

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 Teodoro¹; Leila Nunes Menegasse Velásquez¹; Peter Marshall Fleming²; Rodrigo Sérgio Paula¹; Rogério Tadeu Souza¹; Bruno Mamoru Doi³ ✉

¹ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG

² Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CNEN/CDTN), Belo Horizonte, MG

³ Hidrovia – Hidrogeologia e Meio Ambiente

✉ mariaisa2107@hotmail.com, menegase@yahoo.com.br, pmf@cdtn.br, rodrigo.spdm@yahoo.com.br, rtssouza1@gmail.com, 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 9.5×10^{-3} m/s to 4.49×10^{-2} m/s and 1.43×10^{-2} m/s to 6.27×10^{-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

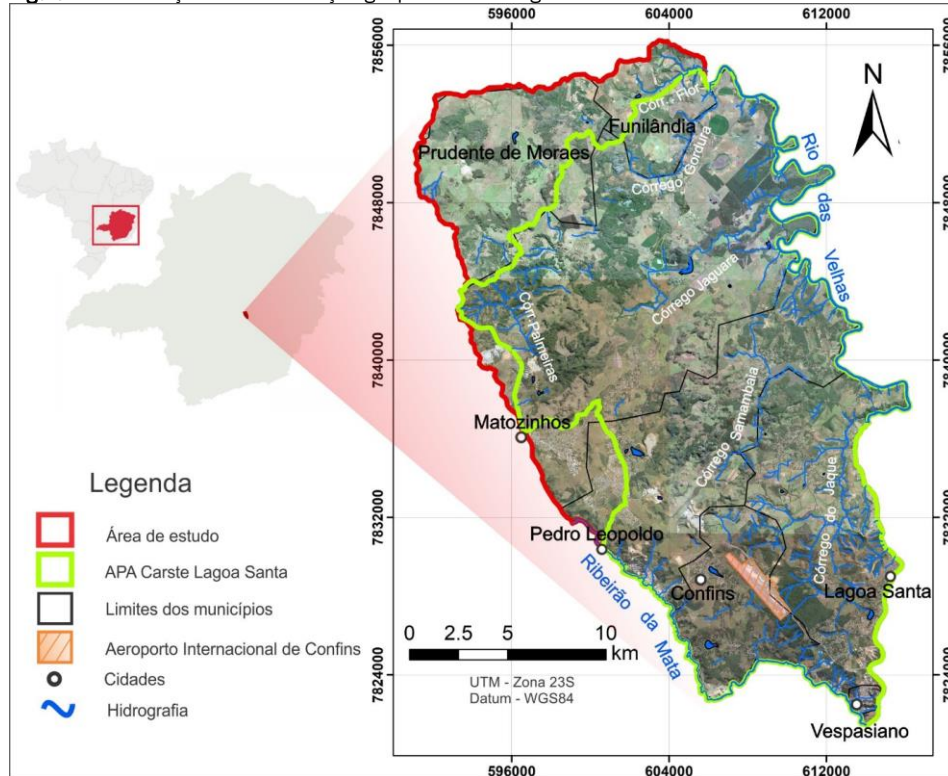
A área estudada localiza-se na porção central do estado de

MG, 30 km a norte de Belo Horizonte, estendendo-se por 504,92 km². Engloba a APA Carste de Lagoa Santa (356 km²) 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)

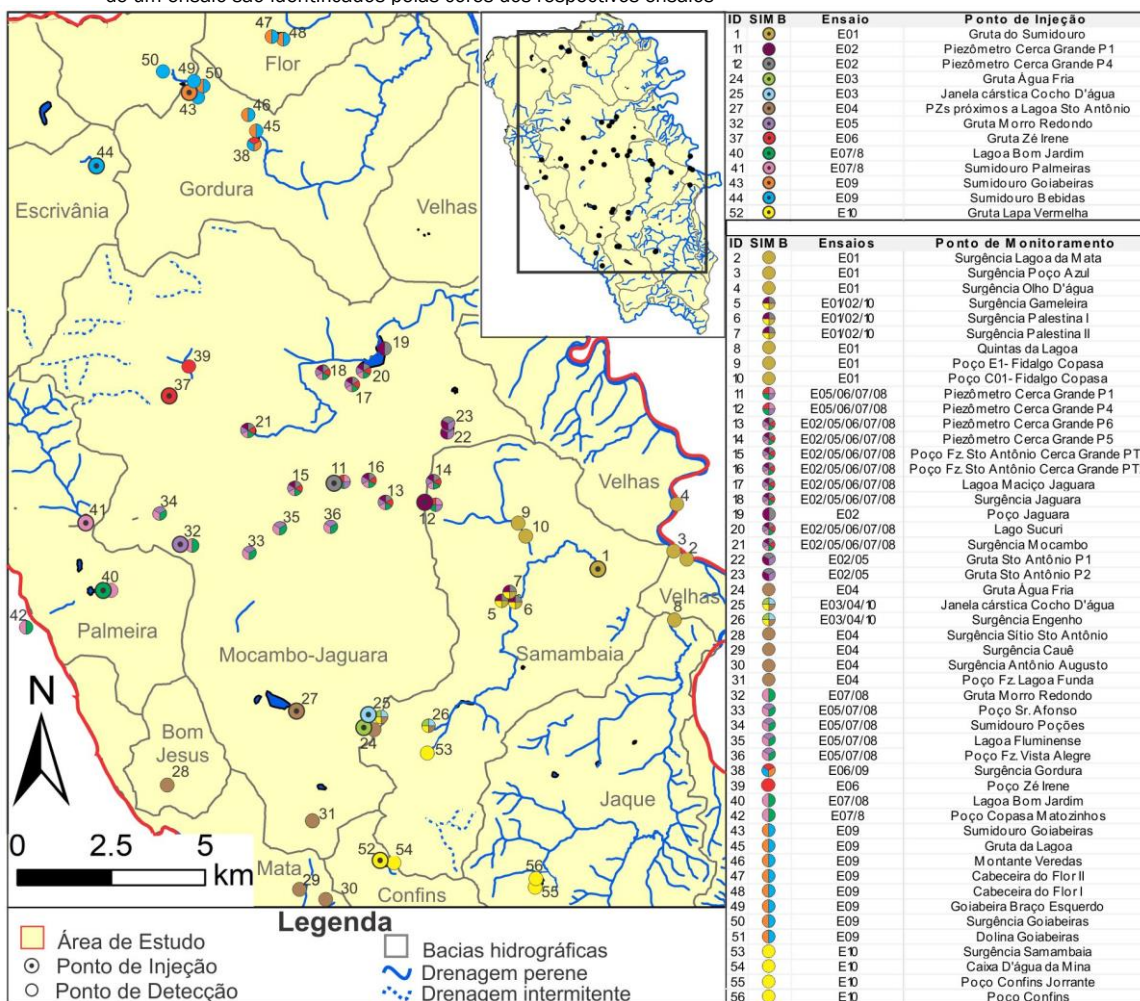
ID	Ensaio	Ponto	Injeção/Detecção	UTM E (X)	UTM N (Y)	Cota Z (m)
1	E01	Gruta do Sumidouro	Rodamina WT	610955	7838934	646
2	E01	Surgência Lagoa da Mata	Carvão Ativado	613217	7839218	653
3	E01	Surgência Poço Azul	Coletor Automático	612947	7839367	653
4	E01	Surgência Olho D'água	Carvão Ativado	612993	7840664	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	E02	Piezômetro Cerca Grande P1	Rodamina WT	603868	7839762	743
12	E02	Piezômetro Cerca Grande P4	Fluoresceína	606328	7840743	814
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	E03	Gruta Água Fria	Rodamina WT	604681	7834636	730
25	E03	Janela cárstica Cocho D'água	Fluoresceína	604828	7834927	711
25	E03	Janela cárstica Cocho D'água	Fluorímetro	604828	7834927	711
26	E03	Surgência Engenho	Coletor Automático	606428	7834617	694
27	E04	PZs próximos a Lagoa Sto Antônio	Fluoresceína	602843	7835138	737
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	E05	Gruta Morro Redondo	Rodamina WT	599826	7839622	725
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	E06	Gruta Zé Irene	Rodamina WT	599476	7843640	692
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
40	E07/8	Lagoa Bom Jardim	Rodamina WT	597653	7838380	719
41	E07/8	Sumidouro Palmeiras	Fluoresceína	597262	7840276	724
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
43	E09	Sumidouro Goiabeiras	Fluoresceína	600078	7851993	657
44	E09	Sumidouro Bebidas	Rodamina WT	597495	7849934	684
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
52	E10	Gruta Lapa Vermelha	Fluoresceína	605231	7830928	728
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 [L³], em cada ensaio foi determinado segundo a Equação 1, adaptada por Pessoa (2005), considerando a vazão no ponto de amostragem, Q [L³/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/L³].

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

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 [L³/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).

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

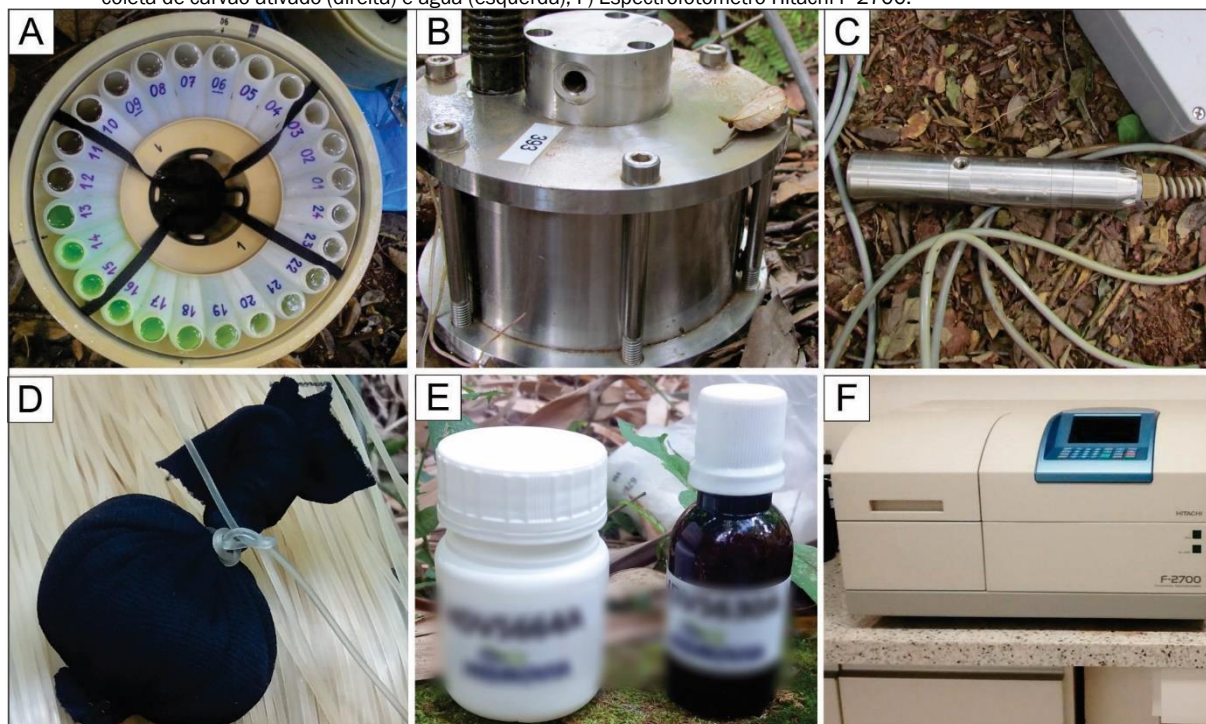
A análise das curvas de passagem e recuperação (Figura 8) permitiu inferir parâmetros hidráulicos para cada rota aquífera investigada.

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

[L³/t], e de detecção, Q [L³/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 [L²/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 ³ /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) ¹.

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.

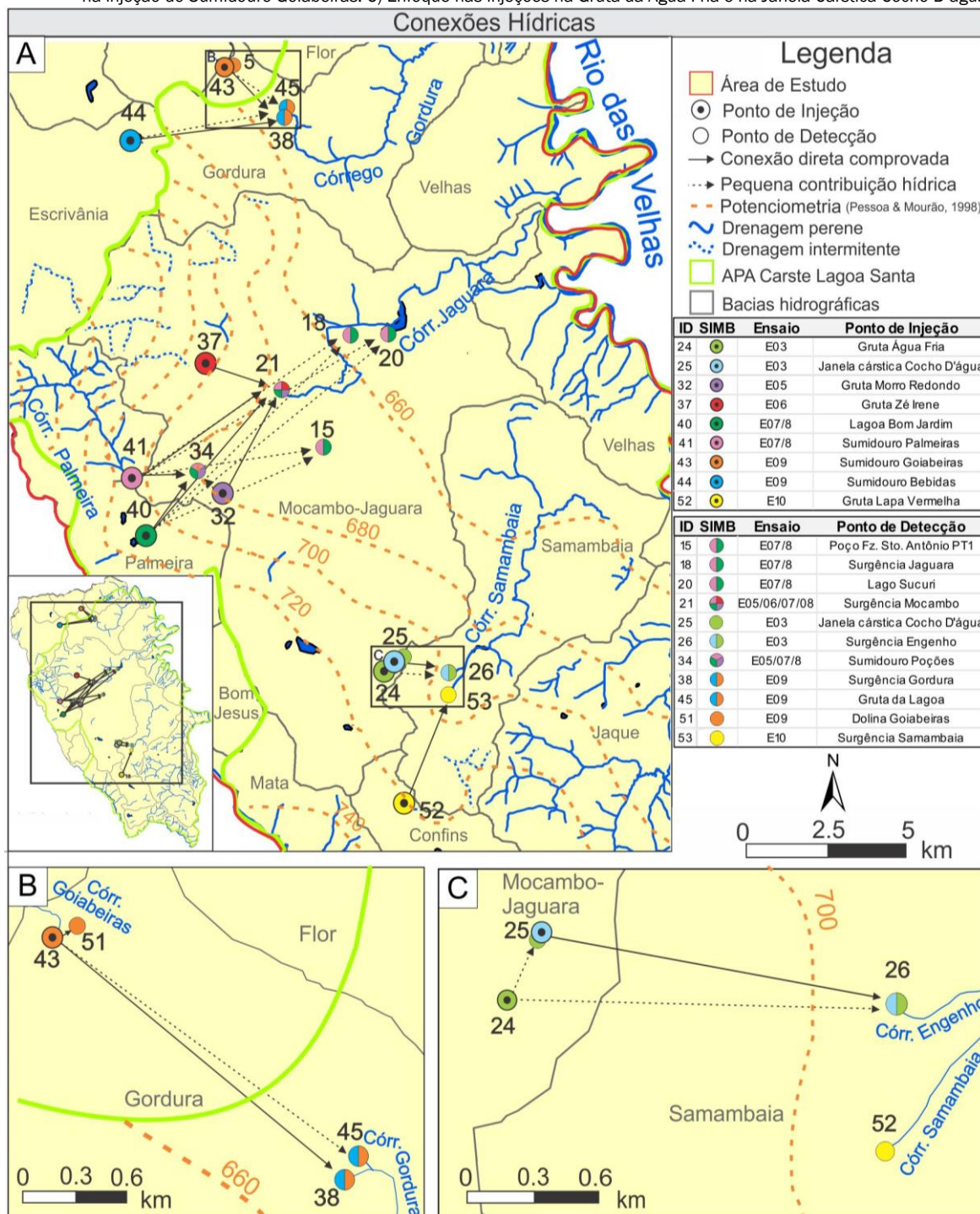
Estima-se que se já tenha descoberto a proveniência de 42,5% do Córrego Samambaia logo à jusante da contribuição do Córrego do Engenho (Figura 6).

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).

¹ 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 Moro 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.

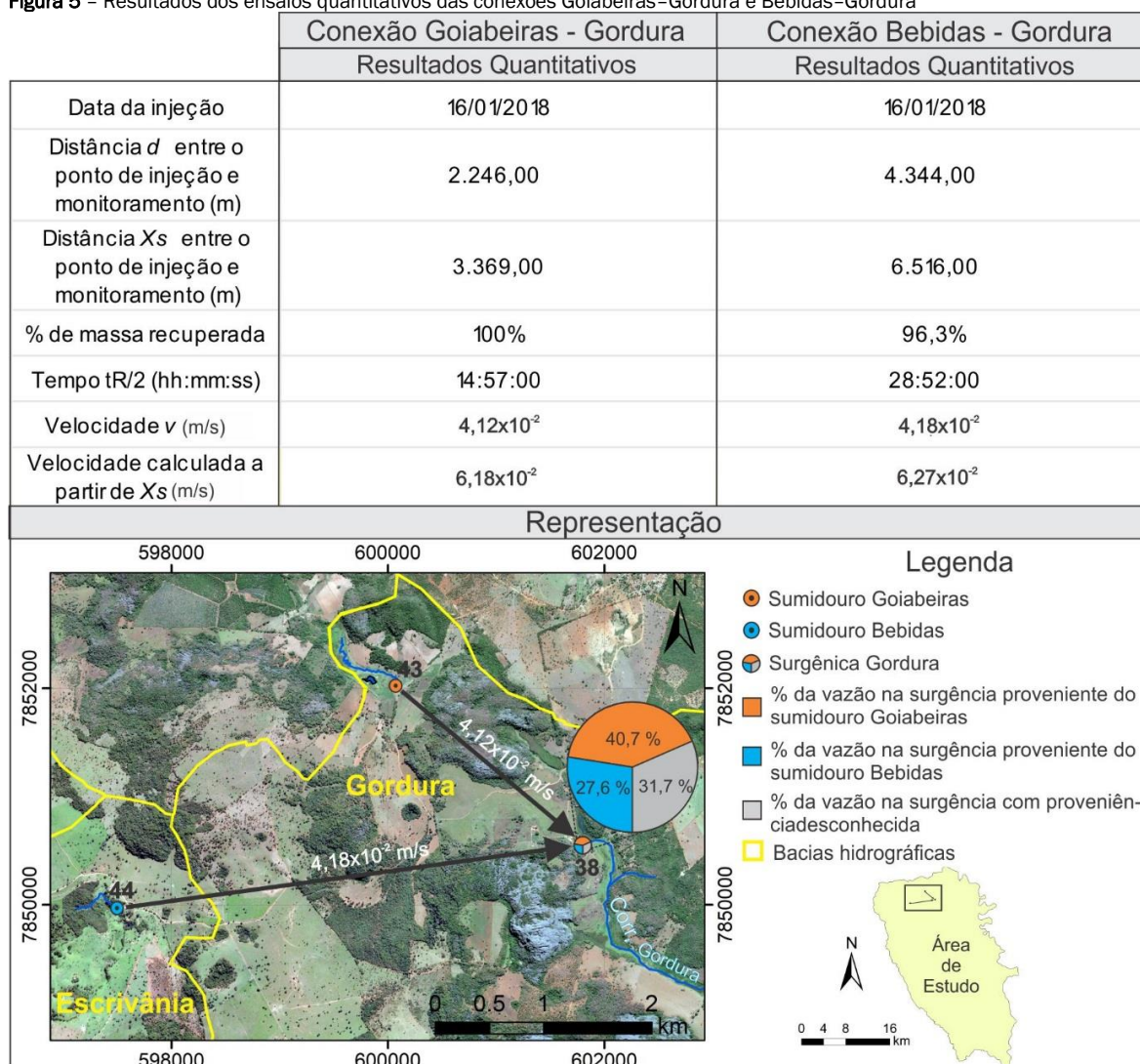
Ainda no contexto da conexão entre as bacias dos córregos

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

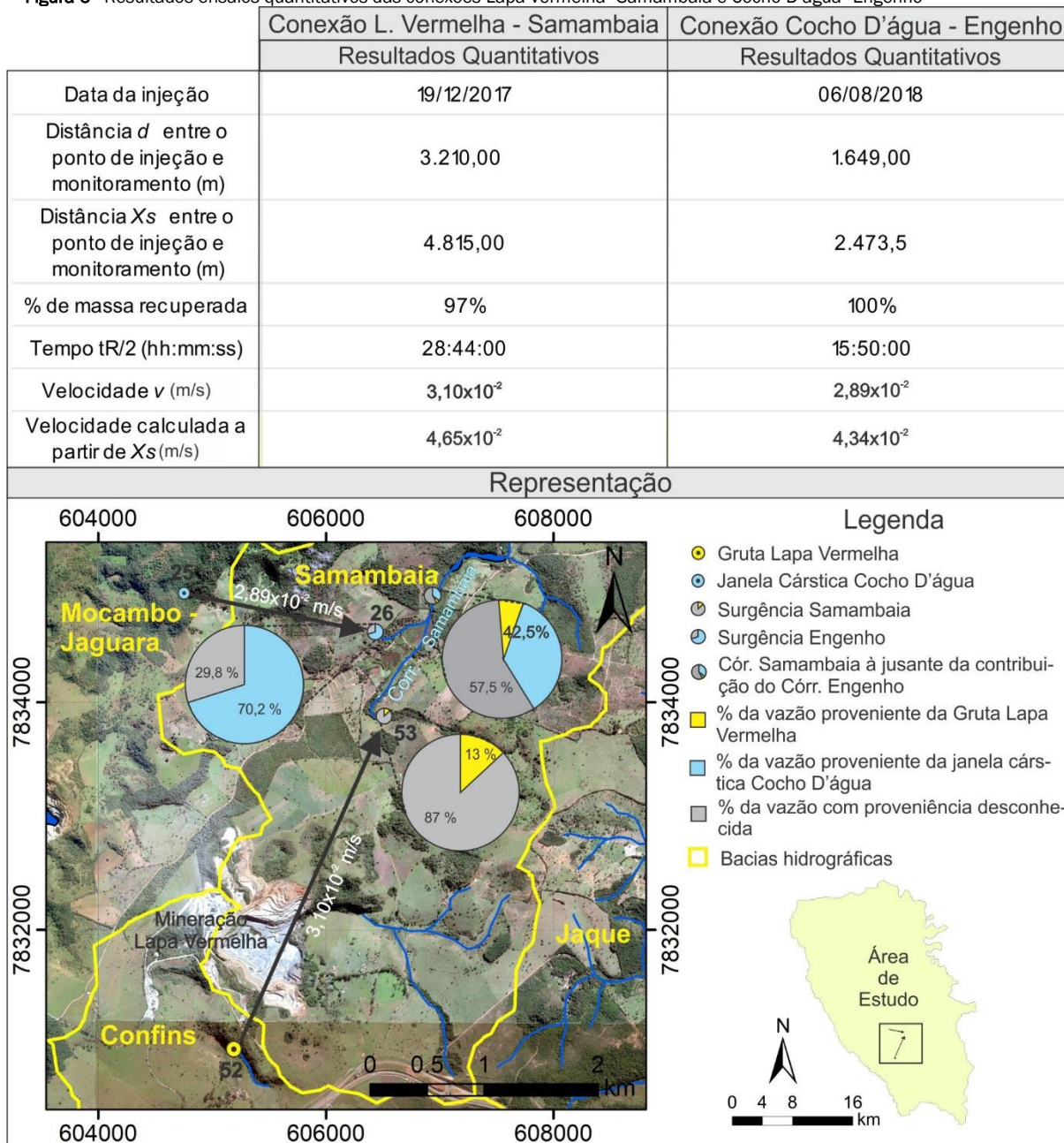
As conexões hídricas obtidas indicam fluxos subterrâneos com pouca ou nenhuma continuidade lateral, formando sistemas isolados, assim como observado por Salles et al. (2018) nos aquíferos cársticos na porção central da Chapada Diamantina. As interconexões apresentam majoritariamente sentido de fluxo 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: 2×10^{-2} m/s a 5×10^{-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).

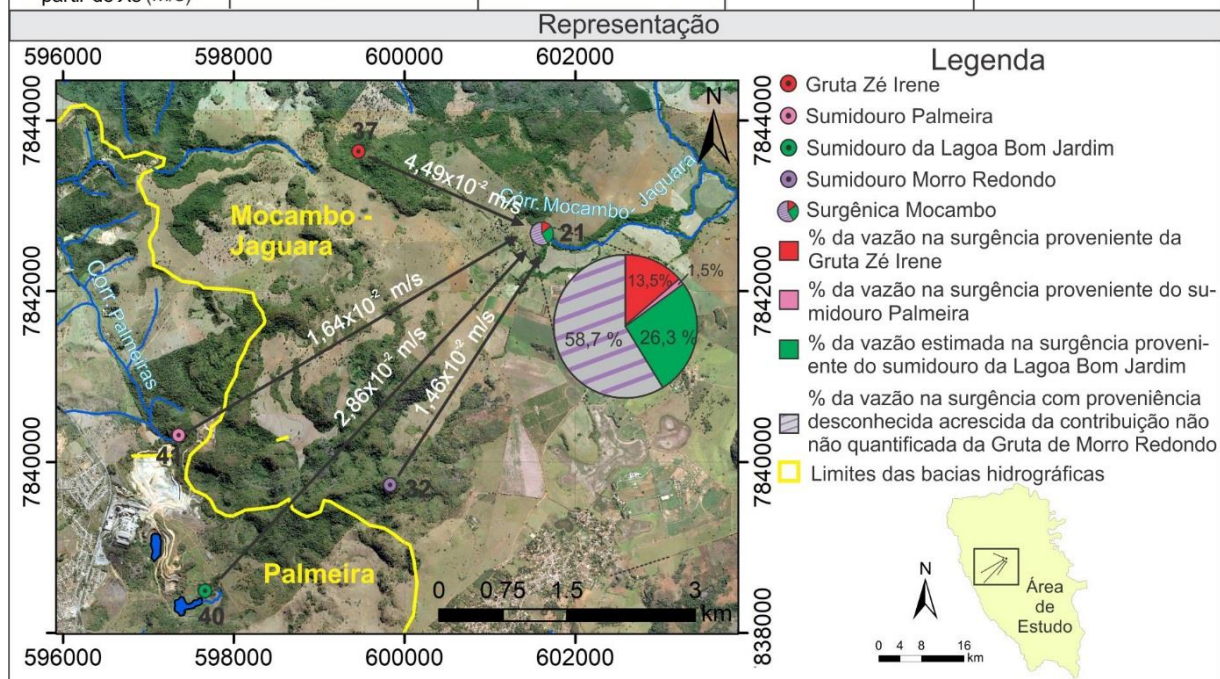
Nas contribuições da Surgência Gordura as curvas têm caráter bimodal (figuras 8A, 8B) sugerindo que o fluxo tenha seguido por duas trajetórias distintas com chegadas defasadas no tempo. Em três das quatro rotas de contribuições para a surgência Mocambo as curvas apresentam três pequenos picos de concentração (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.

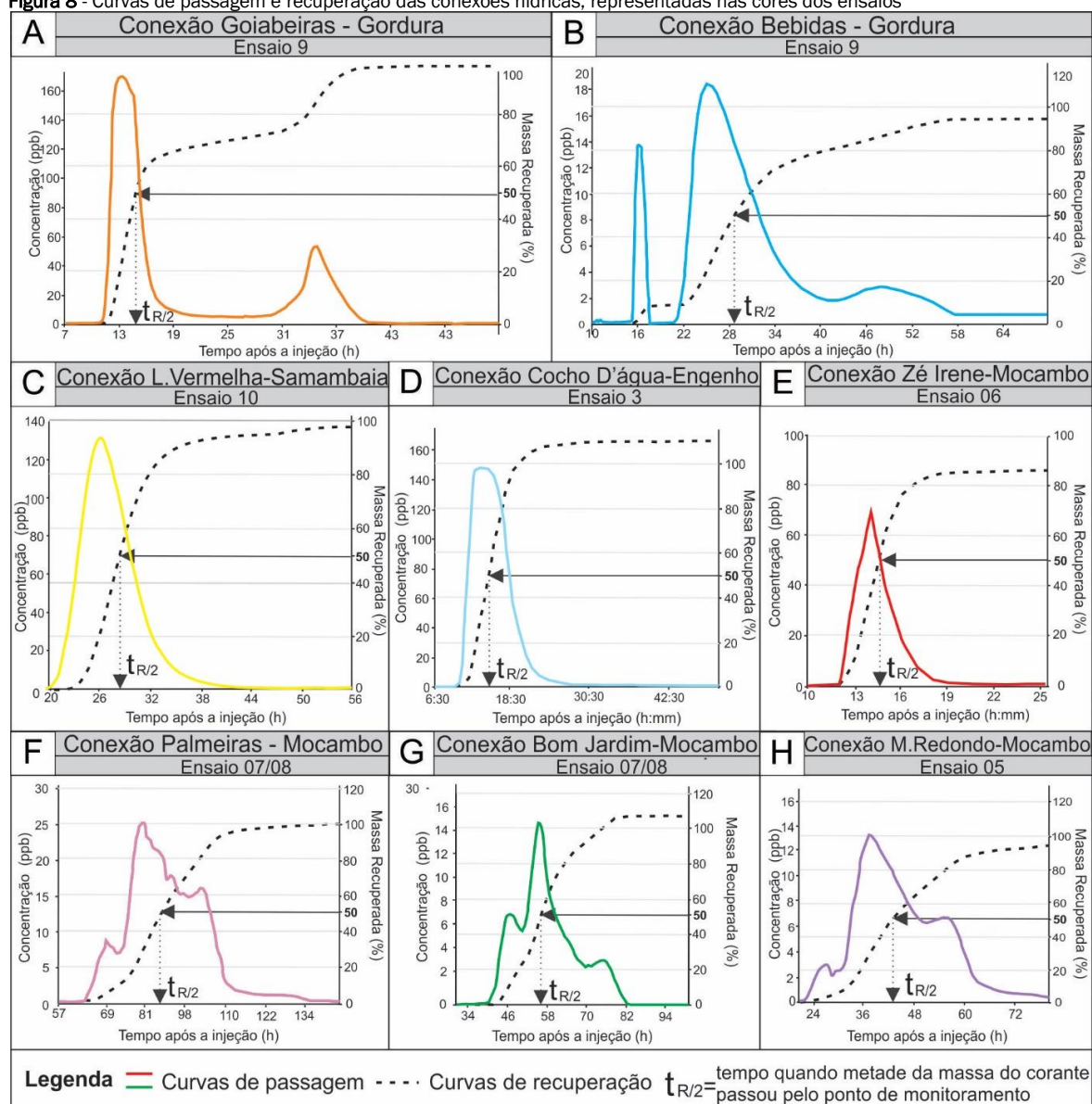
Figura 7 - Resultados dos ensaios quantitativos das conexões Zé Irene–Mocambo, Palmeiras–Mocambo, Bom Jardim–Mocambo e Morro Redondo-Mocambo

	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 região 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.