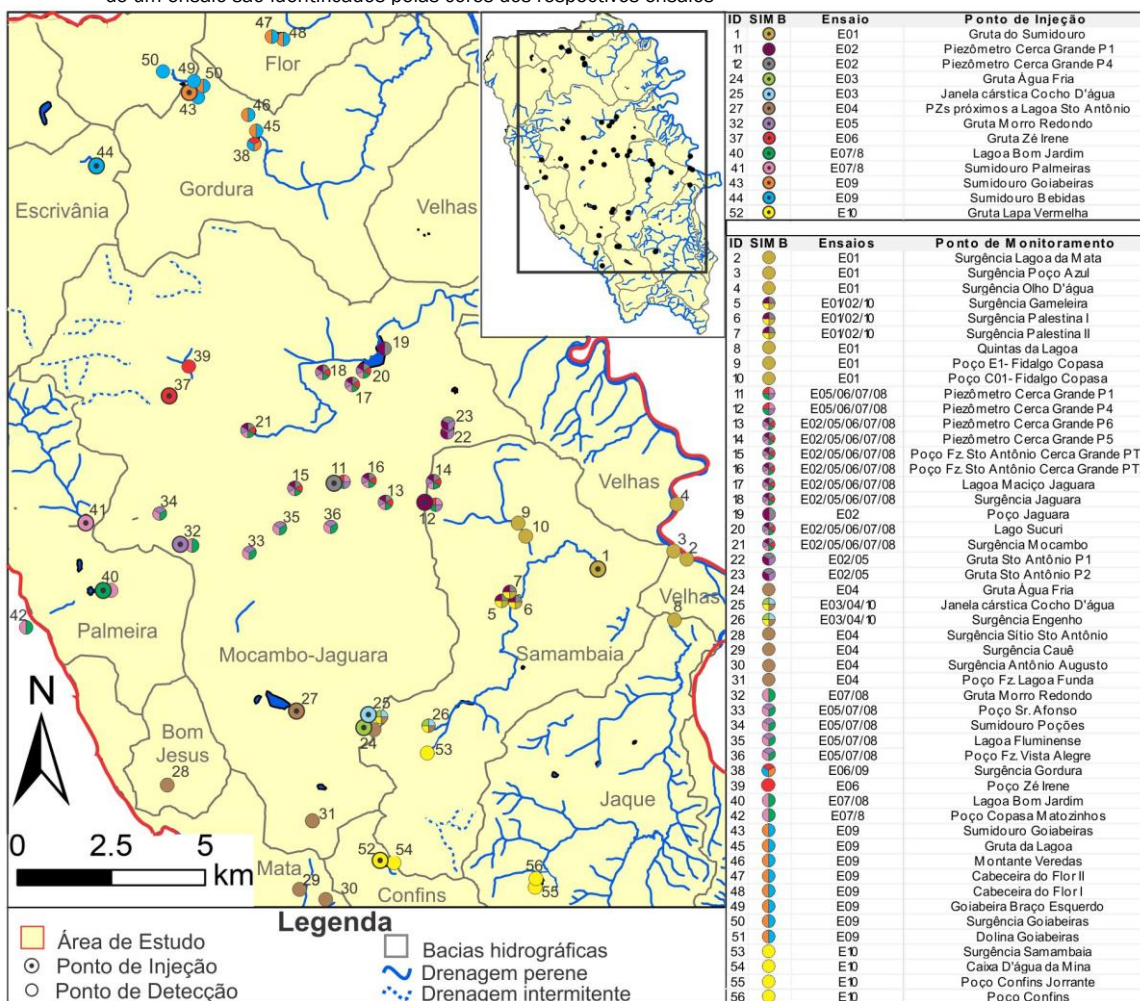
**Tabela 1** - Pontos de injeção e detecção dos ensaios com traçadores corantes (conclusão)

ID	Ensaio	Ponto	Injeção/Detecção	UTM E (X)	UTM N (Y)	Cota Z (m)
15	E06	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	Carvão Ativado	602867	7841131	624
16	E06	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	Carvão Ativado	604865	7841341	638
11	E06	Piezômetro Cerca Grande P1	Carvão Ativado	603801	7841131	743
12	E06	Piezômetro Cerca Grande P4	Carvão Ativado	606328	7840743	814
14	E06	Piezômetro Cerca Grande P5	Carvão Ativado	606582	7841213	791
13	E06	Piezômetro Cerca Grande P6	Carvão Ativado	605271	7840760	709
39	E06	Poço Zé Irene	Carvão Ativado	600024	7844414	719
<b>40</b>	<b>E07/8</b>	<b>Lagoa Bom Jardim</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>597653</b>	<b>7838380</b>	<b>719</b>
<b>41</b>	<b>E07/8</b>	<b>Sumidouro Palmeiras</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>597262</b>	<b>7840276</b>	<b>724</b>
32	E07/8	Gruta Morro Redondo	Carvão Ativado	599826	7839622	725
35	E07/8	Lagoa Fluminense	Carvão Ativado	602477	7840065	667
33	E07/8	Poço Sr. Afonso	Carvão Ativado	603591	7844335	687
15	E07/8	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT1	Carvão Ativado	602867	7841131	624
16	E07/8	Poço Fz. Sto Antônio Cerca Grande PT2	Carvão Ativado	604865	7841341	638
11	E07/8	Piezômetro Cerca Grande P1	Carvão Ativado	603868	7839762	743
12	E07/8	Piezômetro Cerca Grande P4	Carvão Ativado	606328	7840743	814
14	E07/8	Piezômetro Cerca Grande P5	Carvão Ativado	606582	7841213	791
13	E07/8	Piezômetro Cerca Grande P6	Carvão Ativado	605271	7840760	709
36	E07/8	Poço Fz. Vista Alegre	Carvão Ativado	602082	7840776	711
42	E07/8	Poço Copasa Matozinhos	Carvão Ativado	595681	7837321	764
40	E07/8	Lagoa Bom Jardim	Carvão Ativado	597653	7838380	719
21	E07/8	Surgência Mocambo	Coletor Automático	601679	7842655	689
34	E07/8	Sumidouro Poções	Carvão Ativado	599263	7840407	705
18	E07/8	Surgência Jaguará	Fluorímetro	603591	7844335	659
17	E07/8	Lagoa Maciço Jaguará	Carvão Ativado	604388	7843944	659
20	E07/8	Lago Sucuri	Carvão Ativado	604690	7844354	656
<b>43</b>	<b>E09</b>	<b>Sumidouro Goiabeiras</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>600078</b>	<b>7851993</b>	<b>657</b>
<b>44</b>	<b>E09</b>	<b>Sumidouro Bebidas</b>	<b>Rodamina WT</b>	<b>597495</b>	<b>7849934</b>	<b>684</b>
38	E09	Surgência Gordura	Fluorímetro	601795	7850545	653
45	E09	Gruta da Lagoa	Coletor Automático	601816	7850694	651
46	E09	Montante Veredas	Carvão Ativado	601614	7851254	652
47	E09	Cabeceira do Flor II	Carvão Ativado	602328	7853383	664
48	E09	Cabeceira do Flor I	Carvão Ativado	602479	7853354	664
49	E09	Goiabeira Braço Esquerdo	Carvão Ativado	600136	7852096	656
50	E09	Surgência Goiabeiras	Carvão Ativado	599335	7852441	668
51	E09	Dolina Goiabeiras	Carvão Ativado	600171	7852001	656
43	E09	Sumidouro Goiabeiras	Carvão Ativado	600078	7851993	657
<b>52</b>	<b>E10</b>	<b>Gruta Lapa Vermelha</b>	<b>Fluoresceína</b>	<b>605231</b>	<b>7830928</b>	<b>728</b>
53	E10	Surgência Samambaia	Fluorímetro	606391	7833945	705
26	E10	Surgência Engenho	Coletor Automático	606428	7834617	694
54	E10	Caixa D'água da Mina	Carvão Ativado	605452	7830960	824
25	E10	Janela cárstica Cocho D'água	Carvão Ativado	604828	7834927	711
6	E10	Surgência Palestina I	Carvão Ativado	608603	7838121	661
55	E10	Poço Confins Jorrante	Fluorímetro	609354	7830421	745
56	E10	Poço Confins	Carvão Ativado	609278	7830365	752
7	E10	Surgência Palestina II	Carvão Ativado	608583	7838168	664
5	E10	Surgência Gameleira	Carvão Ativado	608452	7838099	662

Obs - Coordenadas em WGS84, zona 23S



**Figura 2** – Mapa dos pontos de injeção e monitoramento. Cada ensaio é identificado por uma cor. Pontos monitorados em mais de um ensaio são identificados pelas cores dos respectivos ensaios



O volume de corante injetado,  $V_s$  [L<sup>3</sup>], em cada ensaio foi determinado segundo a Equação 1, adaptada por Pessoa (2005), considerando a vazão no ponto de amostragem,  $Q$  [L<sup>3</sup>/t], a distância retilínea entre o ponto de injeção e detecção,  $d$  [L], a velocidade aparente da água,  $v$  [L/t] e a concentração máxima do corante que se espera no ponto de amostragem,  $C_p$  [M/L<sup>3</sup>].

$$V_s = 1,338 \cdot 10^{-3} \frac{Q(d,1,5)}{v} C_p \quad (1)$$

Entre dezembro de 2017 e setembro de 2018 foram realizadas 6 injeções de Fluoresceína e 7 de Rodamina WT, compondo os 10 ensaios, com emprego dos dois traçadores concomitantemente em 3 destes. A execução dos ensaios foi realizada por profissionais contratados para tal fim, sob a total supervisão dos autores.

#### 4.1. Análises Qualitativas

As alíquotas de carvão ativado e de água coletadas manualmente (~4 mL) foram analisadas em espectrofotômetro de fluorescência marca Hitachi Modelo F-2700 (Figura 3F). Previamente à análise, o carvão foi submetido a um processo térmico de desidratação à 150 °C e depois lhe foi adicionado

uma solução eluente (KOH) para liberar as substâncias sorvidas para a fase líquida. A interpretação dos resultados positivos para Fluoresceína e Rodamina WT foi realizada via análise espectral a partir da identificação de picos de intensidade de fluorescência nos comprimentos de onda de emissão característicos para essas substâncias. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos previamente na campanha de *background*.

#### 4.2. Análises Quantitativas

Os fluorímetros de campo mediram a concentração do corante *in situ*, enquanto as amostras do coletor automático foram analisadas em laboratório. As curvas de passagem foram expressas em concentração (C) versus tempo, para cada conexão confirmada (Figura 8).

A partir da vazão dos pontos de detecção,  $Q$  [L<sup>3</sup>/t] (Tabela 2) e dos dados de concentração sequencial,  $C$  [M/V], traçaram-se as curvas de recuperação dos corantes (Figura 8), que expressam a massa de traçador recuperada ao longo do tempo,  $M_R$  [M], a partir da Equação 2, baseada em Mull et al. (1988).

$$M_R = \int_{t=0}^{\infty} (Q \cdot C) dt \quad (2)$$

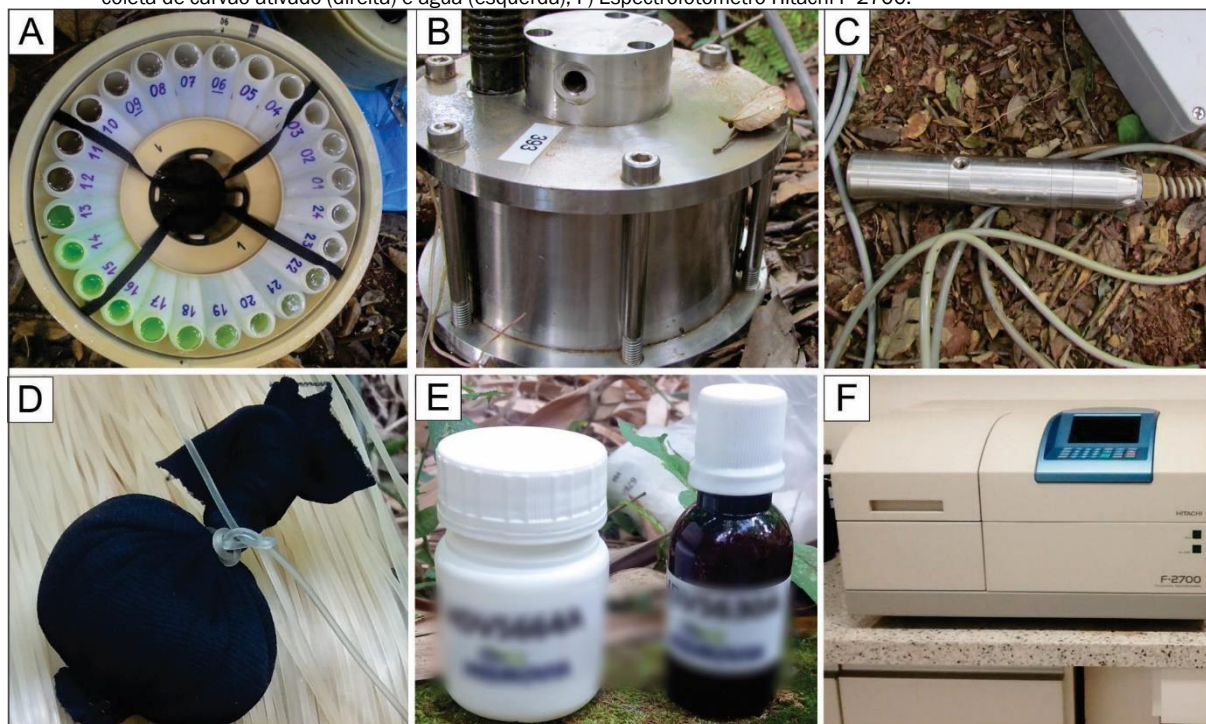
A análise das curvas de passagem e recuperação (Figura 8) permitiu inferir parâmetros hidráulicos para cada rota aquífera investigada.

A partir da porcentagem da massa de corante recuperada,  $M_{R\%}$  [%], ao longo do tempo e da vazão no ponto de injeção,  $q$

[L<sup>3</sup>/t], e de detecção,  $Q$  [L<sup>3</sup>/t] (Tabela 2), avaliou-se a porcentagem na vazão “ $Q$ ” proveniente da vazão “ $q$ ” ( $q \xrightarrow{\%} Q$ ), pela Equação 3.

$$q \xrightarrow{\%} Q = \frac{100 \cdot q \cdot M_{R\%}}{Q} \quad (3)$$

**Figura 3** – Equipamentos e materiais empregados no monitoramento da fluorescência das águas. A) Amostrador automático ISCO 3700; B) Fluorímetro para medição contínua em campo (GGUN-FL30) específico para águas superficiais; C) Fluorímetro para medição contínua em campo (GGUN-FL24) empregado em águas superficiais e poços. D) Sachê com carvão ativado. E) Frascos para a coleta de carvão ativado (direita) e água (esquerda); F) Espectrofotômetro Hitachi F-2700.



#### 4.2.1. Parâmetros Hidráulicos e Geométricos

Velocidade média aparente -  $v$  [L<sup>2</sup>/t]

Segundo Goldscheider et al. (2008), obtém-se uma boa aproximação da velocidade média do fluxo pela Equação 4, em que  $d$  [L] é a distância retilínea, entre o ponto de injeção e detecção, e  $t_{R/2}$  [t] é o tempo em que metade da massa do corante foi recuperada no ponto de detecção (Figura 8). Tal velocidade “ $v$ ” é aparente, visto não considerar a trajetória real do fluxo.

$$v = \frac{d}{t_{R/2}} \quad (4)$$

Sinuosidade da rota de fluxo

A partir da compilação de dados de diversas cavidades cársticas no mundo, Worthington (1991) assumiu um fator de si-

nuosidade ( $S$ ) de 1,5 para o cálculo da distância percorrida pela água,  $X_s$  [L], (Equação 5), adotado neste estudo.

$$X_s = S \cdot d \quad (5)$$

Uma aproximação da velocidade real do fluxo no sistema pode ser obtida substituindo, na Equação 4, o valor de  $d$  [L] por  $X_s$  [L].

#### 5. RESULTADOS

Dentre os 10 ensaios realizados, 7 resultaram positivo (3, 5, 6, 7, 8, 9 e 10) e em 12 dos 50 pontos monitorados constatou-se a presença de traçador ao menos uma vez.

Na Tabela 2 constam as vazões medidas para as análises quantitativas e a Figura 4 apresenta todos os pontos de conexões confirmadas nas análises de água e de carvão.

**Tabela 2** - Vazões medidas nos pontos de injeção e detecção dos ensaios quantitativos

Ponto	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Método	Data
Lagoa Bom Jardim *	0,192	–	16/07/1991
Gruta Lapa Vermelha	0,015	Micromolinete	19/12/2017
Surgência Samambaia	0,113	Micromolinete	19/12/2017
Surgência Gordura	0,696	Micromolinete	16/01/2018
Sumidouro Bebidas	0,199	Micromolinete	16/01/2018
Sumidouro Goiabeiras	0,283	Micromolinete	16/01/2018
Gruta da Lagoa	0,002	Volumétrico	16/01/2018
Surgência Mocambo	0,822	Micromolinete	14/05/2018
Surgência Jaguará	0,963	Micromolinete	14/05/2018
Sumidouro Palmeira	0,011	Micromolinete	04/06/2018
Surgência Mocambo	0,731	Micromolinete	18/06/2018
Janela Cárstica Cocho D'água	0,085	Micromolinete	04/09/2018
Gruta Água Fria	0,00009	Volumétrico	04/09/2018
Surgência Engenho	0,121	Micromolinete	04/09/2018
Gruta Zé Irene	0,128	Micromolinete	14/05/2018

\*Dados de Pessoa e Mourão (1998). Para o ensaio quantitativo, foi possível empregar tal vazão considerando que as maiores vazões de nascentes do carste na região não tiveram grandes variações ao longo do tempo de acordo com (informação verbal) <sup>1</sup>.

### 5.1. Bacia do Gordura

A origem de aproximadamente 70% da vazão na Surgência Gordura foi evidenciada através do Ensaio 09: 40,7% provêm do Sumidouro Goiabeiras (mesma bacia) e 27,6% do Sumidouro Bebidas (da bacia Escrivânia) – Figura 5. Para as conexões Goiabeiras-Gordura e Bebidas-Gordura as velocidades médias aparentes do fluxo ( $v$ ) foram de  $4,12 \times 10^{-2}$  m/s e  $4,18 \times 10^{-2}$  m/s e os valores de velocidades “reais” foram  $6,18 \times 10^{-2}$  m/s e  $6,27 \times 10^{-2}$  m/s, respectivamente. As curvas de passagem e de recuperação das conexões encontram-se nas figuras 8A e 8B.

Constataram-se pequenas contribuições a partir dos sumidouros Goiabeiras e Bebidas para a surgência Gruta da Lagoa (Figuras 4A, 4B), porém não foi possível observar a curva de passagem completa dos traçadores e nos dois casos menos de 0,01% da massa injetada foi recuperada.

### 5.2. Bacia do Samambaia

13% da vazão da Surgência Samambaia provém da Gruta Lapa Vermelha (bacia de Confins), a uma velocidade aparente “ $v$ ” de  $3,10 \times 10^{-2}$  m/s e velocidade “real” de  $4,65 \times 10^{-2}$  m/s (Figura 6). O Córrego Samambaia recebe também importante contribuição da Surgência do Engenho, na qual 70,2% de sua vazão é proveniente do sumidouro Cocho D'água (bacia Mocambo/Jaguara), provada por meio do Ensaio 03, numa velocidade “ $v$ ” de  $2,89 \times 10^{-2}$  m/s e velocidade “real” de  $4,34 \times 10^{-2}$

m/s (Figura 6). Representam-se as curvas de passagem e recuperação das conexões Lapa vermelha - Samambaia e Cocho D'água – Engenho nas figuras 8C e 8D, respectivamente. Na bacia Samambaia foram ainda comprovadas por meio do Ensaio 3 (Figura 4C), contribuições hídricas entre: Gruta da Água Fria – Engenho e Gruta da Água Fria – Cocho D'água, com recuperações de 7% e 1,15% da massa injetada, respectivamente. As velocidades médias aparentes do fluxo foram de  $3,12 \times 10^{-2}$  m/s e  $9,5 \times 10^{-3}$  m/s para as respectivas conexões e as velocidades “reais” foram  $4,68 \times 10^{-2}$  m/s e  $1,43 \times 10^{-2}$  m/s, respectivamente.

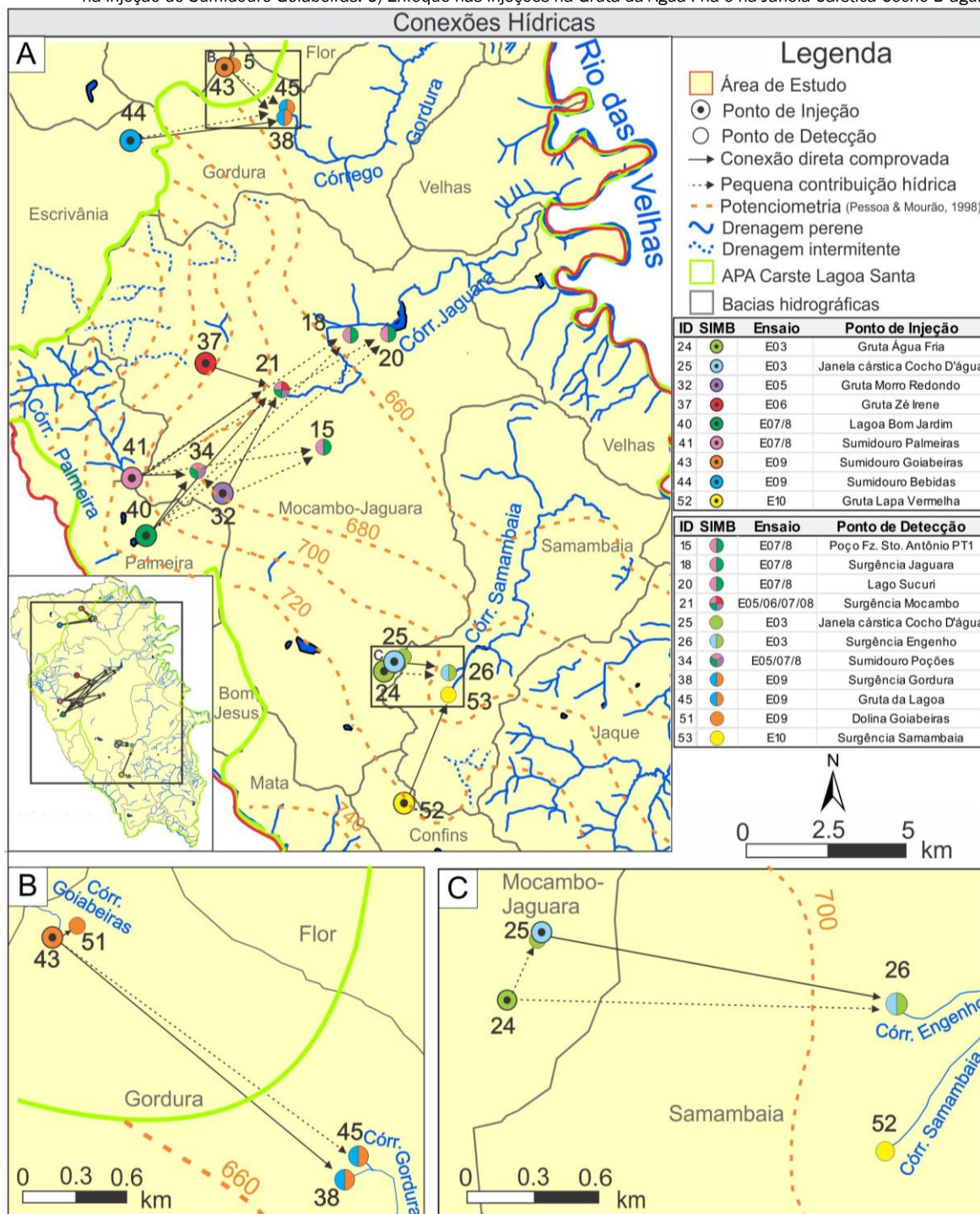
Estima-se que se já tenha descoberto a proveniência de 42,5% do Córrego Samambaia logo à jusante da contribuição do Córrego do Engenho (Figura 6).

### 5.3. Bacias Palmeiras-Mocambo/Jaguara

Por meio dos Ensaios 07/08 foram estabelecidos os quantitativos da conexão subterrânea entre as bacias dos córregos Palmeiras e Mocambo-Jaguara. Na surgência Mocambo, 1,5 % da vazão provém do Sumidouro Palmeiras a velocidade “ $v$ ” de  $1,64 \times 10^{-2}$  m/s e “real” de  $2,46 \times 10^{-2}$  m/s, 26,3% da Lagoa Bom Jardim a velocidade “ $v$ ” de  $2,86 \times 10^{-2}$  m/s e “real” de  $4,30 \times 10^{-2}$  m/s e 13,5% da gruta Zé Irene (Bacia Mocambo/Jaguara), a velocidade “ $v$ ” de  $4,49 \times 10^{-2}$  m/s e “real” de  $6,74 \times 10^{-2}$  m/s, totalizando 41,3% de contribuição (Figura 7).

<sup>1</sup> Informação fornecida pelo Geólogo Rodrigo Sérgio de Paula, doutorando em hidrogeologia cárstica pela UFMG, em outubro de 2018.

**Figura 4** - Resultados das conexões hídricas confirmadas. Cada ensaio é identificado por uma cor distinta. Pontos monitorados em mais de um ensaio são identificados pelas cores dos respectivos ensaios. A) Todas as conexões hídricas confirmadas. B) Enfoque na injeção do Sumidouro Goiabeiras. C) Enfoque nas injeções na Gruta da Água Fria e na Janela Cárstica Cocho D'água



Outra contribuição encontrada para a Surgência Mocambo foi uma não quantificada, proveniente da Cavidade Morro Redondo (Bacia Mocambo/Jaguara) à uma velocidade “v” de  $1,46 \times 10^{-2}$  m/s e “real” de  $2,19 \times 10^{-2}$  m/s (Figura 7). Apesar de praticamente toda a água desta cavidade fluir para a Surgência Mocambo, não foi possível medir a vazão no seu interior.

As curvas de passagem e recuperação das conexões com a Surgência Mocambo são apresentadas nas figuras 8E, 8F, 8G e 8H.

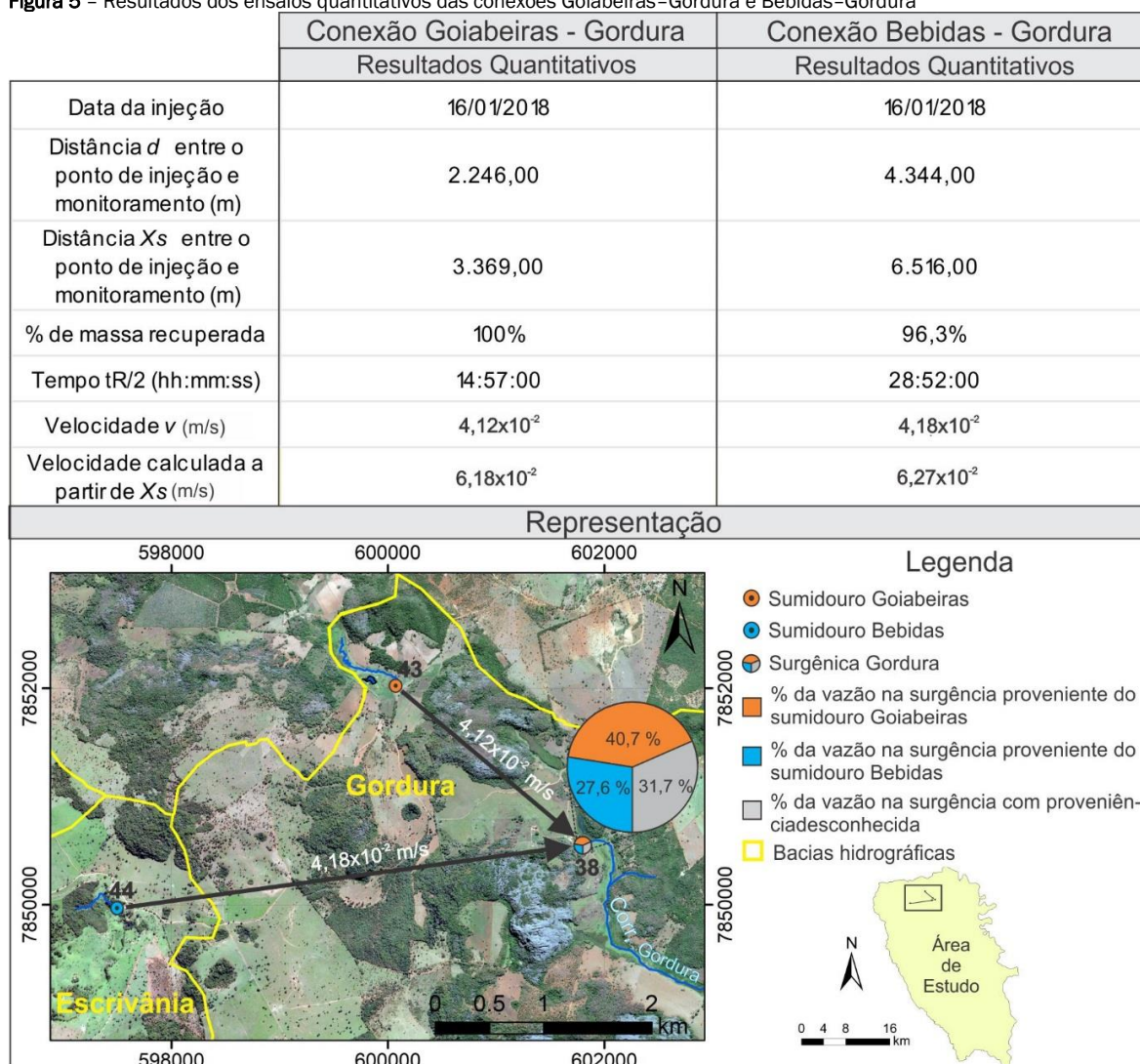
Ainda no contexto da conexão entre as bacias dos córregos

Palmeiras e Jaguará/Mocambo, ressalta-se que o poço Faz. Sto. Antônio Cerca Grande PT1, da bacia do córrego Jaguará/Mocambo, com profundidade de 120 m, apresentou conexão com Palmeiras e Lagoa Bom Jardim, evidenciando conexões hídricas mais profundas.

#### 5.4. Velocidade dos fluxos

As velocidades médias aparentes (v) calculadas para o fluxo de água nas rotas avaliadas variaram de  $0,95 \times 10^{-2}$  m/s a  $4,49 \times 10^{-2}$  m/s, e a velocidades “reais” de  $1,43 \times 10^{-2}$  m/s a  $6,27 \times 10^{-2}$  m/s.

**Figura 5** – Resultados dos ensaios quantitativos das conexões Goiabeiras–Gordura e Bebidas–Gordura



Obs – Pontos de injeção e detecção foram numerados de acordo com a Figura 4.

A partir das conexões hídricas diretas, onde mais de 80% da massa de corante injetada foi recuperada, observa-se um zoneamento espacial das velocidades, que são relativamente homogêneas dentro de cada domínio de contribuição hídrica. Os maiores valores de velocidade “*v*” ocorrem nas contribuições da Surgência Gordura ( $4,12 \times 10^{-2}$  m/s e  $4,18 \times 10^{-2}$  m/s). As velocidades intermediárias, nas contribuições do córrego Samambaia ( $2,89 \times 10^{-2}$  m/s e  $3,10 \times 10^{-2}$  m/s) e as menores velocidades nas contribuições da Surgência Mocambo ( $1,46 \times 10^{-2}$  m/s,  $1,64 \times 10^{-2}$  m/s e  $2,86 \times 10^{-2}$  m/s), exceto a conexão Zê Irene-Mocambo ( $4,49 \times 10^{-2}$  m/s).

## 6. DISCUSSÃO

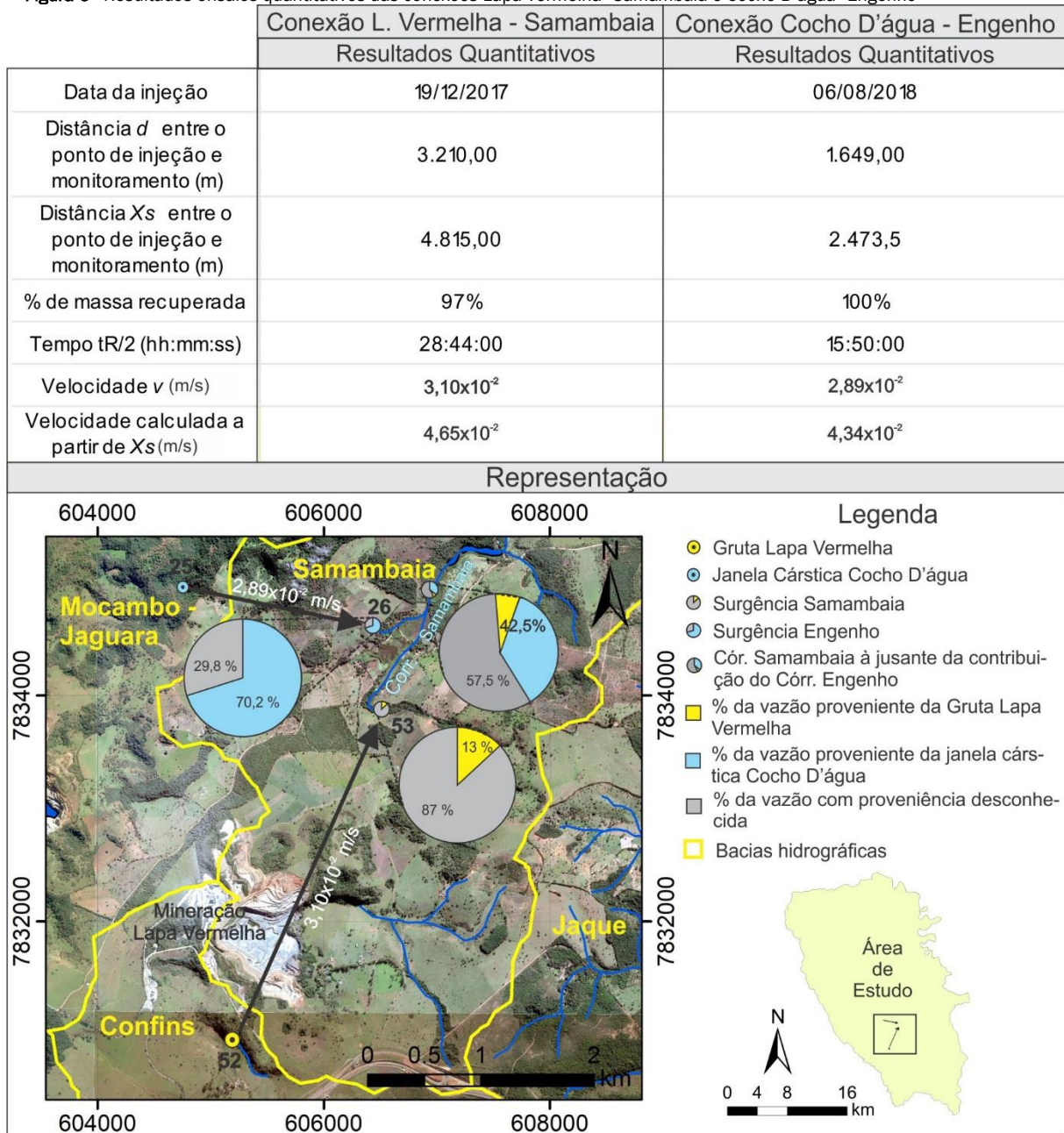
As conexões hídricas obtidas indicam fluxos subterrâneos com pouca ou nenhuma continuidade lateral, formando sistemas isolados, assim como observado por Salles et al. (2018) nos aquíferos cársticos na porção central da Chapada Diamantina. As interconexões apresentam majoritariamente sentido de fluxo para o setor leste (Figura 4) e principalmente para o quadrante nordeste, em direção ao nível de base regional, o Rio das Velhas. Isso concorda com o mapa potenciométrico apresentado por Pessoa e Mourão (1998; Figura 4) e com a predominância de fraturas com direção N10°-30°E (mergulhos de

15° a 45°) e N80°-90°W (mergulhos > 45°), paleocondutos de direções N20°E, N40°E (PEÑARANDA-SALGADO, 2016; RIBEIRO et al., 2019) e E-W com mergulho suave para E e acamamentos com caimento majoritariamente para E (RIBEIRO et al., 2019). Assim, as fraturas e o acamamento exercem um importante papel no condicionamento da carstificação e, por consequência, no controle do fluxo subterrâneo, conforme Auler (1994), Pessoa (2005) e Worthington (2005).

Evidenciou-se se conexão entre as bacias Palmeiras e Mocambo/Jaguara (ensaios 07 e 08), diferente de Auler (1994), que obteve conexões apenas entre Palmeiras e Mocambo. Outrossim foi comprovada a conexão Morro Redondo – Mocambo, anteriormente testada pelo mesmo autor, mas com resultado negativo. Tais divergências podem ser atribuídas as diferentes épocas de injeção, tipos de corantes empregados e período monitorado.

As velocidades médias aparentes calculadas dos fluxos variaram de  $9,5 \times 10^{-3}$  m/s a  $4,49 \times 10^{-2}$  m/s, concordantes com as observadas em vários locais do mundo:  $2 \times 10^{-2}$  m/s a  $5 \times 10^{-2}$  m/s (WORTHINGTON, 1991).

**Figura 6** - Resultados ensaios quantitativos das conexões Lapa Vermelha-Samambaia e Cocho D'água-Engenho



Obs - Pontos de injeção e detecção foram numerados de acordo com a Figura 4.

O zoneamento espacial das velocidades e a homogeneidade dos valores internamente a cada um dos domínios podem estar associados às características próprias do sistema, como estratigrafia e estrutural, condicionantes das rotas de fluxo em cada região. As formas das curvas de passagem corroboram com tal hipótese, denotada pela similaridade das curvas dentro de um mesmo domínio (Figura 8).

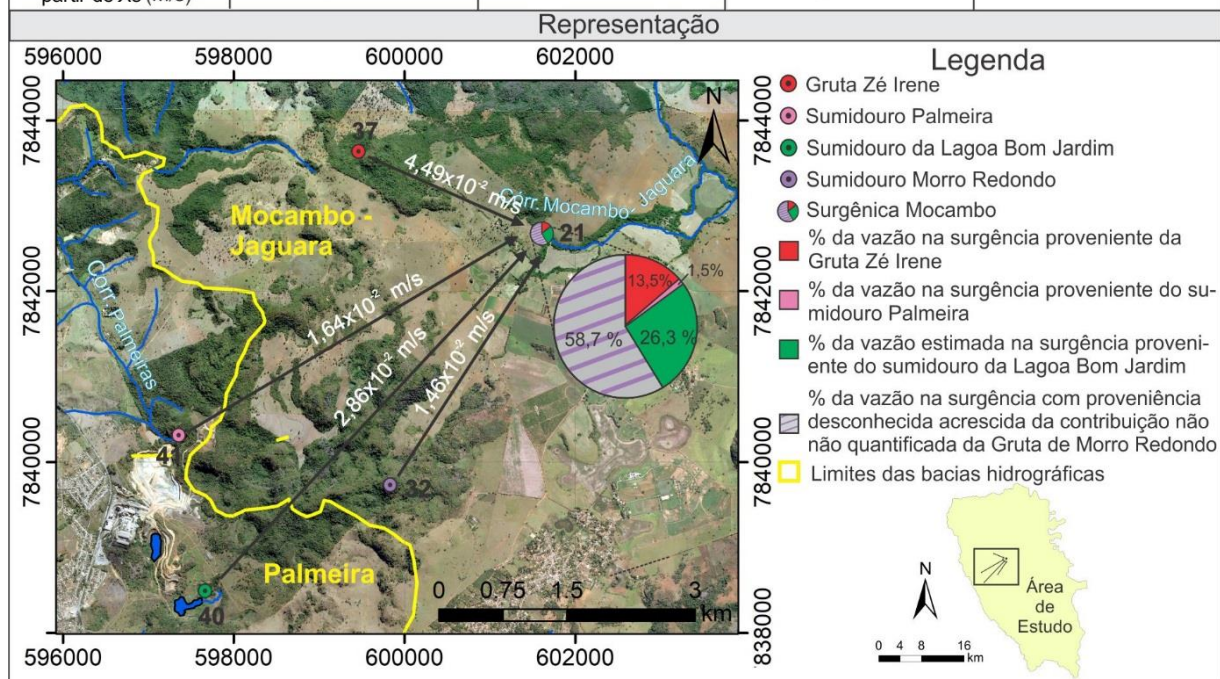
Nas contribuições da Surgência Gordura as curvas têm caráter bimodal (figuras 8A, 8B) sugerindo que o fluxo tenha seguido por duas trajetórias distintas com chegadas defasadas no tempo. Em três das quatro rotas de contribuições para a surgência Mocambo as curvas apresentam três pequenos picos de concentração (figuras 8F, 8G, 8H), sugerindo que as distâncias maiores entre os pontos de injeção e surgência propiciam maior probabilidade de dispersão dos traçadores, podendo ainda haver distorções associadas ao transporte, como

difusão e advecção (SCHIESSER; SILEBI, 1997). Apenas a rota Zé-Irene-Mocambo, de menor distância, apresentou um único pico, de maior velocidade, denotando uma possível rota de fluxo distinta das demais (Figura 8E). No domínio do córrego Samambaia as curvas apresentam um único pico (figuras 8C, 8D).

Em nenhuma surgência obteve-se o fechamento de 100% da proveniência da água, sendo plausível considerar pelo menos quatro possibilidades: 1) existência de sumidouros contribuintes até então desconhecidos; 2) contribuições via fraturas ao longo do trajeto, mesmo que ínfima, já que grande parte destas encontram-se preenchidas por calcita (GALVÃO, 2015); 3) fenômenos de transporte, como difusão e advecção (SCHIESSER; SILEBI, 1997); 4) perdas para o aquífero profundo.

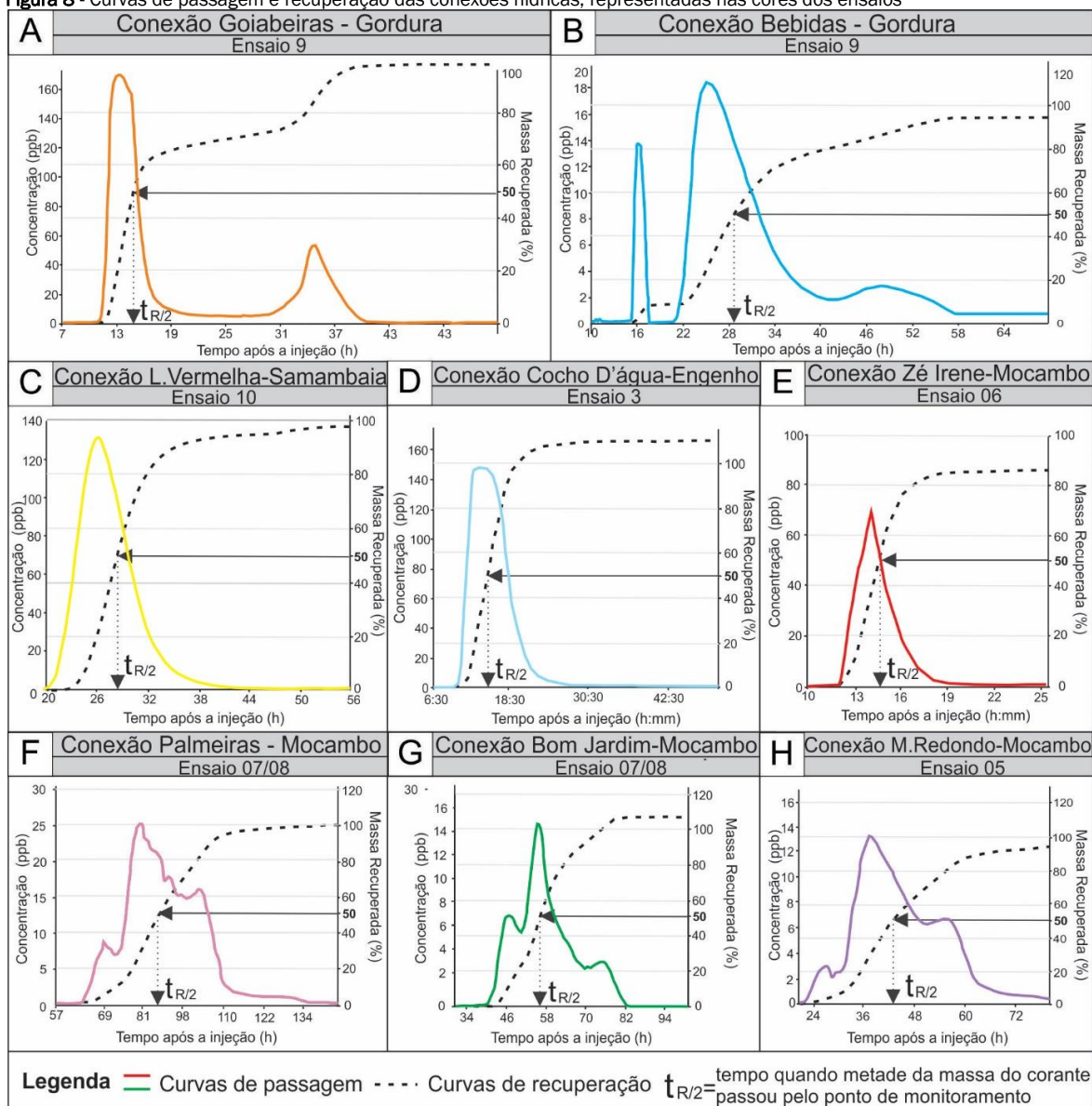
**Figura 7** - Resultados dos ensaios quantitativos das conexões Zé Irene–Mocambo, Palmeiras–Mocambo, Bom Jardim–Mocambo e Morro Redondo-Mocambo

	Conexão Zé Irene - Mocambo	Conexão Palmeiras - Mocambo	Conexão Bom Jardim - Mocambo	Conexão M. Redondo - Mocambo
	Resultados Quantitativos	Resultados Quantitativos	Resultados Quantitativos	Resultados Quantitativos
Data da injeção	14/05/2018	04/06/2018	04/06/2018	26/06/2018
Distância <i>d'</i> entre o ponto de injeção e monitoramento (m)	2.413,00	5.032,00	5.705,00	3.546,00
Distância <i>Xs</i> entre o ponto de injeção e monitoramento (m)	3.619,00	7.548,00	8.557,5	5.319,0
% de massa recuperada	86,7%	99,9%	100%	95,4%
Tempo <i>tR/2</i> (hh:mm:ss)	14:54:48	85:20:00	55:20:00	67:20:00
Velocidade <i>v</i> (m/s)	$4,49 \times 10^{-2}$	$1,64 \times 10^{-2}$	$2,86 \times 10^{-2}$	$1,46 \times 10^{-2}$
Velocidade calculada a partir de <i>Xs</i> (m/s)	$6,74 \times 10^{-2}$	$2,46 \times 10^{-2}$	$4,30 \times 10^{-2}$	$2,19 \times 10^{-2}$



Obs - Pontos de injeção e detecção foram numerados de acordo com a Fig. 4.

**Figura 8** - Curvas de passagem e recuperação das conexões hídricas, representadas nas cores dos ensaios



## 7. CONCLUSÕES

Os ensaios quantitativos por meio de traçadores corantes demonstraram as proveniências de 4 das principais surgências cársticas em percentuais de contribuição hídrica de 13% a 70,2%, e velocidades médias aparentes ( $v$ ) dos fluxos de  $9,5 \times 10^{-3}$  m/s a  $4,49 \times 10^{-2}$  m/s. Observou-se um zoneamento espacial das velocidades, apontando para uma compartimentação hidrogeológica.

A técnica mostrou ser uma importante ferramenta para: i) conhecimento do sentido dos fluxos; ii) quantias das contribuições das fontes originárias; iii) velocidades dos fluxos; iv) avaliação espacial do grau de carstificação mediante as velocidades dos fluxos; v) conexão entre bacias hidrográficas, propiciando uma compartimentação mais consistente das bacias hidrogeológicas. As interconexões desvendadas, até então, contribuem para a elaboração de um modelo hidrogeológico de fluxo e para o gerenciamento dos recursos hídricos.

## AGRADECIMENTOS

Ao CDTN pelo apoio, ao CECAV/ICMBio pelo suporte financeiro, à CAPES pela bolsa de estudos e ao Programa de pós-graduação em Geologia da UFMG.

## REFERÊNCIAS

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. (Eds.). *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. 1.ed. Belo Horizonte: SBG, 2001. cap.2, p. 9-30.

AULER, A. S. *Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil*. 1994. 110 f. Msc Thesis, Department Of Geography And Geology, Western Kentucky University, Bowling Green, 1994.

AYUB, S. *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. 1998. 104 f. Dissertação (mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- BANCO de dados meteorológicos. INMET, 2019. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>>. Acesso em: 29 de julho de 2019.
- BERBERT-BORN, M. Carste de Lagoa Santa, MG - Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M. (Eds.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. 1. ed. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), 2002. p. 415-430.
- DREW, D.; HÖTZL, H. (Ed.). *Karst Hydrogeology and Human Activities: Impacts, Consequences and Implications*. 20. Vol. Rotterdam: Balkema, 1999. 322 p. (International Contributions to Hydrogeology).
- EPA (Environmental Protection Agency). *The Qtracer program for tracer breakthrough curve analysis for karst and fractured-rock aquifers*. Washington: EPA, 1999.
- FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. *Karst hydrogeology and geomorphology*. Rev. ed. John Wiley & Sons Ltd: Chichester, 2007, 576p.
- FREITAS, P. M. C. *Estudo de intercomunicação hidráulica superficial - subterrânea no carste da área periurbana de Paíns/MG, utilizando-se traçador rodamina WT*. 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado em geologia Econômica e Aplicada) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, BH, 2009.
- FIELD, Malcolm S. et al. An assessment of the potential adverse properties of fluorescent tracer dyes used for groundwater tracing. *Environmental Monitoring And Assessment*, v. 38, n. 1, p.75-96, out. 1995. Springer Nature America, Inc.
- GALVÃO, P. H. F. *Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas*. 2015. 124 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- GENTHNER, C. *Aplicação do traçador fluorescente rodamina-WT no estudo geohidrológico da área carbonática Lajeado-Bombas, Vale do Betari, sul do Estado de São Paulo*. 2001. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, SP, 2001.
- GOLDSCHIEDER, N. et al. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, Bologna, v. 37, n. 1, p. 27-40, 2008.
- GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. *Methods in Karst Hydrogeology*. ed. Taylor & Francis, London, 2007, 264p.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Informação municipal básica*, 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama>> Acesso em: 20 de Dezembro de 2018.
- MULL, D.S. et al. United States Environmental Protection Agency. Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport characteristics of ground water in karst terranes. Atlanta: Epa 904/6-88-001, 1988. 103 p.
- PAULA, R. S. *Modelo Conceitual de Fluxo dos Aquíferos Pelíticos-Carbonáticos da Região da APA Carste de Lagoa Santa*. 2019. 279 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- PEÑARANDA SALGADO, J.R. *Condicionamento estrutural e litológico da porosidade cárstica da formação Sete Lagoas, Município de Sete Lagoas (MG)*. 2016. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2016.
- PESSOA, P. F. P. *Caracterização hidrogeológica da regiões cárstica de Sete Lagoas - MG: potencialidades e riscos*. 1996. Dissertação (Mestrado em recursos minerais e hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- PESSOA, P. F. P.; MOURÃO, M. A. A. Levantamento Hidrogeológico. In: IBAMA; CPRM; (Eds.). *APA Carste de Lagoa Santa - Meio físico*. Belo Horizonte, 1998. 36p. (Série APA Carste de Lagoa Santa - MG).
- PESSOA, P.F.P. *Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos da Região de Lagoa Santa, MG*. 2005. 335 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- PLATA, A. Parameters of carbonate rock aquifers from tracer methods. In: Antalya Symposium and Field Seminar - Hydrogeological Processes in Karst Terranes. 1993. *Proceedings [...]*, 207, p. 361-380.
- RIBEIRO, J.H. et al. *Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais - relatório final, escala 1:50.000*. 2. ed. Belo Horizonte: CPRM, 2003, 54p.
- RIBEIRO, C.G. et al. Análise dos Fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Revista Águas Subterrâneas*, 2019.
- SALLES, L. Q. et al. Influência dos Aspectos Hidrogeológicos de Aquíferos Cársticos na Evolução do Revelo: Porção Central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.19, n.1, p.93-106, 2018.
- SCHIESSER, W. E., SILEBI, C. A. *Computational Transport Phenomena: Numerical Methods for the Solution of Transport Problems*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- SCHÖLL, W.U. Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí

na parte sudeste da Bacia do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., 1976, Ouro Preto. *Anais [...]*, 2, p. 207-231.

SILVA, A.B. *Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais*. 1984. 190 f. Tese (Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

SILVA, J.C.S. *Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na Região Cárstica de Lagoa Santa, MG*. 2003. 239 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de

Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

SLAVEC, P. Pesquisas do conjunto hidrológico das Areias, Municípios de Iporanga, estado de São Paulo. *Espeleo-tema: Edição Histórica*, São Paulo, v. 8, p.16-22, 1976.

WORTHINGTON, S.R.H. *Karst Hydrology of the Canadian Rocky Mountains*. 1991. 380 f. Ph.D. Msc Thesis. McMaster University, Hamilton, 1991.

WORTHINGTON, S.H.R. Hydraulic and geological factors influencing conduit flow depths. *Caves and Karst Science*, v.31, n.3, p.123-134, 2005.

**APÊNDICE C – Ensaio 1**  
**Injeção na Gruta do Sumidouro**

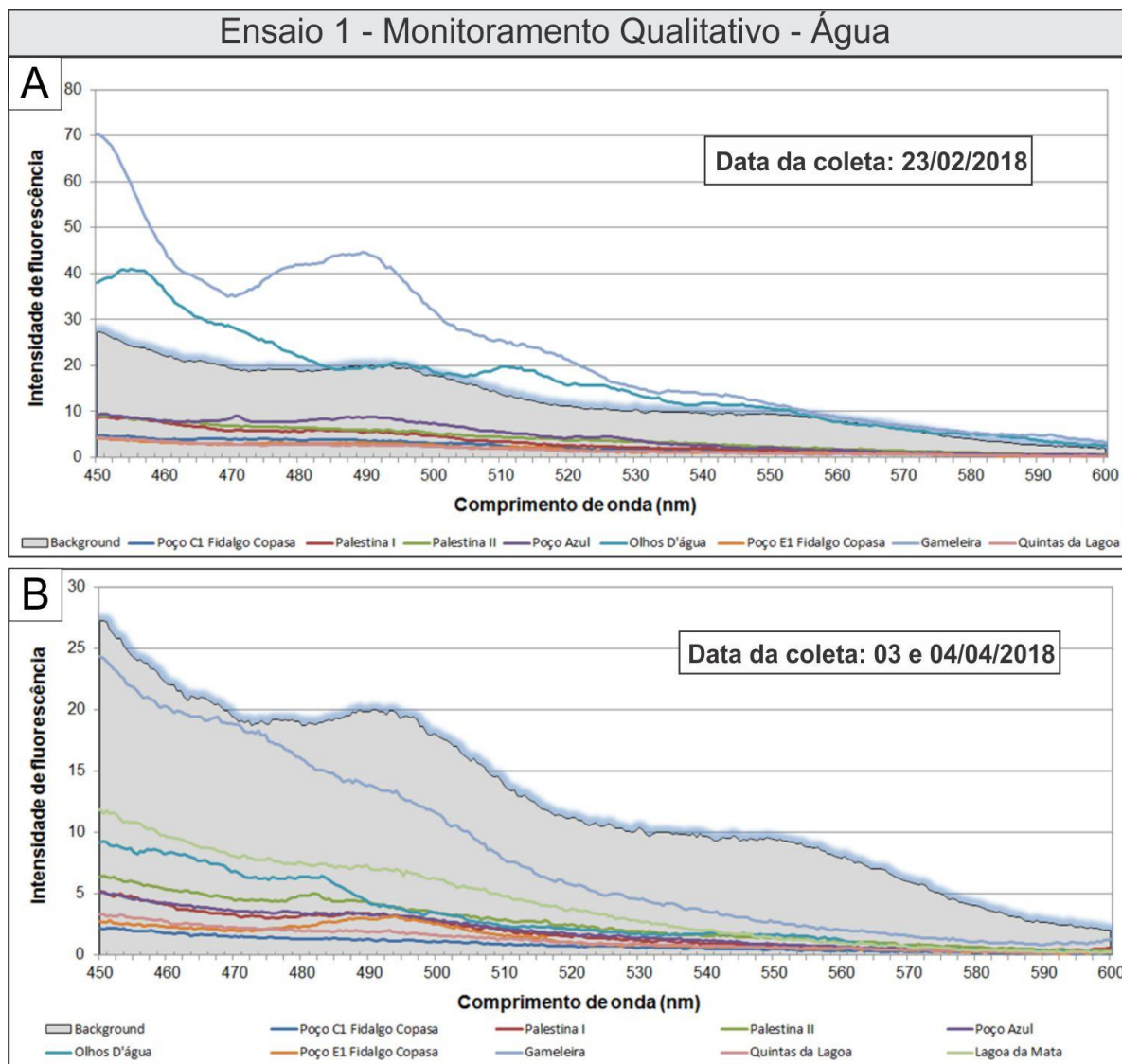


Figura C.1 – Resultado das análises qualitativas das amostras de água coletadas em (A) 23/02/2018 e (B) 03 e 04/04/2018.

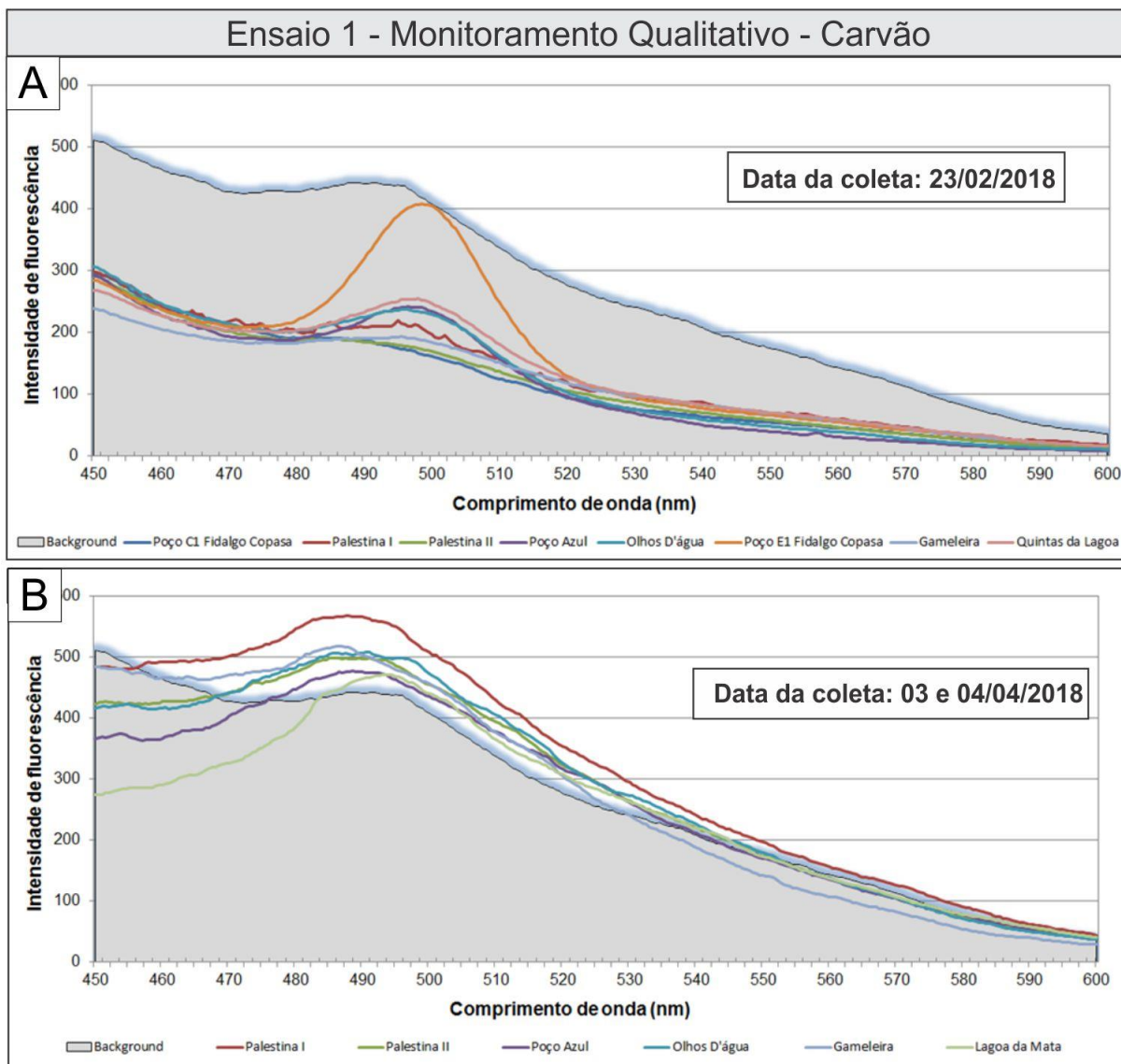


Figura C.2 - Resultados das análises qualitativas das amostras de carvão ativado coletadas em (A) 23/02/2018 e (B) 03 e 04/04/2018.

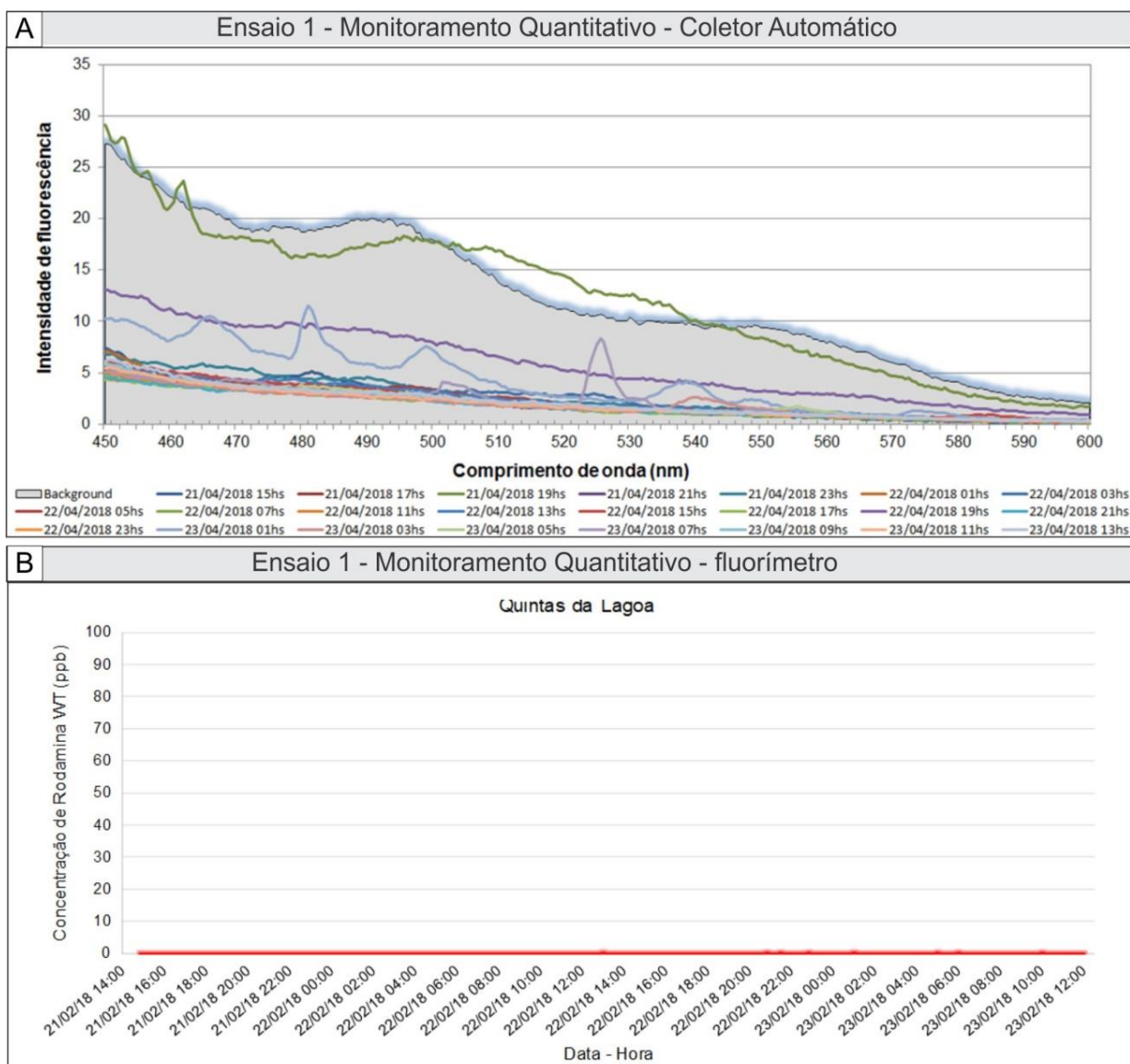


Figura C.3 - Resultados das análises quantitativas realizadas através A) do coletor automático posicionado no Poço Azul (ID-3) no período de 21 a 23/02/2018 e B) do fluorímetro posicionado no poço do condomínio Quintas da Lagoa (ID-08) no período de 21 a 23/02/2018.

## **APÊNDICE D – Ensaio 2**

### **Injeção nos piezômetros Cerca Grande P1 e P4**

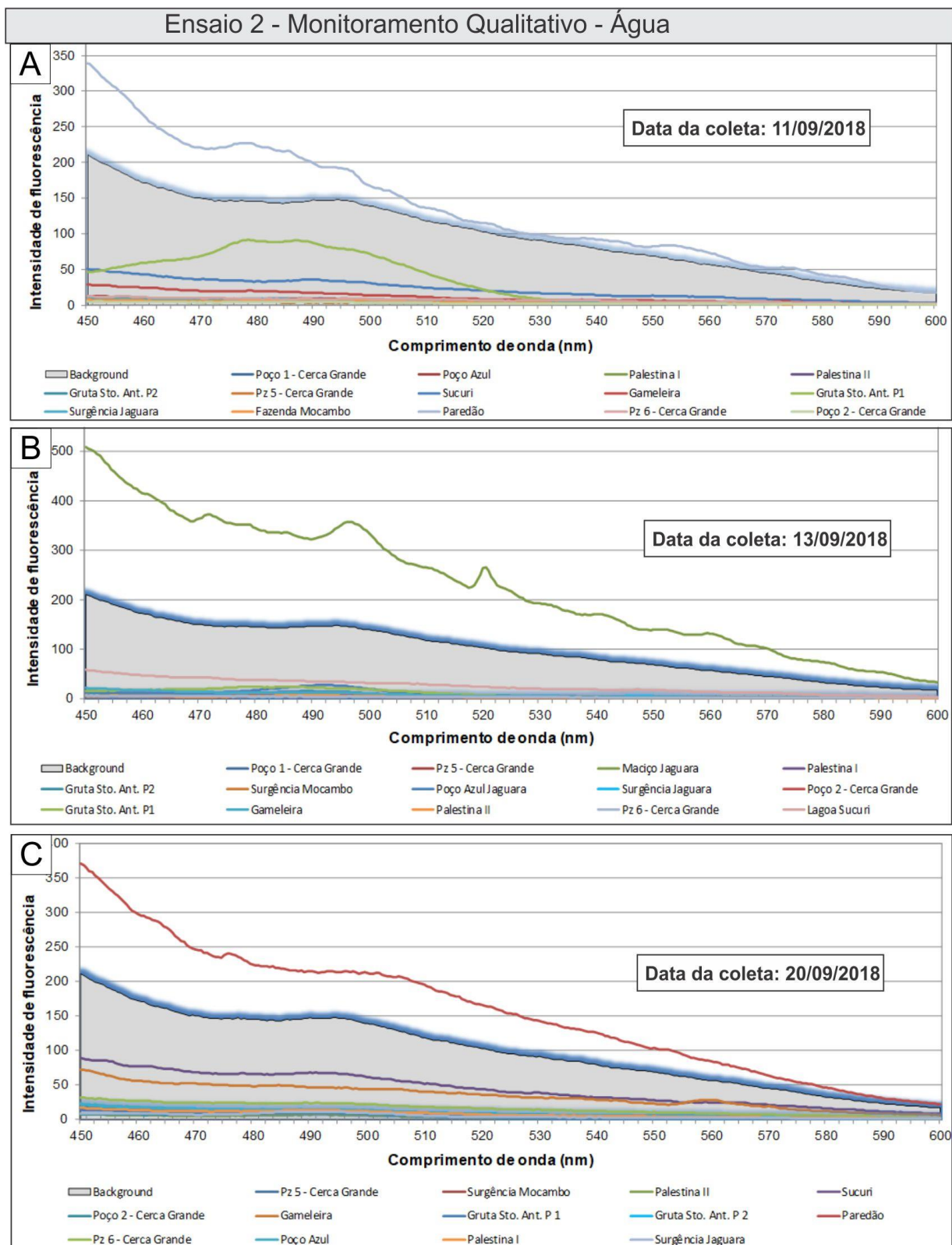


Figura D.1 - Resultado das análises qualitativas das amostras de água coletadas em (A) 11/09/2018; (B) 13/09/2018 e (C) 20/09/2018.



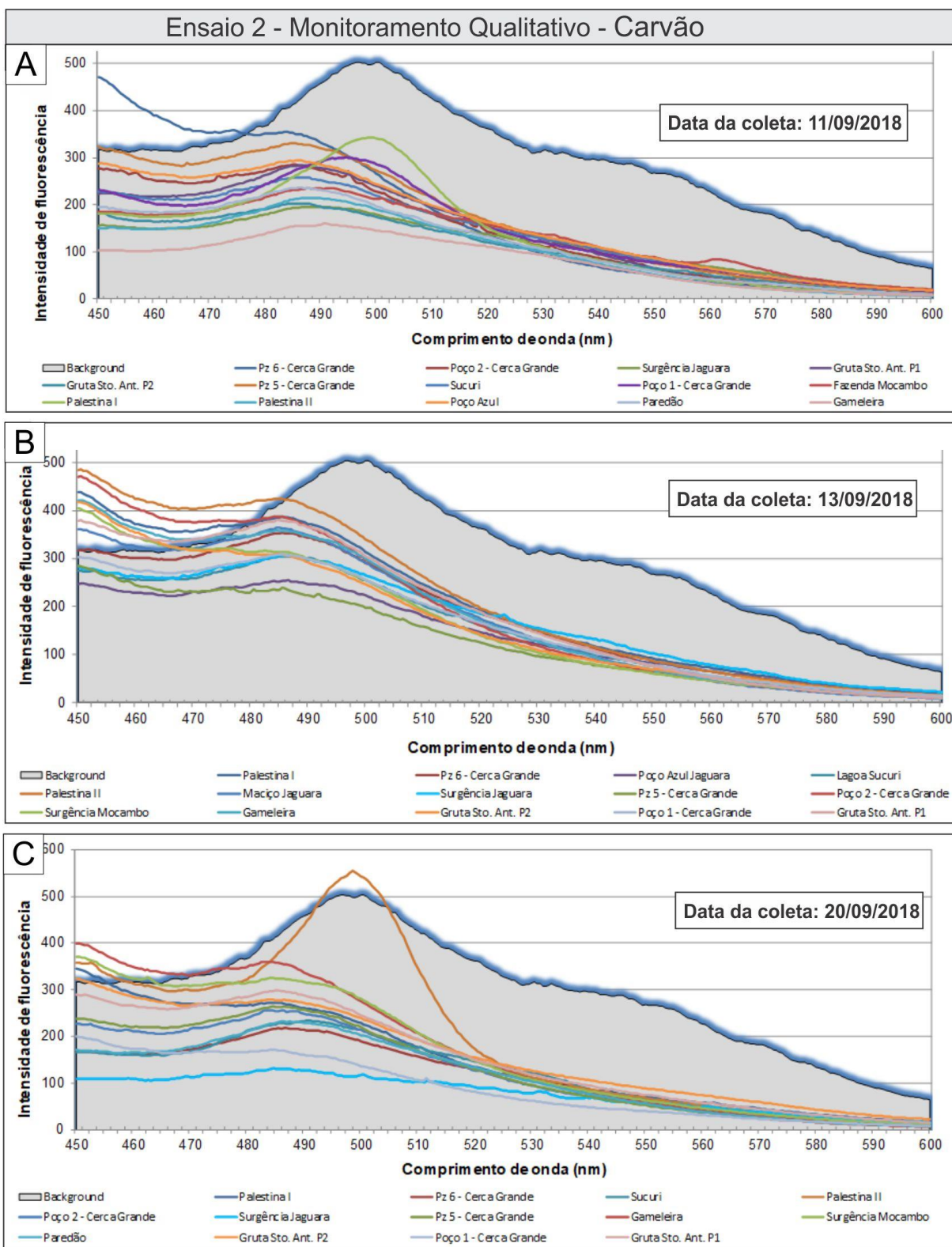


Figura D.2 - Resultado das análises qualitativas das amostras de carvão coletadas em (A) 11/09/2018; (B) 13/09/2018 e (C) 20/09/2018.

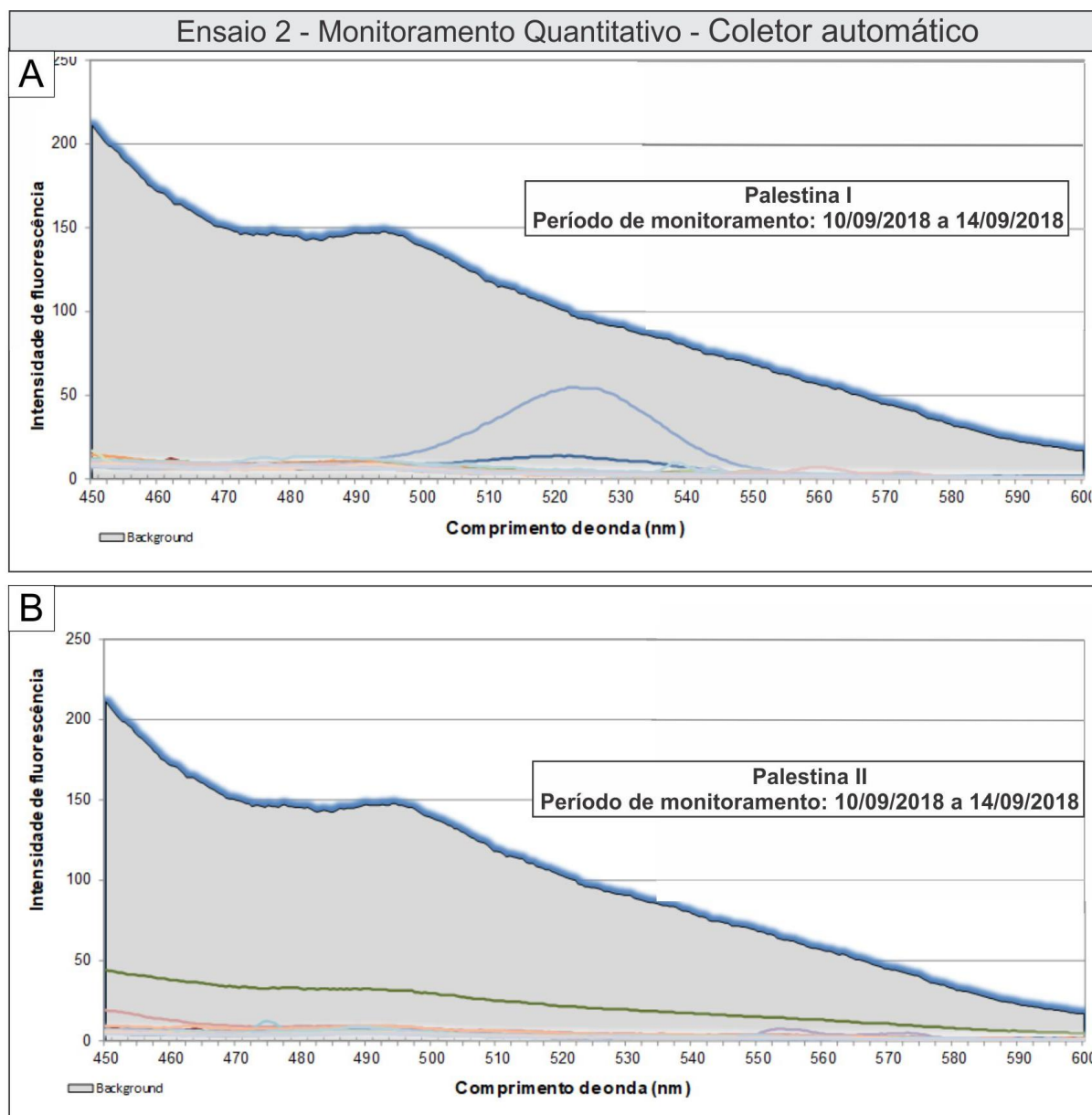


Figura D.3 – Resultados das análises quantitativas realizadas através do coletor automático posicionado em A) Palestina I (ID-6) no período de 10 a 14/09/2018 e em B) Palestina II (ID-7) no período de 10 a 14/09/2018.

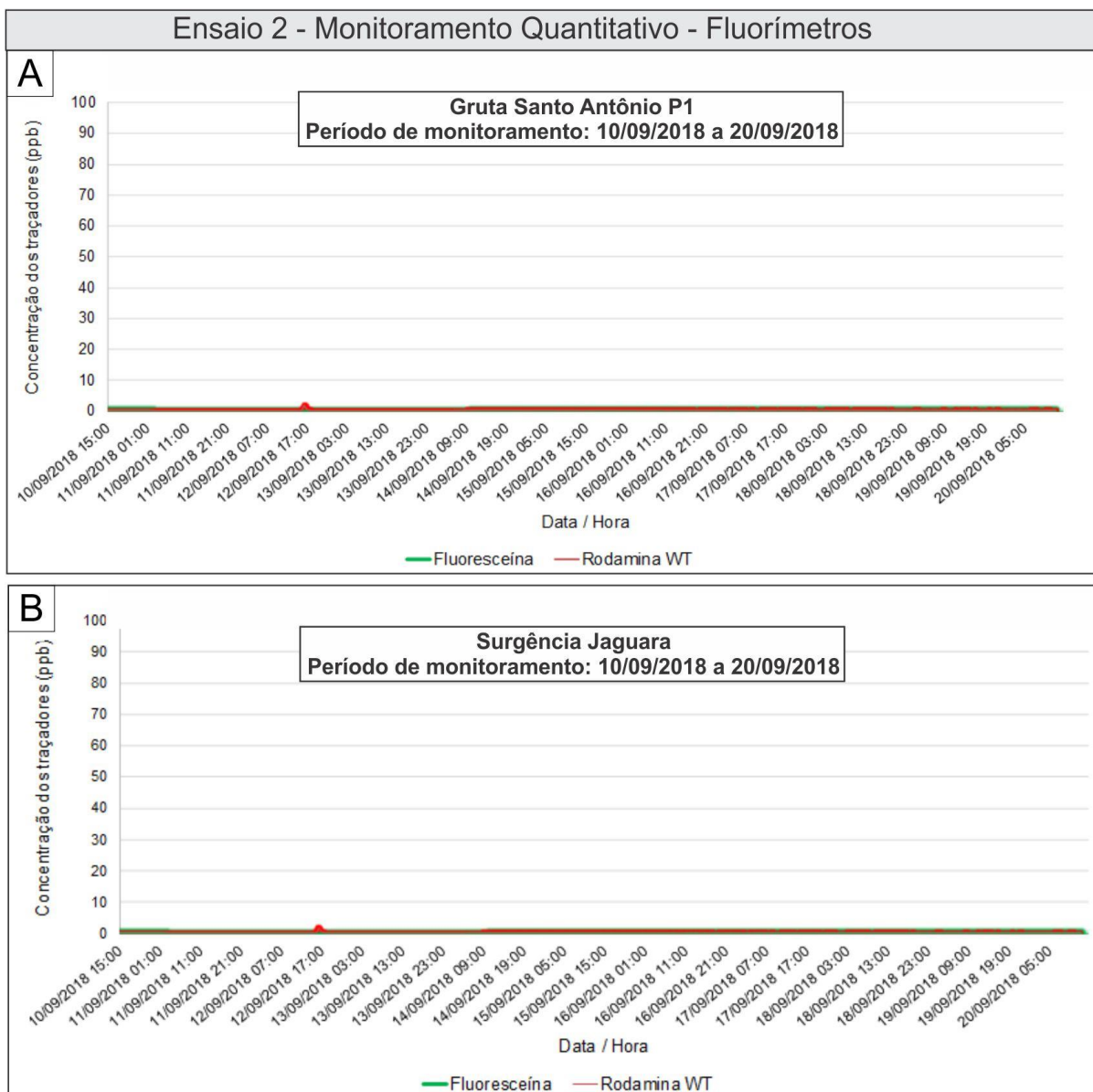


Figura D.4 - Resultados das análises quantitativas realizadas através dos fluorímetros posicionados na A) Gruta Santo Antônio P1 (ID-22) no período de 10 a 20/09/2018 e na B) Surgência Jaguará (ID-18) no período de 10 a 20/09/2018.

### **APÊNDICE E – Ensaio 3**

**Injeção na Gruta da Água Fria e na Janela Cárstica Cocho d'Água**

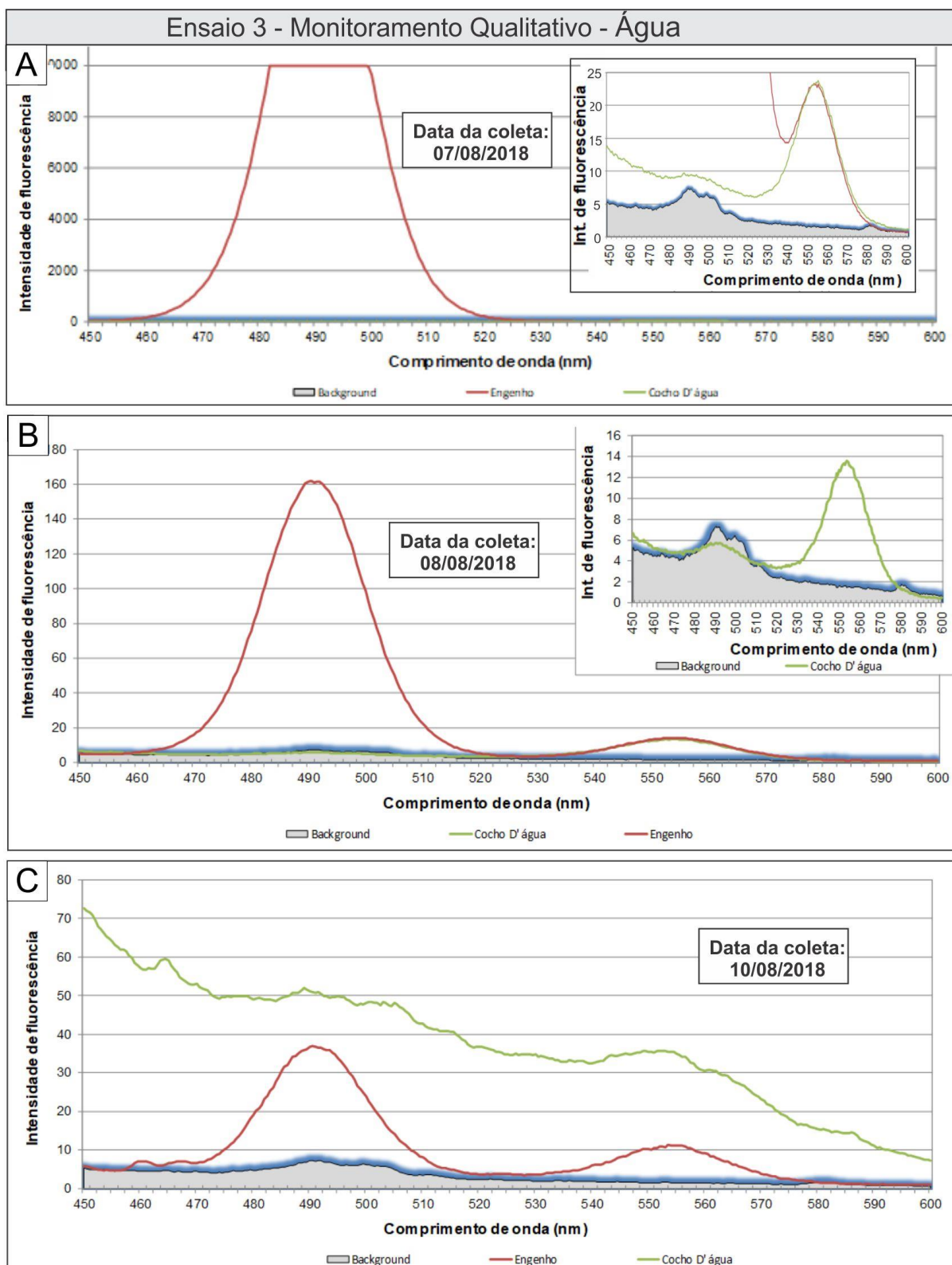


Figura E.1 - Resultados das análises qualitativas de água, evidenciando picos de fluorescência nos comprimentos de onda característicos da excitação da Fluoresceína (491 nm) e da Rodamina WT (561 nm) para as amostras coletadas na surgência Engenho em A) 07/08/2018; B) 08/08/2018 e C) 10/08/2018 e somente de Rodamina WT (561 nm) para as amostras coletadas na surgência Cocho d'água em A) 07/08/2018 e B) 08/08/2018.

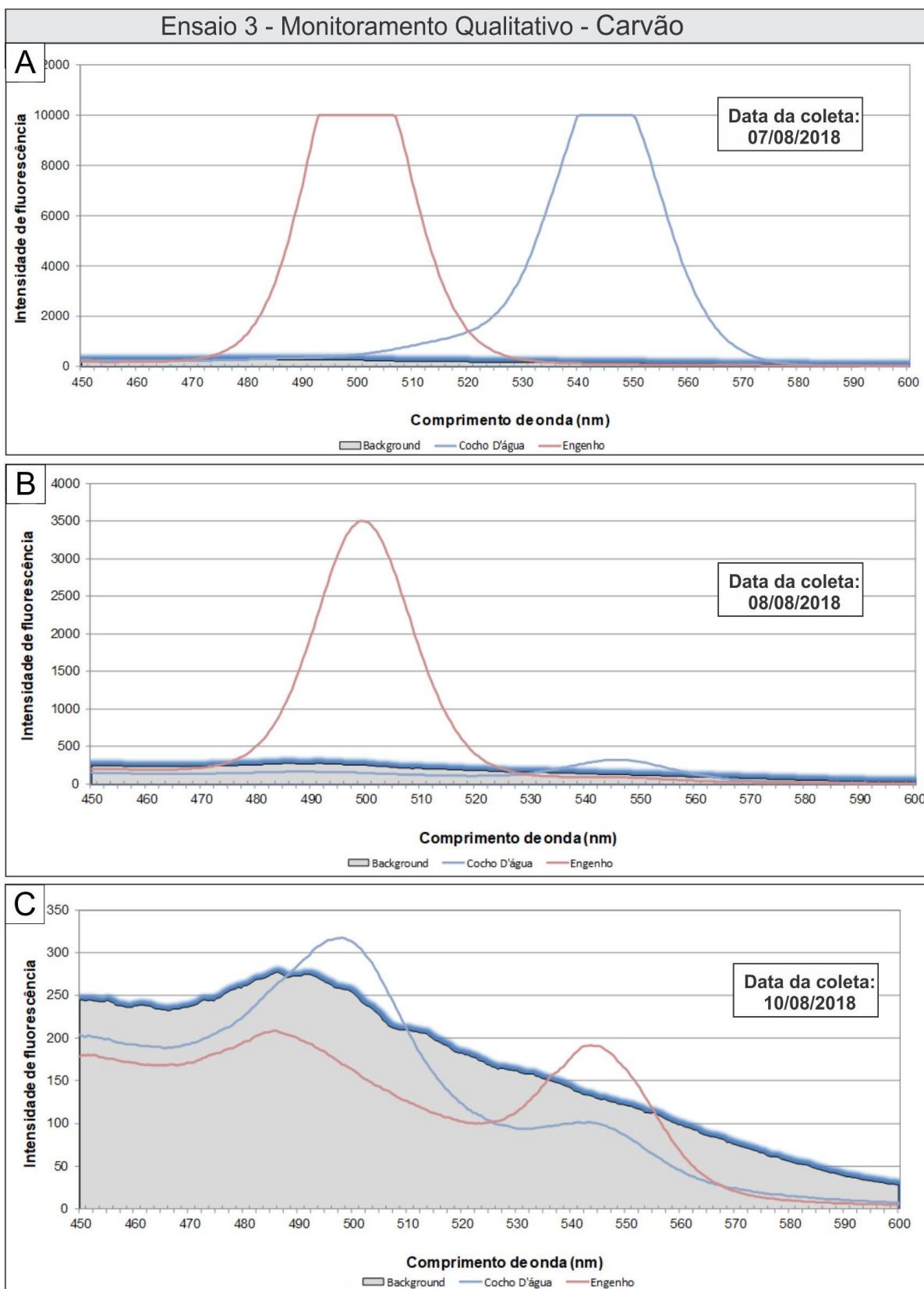


Figura E.2 - Resultados das análises qualitativas de carvão, evidenciando picos de fluorescência nos comprimentos de onda característicos da excitação da Fluoresceína (491 nm) para as amostras coletadas na surgência Engenho em A) 07/08/2018; B) 08/08/2018 e C) 10/08/2018 e da Rodamina WT (561 nm) para as amostras coletadas na surgência Cocho d'água em A) 07/08/2018 e B) 08/08/2018.

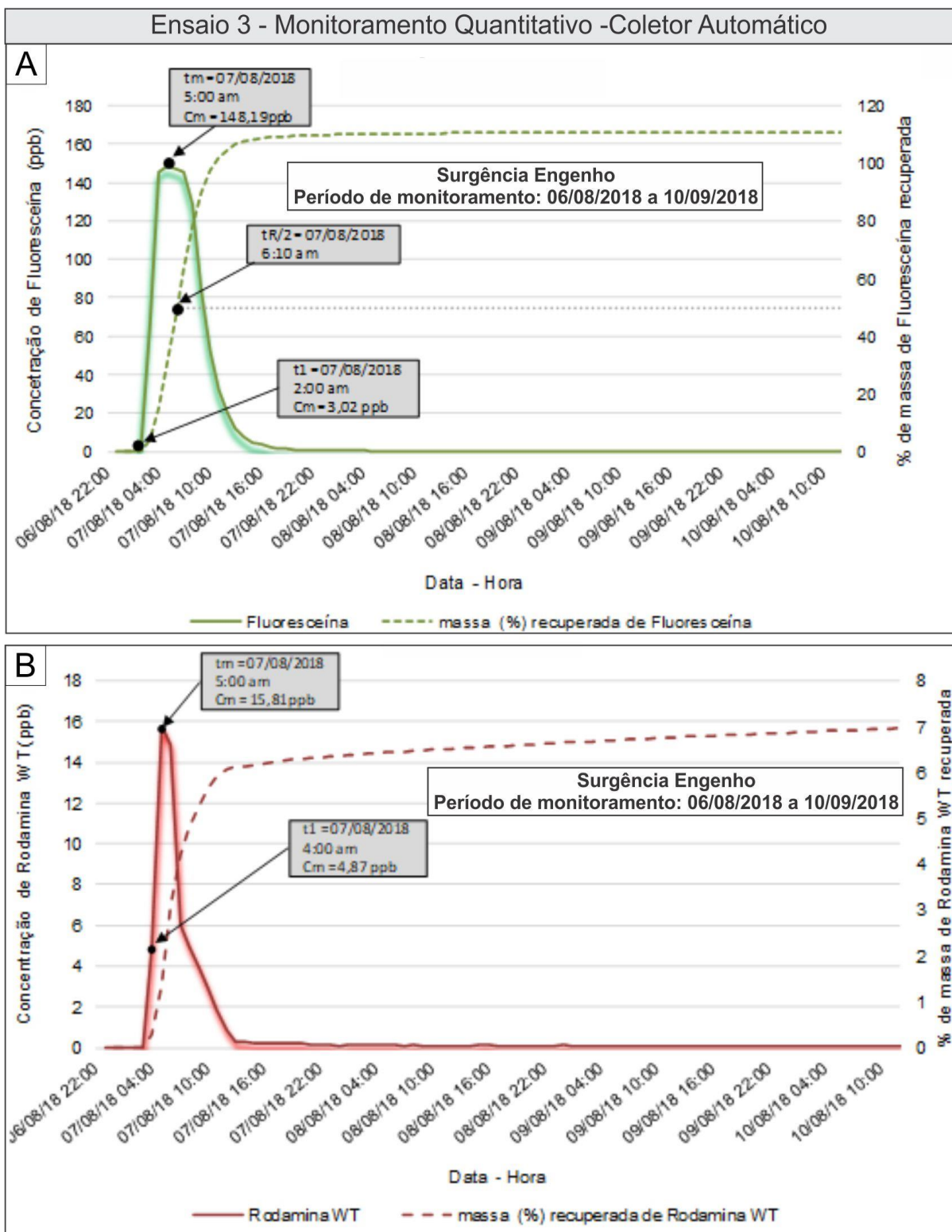


Figura E.3 - Resultados das análises quantitativas realizadas através do coletor automático posicionado na Surgência Engenho. A) Curva de passagem (linha contínua) e recuperação (linha tracejada) do corante Fluoresceína. B) Curva de passagem (linha contínua) e recuperação (linha tracejada) do corante Rodamina WT.

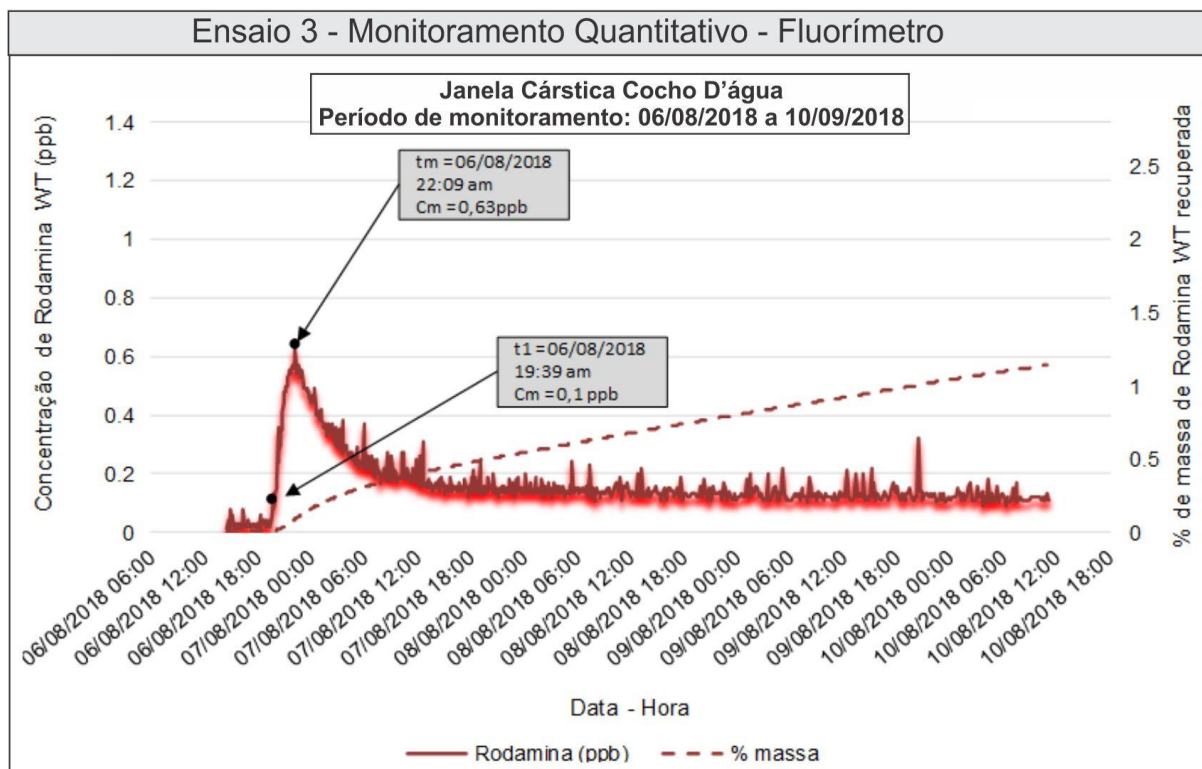


Figura E.456 – Curvas de passagem (linha contínua) e recuperação (tracejada) do corante Rodamina WT obtidas do fluorímetro posicionado na Janela Cárstica Cocho D'água.



## **APÊNDICE F – Ensaio 4**

### **Injeção nos piezômetros próximos à Lagoa do Santo Antônio**

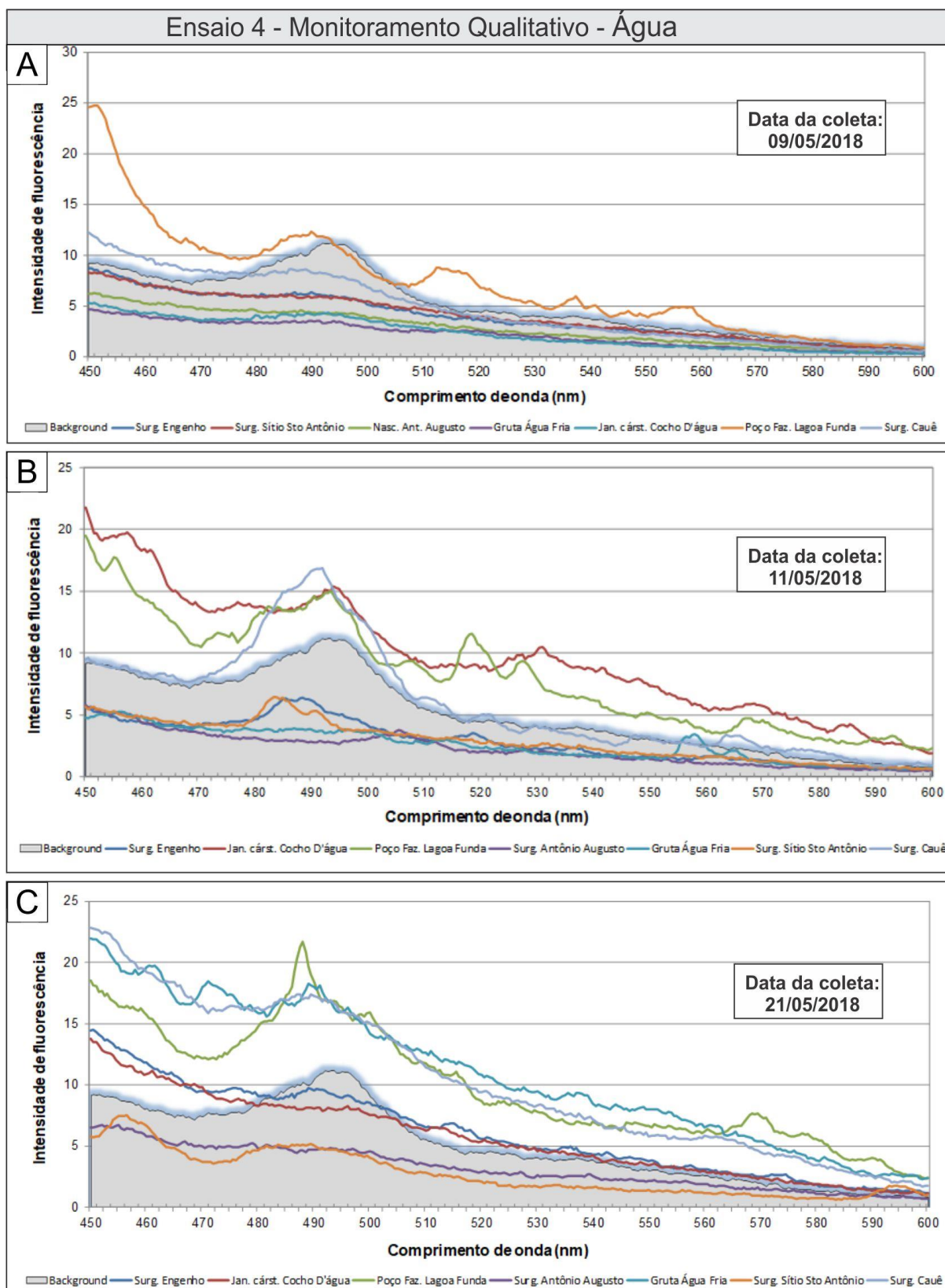


Figura F.1 - Resultado das análises qualitativas das amostras de água coletadas no Ensaio 4 em A) 09/05/2018 e B) 11/05/2018 e C) 21/05/2018.

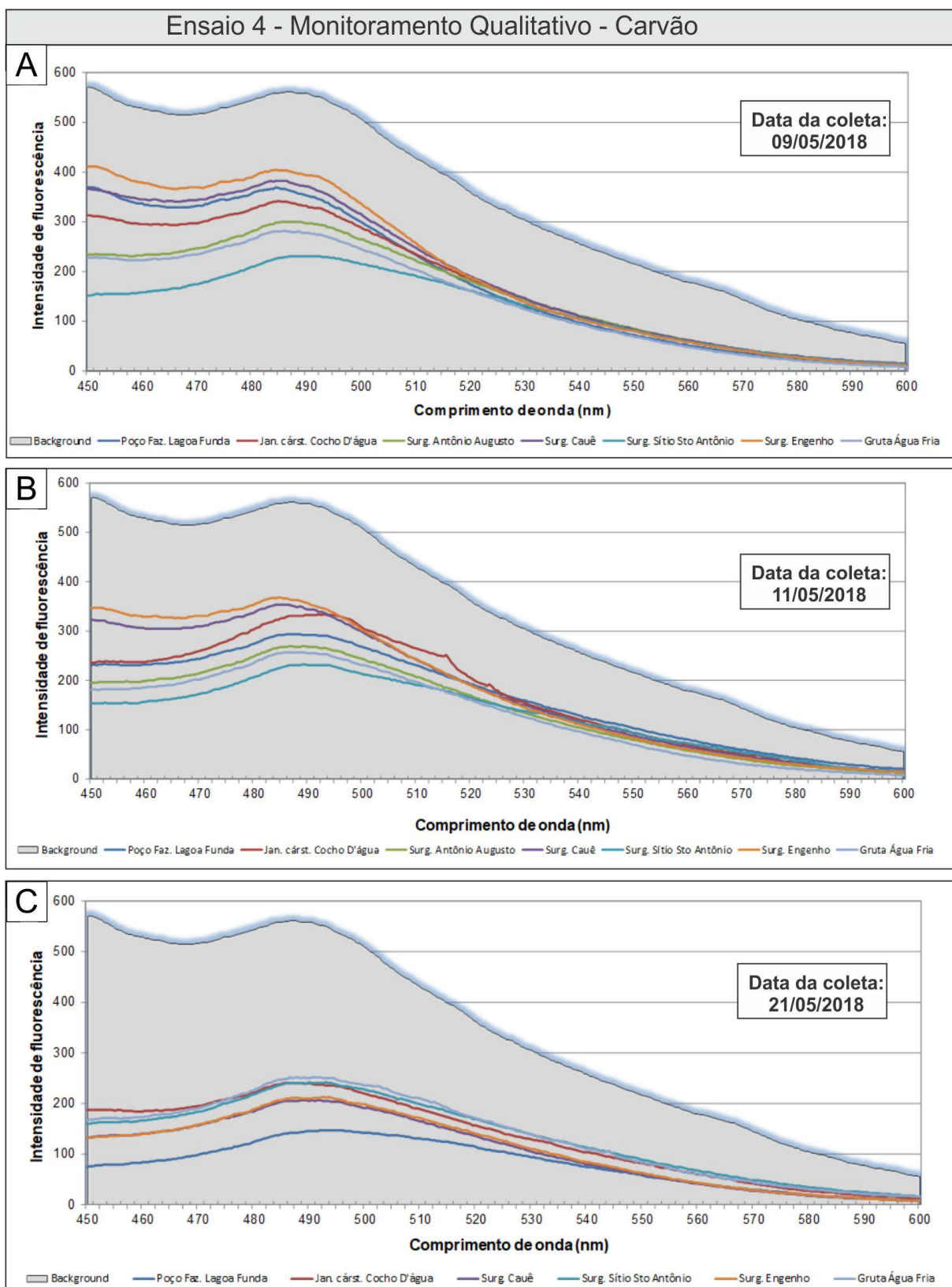


Figura F.2 - Resultado das análises qualitativas das amostras de carvão coletadas no Ensaio 4 em A) 09/05/2018 e B) 11/05/2019 e C) 21/05/2018.

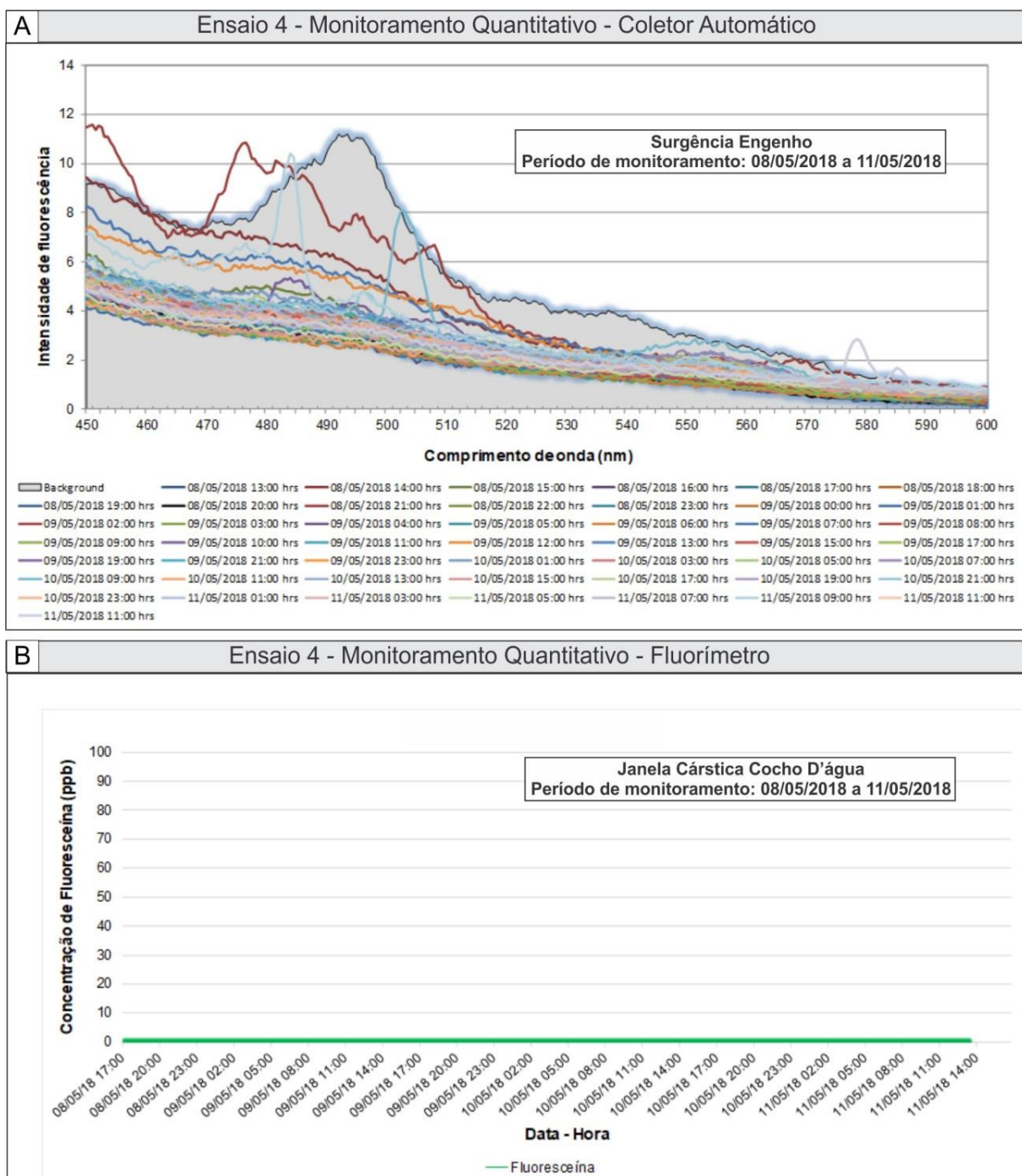


Figura F.3 - Resultados das análises quantitativas realizadas no Ensaio 4 através A) do Coletor Automático posicionado na Surgência do Engenho (ID-26), no período de 08 a 11/05/2018 e B) do Fluorímetro posicionado na Janela Cárstica Cocho D'água (ID-25) no período de 08 a 11/5/2018.

**APÊNDICE G – Ensaio 5**

**Injeção na Gruta do Morro Redondo**

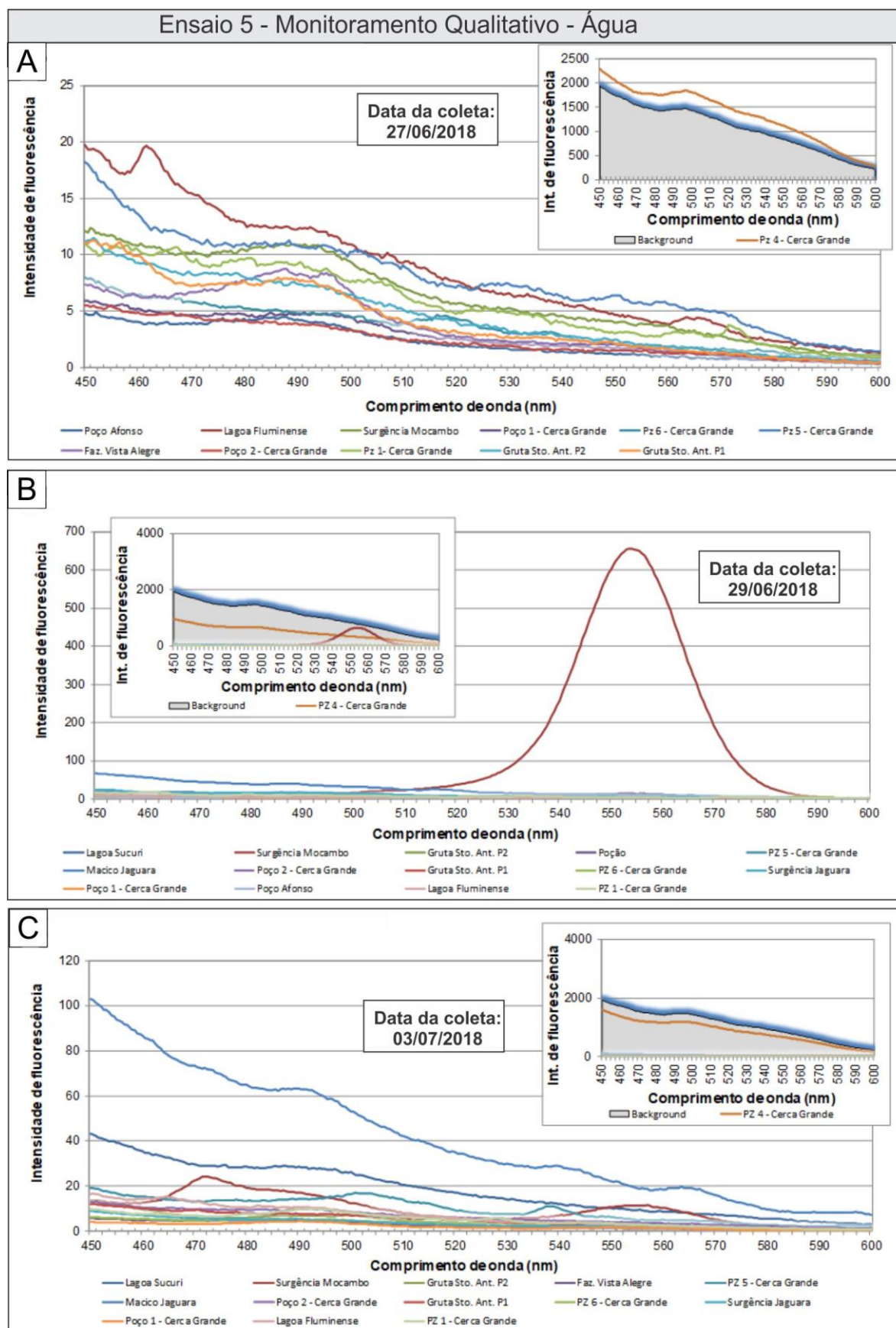


Figura G.1 - Resultados das análises qualitativas de água, para as amostras coletadas em A) 27/06/2018; (B) 29/06/2018, em que se observa um pico de fluorescência no comprimento de onda característico da excitação da Rodamina WT para a Surgência do Mocambo (ID-21), e C) 03/07/2018.

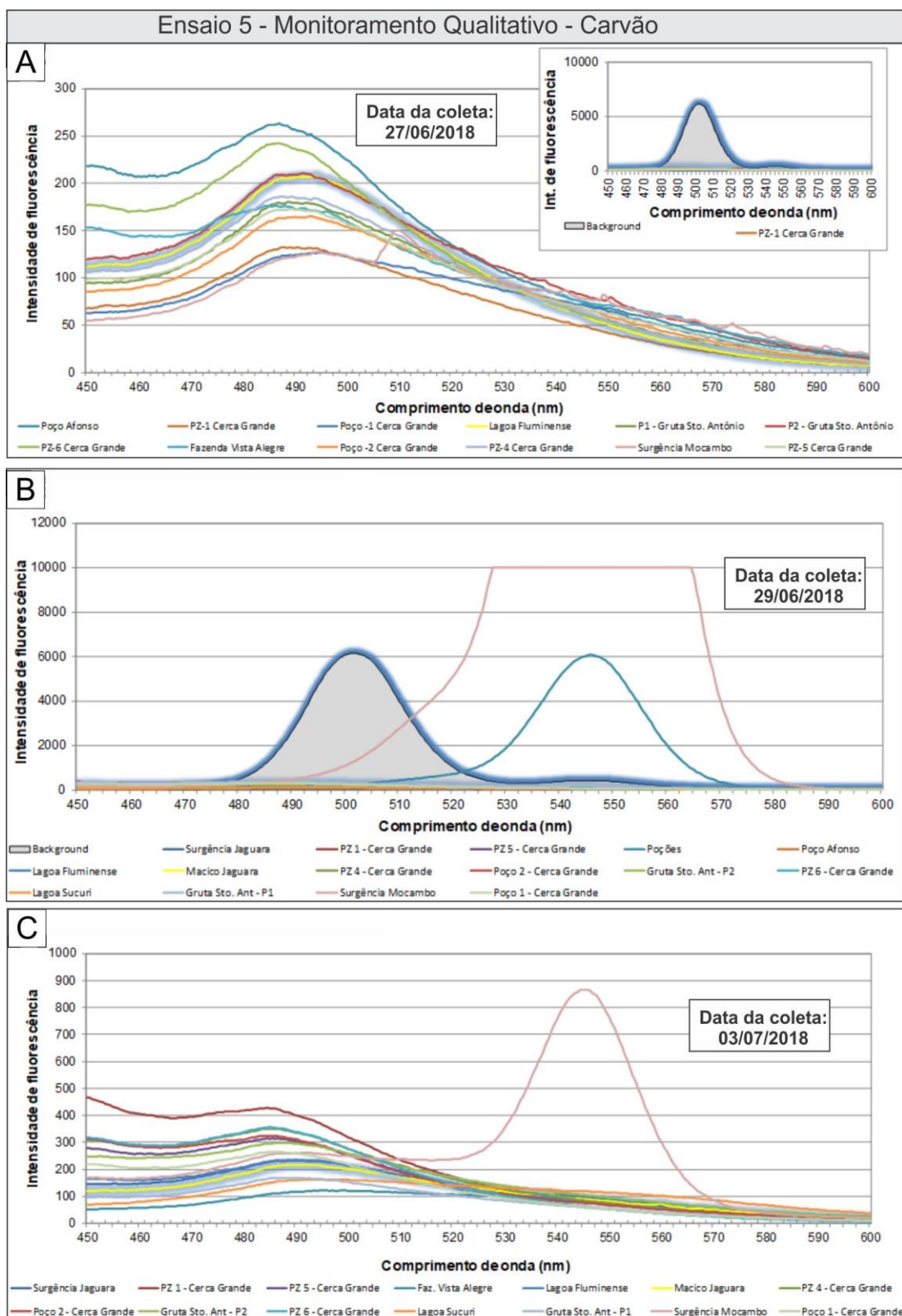


Figura G.2 - Resultados das análises qualitativas de carvão, para as amostras coletadas em A) 27/06/2018; B) 29/06/2018, em que se observa um pico de fluorescência no comprimento de onda característico da excitação da Rodamina WT para a Surgência do Mocambo (ID-21) e Poções (ID-34) e C) 03/07/2018, em que se observa um pico de fluorescência no comprimento de onda característico da excitação da Rodamina WT para a Surgência do Mocambo (ID-21).

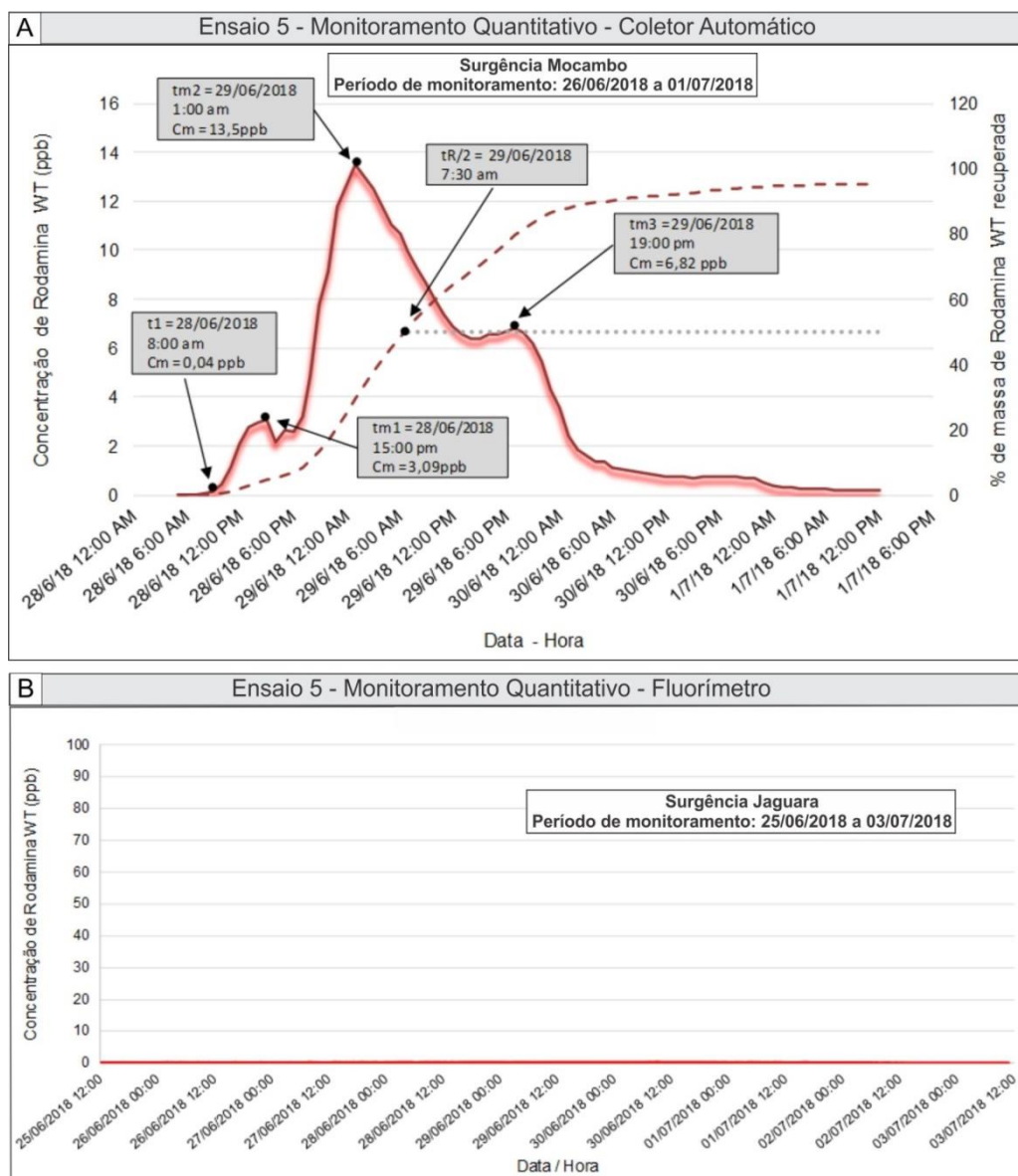


Figura G.3 - Resultados das análises quantitativas realizadas através A) do coletor automático posicionado na Surgência Mocambo, apresentando a curva de passagem (linha contínua) e recuperação (linha tracejada) do corante Rodamina WT e B) do fluorímetro posicionado na Surgência Jaguará (ID-18), com resultado negativo.



**APÊNDICE H – Ensaio 6**

**Injeção na Gruta Zé Irene**

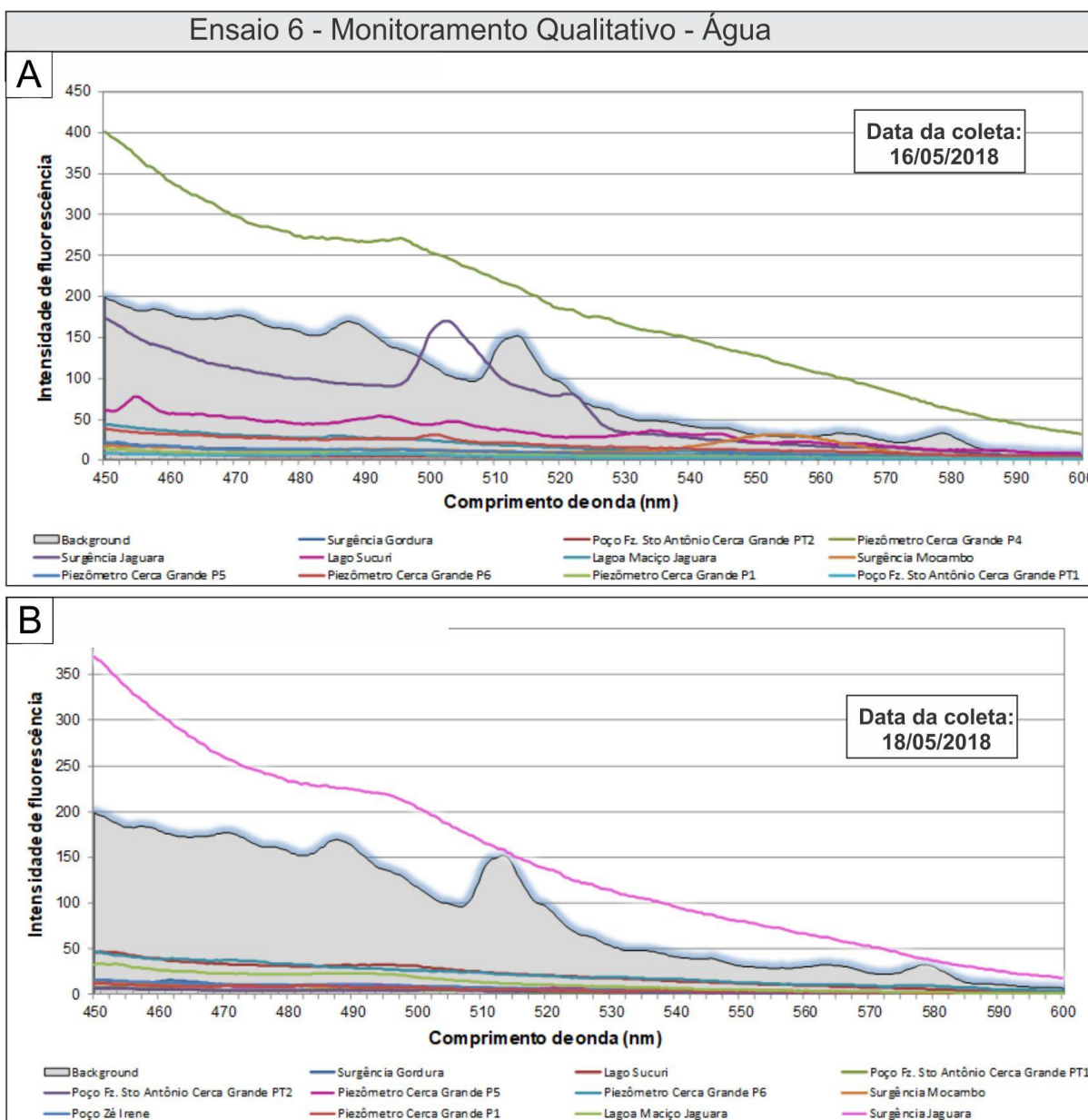


Figura H.157 - Resultados das análises qualitativas de água para as amostras coletadas em A) 16/05/2018 e em B) 18/05/2018, sem resultados positivos.

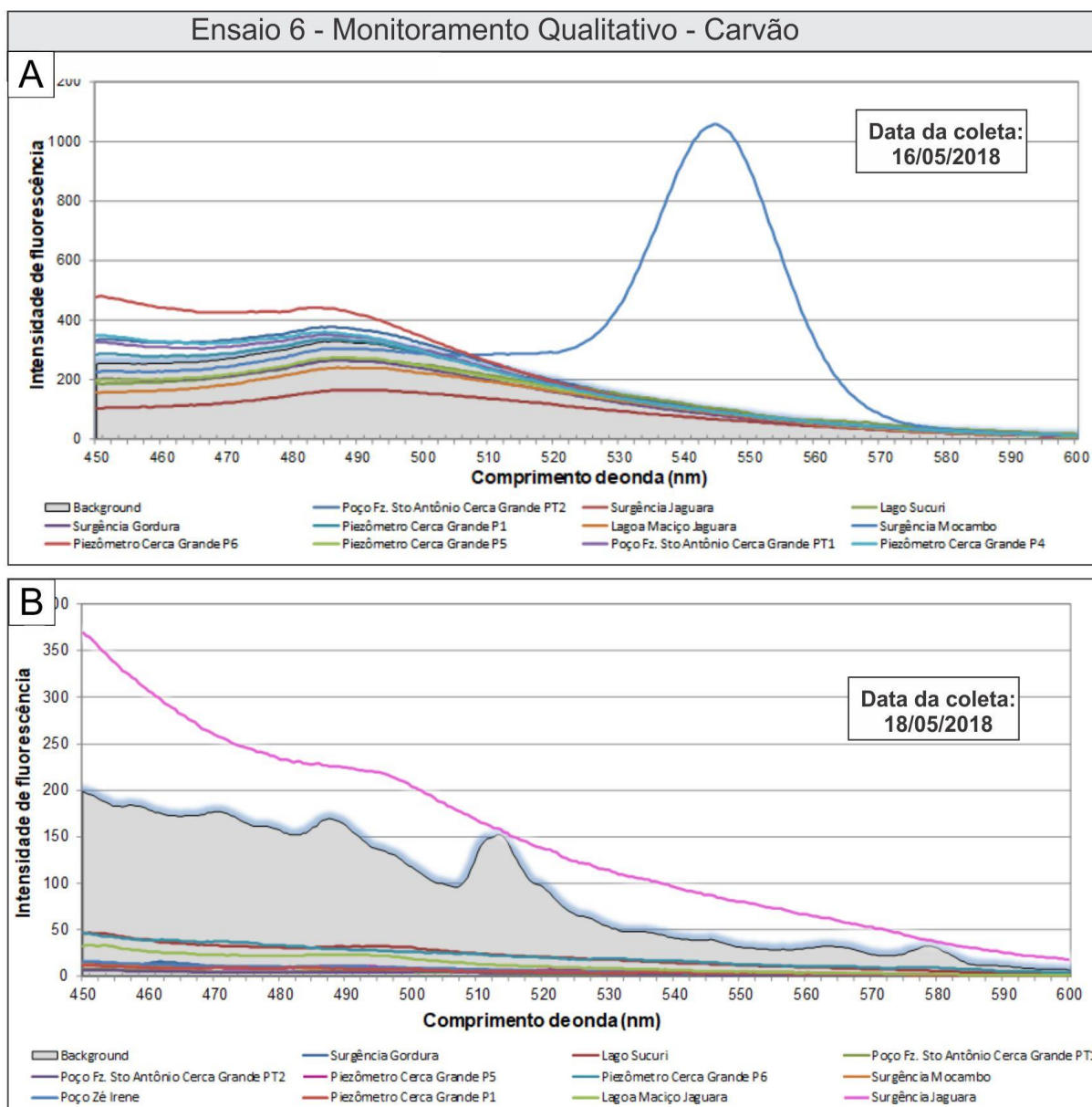


Figura H.2 - Resultados das análises qualitativas de carvão, para as amostras coletadas em A) 16/05/2018, em que se observa um pico de fluorescência no comprimento de onda característico da excitação da Rodamina WT para a Surgência do Mocambo (ID-21), e em B) 18/05/2018.

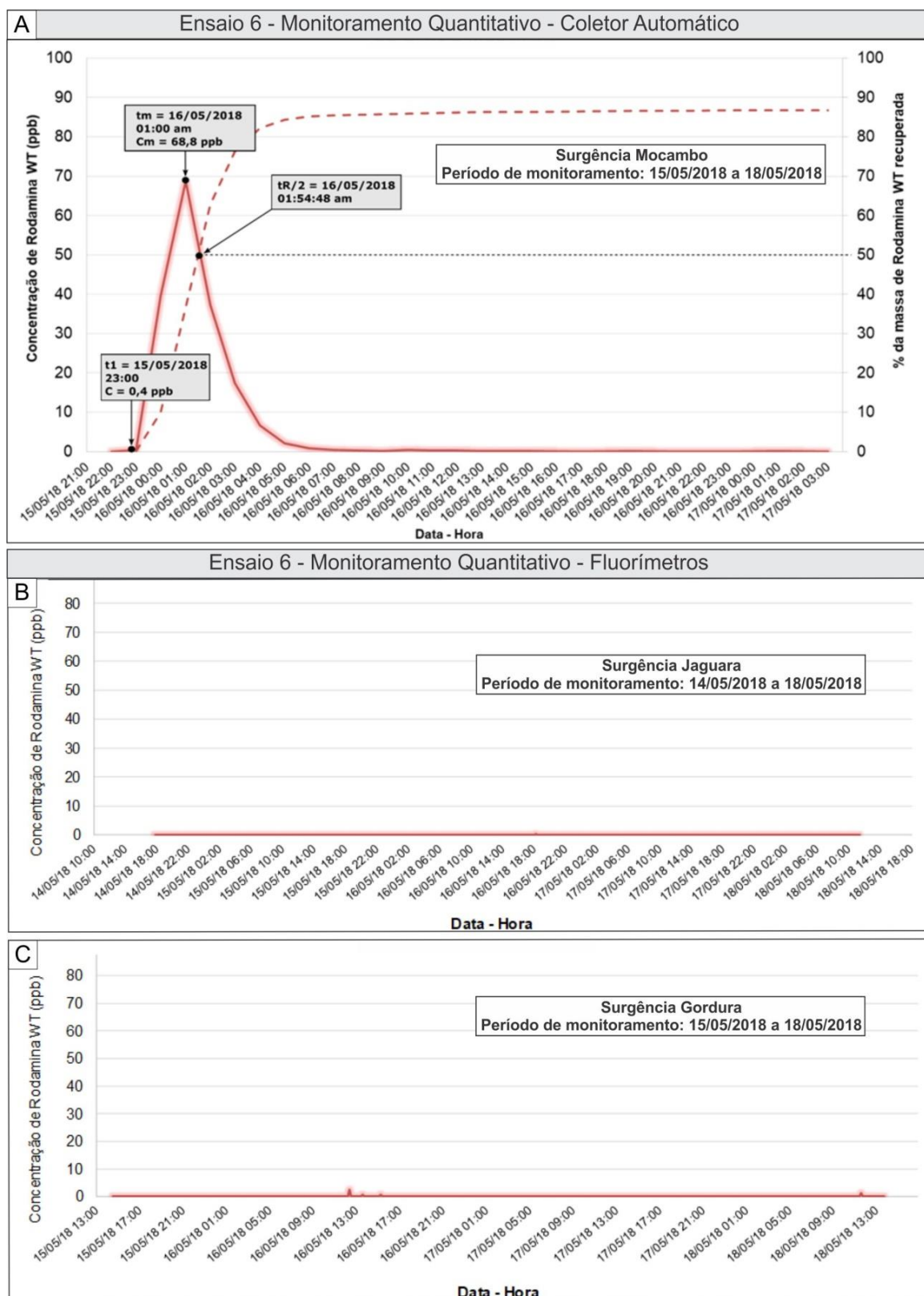


Figura H.3 - Resultados das análises quantitativas realizadas através: A) do coletor automático posicionado na Surgência Mocambo, apresentando as curvas de passagem (linha contínua) e recuperação (linha tracejada) do corante Rodamina WT; e dos fluorímetros posicionados na B) Surgência Jaguará (ID-18) e C) Surgência Gordura (ID-38).

**APÊNDICE I – Ensaio 7 e 8**

**Injeção no Sumidouro Palmeira e Lagoa do Bom Jardim**

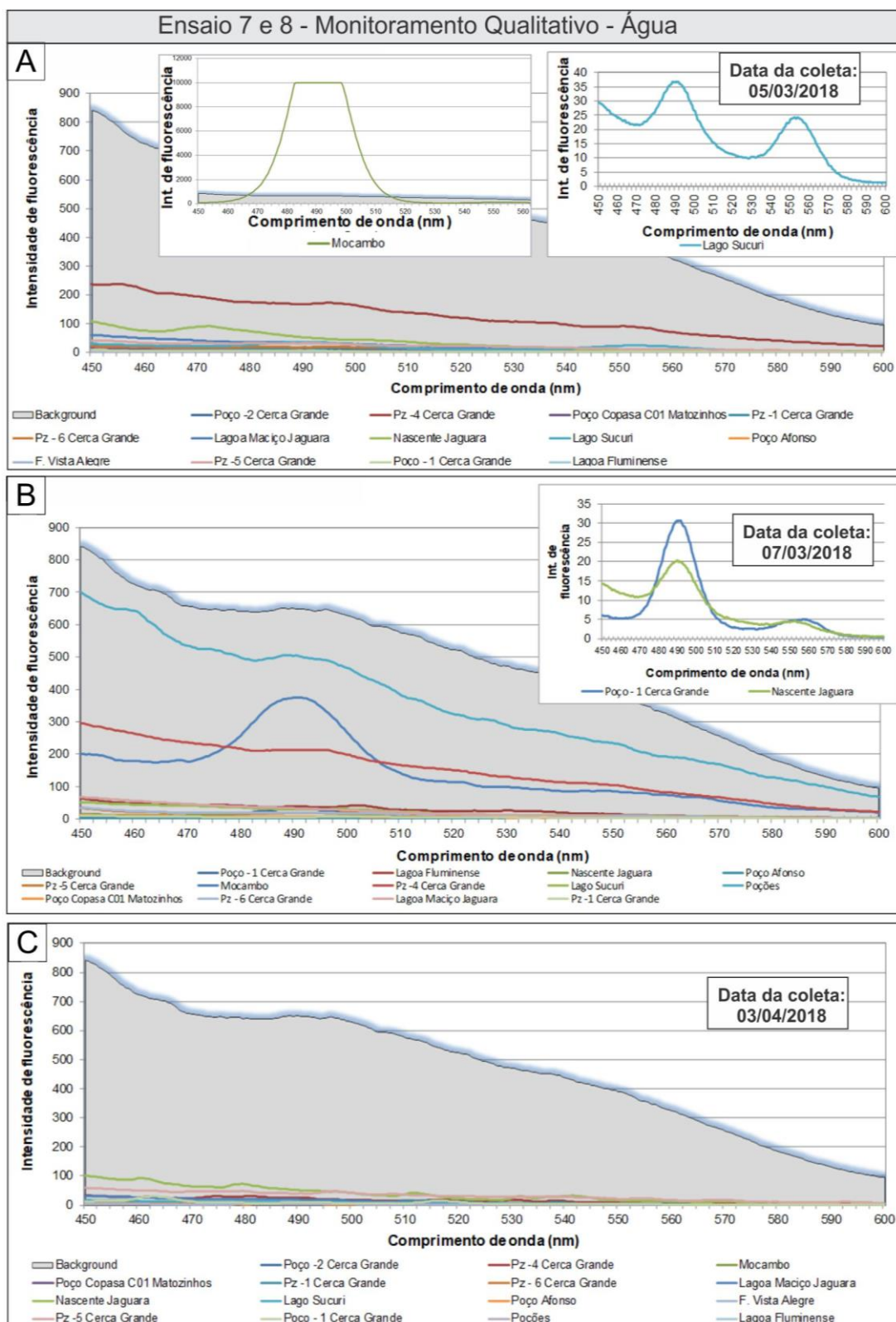


Figura I.1 - Resultados das análises qualitativas de água, para as amostras coletadas em A) 05/03/2018, em que se observam picos de fluorescência nos comprimentos de onda característicos de excitação da Fluoresceína e Rodamina WT para a Surgência do Mocambo (ID-21) e Lago Sucuri (ID-20); em B) 07/03/2018, em que se observam picos de fluorescência nos comprimentos de onda característicos da excitação da Fluoresceína e Rodamina WT para o Poço Fz. Sto. Antônio cerca Grande PT1 (ID-15) e Nascente Jaguará (ID-18) e em C) 03/04/2018, sem indicação de resultados positivos.

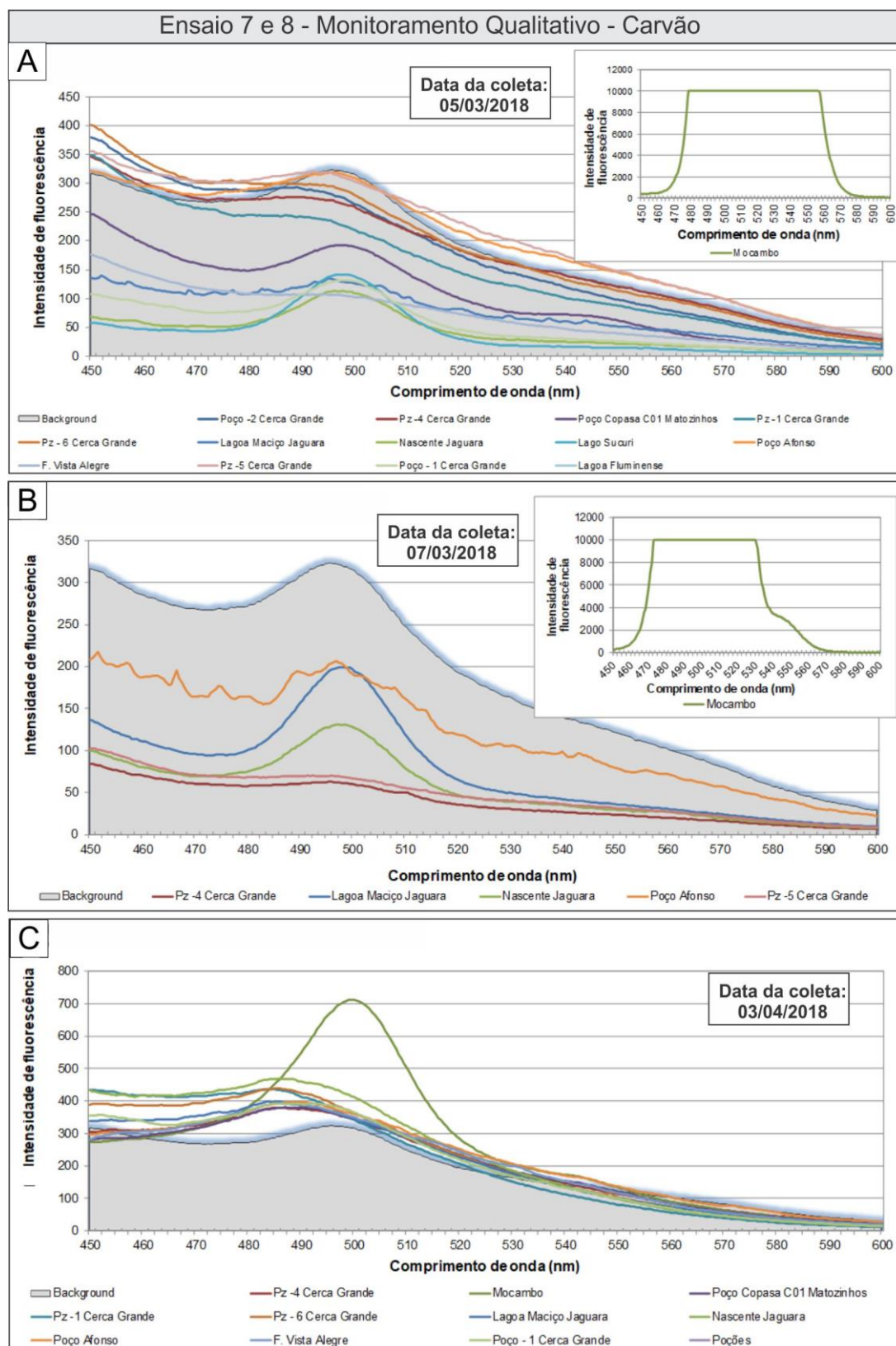


Figura I.2 – Resultados das análises qualitativas de carvão, para as amostras coletadas em A) 05/03/2018 e em B) 07/03/2018, em que se observam picos de fluorescência englobando os comprimentos de onda característicos de excitação da Fluoresceína e Rodamina WT para a Surgência do Mocambo (ID-21) e em C) 03/04/2018, que evidencia um pico de fluorescência no comprimento de onda característico da excitação da Fluoresceína para a Surgência Mocambo.

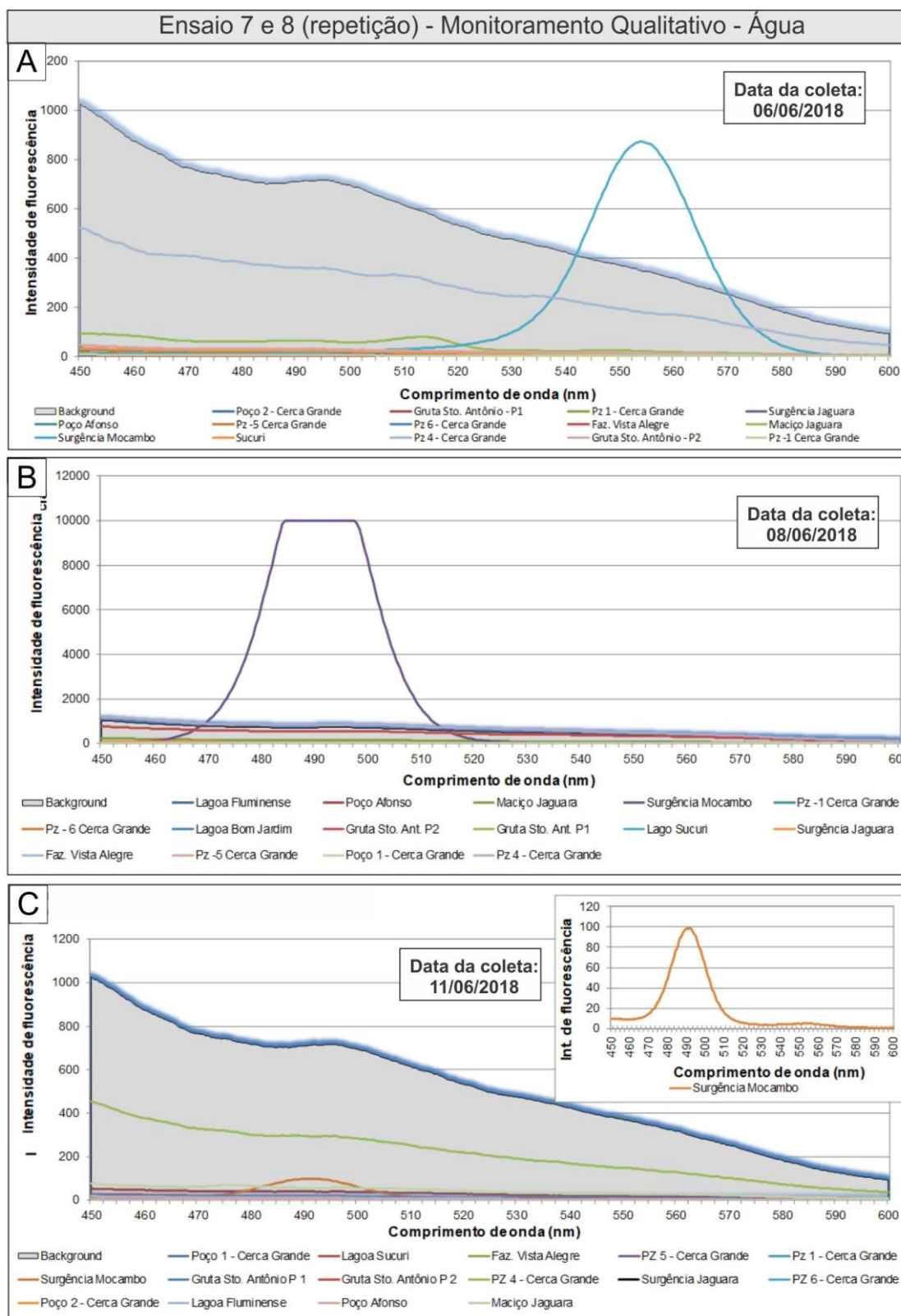


Figura I.3 - Resultados das análises qualitativas de água, para as amostras coletadas em A) 06/06/2018, em que se observa um pico de fluorescência no comprimento de onda característico de excitação da Rodamina WT para a Surgência do Mocambo (ID-21); em B) 08/06/2018, em que se observa um pico de fluorescência no comprimento de onda característico de excitação da Fluoresceína para a Surgência do Mocambo e em C) 11/06/2018, em que se nota um pico de fluorescência no comprimento de onda característico de excitação da Fluoresceína para a Surgência do Mocambo.



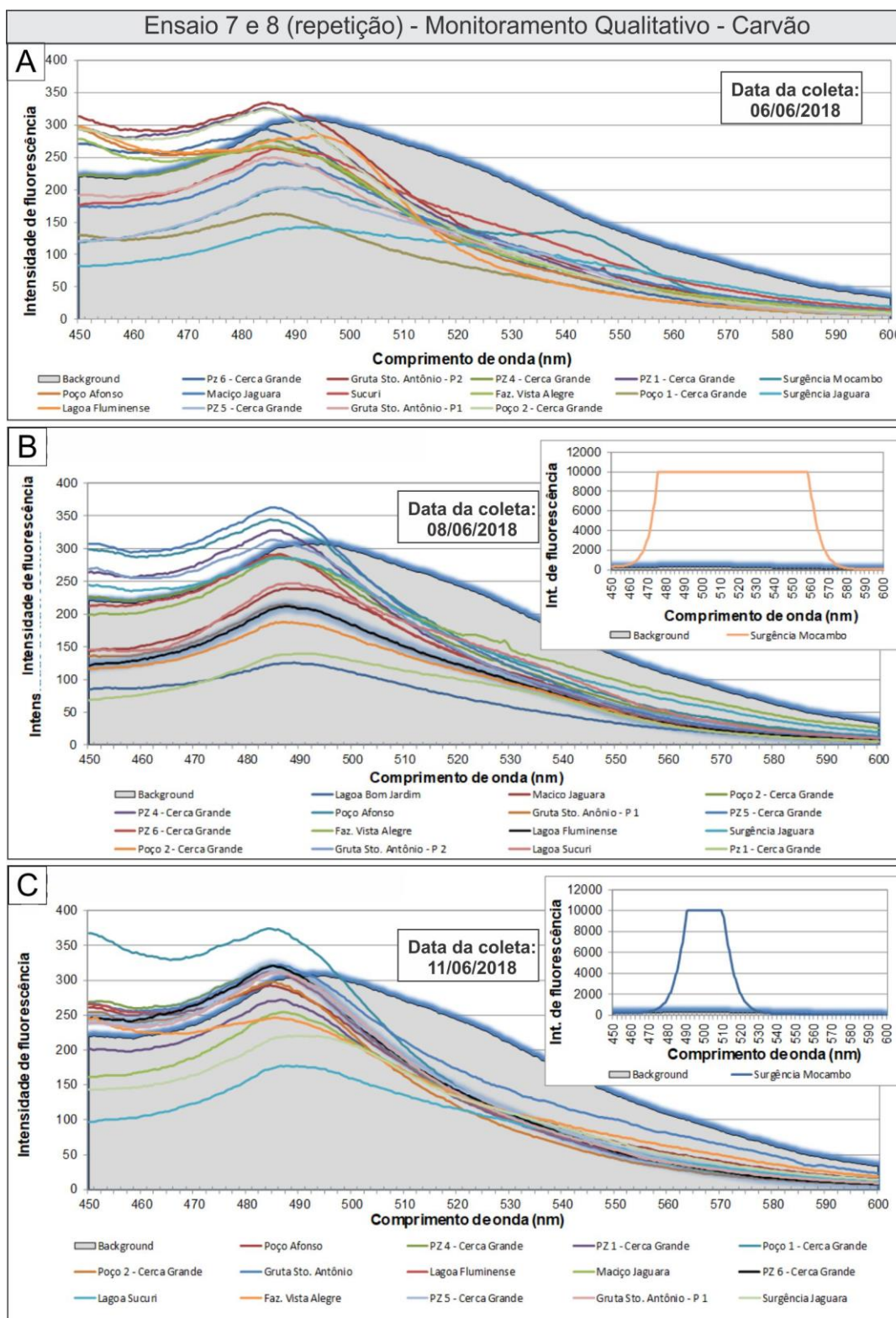


Figura I.4 - Resultados das análises qualitativas de carvão, para as amostras coletadas em A) 06/06/2018, em B) 08/06/2018, em que se observa um pico de fluorescência englobando os comprimentos de onda característicos de excitação da Rodamina WT e Fluoresceína para a Surgência Mocambo e em C) 11/06/2018, em que se nota um pico de fluorescência no comprimento de onda característico de excitação da Fluoresceína para a Surgência do Mocambo.

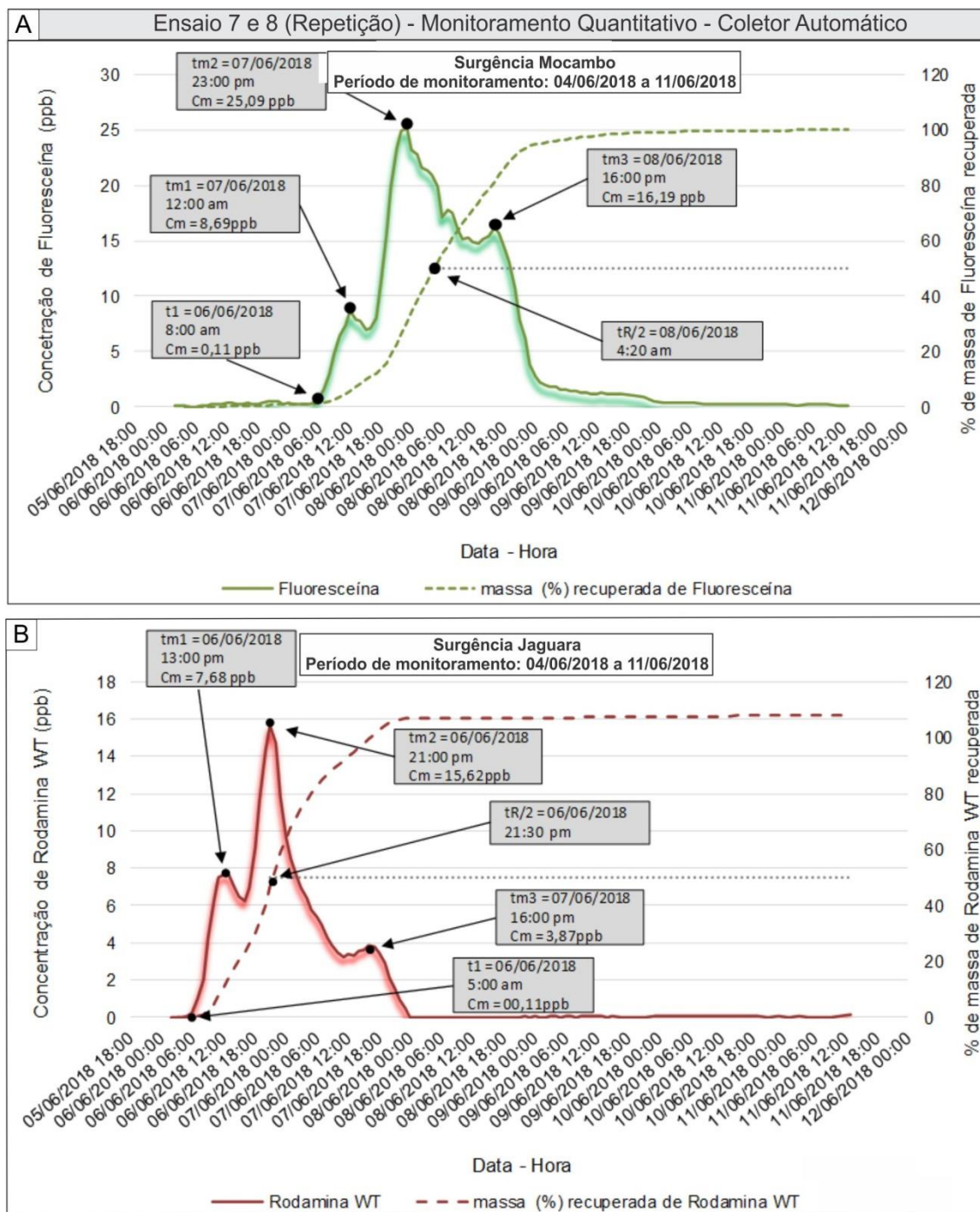


Figura I.5 – Resultados das análises quantitativas realizadas através do coletor automático posicionado na Surgência Mocambo, apresentando as curvas de passagem (linha contínua) e recuperação (linha tracejada) para o corante A) Fluoresceína proveniente do Sumidouro Palmeira (ID-41) e B) Rodamina WT proveniente da Lagoa Bom Jardim (ID-40).

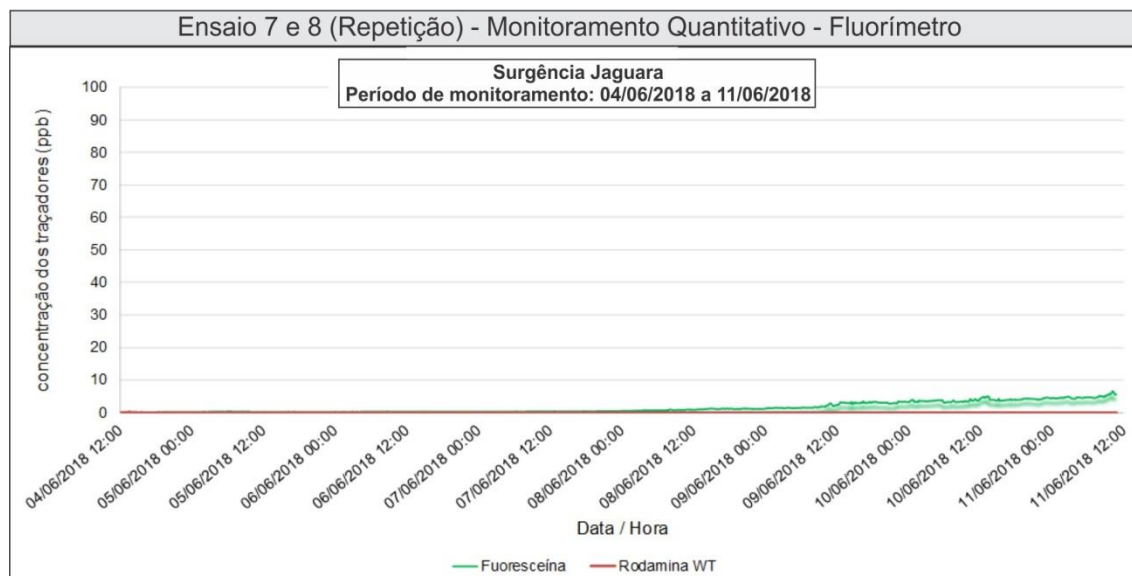


Figura I.6 - Resultados das análises quantitativas realizadas através do fluorímetro posicionado na Surgência Jaguará (ID-18), não indicando a passagem dos corantes Fluoresceína e Rodamina WT.

## **APÊNDICE J – Ensaio 9**

### **Injeção nos sumidouros Goiabeiras e Bebidas**

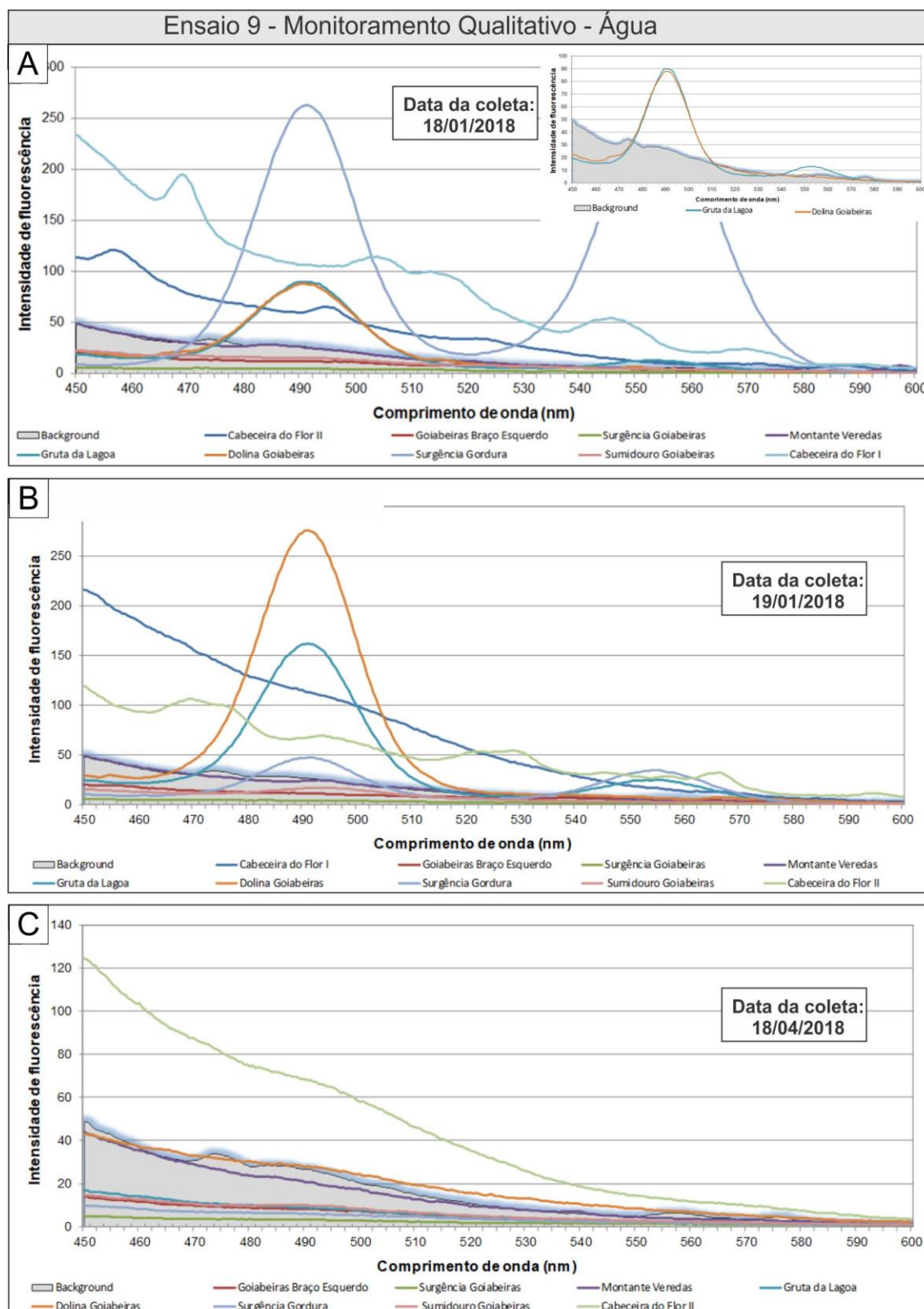


Figura J.1 - Resultados das análises qualitativas de água, para as amostras coletadas em A) 18/01/2018 e B) 19/01/2018 em que se observam picos de fluorescência nos comprimentos de onda característicos de excitação da Rodamina WT e Fluoresceína para a Surgência do Gordura (ID-38) e Gruta da Lagoa (ID-45) e somente de Fluoresceína para a Dolina Goiabeiras (ID-51) e em C) 18/04/2018, em que não se observa nenhum pico de fluorescência.

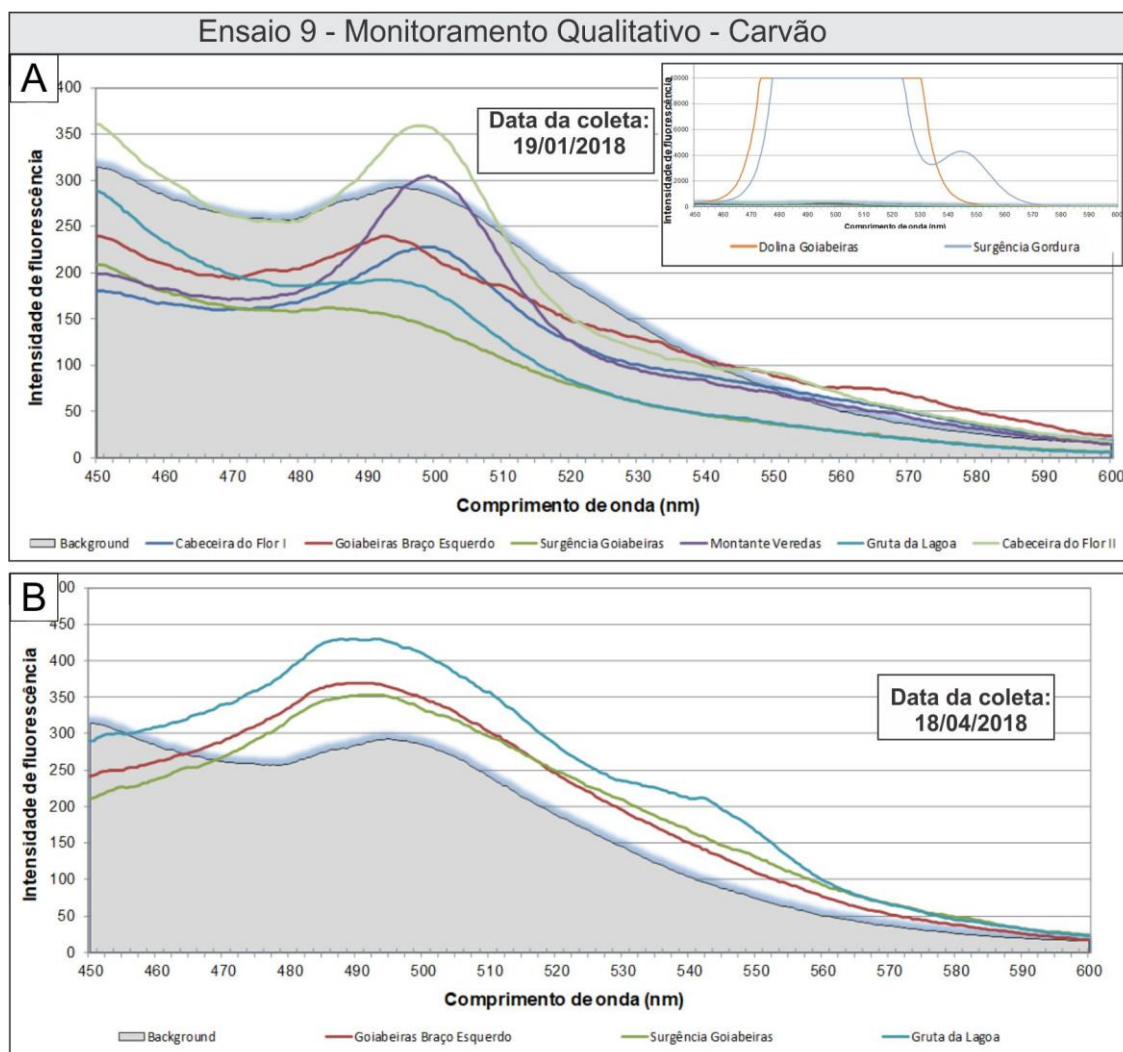


Figura J.2 - Resultados das análises qualitativas de carvão, para as amostras coletadas em A) 19/01/2018, em que se observam picos de fluorescência nos comprimentos de onda característicos de excitação da Rodamina WT e Fluoresceína para a Surgência do Gordura (ID-38) e somente de Fluoresceína para a Dolina Goiabeiras (ID-51); e em B) 18/04/2018, em que não se observa nenhum pico de fluorescência.

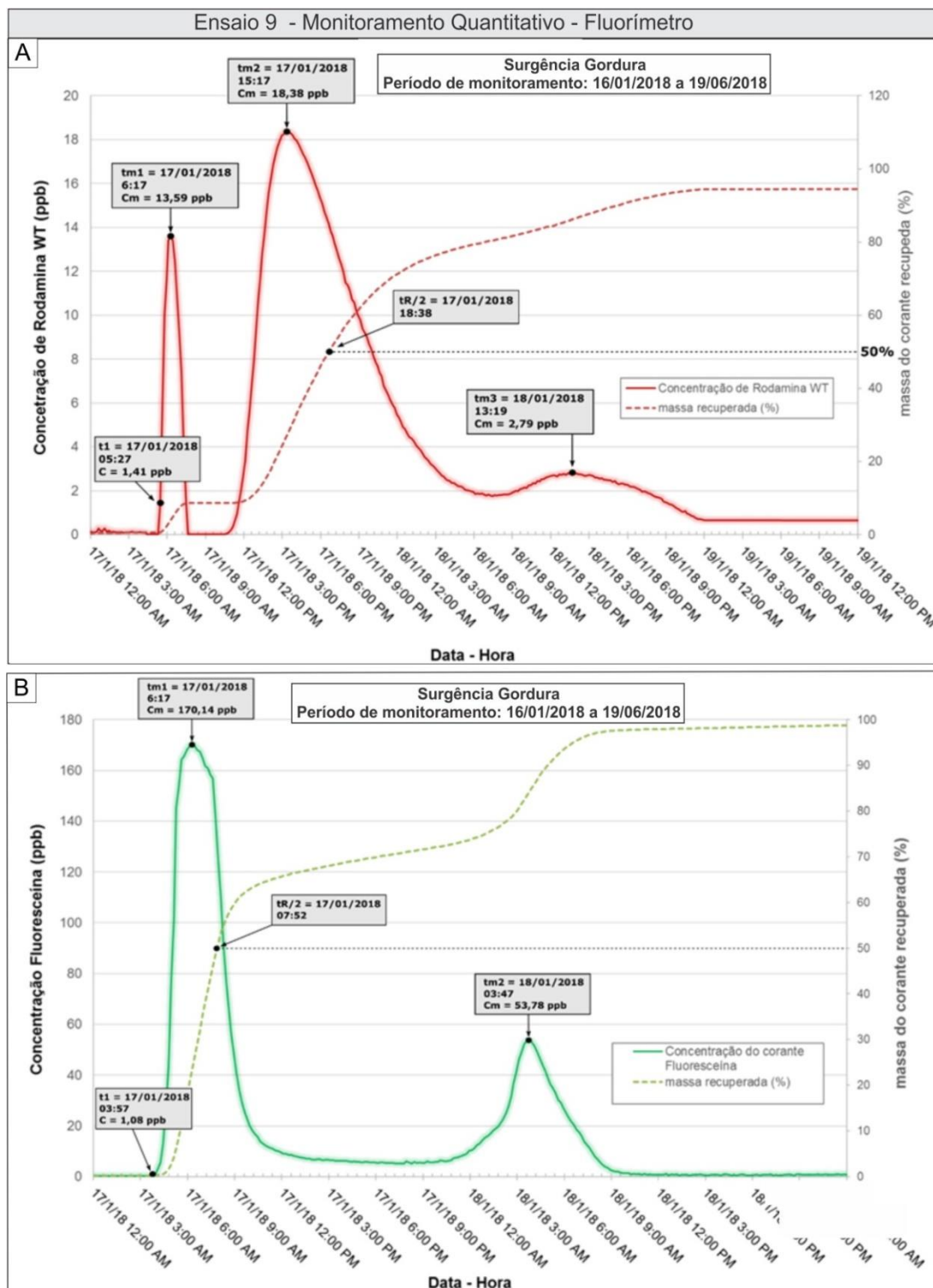


Figura J.3 – Resultados das análises quantitativas realizadas através do fluorímetro posicionado na Surgência Gordura, apresentando as curvas de passagem (linha contínua) e recuperação (linha tracejada) para os corantes A) Rodamina WT proveniente do Sumidouro Bebida e B) Fluoresceína proveniente do Sumidouro Goiabeiras.

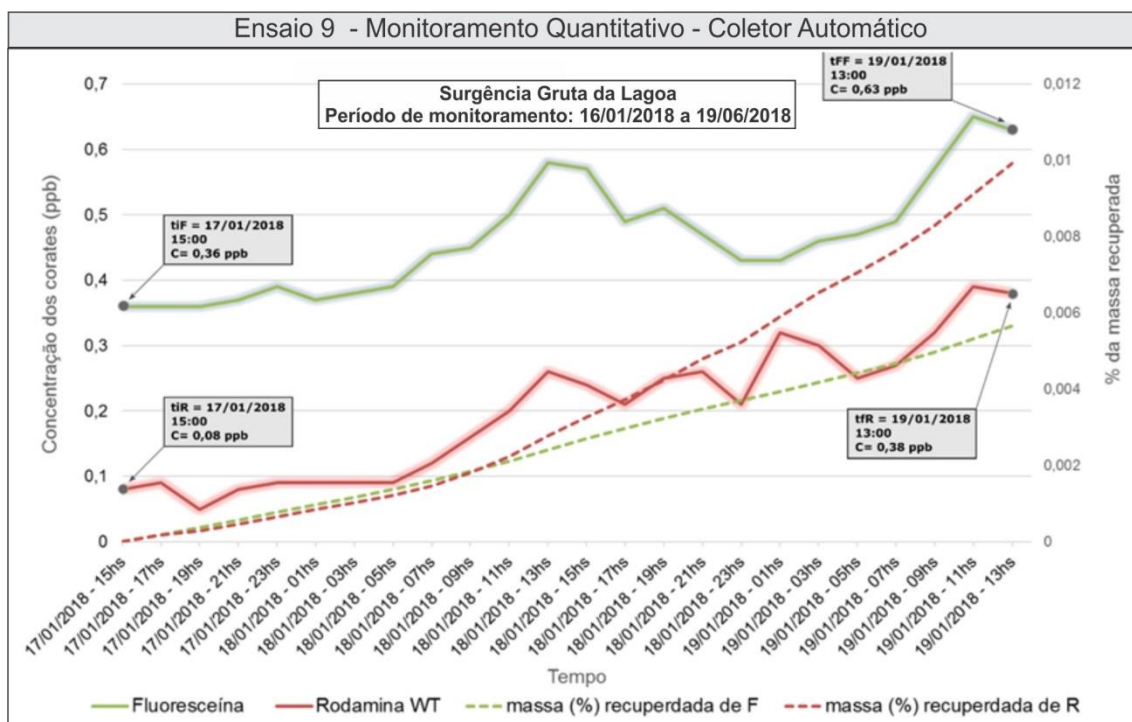


Figura J.4 - Resultados das análises quantitativas realizadas através do fluorímetro posicionado na Gruta da Lagoa, apresentando as curvas de passagem (linha contínua) e recuperação (linha tracejada) para os corantes Rodamina WT, proveniente do Sumidouro Bebida, e Fluoresceína, proveniente do Sumidouro Goiabeiras.



**APÊNDICE K – Ensaio 10**  
**Injeção na Gruta Lapa Vermelha**

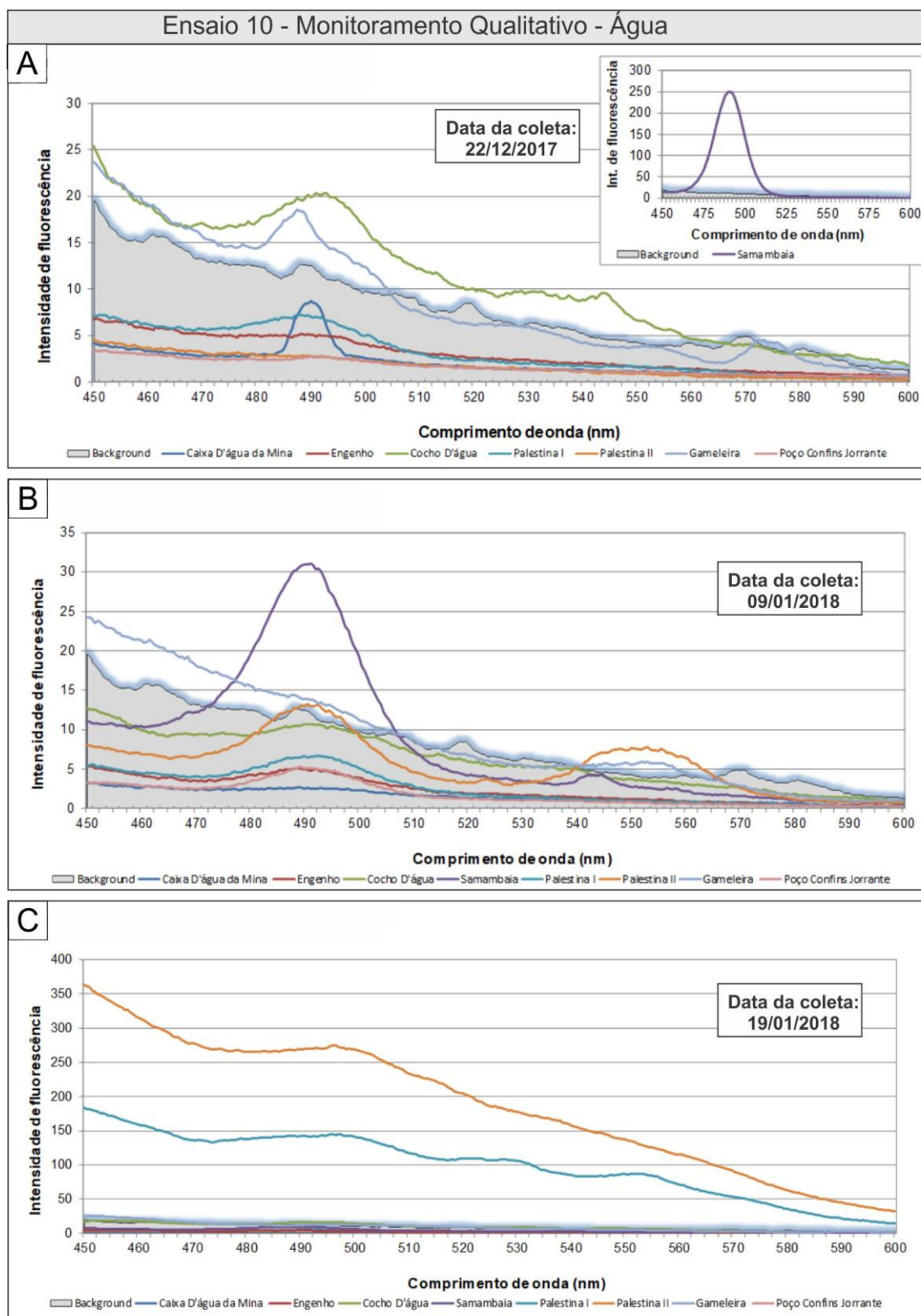


Figura K.1 - Resultados das análises qualitativas de água, para as amostras coletadas em A) 22/12/2018 e B) 09/01/2018, em que se observam picos de fluorescência no comprimento de onda característico de excitação da Fluoresceína para a Surgência Samambaia (ID-53); e em B) 19/01/2018, em que não se observa nenhum pico de fluorescência.

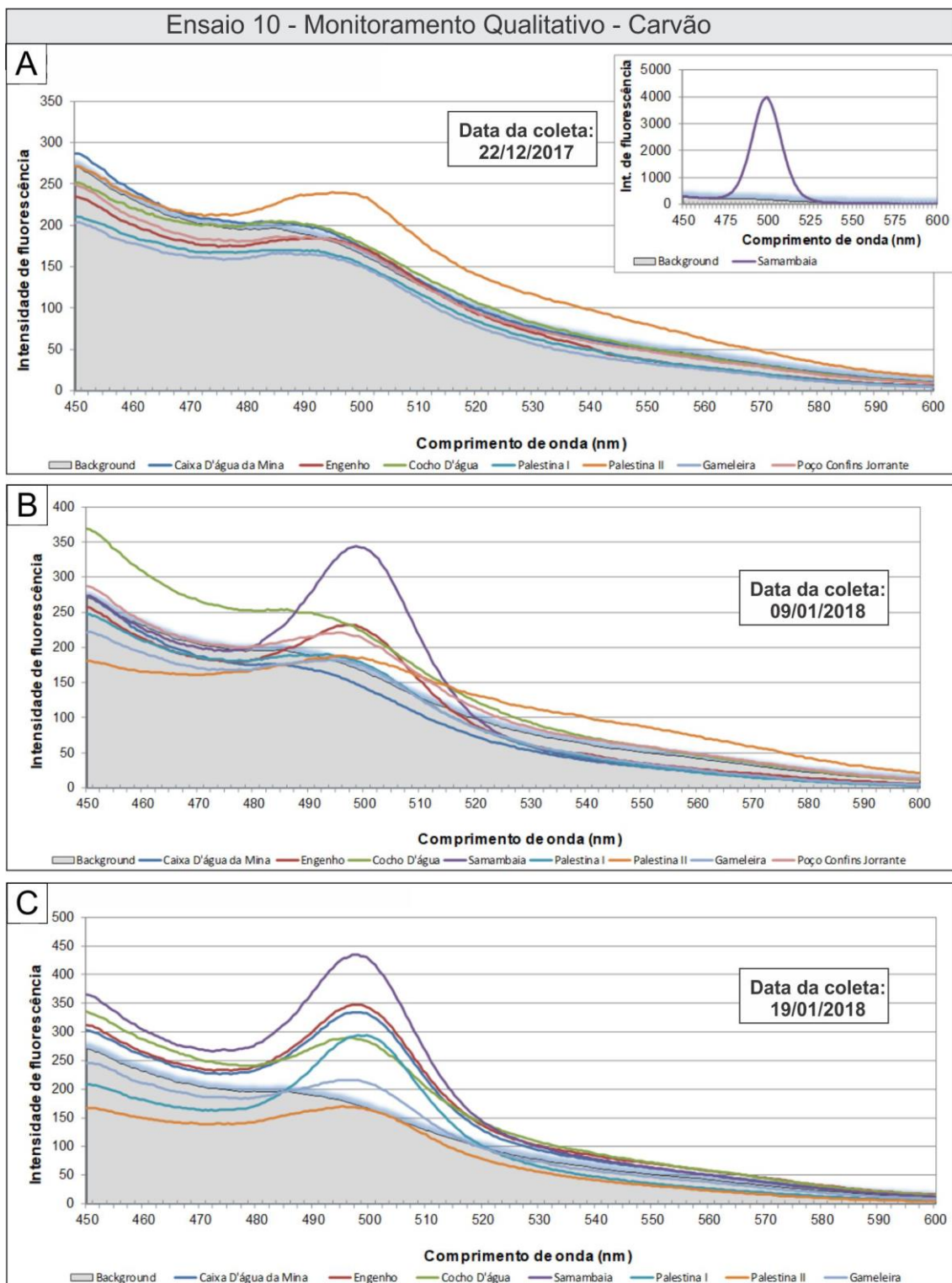


Figura K.2 - Resultados das análises qualitativas de carvão, para as amostras coletadas em A) 22/12/2018, B) 09/01/2018 e C) 19/01/2018 em que se observam picos de fluorescência no comprimento de onda característicos de excitação da Fluoresceína para a Surgência Samambaia (ID-53).

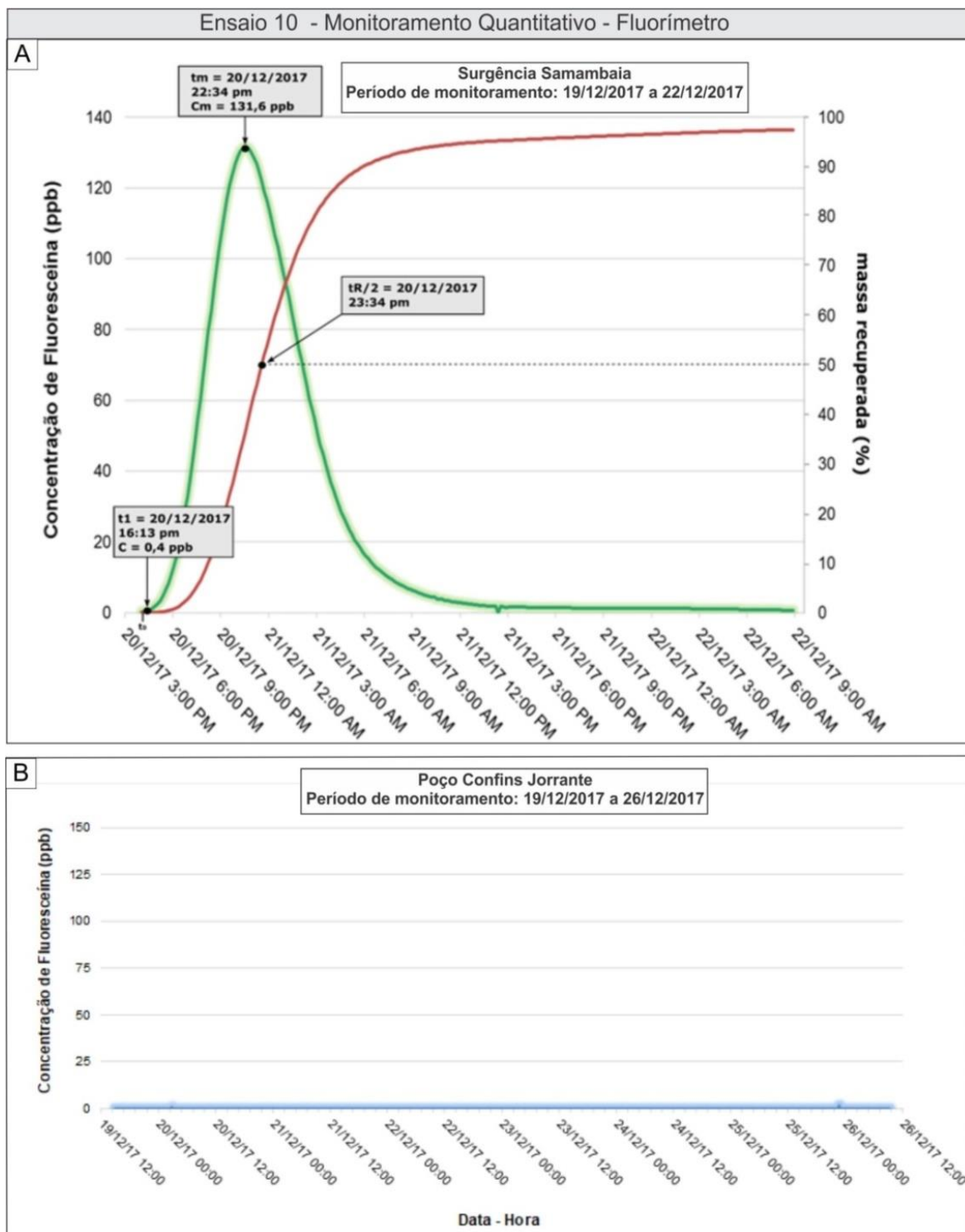


Figura K.3 - Resultados das análises quantitativas realizadas através dos fluorímetros posicionados A) na Surgência Samambaia, apresentando as curvas de passagem (linha verde) e recuperação (linha vermelha) para a Fluoresceína proveniente da Gruta da Lapa Vermelha, e B) no Poço Confins Jorrante (ID-55), não indicando a passagem do corante.