

Interação das águas superficiais e subterrâneas nas bacias hidrográficas carbonáticas e mistas do carste de Lagoa Santa, Minas Gerais

Interaction between surface and groundwater in the carbonate and mixed watersheds of the Lagoa Santa karst, Minas Gerais

Wallace Maciel Pacheco Neto^{1*}; Gabriela Meira Teixeira²; Rodrigo Sérgio de Paula³

- 1 Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geologia – Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID), Belo Horizonte/MG, Brasil. Email: wallacemaciel.geo@gmail.com *autor correspondente
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9286-9751>
- 2 Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geologia – Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID), Belo Horizonte/MG, Brasil. Email: gabrielameira1998@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3861-8638>
- 3 Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geologia – Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID), Belo Horizonte/MG, Brasil. Email: depaula.ufmg@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5117-3516>

Resumo: O carste de Lagoa Santa, localizada próximo a Belo Horizonte, Minas Gerais, abriga importantes aquíferos carbonáticos e siliciclásticos pertencentes ao grupo Bambuí. A fim de colaborar com a gestão e o monitoramento, foi instaurado uma rede de monitoramento fluviométrica nas principais bacias da região. O monitoramento visou estudar a evolução e o comportamento geral das bacias ao longo de quatro ciclos hidrogeológicos completos, de 2017 a 2021, e suas relações entre água superficial e subterrânea, de forma a balizar, dentre outros estudos, aqueles envolvendo a recarga aquífera. Para tanto, foram geradas as curvas-chave de seções representativas, correlacionando as vazões medidas com dados de nível d'água, e produzindo hidrogramas com os dados de nível d'água obtidos de forma semiautomática por transdutores de pressão. A partir dos resultados, foi possível constatar um aumento geral do nível de base das bacias e que os longos períodos de recessão sugerem uma reativação de dutos superiores a partir de 2019/20 e uma descarga lenta em diversas bacias da região, típico de um sistema cárstico complexo e com compartimentações verticais e horizontais. Além disso, as altas produtividades das bacias cársticas do Escrivânia-Gordura e Palmeira-Jaguara indicam a ocorrência de recargas alóctones.

Palavras-chave: Aquíferos Carbonáticos; Monitoramento Fluviométrico; Curvas-chave.

Abstract: The Lagoa Santa karst, located near Belo Horizonte, Minas Gerais, contains significant carbonate and siliciclastic aquifers belonging to the Bambuí Group. To assist with management and monitoring, a network of streamflow monitoring stations was established in the main basins of the region. The monitoring aimed to study the evolution and general behavior of the basins over four complete hydrogeological cycles, from 2017 to 2021, and their relationships between surface and groundwater, to inform various studies, including those involving aquifer recharge. Key curves for representative sections were generated by correlating measured flow rates with water level data, and hydrographs were produced using water level data obtained semi-automatically from pressure transducers. The results revealed a general increase in the base level of the basins, with long recession periods suggesting a reactivation of upper conduits from 2019/20 and a slow discharge in various basins of the region, characteristic of a complex karst system with vertical and horizontal compartmentalization. Additionally, the high productivity of the Escrivânia-Gordura and Palmeira-Jaguara karst basins indicates the occurrence of allochthonous recharge.

Keywords: Lagoa Santa Karst; River Monitoring; Key curves.

1. Introdução

A região de estudo localiza-se a aproximadamente 55 km a norte de Belo Horizonte, Minas Gerais, e hospeda um importante centro histórico, cultural, arqueológico e paleontológico representado pelos terrenos pelítico-carbonáticos da base do Grupo Bambuí, e constitui uma das principais áreas de proteção ambiental do Brasil, denominada como APA Carste de Lagoa Santa. Dentre os estudos elaborados na área, há de destacar os trabalhos de Kohler (1978) focado em geomorfologia, Auler (1994) com a definição de rotas de fluxo subterrâneas, Berbert-Born (1998) com estudos sobre geoquímica e Pessoa (2005) com o estudo de caracterização geral da hidrogeologia da região.

Apesar da relevância científica da região, a área é marcada pela constante atividade antrópica, relacionada com o avanço da urbanização a presença de minerações de calcário, da agropecuária e da indústria. Dessa maneira, e sabendo-se que o sistema cárstico é intrinsecamente mais vulnerável à poluição, o trabalho aqui ressalta a importância de se conhecer a dinâmica entre a água superficial e subterrânea a partir do aprofundamento nos conhecimentos dessas regiões de recarga e na determinação da parcela de água que é, de fato, recarregada para o aquífero.

Para isso, foi realizado o monitoramento das descargas das seis principais bacias da região, no período de 2016 a 2021, de modo a avaliar o comportamento dos cursos d'água da região e a relação entre as águas superficiais e interação com o sistema subterrâneo. Para tanto, foram atualizadas as curvas-chave dos córregos e analisada sua aderência com as vazões medidas em campo e com as curvas-chave elaboradas inicialmente por De Paula (2019) para um período menor de monitoramento. Após a validação das curvas, foram gerados os hidrogramas das vazões dos córregos obtidos pelo monitoramento semiautomático por transdutores de pressão. A partir disso, realizou-se a interpretação das vazões monitoradas utilizando análises baseadas em estatística analítica dos eventos de periodicidade diária, anual e para o período completo de monitoramento, a fim de interpretar o comportamento e as características de cada bacia.

2. Contextualização Física

A região de estudo engloba parcialmente ou totalmente os municípios de Vespasiano, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Confins, Capim Branco, Prudente de Moraes e Funilândia (Figura 1).

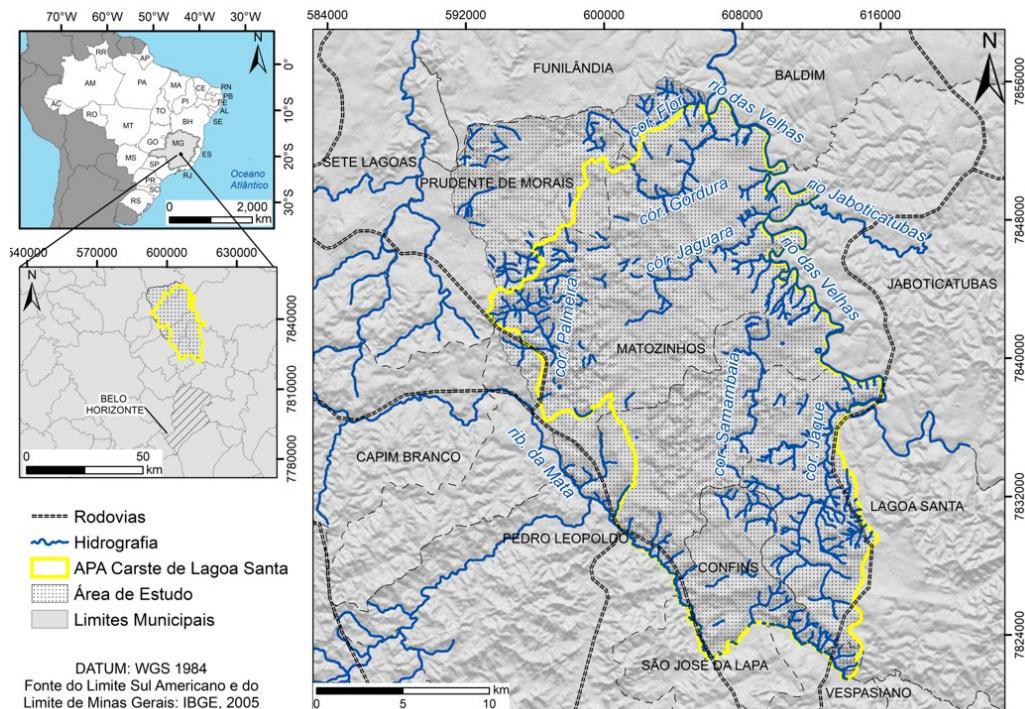


Figura 1 – Localização da área de estudo com destaque para a APA Carste de Lagoa Santa e a hidrografia. Fonte: IBGE (2005).

Hidrografia

A região é bordejada a leste pelo rio das Velhas, rio de maior extensão pertencente à bacia hidrográfica federal do rio São Francisco. A nível local, a área é formada por onze sub-bacias hidrográficas: Flor, Escrivânia-Gordura, Palmeira-Jaguara, Palmeira, Margem Velhas, Samambaia, Bom Jardim, Margem Ribeirão da Mata, Confins, Retiro e Jaque. Uma característica marcante é a pouca densidade de drenagens superficiais (Figura 1) e a predominância de uma rede de drenagem subterrânea (DE PAULA, 2019).

O córrego Flor é do tipo mista, já que há mistura de águas provenientes do metapelito e do carbonato. As vazões médias são baixas, de $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma área pequena de 16 km^2 . Este córrego é bastante afetado por retiradas antrópicas de água, e chega a ficar seco nos meses de estiagem (DE PAULA, 2019). O córrego Gordura com suas nascentes em terrenos carbonáticos apresenta altas vazões ($0,88 \text{ m}^3/\text{s}$), este córrego forma a bacia hidrogeológica denominada Escrivânia-Gordura, com área de abrangência de 96 km^2 . A bacia da Escrivânia possui uma única nascente, que imerge em um sumidouro e emerge na bacia do Gordura, formando assim o compartimento Escrivânia-Gordura (DE PAULA; VELÁSQUEZ, 2019).

A bacia do córrego Palmeira é carbonática e intensamente carstificada, apresenta uma área de 31 km^2 e vazão média de $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$. Esse córrego apresenta uma direção de fluxo diferente dos demais córregos, e forma, juntamente com o córrego Jaguara, a bacia hidrogeológica Palmeira-Jaguara, definido assim por Auler (1994) devido às conectividades de fluxo entre esses dois sistemas. O córrego Jaguara, por sua vez, apresenta a maior média de vazão da área, de $0,98 \text{ m}^3/\text{s}$, e é uma bacia carbonática. Por fim, o córrego Samambaia apresenta uma vazão média de $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma área de 48 km^2 e forma uma bacia tipicamente carbonática, diferentemente do córrego Jaque, que recebe contribuições do metapelito e do metacalcário, sendo, portanto, uma bacia mista, com vazão média de $0,34 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma área de 59 km^2 .

Clima

Segundo Köppen-Geiger (1928), o clima da região é tipicamente Tropical Úmido (Aw). Existem duas estações definidas: inverno seco, de abril a setembro, e verão chuvoso, de outubro a março, e a temperatura média da região é de 18°C (VIEIRA, 2015). Para a análise da série histórica da precipitação anual, considerou-se o período de 1980 a 2021. As estações analisadas foram a de Lagoa Santa (1943049), Vespasiano (19430400, Pedro Leopoldo (1944009) e Sete Lagoas (OMM:8670).

A partir do mapa de Thiessen (Figura 2), foi calculada a porcentagem da área de abrangência de cada estação. Considerando as proporções calculadas pelo mapa de Thiessen, a média de precipitação anual para o período histórico de 1980 a 2021, foi de 1173 mm.

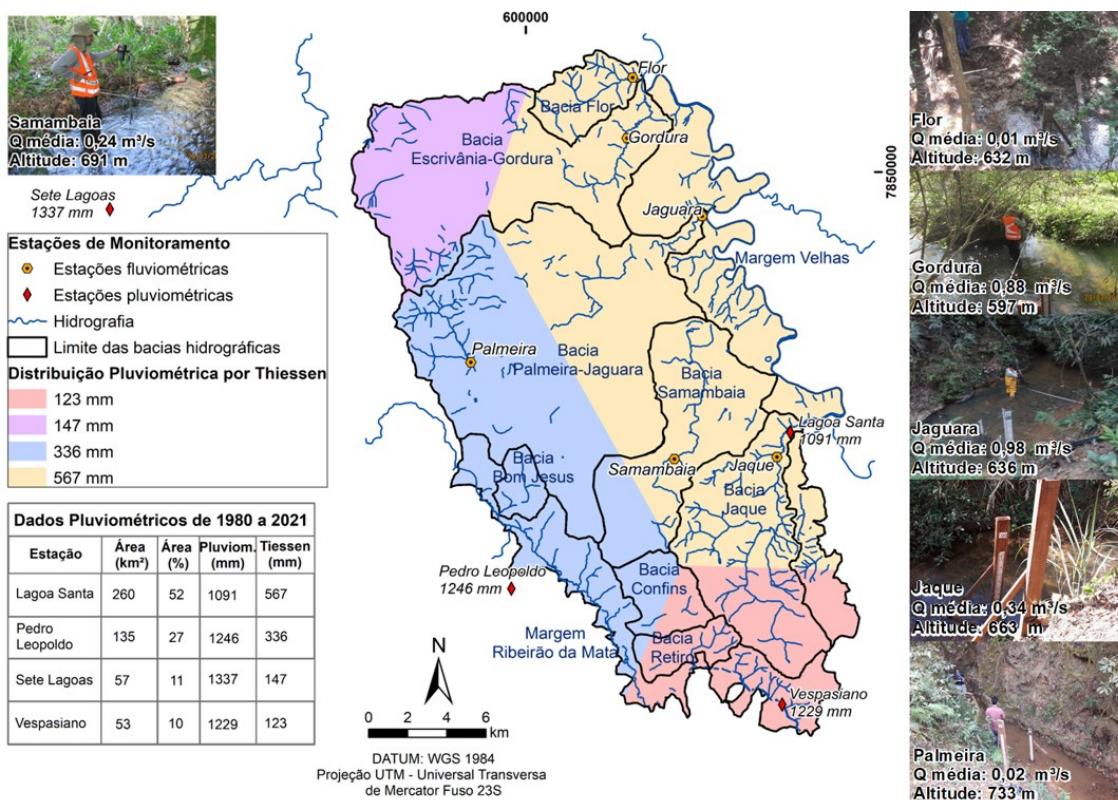


Figura 2 – Mapa de Thiessen e das bacias hidrográficas, com destaque para as estações de monitoramento. Fonte: autor (2022).

Geologia

A área de estudo está inserida no contexto da bacia intracratônica do São Francisco. O cráton São Francisco é uma unidade neoproterozoica individualizada durante a orogenia Brasiliiana (ALKMIM; NEVES; ALVES, 1993), e faz parte da porção ocidental do Cráton Congo-São Francisco, fragmentado durante a abertura do Oceano Atlântico. Esta bacia, é constituída por uma cobertura de rochas clásticas e carbonáticas neoproterozoicas, correspondentes ao Supergrupo São Francisco. Marcada por uma expressiva sucessão carbonática, o Grupo Bambuí, é composto, da base para o topo, pelas unidades da Formação Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e pela Formação Três Marias (MARTINS-NETO; PEDROSA-SOARES; LIMA, 2001).

Localmente, a estratigrafia é representada pelo embasamento cristalino gnáissico-granítico-migmatítico do Complexo Belo Horizonte (RIBEIRO *et al.*, 2003) e apresenta como unidades aflorantes rochas do Grupo Bambuí, representadas pelas Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena e abrangem a maior parte da área (Figura 3). A Formação Sete Lagoas, por sua vez, é dividida em dois membros: Membro Pedro Leopoldo e Lagoa Santa. Enquanto o Membro basal Pedro Leopoldo corresponde a um metacalcário impuro de granulação fina, o Membro Lagoa Santa, no topo, constitui um metacalcário extremamente puro, com teores de calcita acima de 90% de calcita, e por isso, a carstificação se apresentam mais concentradas neste membro.

A unidade de topo do Grupo Bambuí aflorante na área é composta pela Formação Serra de Santa Helena, presente principalmente nas regiões oeste da área. Essa unidade aflora como um metapelito, geralmente muito intemperizado, composto por argilominerais e quartzo. A rocha apresenta uma granulometria fina e uma foliação formada pelos planos dos minerais filossilicatos. É comum a presença de veios de quartzo paralelos ao acamamento.

No topo da estratigrafia estão as coberturas detrito-lateríticas, de granulometria variada e que formam concreções limonitizadas ou em forma de um solo laterítico contendo caulim. Além disso, a região é composta por coberturas aluvionares

que margeiam os principais cursos d'água da área. Essas coberturas formam depósitos de granulometria variada contendo sedimentos de minerais como quartzo, além de fragmentos rochosos.

Em campo, os metapelitos e coberturas se misturam com os solos e recobrem grande parte dos calcários da região, e geram uma região cárstica com cobertura de espessura média de 40 metros, conforme medições de De Paula (2019).

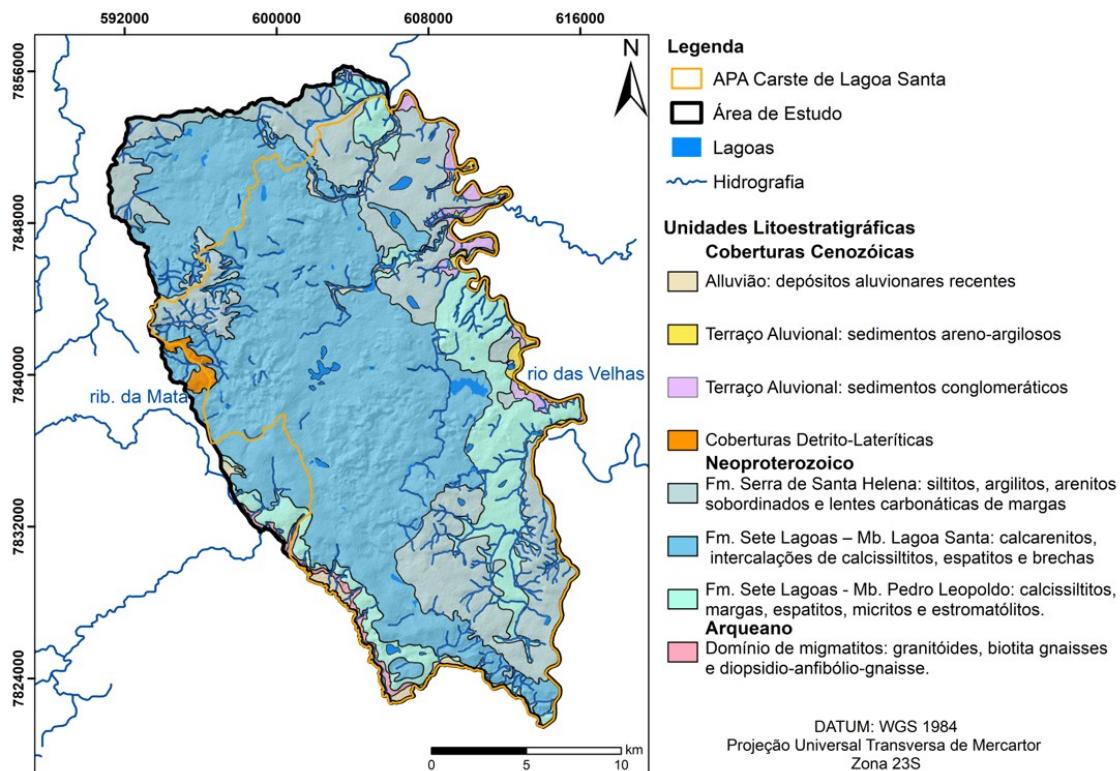


Figura 2 – Mapa geológico da região de estudo. Fonte: Ribeiro *et al.* (2003).

Estruturalmente, há predominância de estruturas rúpteis representadas por famílias de fraturas, que são evidenciadas em todas as rochas, mas facilmente reconhecidas no membro mais carstificado. Conforme descrito por Ribeiro *et al.* (2003), e posteriormente por De Paula (2019), as fraturas de alto ângulo nos carbonatos funcionam como mecanismo de recarga que direcionam a água meteórica para o meio subterrâneo. Quando estas fraturas interceptam uma estrutura planar sub-horizontal, o processo de dissolução evolui e gera os condutos cársticos com gradiente hidráulico para o rio das Velhas.

Hidrogeologia

Ao considerar os aspectos geológicos, estruturais, litológicos, estratigráficos e morfológicos das rochas, De Paula (2019) discriminou quatro unidades hidroestratigráficas, correspondentes às unidades do Cristalino, de Sete Lagoas, da Serra de Santa Helena e das Coberturas. Em relação a interação da água superficial e subterrânea, estudos de De Paula e Velásquez (2020) constataram uma grande correlação entre o sistema de água superficial e subterrânea, a partir da análise de correlação cruzada entre dados de pluviometria e da vazão dos cursos d'água.

Para as bacias analisadas, observa-se valores de correlação de 1 a 4 dias para o sistema causa-efeito, tendo as bacias carbonáticas uma resposta mais rápida, menores até que 1 dia, após os eventos pluviométricos. Para validação dos dados matemáticos, De Paula (2019) comparou os resultados da bacia Escrívânia-Gordura com ensaios diretos de traçadores corantes realizados por Teodoro *et al.* (2019). Estes últimos obtiveram valores de resposta de 23 horas, contra 1 dia encontrado, a partir de análise de correlação cruzada.

Com relação à recarga, em ambientes cársticos, ela pode ocorrer de forma alogênica (água externa ao sistema) e de forma autogênica (água é proveniente do próprio sistema). A recarga autogênica pode resultar da infiltração da água dos aquíferos suspensos, ou através do escoamento interno em sumidouros (WHITE, 2002). Em relação à recarga alogênica, para a área de estudo, Teixeira, Pena e Silva (2020) destacam uma zona de recarga importante para a região de estudo, proveniente da surgência Bom Jardim na porção centro-oeste da área de estudo.

Estudos de Galvão, Hirata e Conicelli (2018) nos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena em Sete Lagoas (MG), a noroeste da área de estudo, mostrou que as porções com maior potencial para recarregar o aquífero são as regiões com cobertura de solos mais arenosos, regiões com declives < 2%, ou entre 2-7%, e regiões com cobertura florestal. De forma geral, essa unidade não é muito produtiva na área de estudo, no entanto, apresenta a função de recarregar o aquífero cárstico e o cárstico-fissural.

De Paula e Velásquez (2019) realizaram o balanço hídrico e a análise de recarga do sistema aquífero, e estimaram valores de recarga líquida de 12 a 164 mm/ano, com média de 119 mm, o que representa 12% do total pluviométrico. Nesse mesmo estudo, os autores calculam o balanço de massa considerando as retiradas antrópicas e entradas autóctones. Os valores apresentados mostraram que, apesar da região ser uma das principais áreas de proteção cársticas do país, as retiradas antrópicas são maiores que a recarga líquida pluvial.

3. Metodologia

Para o cálculo da recarga a partir do escoamento de base do curso d'água, é necessário primeiramente a formulação do seu hidrograma, que relaciona a variação da vazão de um afluente em determinado período. Para a construção de hidrogramas, são necessárias medições de vazão por períodos prolongados, de no mínimo um ano hidrológico. Neste trabalho, adotou-se um monitoramento semiautomático, por transdutores de pressão, durante quatro anos hidrológicos consecutivos, com monitoramento das vazões *in loco*.

Foram empregadas medições de vazão das principais drenagens da região, nos córregos Flor, Jaguara, Gordura, Palmeira, Samambaia e Jaque. Foi utilizado o micromolinete para medição da vazão nos córregos Jaguara, Gordura, Samambaia e Jaque, pois se tratam de córregos com vazões maiores do que os córregos Flor e Palmeira, onde foi aplicado o método com molinete ou medição com flutuador. O *flowtracker* foi utilizado pelo menos uma vez por ano para aferição e comparação com os resultados do micromolinete. A medição da vazão ocorreu entre os períodos de 2017 a 2021.

Foram definidos os pontos fluviométricos desses seis córregos, e instaladas réguas limimétricas para a aferição do nível d'água nessas estações. O produto da área dessa seção transversal com a velocidade média do curso d'água (medida com micromolinete) ao longo dessa seção forneceu a sua vazão, ou, em outras palavras, a sua descarga. Em relação aos valores de nível d'água, foram instalados transdutores de pressão nos seis córregos, estes, foram programados para armazenar as medidas de pressão a cada hora, e essas medidas foram, posteriormente, convertidas em nível d'água.

A partir da medição manual das vazões e do nível d'água das réguas, foi possível atualizar as curvas-chave dos córregos. De Paula (2019) havia elaborado as curvas-chave entre os períodos de 2016 e 2018, e, a partir das medições realizadas entre o final de 2020 e início de 2021, elas foram atualizadas e os resultados comparados com as curvas anteriores a partir da análise do erro quadrático entre as duas medidas, a fim de validar ou refutar a curva atual.

Curvas-chave são representadas de forma gráfica, relacionando a vazão, plotadas nos eixos das abscissas, com a altura do nível d'água das réguas, plotadas nos eixos das ordenadas. Esse ajuste entre os dados de cota e vazão foi realizado considerando-se o método de extrapolação logarítmica descrito por Santos *et al.* (2001), conforme a Equação 1:

$$Q = a(h - h0)^b \quad (1)$$

Sendo Q a descarga (vazão), “ h ” a lâmina d'água relativa ao Q medido, “ $h0$ ” é a medida da lâmina d'água para qual obtém-se o valor de Q nulo. Já as constantes “ a ” e “ b ” são parâmetros de ajuste específico de cada seção fluviométrica. Os parâmetros de ajustes são encontrados a partir de uma função não linear que apresente a menor diferença quadrada entre as vazões medidas empiricamente e a calculada pela função.

Utilizou-se, para isso, a ferramenta *Solver* disponível no *software MS Excel*, e obteve-se uma equação não linear que mais se aproximava dos valores de vazão medidos em campo. Foram removidas as medidas de vazão que obtiveram o maior

erro quadrado entre o Q medido e o calculado, a fim de se obter melhor aderência na curva. Uma condição importante para a formulação da equação é que o valor de “ h_0 ” deve ser menor ou igual à menor medida de régua realizada em campo.

Após a construção das curvas-chave e a obtenção das vazões durante o ciclo hidrológico de quatro anos, foram obtidos hidrogramas que foram analisados com o objetivo de se avaliar a relação da água superficial e a subterrânea nas bacias. Para essas análises, foram realizadas interpretações com base em estatística descritiva e na análise dos diagramas em eventos diários, anuais e para o período completo, baseando-se também nas características das bacias.

Para a análise dos dados de precipitação, foram utilizados os dados pluviométricos das seguintes estações pluviométricas: Vespasiano (1943009), Pedro Leopoldo (1944009), Ponte Raul Soares (1943049) e Sete Lagoas (1944052). Suas localizações espaciais são indicadas na Figura 2. Os dados das estações estão disponíveis nas plataformas digitais da Agência Nacional das Águas – ANA (2022) e do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2022).

4. Resultados e discussão

Como base no monitoramento de cota e de vazão, foram confeccionadas as curvas chaves dos córregos monitorados. Os parâmetros das curvas-chaves de cada estação de monitoramento estão assinalados na Tabela 1 e as curvas-chaves representadas na Figura 4. Percebe-se que o erro quadrado (R^2) entre os valores de vazão medidos em campo e calculados pelo *Solver* utilizado foram todos acima de 0,80, o que indica uma boa aderência das curvas.

Devido à boa adesão das curvas, elas foram consideradas válidas e aplicadas nos dados de monitoramento da régua obtidos por meio dos transdutores de pressão, e produziram valores de vazão que foram utilizados para confecção dos hidrogramas das bacias que serão apresentados posteriormente.

Tabela 1 – Parâmetros de confecção das curvas chave e erro quadrado entre os valores de vazão medidos e calculados para cada estação de monitoramento.

Estações de Monitoramento	a	b	h_0	R^2
Córrego Palmeira	3,14	11,25	-1,11	0,80
Córrego Flor	1067,22	2,28	-0,04	0,83
Córrego Samambaia	0,04	12,77	-1,83	0,86
Córrego Gordura	4756,21	0,39	0,19	0,88
Córrego Jaguara	16709,09	2,42	0,00	0,96
Córrego Jaque	4361,06	1,22	0,07	0,99

h_0 corresponde ao nível d’água para qual a vazão é nula, “a” e “b” são constantes lineares determinadas para o local e R^2 corresponde ao erro médio quadrado. Fonte: autor (2022).

Como pode se observar na Figura 4, existem alguns pares de pontos com paralelismo vertical dentro de um mesmo hidrograma, o que indica uma dispersão de mais de 10% de vazão monitorada para uma mesma coluna d’água. Isso pode ser exemplificado pelo par de ponto da base do córrego Gordura e o par de ponto no meio do gráfico do córrego Jaguara. Essa relação de mesma cota para variação de vazão está ligada ao erro de medida durante o monitoramento manual da vazão. Contudo, como o R^2 destas duas curvas foi superior a 0,85, foram considerados os pontos durante a geração da curva, uma vez que não foi possível identificar qual das medidas mais se aproximava da realidade. Apesar de dispersões observadas em outros pontos nos gráficos das curvas-chave, nenhuma outra anomalia foi observada na geração da curva, e aponta a validade das medições de vazão realizadas e, consequentemente, sua utilização para confecção das curvas apresentadas.

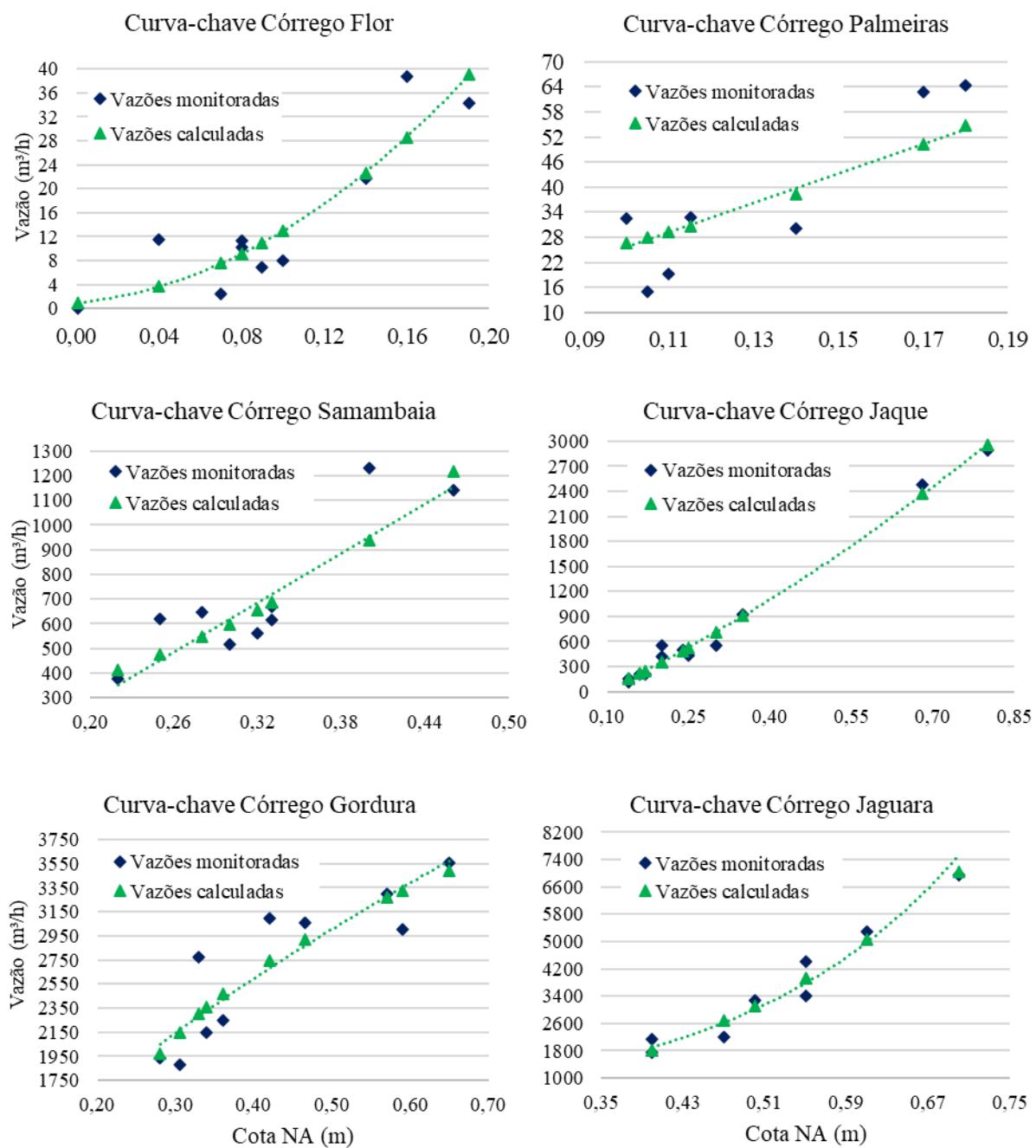


Figura 4 – Curvas chaves atualizadas das vazões monitoradas entre o período de 2016 a 2021 para cada córrego. Fonte: autor (2022).

As medições das vazões podem ser prejudicadas por atividades antrópicas (ocorrência de captações expressivas durante o curso d'água, realizações de barramentos), por alterações naturais (grande variação de precipitação anual comparado com o período de realização das curvas), ou até mesmo por conta de modificações das seções no ponto de medição das vazões. Por conta disso, foi testada a validade destas curvas durante o período de monitoramento e comparadas as curvas com as de De Paula (2019).

Para tanto, realizou-se a comparação entre os erros quadráticos médios das curvas-chave de De Paula (2019) com as curvas-chave atualizadas neste trabalho (Tabela 2). Há de ressaltar que o monitoramento de De Paula (2019) compreendeu os anos hidrológicos de 2016-2018, e o trabalho atual de 2017-2021, e apresentam um ano hidrológico de correspondência.

Tabela 2 – Comparação de R^2 médio entre as curvas-chave deste trabalho e com dados De Paula (2019).

Estações de Monitoramento	R^2 (Dos autores)	R^2 (De Paula, 2019)	R^2 (entre as curvas)
Córrego Palmeira	0,80	0,76	0,74
Córrego Flor	0,83	0,78	0,85
Córrego Samambaia	0,86	0,77	0,90
Córrego Gordura	0,88	0,96	0,95
Córrego Jaguara	0,96	0,91	0,75
Córrego Jaque	0,99	0,97	0,98

Fonte: De Paula (2019) e autor (2022).

De modo geral, com exceção do córrego Gordura, os dados produzidos neste trabalho apresentam uma maior aderência que os calculados por De Paula (2019). Esse fato pode estar relacionado ao tempo de monitoramento, já que o trabalho atual realizou um monitoramento por um período duas vezes maior do que o trabalho de De Paula (2019), e por isto apresenta uma variabilidade maior de pontos em relação às variações sazonais. Desta forma, entende-se que o número de anos hidrológicos monitorados é um fator importante para construção de curvas mais robustas.

Há de ressaltar ainda que, as vazões calculadas neste trabalho, principalmente para o período de 2019/20, que foram maiores por conta do registro de maiores índices pluviométricos. Dessa forma, as vazões nos períodos de chuva monitoradas por De Paula (2019) foram mais baixos do que os anos posteriores. Portanto, as referências de vazões para o período chuvoso deste trabalho aproximam-se mais da realidade das bacias. A falta de dados de vazão mais representativos do período chuvoso no período monitorado por De Paula (2019) durante a realização da curva pelo *solver* pode ter superestimado a relação entre régua e a vazão para valores mais altos, justamente por não ter referências reais de medidas nestas condições.

Quando se compara o erro entre as curvas, percebe-se que os córregos Palmeira e Jaguara apresentaram um R^2 menor ou igual a 0,75. O primeiro córrego demonstrou uma influência direta com a captação superficial antes do ponto monitorado. Já o segundo córrego exibiu uma maior variação de vazão no último ano hidrológico (2020/21), não monitorado por De Paula (2019). Essa comparação é relevante para apresentar a validade das curvas-chave ao passar dos anos e a constante necessidade de atualizações. Ao considerar um R^2 maior que 0,75 como uma curva válida, conforme adotada por De Paula (2019), todas as curvas apresentadas neste trabalho foram respaldadas de 2016 a 2021 (R^2 maior 0,80).

Já as curvas dos córregos Palmeira e Jaguara do trabalho de De Paula (2019) já não podem ser aplicadas após o ano hidrológico de 2017/18, pois o córrego Palmeira, quando aplicada à nova equação obtida neste trabalho, obteve um R^2 de 0,74. Já o córrego Jaguara apresentou uma grande dispersão dos dados, e o R^2 de 0,97 diminuiu para 0,75 quando aplicada a nova equação.

Uma vez ratificados os dados de monitoramento e as curvas durante o ciclo de quatro anos, os dados de monitoramento por transdutores de pressão foram empregados nas curvas chaves para a confecção dos hidrogramas (Figura 5) e correlacionados com os eventos pluviométricos de modo a denotar uma relação entre águas superficial e subterrânea.

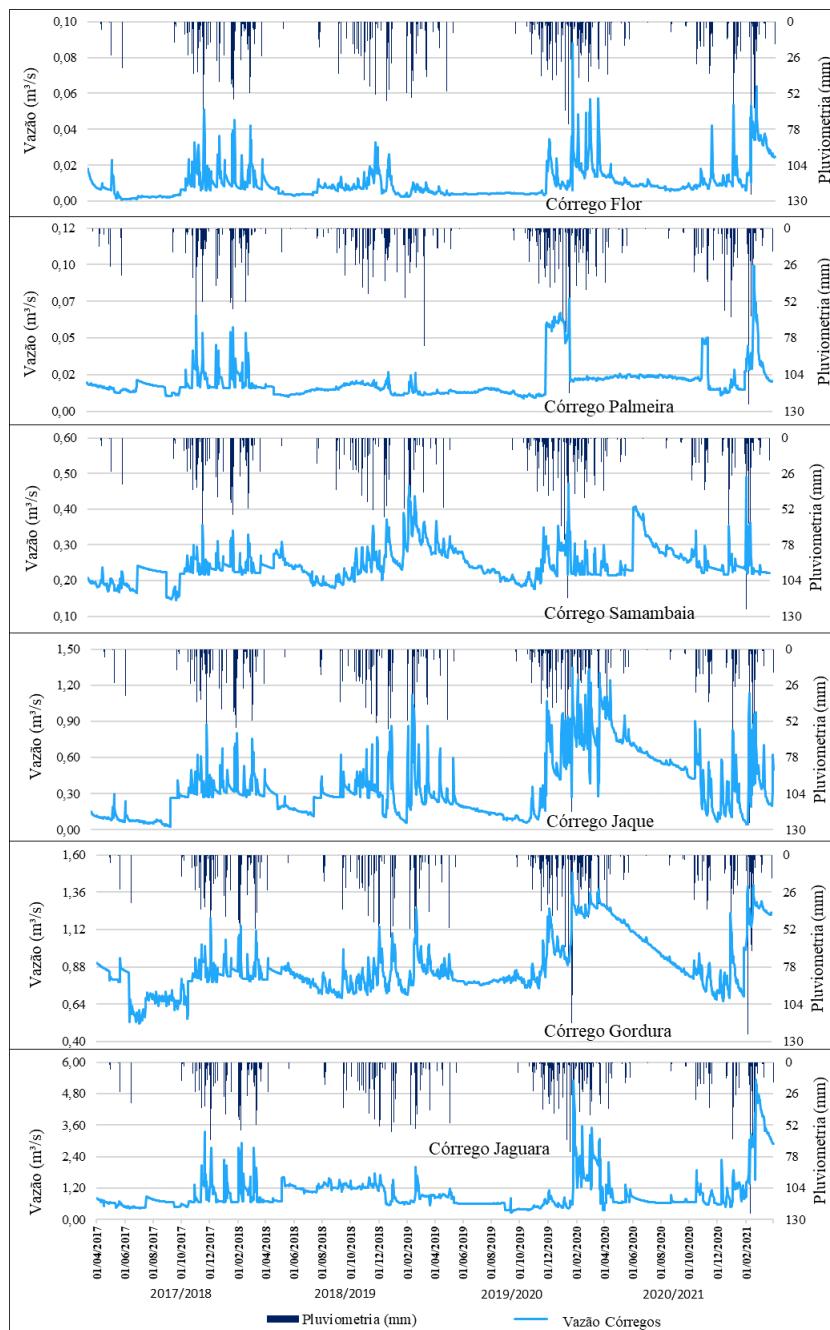


Figura 5 – Hidrogramas de vazão de monitoramento dos anos hidrológicos de 2017 a 2021 dos córregos. Fonte: autor (2022).

Para realizar a análise dos hidrogramas, deve-se primeiramente definir os totais pluviométricos dos anos hidrológicos (Tabela 3). O córrego Palmeira foi separado dos demais porque ele apresenta a estação pluviométrica de Pedro Leopoldo como a de maior abrangência na bacia, enquanto as demais a estação Lagoa Santa é a de maior abrangência.

Observa-se nas duas estações que o ano hidrológico de 2019/20 caracteriza-se como um ano chuvoso, com valores 15% maiores que a média (1173 mm/ano), enquanto os demais anos apresentam uma variação próxima de 10%, acima ou abaixo da média histórica, a depender do ano e da estação.

Tabela 3 – Totais pluviométricos por ano hidrológico das estações representativas para o córrego Palmeira e demais córregos representados pela estação de Lagoa Santa.

Ano Hidrológico	Pluviometria Anual		Período Seco*		Período Chuvoso**	
	Córrego	Demais	Córrego	Demais	Córrego	Demais
	Palmeira	Córregos	Palmeira	Córregos	Palmeira	Córregos
2017/18	1268,7	1160,4	104,3	66,8	1164,4	1093,6
2018/19	1119,9	1142,0	98,5	142,1	1021,4	999,9
2019/20	1384,2	1211,4	88,0	107,6	1296,2	1103,8
2020/21	1124,4	1135,0	142,4	142,4	982,0	992,6

*Período Seco (abril a setembro) **Período Chuvoso (outubro a março). Fonte: autor (2022).

Os eventos pluviométricos ocorridos no período chuvoso de 2019/20 são evidenciados em todos os hidrogramas com o aumento significativo de vazão nos cursos d'água. O nível de água mais elevado refletiu no ano seguinte (2020/21) em todos os cursos d'água, com exceção do córrego Samambaia.

Dessa forma, apesar dos eventos pluviométricos do ano 2020/21 serem menores que a média histórica, o nível regional do sistema aquífero se manteve mais elevado, fato corroborado com o aumento do escoamento de base nos hidrogramas a partir deste ano, e a recuperação do nível de base das lagoas da área. Com relação ao córrego Samambaia, é importante ressaltar que seu nível d'água não foi elevado como os demais por apresentar um barramento a montante do ponto de monitoramento, com controle de vazão após o barramento. Portanto, desconsiderando esse ponto na análise, supõe-se que durante esse período (2019 a 2021) houve uma elevação regional do nível do aquífero.

Ao averiguar os eventos pluviométricos isolados e as variações de vazão, percebe-se que eles ocorrem quase que de maneira simultânea, o que corrobora com os resultados obtidos por De Paula e Velásquez (2020) que determinaram tempos de respostas destes cursos d'água de um a três dias após os eventos pluviométricos. Uma avaliação do comportamento dos hidrogramas em uma série de quatro anos de monitoramento possibilitou observar o comportamento similar entre as bacias majoritariamente pelíticas (córrego Flor e Jaque), com as bacias carbonáticas (Palmeira-Jaguara, Escrivânia-Gordura e Samambaia), e pode-se concluir que as bacias Flor e Jaque, antes classificadas como bacias pelíticas, são mais bem classificadas como mistas, já que também são influenciadas pelo sistema carbonático.

Ao avaliar a descarga das bacias, observa-se que a bacia Palmeira-Jaguara reage instantaneamente aos eventos pluviométricos e desaguam com grande velocidade, e revela ser um sistema com elevado grau de carstificação. O maior desenvolvimento do carste desta região pode ser confirmado pela existência de uma centena de cavidades observadas nestas bacias. Estudos recentes desenvolvidos por Dantas, Velásquez e De Paula (2023) delimitou parte desta bacia como uma das regiões de maior carstificação da área de estudo.

Ainda sobre as descargas, quando avaliadas em escala anual, percebe-se que os córregos Gordura, Samambaia e Jaque, no ano hidrológico de 2019/20 para 2020/21, ou seja, após o período chuvoso do ano 2019/20, apresentaram um período de recessão regional observada em 2020/21 que se estendeu de 3 a 5 meses. Durante esse período prolongado de lenta recessão, observado após um período de elevação do sistema aquífero, os paleocondutos das porções superiores foram reativados com as chuvas de 2019/20, e foram esvaziados ao longo dos meses subsequentes de maneira mais lenta. O fato da bacia do córrego Jaque apresentar o mesmo comportamento é mais um indicativo deste possuir contribuições carbonáticas subterrâneas.

Após a avaliação das recargas e descargas das bacias, foi analisado separadamente cada hidrograma utilizando gráficos de *boxplot* para avaliar a variabilidade das vazões ao longo dos 48 meses (Figura 6) em conjunto com os hidrogramas da Figura 5.

O córrego Jaguara exibiu a maior variabilidade de vazão. A média e mediana apresentou grande variabilidade e uma grande quantidade de *outliers*. Como dito, essa bacia está na região mais carstificada e apresenta rápidos eventos de recarga e descarga. Portanto, pode-se relacionar essa alta variabilidade ao recebimento de águas sazonais de eventos pluviométricos ocorridos nos maciços distantes desta bacia. A produtividade média obtida para os quatro ciclos de monitoramento foi de 0,0079 m³/s km².

A bacia Escrivânia-Gordura, monitorada pelas vazões do córrego Gordura, provavelmente recebe contribuições alóctones, conforme descrito nos trabalhos de De Paula (2019). Essas afirmações podem ser relacionadas à produtividade nominal destas bacias, uma vez que a vazão da bacia Escrivânia-Gordura é menor que a do córrego Jaguara, e não apresenta uma variação sazonal marcante como o Jaguara. Pelo contrário, como mostrado na Figura 6, o córrego Gordura apresenta uma descarga com distribuição homogênea, porém, a produtividade média da bacia Escrivânia-Gordura é muito alta, de 0,00915 m³/s km².

A bacia Escrivânia-Gordura não apresenta nem área nem densidade de maciços superior à do Palmeira-Jaguara. Portanto, a alta produtividade específica pode ser justificada pela existência de fluxos subterrâneos provenientes de fora da bacia. Teodoro *et al.* (2020), em seu trabalho sobre traçadores corantes, identificou que dois terços da vazão desta bacia é proveniente de fontes internas, e o restante da sua descarga tem origem ainda desconhecida.

O córrego Palmeira, por sua vez, possui fluxo de água de norte a sul, e é interpretado como um sistema mais antigo devido ao sentido de fluxo incomum para área, paralelo à formação dos cursos d'água estaduais e federais existentes no carste do Bambuí em Minas Gerais (sul para norte). A produtividade relativamente baixa desta bacia (0,0062 m³/s km²) indica que ela é drenada para outro sistema, pois, apesar de ser um sistema cártico, ele não produz como as demais bacias carbonáticas. As hipóteses apresentadas para essa bacia são sustentadas pelo fato de que a drenagem termina em um sumidouro no extremo sul da bacia, e posteriormente é direcionada para o meio subterrâneo para leste, no sentido da ressurgência existente na bacia do Jaguara, e dessa forma constitui a bacia hidrogeológica Palmeira-Jaguara. Ensaios de traçadores corantes realizados por Auler (1994) e Teodoro *et al.* (2020), entre outros autores, comprovaram essas conexões.

O córrego Flor apresenta uma baixa produtividade (0,0061 m³/s km²). Este fato e a presença de cobertura argilosa da Formação Serra de Santa Helena inicialmente sugerem uma origem pelítica para a bacia. Contudo, as respostas semelhantes às bacias carbonáticas nos hidrogramas e a velocidade de resposta a eventos pluviométricos levantados em trabalhos de De Paula e Velásquez (2019), não são características de bacia tipicamente pelítica. Portanto, é provável que a bacia apresente contribuições carbonáticas de um sistema endocárstico mais evoluído.

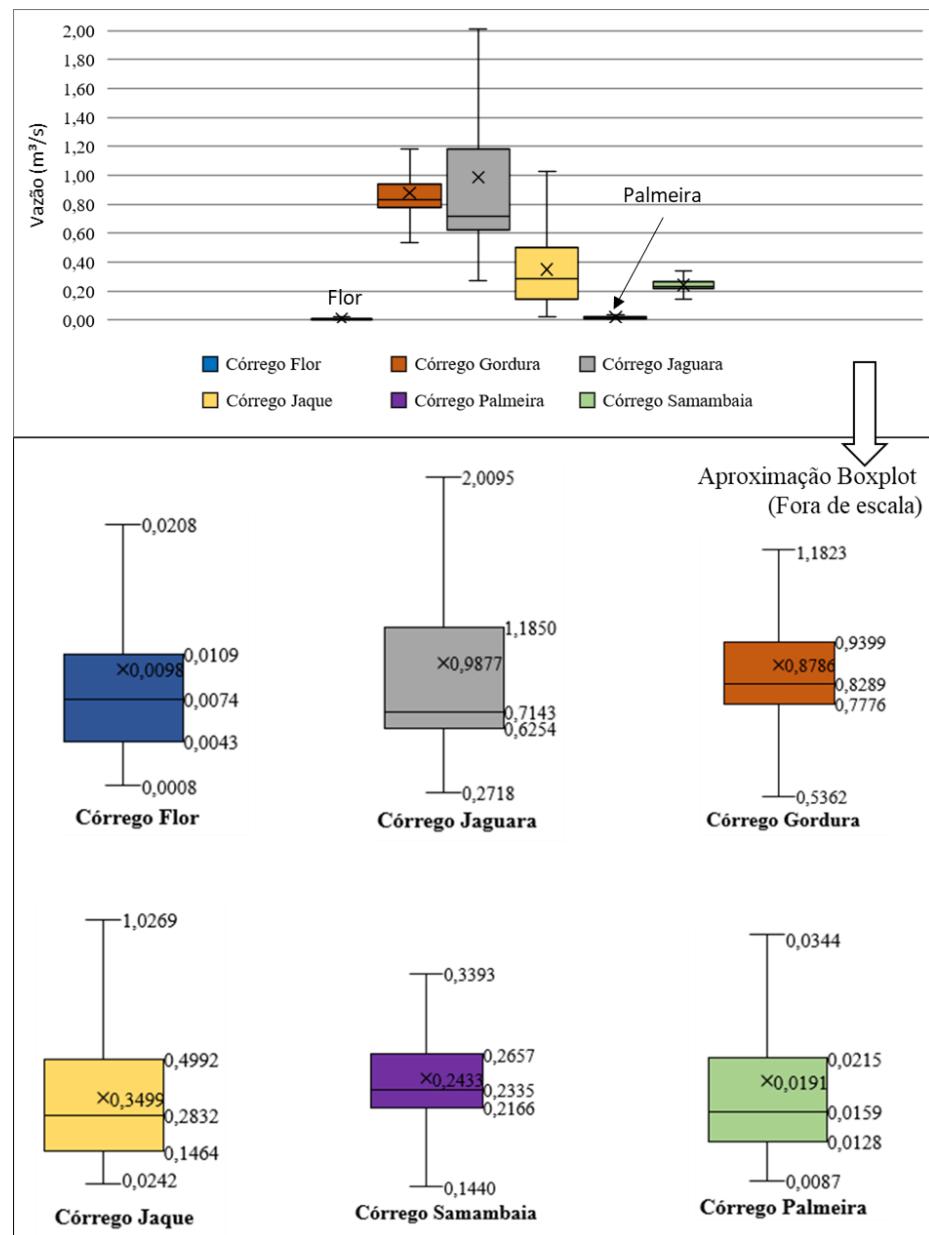


Figura 6 – Boxplot das vazões monitoradas com aproximação fora de escala para cada córrego. Fonte: autor (2022).

É possível notar no córrego Samambaia uma boa similaridade entre essa bacia e as bacias do Palmeira-Jaguara e Escrivanha-Gordura. A localização geográfica da bacia do Samambaia, circundada por outras bacias e com o seu exultório terminando em um sumidouro, a classifica como cárstica. A sua produtividade de $0,0051 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ é menor que a do Escrivanha-Gordura e Palmeira-Jaguara, o que indica um processo menos evoluído de desenvolvimento cárstico, ou uma menor área de captação.

Quando se compara as Figuras 5 e 6 para o córrego Jaque e Samambaia, observa-se grandes semelhanças dos hidrogramas, na variabilidade dos dados do *boxplot*, assim como na produtividade calculada, sendo que a bacia do Jaque possui produtividade de $0,0058 \text{ m}^3/\text{s km}^2$, e é um indicador de uma bacia mista.

5. Considerações finais

Os dados de monitoramento por quatro ciclos hidrológicos possibilitaram a construção de curvas chaves robustas que tiveram seus dados de monitoramento e sua construção validados. A periodicidade do monitoramento na construção de curvas-chave evidenciou a importância de um monitoramento prolongado para produção e validação de curvas-chave. É importante destacar que a validade da curva está condicionada à não modificação da seção de monitoramento, assim como à obtenção de um valor R^2 alto, sendo aqui sugerido valores superiores a 0,8.

Uma importante contribuição regional e para as comunidades existentes na área de estudo foi a variabilidade de carga hidráulica do aquífero, que registrou elevações após um período de maior pluviosidade, e manteve esse nível elevado até o ano hidrológico seguinte. A interpretação dos períodos de recessão dos hidrogramas sugere que houve a reativação de dutos superiores que foram descarregando ao longo de meses nas bacias do Escrivânia-Gordura, Jaque e Samambaia. Essas constatações ilustram um sistema cárstico complexo.

Em se tratando do sistema de recarga, foram constatadas evidências da provável ocorrência de recarga alóctone em pelo menos duas grandes bacias cársticas, devido à alta produtividade apresentada por esses sistemas quando comparados com os demais. Essas contribuições externas à área de estudo, área essa que circunda a APA Carste de Lagoa Santa, sugerem que a delimitação atual da área de proteção ambiental é insuficiente para abranger o seu sistema hidrogeológico real.

A similaridade dos hidrogramas das bacias estudadas durante os quatro ciclos hidrológicos revela que as bacias hidrográficas sobre as rochas pelíticas (córregos Jaque e Flor) são mais bem classificadas como bacias mistas. A bacia de Jaque, além da similaridade apresentada nos hidrogramas, possui produtividade similar às bacias carbonáticas.

Recomenda-se um estudo mais aprofundado de recarga para região com o objetivo de setorizar as recargas por bacias, e setorizar as principais feições cársticas para definir a sua importância na comunicação entre o sistema superficial e subterrâneo, além da evolução de estudos integrando a zona saturada e vadosa de modo a avaliar o nível d'água no decorrer de anos hidrológicos.

Referências

- ALKMIM, F. F.; NEVES, B. B. B.; ALVES, J. A. C. Arcabouço Tectônico do Cráton do São Francisco–Uma Revisão. O Cráton do São Francisco. *II Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, Salvador, Bahia*. 1993.
- AULER, A.S. *Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil*. Msc Thesis, Department Of Geography And Geology, Western Kentucky University, Bowling Green, 110 f. 1994.
- BERBERT-BORN, M.L.C. *Geoquímica dos Sedimentos Superficiais da Região Cárstica de Sete Lagoas-Lagoa Santa (MG), e os indícios de Interferências Antrópicas*. DEGEO/UFOP. Dissertação de Mestrado. 1998.
- DE PAULA, R.S. *Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste Lagoa Santa, MG*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 279p. 2019.
- DE PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Aguas Subterrâneas*, 33(2), 119-133. 2019. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29252>
- DE PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M. Method to complete flow rate data in automatic fluvimetric stations in the karst system of Lagoa Santa area, MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*. 2020. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190031>
- GALVÃO P.; HIRATA R.; CONICELLI B. Estimating groundwater recharge using GIS based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 77(10): 398. 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7579-z>
- KOHLER, H.C. A Evolução Morfogenética da Lagoa Santa - MG. *Anais 30º Congresso Brasileiro de Geologia*, Recife, 1, 147-153. 1978.
- KÖPPEN, W.G., Geiger R. *Klimate der Erde*. Gotha Verlagcondicionadas, Justus Perthes. 1928.

- MARTINS-NETO M.A.; PEDROSA-SOARES A.C.; LIMA S.A.A. Tectono-sedimentary evolution of sedimentary basis from Late Paleoproterozoic to Late Neoproterozoic in the São Francisco craton and Araçuaí fold belt, eastern Brazil. *Sedimentary Geology*, 141-142: 343-370. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00082-3)
- PESSOA, P.F.P. *Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG*. SMARH/UFMG, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, 375 p. 2005.
- RIBEIRO, J.H.; TULLER, M.P.; FILHO, A.D.; PADILHA, A.V.; CÓRDOBA, C.V. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Campim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – Relatório final CPRM, 2^a ed, escala 1:50.000. 2003.
- SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M. V. B; BUBA, H.; KISHI R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. *Hidrometria Aplicada*. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba, PR. LACTEC. ISBN 85-88519-01-1. 2001.
- SILVA, J.C.S. *Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG*. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), 303 p. 2003.
- TEIXEIRA, G.M.; PENA, M.A.C.; SILVA, P.H.P. *Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG*. Trabalho de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2020.
- TEODORO M.I.P.; VELÁSQUEZ L.N.M.; FLEMING P.M.; DE PAULA R.S.; SOUZA R.T.; DOI B.B. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de Traçadores Corantes, na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, 33(4):392-406. 2019. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i4.29532>
- WHITE, W.B. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*, v. 65, p. 85-105. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00116-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00116-8)