

DISPONIBILIDADE DE ÁGUA EM NASCENTES DO CERRADO: RELAÇÕES COM USO DA TERRA E MORFOMETRIA DE BACIA HIDROGRÁFICA

Eliana Aparecida Panarelli

Universidade do Estado de Minas Gerais,
Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Frutal, MG, Brasil
eliana.panarelli@uemg.br

Sophia Oliveira Vidote

Universidade do Estado de Minas Gerais,
Licenciatura em Geografia, Frutal, MG, Brasil
sophia.1093972@discente.uemg.br

Daniela Fernanda da Silva Fuzzo

Universidade do Estado de Minas Gerais,
Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas, Frutal, MG, Brasil
daniela.fuzzo@uemg.br

Adriana Duneya Diaz Carrillo

Universidade Federal de Goiás,
Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Samambaia, Goiania (GO), Brasil
adriana.carrillo@discente.ufg.br

Palmira Inocência Antônio

Universidade do Estado de Minas Gerais,
Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Frutal, MG, Brasil
palmira.1098346@discente.uemg.br

Rodrigo Ney Millan

Universidade do Estado de Minas Gerais,
Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Frutal, MG, Brasil
rodrigo.millan@uemg.br

RESUMO

A escassez hídrica é realidade em diversos cursos d'água que supriam a demanda da produção agrícola no Cerrado. Este estudo caracterizou a morfometria em cinco sub-bacias hidrográficas do rio Grande, localizadas na porção sul da Serrinha, município de Frutal (MG), e avaliou nascentes em cada uma das sub-bacias quanto à disponibilidade hídrica e o uso e cobertura da terra. Os parâmetros morfométricos foram obtidos utilizando as ferramentas do *Google Earth*. Os percentuais de uso do solo foram analisados em um raio de 2 km ao redor das nascentes, usando dados disponíveis no MapBiomas. Os dados de vazão dos riachos foram medidos no local. Dentre as bacias hidrográficas, uma é de quinta ordem, com maiores dimensões e menor densidade de drenagem, as outras quatro são de quarta ordem. Todas possuem índices de circularidade < 0,51 e baixas relação de relevo, com variação para os demais parâmetros. Foram registradas 702 nascentes, sendo 149 secas ou intermitentes. O uso do solo predominante foi cana-de-açúcar, mosaico de usos e pastagem. A vazão variou em escala 15 vezes maior durante o período chuvoso quando comparada ao período seco, mas não houve diferença estatística significativa entre os períodos ou entre as bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Rios de primeira ordem. Pecuária. Agricultura. Análise morfométrica. Vazão de nascentes.

WATER AVAILABILITY IN BRAZILIAN SAVANNAS SPRINGS: RELATIONS TO LAND USES AND WATERSHED MORPHOMETRY

ABSTRACT

Water scarcity is a reality in several water bodies that supplied agricultural production demands in the Brazilian savannas. This study characterized the morphometry of five sub-basins of the Grande River, located in the southern region of Serrinha, in the municipality of

Frutal, and evaluated land uses and water availability at the springs in each watershed. The morphometric parameters were obtained using the Google Earth tools. The land use percentages were performed for a 2 km radius around the springs, based on data available from the MapBiomas collections. Streamflow data were measured *in situ*. Among the studied watersheds, one is a fifth-order with larger dimensions and lower drainage density, while the other four are fourth-order. All of them have circularity ratios < 0.51 and low basin relief relation, with variation in the other parameters. A total of 702 springs were registered, among them, 149 were dry or intermittent. The predominant land uses were sugarcane, mosaic of uses, and pasture. The flow was about 15 times higher during the rainy than dry season, but there were no significant differences between periods or among watersheds.

Keywords: First-order streams. Livestock. Agriculture. Basin morphometry. Spring flow.

INTRODUÇÃO

A proteção de nascentes é essencial para manutenção da quantidade e qualidade da água na bacia hidrográfica. As nascentes podem ser definidas como local onde a água subterrânea entra naturalmente em contato com a superfície topográfica, mesmo que de forma intermitente (Brasil, 2002). Quando a nascente origina um sistema fluvial, pode ser entendida como o ponto inicial de um rio, sendo assim um rio de primeira ordem, conforme classificação de Strahler (1952).

Em muitos casos, a variação do nível freático pode estabelecer a migração das nascentes (Faria, 2014). Assim, alguns pontos de contato do nível freático com a superfície topográfica podem surgir de forma sazonal. Entretanto, o atual Código Florestal (Brasil, 2012), que caracteriza a mata ciliar como proteção dos corpos d'água, excluiu as nascentes intermitentes da obrigatoriedade de preservação, o que pode levar ao encurtamento ou até ao desaparecimento dos rios de primeira ordem, pois a exclusão da vegetação pode intensificar o assoreamento da nascente e inviabilizar o seu retorno para o local onde a proteção não é obrigatória.

A proteção integral de nascentes é ainda mais importante em locais que passam por períodos de estiagem prolongada, com chuvas concentradas em poucos meses, onde os cursos d'água só podem permanecer perenes com a alimentação gradual subterrânea, que depende da infiltração nos meses de chuva e adicional proteção das áreas alagáveis, que também são componentes importantes para a manutenção dos cursos de baixa ordem nas paisagens do Cerrado. Paisagem essa que nas últimas seis décadas tem apresentado tendência à redução de precipitações, com mudanças na evapotranspiração, umidade do ar e circulação atmosférica (Hofmann *et al.*, 2023).

Além da tendência de redução da umidade atmosférica, o Cerrado sofre com o uso da terra cada vez mais intensivo, deficiência de instrumentos legais de proteção e baixo controle das ações de desmatamento. De acordo com dados do MapBiomas (2024), a savana brasileira foi o bioma com a maior área desmatada no ano de 2023, correspondendo a 61% do desmatamento no país. Esse fato, somado às alterações no ciclo da água citadas anteriormente, coloca em risco a disponibilidade hídrica para os múltiplos usos, incluindo a atividade agropecuária.

A preservação de matas ciliares e de áreas alagadas é de “fundamental importância na gestão de bacias hidrográficas, contribuindo para a estabilidade dos ciclos hidrológicos e biogeoquímicos e dando condições de sustentabilidade à agricultura” (Tundisi; Matsumura-Tundisi, 2010, p. 74). Ações para recuperação e proteção dos recursos hídricos devem ser pensadas na escala da bacia hidrográfica, considerando a hierarquia e interdependências dos cursos d'água. Assim, a bacia hidrográfica é considerada como unidade de gestão dos recursos hídricos (Brasil, 1997) e unidade de planejamento ambiental em diversas regiões do mundo (Santos, 2007).

Considerando a importância da bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos, a caracterização morfométrica da bacia pode subsidiar o processo de planejamento ambiental integrado, uma vez que apresenta diversas possibilidades de integração com a dinâmica de uso e cobertura do solo, qualidade de água, potencial erosivo, exploração de recursos ambientais e dinâmica socioeconômica de determinada área (Soares *et al.*, 2016).

Dentro do exposto acima, considera-se tanto as bacias hidrográficas como as nascentes importantes unidades de estudo, planejamento ambiental e gestão dos recursos hídricos. Assim, o presente estudo trabalhou com as duas unidades de grandeza e com o objetivo de realizar a caracterização física de bacias hidrográficas e de nascentes do município de Frutal (MG). Os resultados pretendem oferecer subsídios para a conservação e o uso sustentável de rios de primeira ordem em ambiente de Cerrado.

MATERIAIS E MÉTODOS

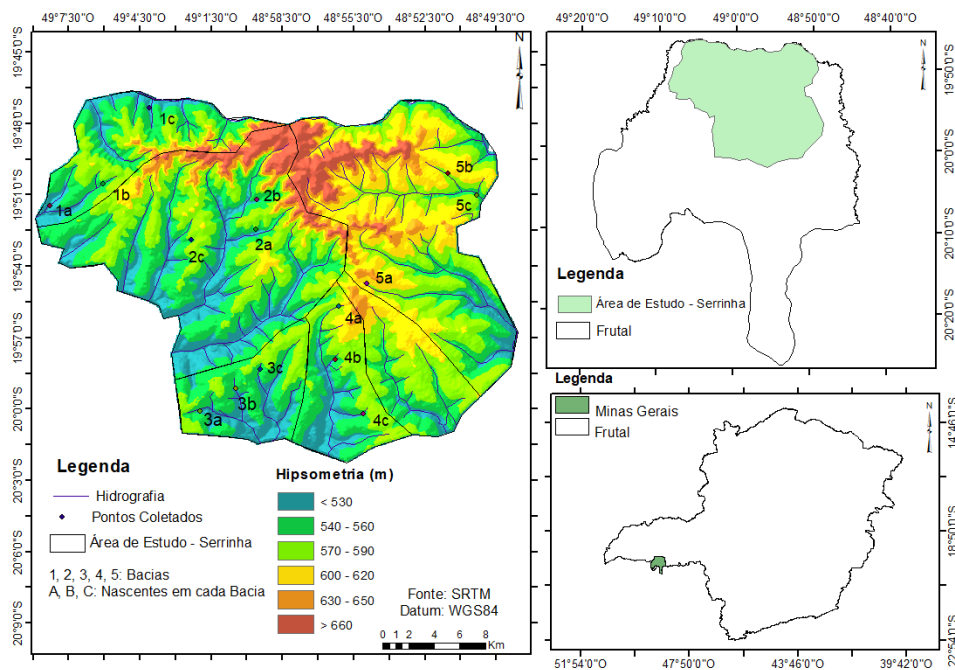
Área de estudo

O trabalho foi realizado em bioma savânico, conhecido nacionalmente como Cerrado. As nascentes estudadas estão inseridas na porção sul da Serrinha, entre as latitudes 19° 46' 52"; 20° 01' 28" S e Longitude: 48° 49' 29"; 49° 08' 53" O (Figura 1). A Serrinha é o divisor de águas das bacias do rio Grande e rio Paranaíba, região noroeste do Estado de Minas Gerais, onde a cobertura da terra é uma matriz fragmentada formada por pastagens, áreas de cultivos perenes, semiperenes e anuais, com poucos fragmentos florestais, onde o setor agropecuário movimenta grandes recursos (IBGE, 2020).

O clima da região é definido como Aw, segundo a classificação Köppen-Geiger, tropical com a estação seca e fria ocorrendo no inverno; o verão apresenta a estação com maiores índices pluviométricos (Alvares *et al.*, 2014), com temperatura e precipitação média anual de 23,8° C e 1.626,9 mm, respectivamente.

A Serrinha é composta por rochas areníticas da Formação Uberaba (Grupo Bauru), seguida ao sul por uma faixa da Formação Vale do Rio do Peixe (Lima; Almeida, 2012), onde se encontram nascentes de cinco bacias dos principais rios do município: Ribeirão São Mateus, Ribeirão Frutal, Córrego São José do Bebedouro, Ribeirão Marimbondo e Rio São Francisco (Figuras 1), todos esses deságuam em região de influência de reservatórios de usina hidrelétrica no Rio Grande.

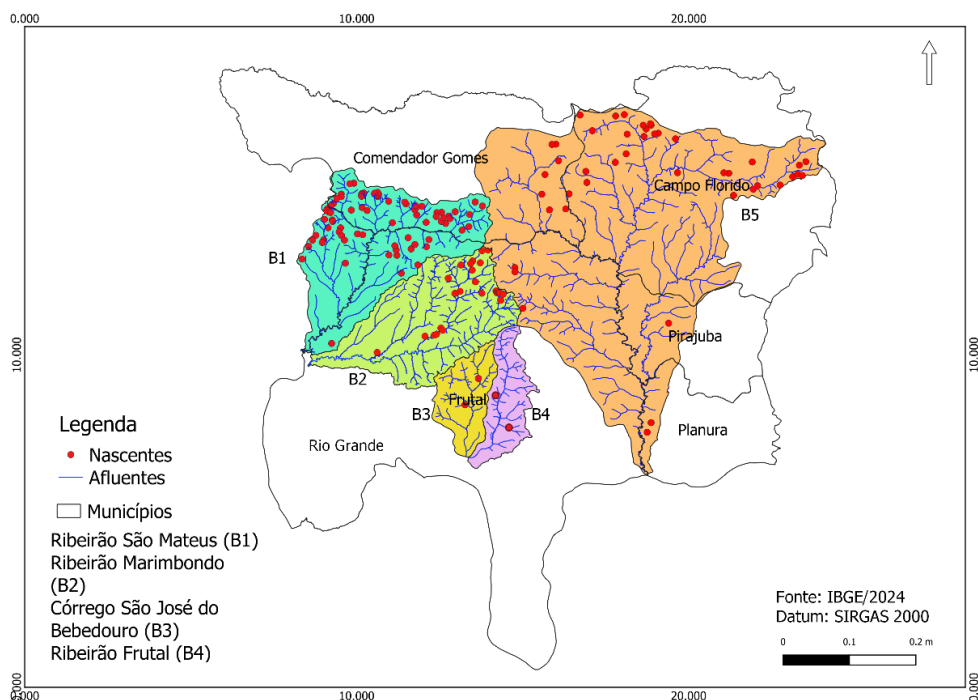
Figura 1 - Altimetria da região e localização das nascentes nas principais bacias hidrográficas do município de Frutal (MG): 1) Ribeirão São Mateus; 2) Ribeirão Marimbondo; 3) Córrego São José do Bebedouro; 4) Ribeirão Frutal; 5) São Francisco



Fonte: Os autores (2023).

A porção central da área de estudo possui nascentes que vertem em áreas entremeadas por afloramento da Formação Serra Geral, as suas bordas leste e oeste compõem área de recarga importante para a manutenção da qualidade e quantidade das águas subterrâneas e seus afloramentos (Lima; Almeida, 2012). A proteção desse tipo de sistema é fundamental, sendo necessário evitar o desmatamento, o uso incorreto dos solos e a instalação de atividades potencialmente poluidoras. Nessa região encontra-se grande concentração de nascentes que abastecem vários municípios, dentre eles o município de Frutal e seus vizinhos Comendador Gomes, Itapagipe, Planura, Pirajuba e Campo Florido, onde estão localizadas as bacias estudadas (Figura 2).

Figura 2 - Delimitação das bacias estudadas, com municípios vizinhos de Frutal, indicando nascentes secas, intermitentes ou assoreadas (pontos vermelhos)



Fonte: Os autores (2024).

Mapeamento e uso da terra

O mapa hipsométrico foi organizado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), com algoritmo de reclassificação *r.recode*, onde as classes hipsométricas foram estabelecidas com base no percentual de representação na área de estudo. Para sua elaboração foram utilizadas as imagens SRTM, (*Shuttle Radar Topography Mission*) resultados da missão espacial americana (NASA e NGA), italiana (ASI) e alemã (DLR) disponibilizadas pela NASA, no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). As imagens foram processadas no *software* QGIS 3.16, com resolução espacial de 30 m.

O mapeamento de uso da terra foi elaborado para o entorno de cada uma das nascentes indicadas na Figura 1, em áreas de abrangência com raio de 2 km (*buffers*). Para identificação e análise de uso e cobertura da terra foram utilizadas imagens do catálogo MapBiomas, que são mapas no formato matricial (pixel de 30 x 30 m) baseados na coleção *Landsat*. Para o presente estudo foram usados os dados de 2021. Os dados na plataforma são classificados automaticamente e processados em nuvem para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil (Moraes, 2020). Assim, cada pixel das imagens é classificado, entre 27 classes de uso da terra (MapBiomas, 2023). Os dados foram integrados em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), utilizando o *software* QGIS 3.16, que possibilitou a análise espacial do Uso da Terra. A nomenclatura utilizada para classes

de uso seguiu o padrão do MapBiomias, incluindo “mosaico de usos” que é o termo utilizado quando a imagem não permite a identificação de um tipo de uso específico em ocupação heterogênea. As cartas podem ser vistas em Antônio *et al.* (2023). Para calcular a área de cada uso da terra foi utilizada a ferramenta *Grass (r-report)* no *software* QGIS.

Morfometria de bacia

As características morfométricas são apresentadas no Quadro 1. Os dados primários foram obtidos com o aplicativo *Google Earth Pro*, que permite resolução suficiente para vetorização de rios de primeira ordem. Entretanto, as imagens utilizadas são originárias de distintas fontes, assim, assume-se erro de 0,02 % para o comprimento dos rios e 3,54% para a área de cada bacia de acordo com Lopes e Nogueira (2011). Os parâmetros morfométricos combinados foram calculados conforme Christofolletti (1980), Villela e Matos (1975).

Quadro 1 - Parâmetros morfométricos, siglas e metodologia de obtenção

Parâmetro morfométrico (unidade)	sigla	Metodologia
Área da bacia (km ²)	A	Medida feita com ferramentas do <i>Google Earth</i>
Perímetro (km)	P	Medida feita com ferramentas do <i>Google Earth</i>
Comprimento do rio principal (km)	L	Medida feita com ferramentas do <i>Google Earth</i> , estipulando o curso mais longo.
Densidade hidrográfica (rio/km ²)	Dh	Dh= número de rios / A (técnica de Strahler)
Densidade de drenagem (km/km ²)	Dd	Dd = comprimento total dos rios/ A
Relação de relevo (m/km)	Rr	amplitude entre > e a < altitude da bacia/ maior extensão linear paralela a linha de drenagem principal da bacia, conforme Schumm (1956) <i>apud</i> Christofolletti (1980)
Coeficiente de compacidade	Kc	$Kc = 0,28(P/\sqrt{A})$
Fator de forma	Kf	$Kf = A/L^2$
Índice de circularidade	Ic	A dividida pela área do círculo de perímetro igual ao da bacia se ela fosse circular.

Fonte: Christofolletti (1980), Villela e Matos (1975).

Para determinar o traçado de rios de baixa ordem, foram estabelecidos critérios para superar as dificuldades visuais das imagens de satélite. O Quadro 2 especifica as decisões metodológicas para o traçado de rios e definição dos locais das nascentes. As imagens de 2023 foram priorizadas para a vetorização dos rios e localização das nascentes. Quando houve dúvida sobre a perenidade dos rios e local de nascentes, foram checadas as imagens disponíveis desde 2011.

Quadro 2 - Metodologia para traçados de rios de baixa ordem e localização de nascentes

Tipo de corpo d'água	Crítérios para localização e traçado
Nascente ativa (ponto de afloramento de água)	- Primeiro traço visível do curso d'água - Reservatórios de cabeceira - Concentração de palmeiras (buriti)
Nascente intermitente ou seca	- Áreas visíveis de assoreamento de reservatórios; - Áreas desmatada no curso dos rios sem visualização de lâmina d'água - Região alagável sem curso consecutivo
Rios em áreas alagadas ou com densa vegetação ciliar	- Trajeto de menor altitude entre a nascente, ou trecho do rio a montante do seu desaparecimento até o ressurgimento do canal - Trajeto seguindo sequência de palmeiras (buriti)

Fonte: Os autores (2024).

Medidas de vazão das nascentes

Em cada uma das cinco bacias hidrográficas, foram selecionados três rios de primeira ordem (nascentes), somando 15 trechos. Cada trecho foi visitado para verificação de existência de fluxo de água durante período de estiagem. Nascentes não perenes foram consideradas como “nascentes secas” observadas *in loco*, em julho/agosto de 2022, esses sistemas foram substituídos por rios com fluxo evidente para a tomada de vazão. As nascentes foram amostradas em altitudes que variaram de 570 a 660 m. A localização de cada nascente está na Figura 1.

A largura e a profundidade do canal (medidas com trena e régua) foram tomados em campo para estimativa de área da seção transversal (A). A velocidade da corrente (V) foi obtida com correntômetro digital (JDC Eletronic, Modelo Flowatch FL-K2). O valor da vazão (Q) de cada nascente foi obtido multiplicando-se A por V, em dois períodos do ano de 2023: entre abril e maio (final do período chuvoso) e setembro (final do período seco).

Análise de dados

A análise de dados focou duas escalas de grandeza: 1) a bacia hidrográfica, para interpretação das variáveis morfométricas, e 2) as nascentes como unidade amostral para verificar agrupamento quanto aos usos predominantes da terra. Ambas foram consideradas para inferência sobre a disponibilidade hídrica nas nascentes da Serrinha.

A caracterização de cada bacia foi feita inicialmente de forma descritiva, de acordo com a interpretação dos dados morfométricos sobre a capacidade de contenção da água ou escoamento relacionados com a relação de relevo, formato da bacia e densidade hidrográfica. Os descritores morfométricos foram considerados para verificar similaridade entre as bacias, utilizando a distância euclidiana para determinar agrupamento (*Cluster*) em análise multivariada.

A análise de componentes principais (*Principal Component Analysis* - PCA) foi realizada após exclusão de variáveis com poucas observações diferentes de zero, com posterior padronização de dados. A ordenação das bacias com os vetores (Componentes Principais – CP) foi determinada pelas variáveis de uso da terra: % de área ocupada por plantações de cana-de-açúcar (Cana), mosaico de cultivos (Mosa) e pastagens (Past) e valores de vazão no período seco (Qsec) e chuvoso (Qchu). Tais variáveis foram submetidas a teste de Shapiro Wilk, que negou a hipótese de normalidade dos dados. Os dados de vazão e classes de uso da terra foram submetidos à análise Kruskal Wallis para comparação entre as cinco bacias. As análises foram realizadas no Programa R 4.0.3. (*R Development Core Team, 2021*).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características de relevo determinam as variáveis morfométricas de bacias hidrográficas (Christofolletti, 1980). Assim, variações no formato, tamanho, amplitude altimétrica e características de drenagem, que resultam em variados índices e coeficientes morfométricos são esperadas para bacias distintas. Entretanto, bacias localizadas na mesma estrutura de relevo podem apresentar morfometria semelhante, como pode ser visto nos ambientes estudados (Tabela 1 e Figura 3).

A Figura 3 mostra a bacia B5 mais distante das demais, por ser uma bacia de 5ª ordem com área, perímetro e comprimento de rio principal bastante superiores às demais, que são de 4ª ordem. B3 e B4 são as menores em área, enquanto B1 e B2 possuem dimensões intermediárias. O tamanho da área da bacia é equivalente à área de drenagem das chuvas, portanto, a quantidade de água que chega em B5 (em mesma condição de regime de chuvas) pode ser aproximadamente três vezes maior que em B1 e B2 e mais de dez vezes maior que em B3 e B4. Essas últimas possuem os maiores valores de densidade de drenagem.

A velocidade do escoamento superficial da precipitação, a taxa de infiltração ou retenção temporária em áreas alagáveis dependem da declividade, cobertura do solo, permeabilidade de rocha e do solo, fatores que também influenciam a estrutura da rede de drenagem (Villela; Matos, 1975). As bacias analisadas possuem densidade de drenagem entre 0,5 e 0,9 km/km², indicando elevada capacidade

de infiltração da água, com subsolo permeável e baixa declividade, reduzindo a proporção de escoamento superficial e possibilitando baixa suscetibilidade aos processos erosivos. Tais características ocorrem em bacia hidrográfica características de relevo suave, com córregos amplamente espaçados, possuindo densidade de drenagem menores que 2 km/km², conforme revisão feita por Sukristiyanti; Maria e Lestiana (2018) e Shekar e Mathew (2023).

A relação de relevo apresenta valores baixos em todas as bacias estudadas, com fraca tendência à erosão, mas favorecendo o acúmulo de água, o que auxilia a explicação sobre a presença de várias áreas alagáveis ao longo dos rios estudados. B5 é caracterizada pela menor densidade hidrográfica e menor densidade de drenagem entre as bacias estudadas.

As bacias em estudo apresentam baixa probabilidade de inundação, com índices de circularidade < 0,51. B3 é a bacia com formato mais ovalado, seguida por B1, B2, B5, sendo B4 a mais alongada de acordo com os índices de circularidade e coeficiente de compacidade (Fritzsons; Mantovani, 2010). B5 e B3 possuem relação de relevo um pouco menor que as demais (Tabela 1).

Pereira *et al.* (2018) obtiveram parâmetros morfométricos um pouco distintos dos apresentados nesse estudo para a mesma bacia (B4), possivelmente pela variação em imagem obtidas para épocas distintas e em decorrência da acuracidade individual de vetorização das variáveis primárias, porém tal diferença não gerou conflito nas conclusões sobre o formato e dinâmica da bacia do Ribeirão Frutal.

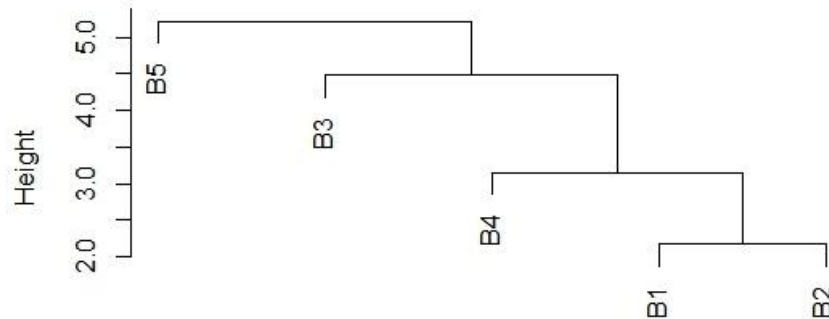
Mesmo com formatos relativamente distante de bacia circular e com boa capacidade de permeabilidade, todas as bacias estudadas apresentam diversas áreas alagáveis próximas às nascentes ou em determinados trechos do curso do rio. Isso ocorre porque a maioria das áreas úmidas do Cerrado apresenta água em contato com o nível freático raso ou superficial, essas áreas são de extrema importância ecológica, mas a legislação brasileira não regulamenta de forma clara a proteção desses sistemas (Durigan *et al.*, 2022).

Tabela 1 - Parâmetros morfométricos de cinco sub-bacias hidrográficas do Rio Grande

Variáveis morfométricas	Ribeirão São Matheus (B1)	Ribeirão do Marimbondo (B2)	Córrego São José do Bebedouro (B3)	Ribeirão Frutal (B4)	Rio São Francisco (B5)
A (Km ²)	477	403	120	122	1620
P (Km)	118	110	55	68	222
L (Km)	69	58	24	32	126
Dh (rio/km ²)	0,216	0,397	0,408	0,402	0,116
Dd (km/km ²)	0,645	0,895	0,729	0,868	0,517
Rr (m/km)	0,009	0,009	0,007	0,009	0,007
Kc	1,513	1,534	1,406	1,724	1,544
Kf	0,100	0,121	0,208	0,119	0,102
Ic	0,430	0,419	0,499	0,332	0,413

Fonte: Os autores (2024).

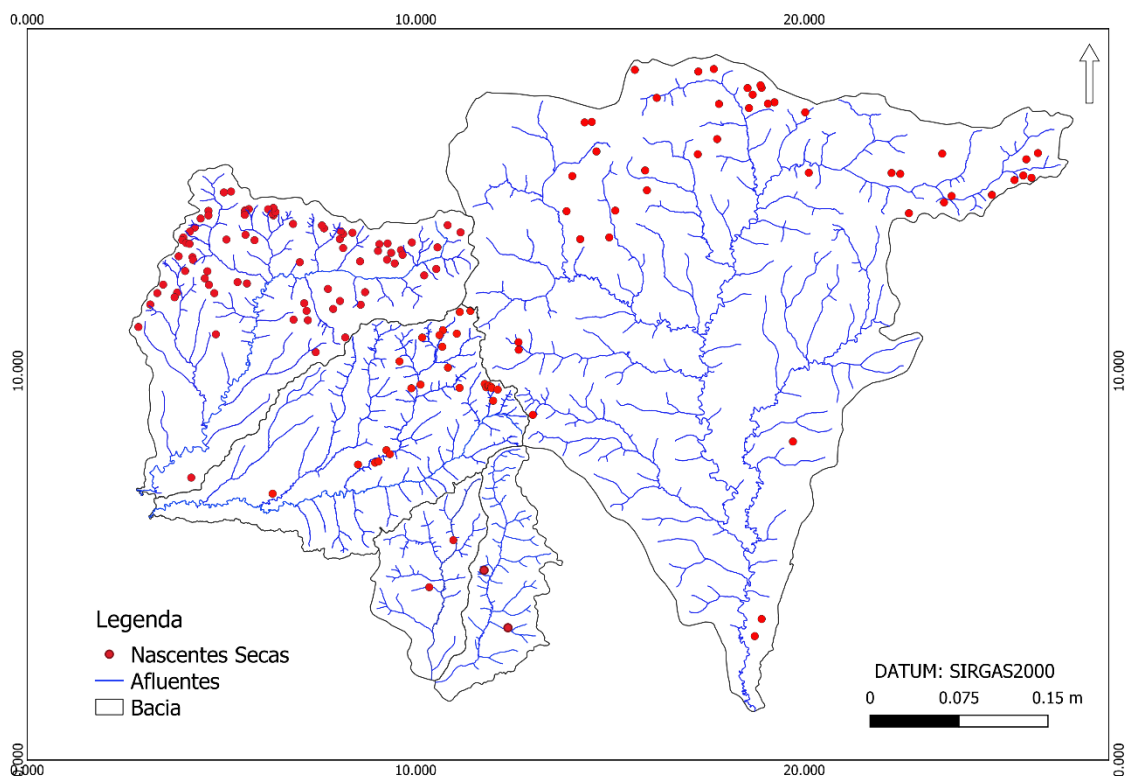
Figura 3 - Agrupamento das bacias hidrográficas, baseado na distância euclidiana para os parâmetros morfométricos, com coeficiente de correlação cofenética = 0,8057



Fonte: Os autores (2024).

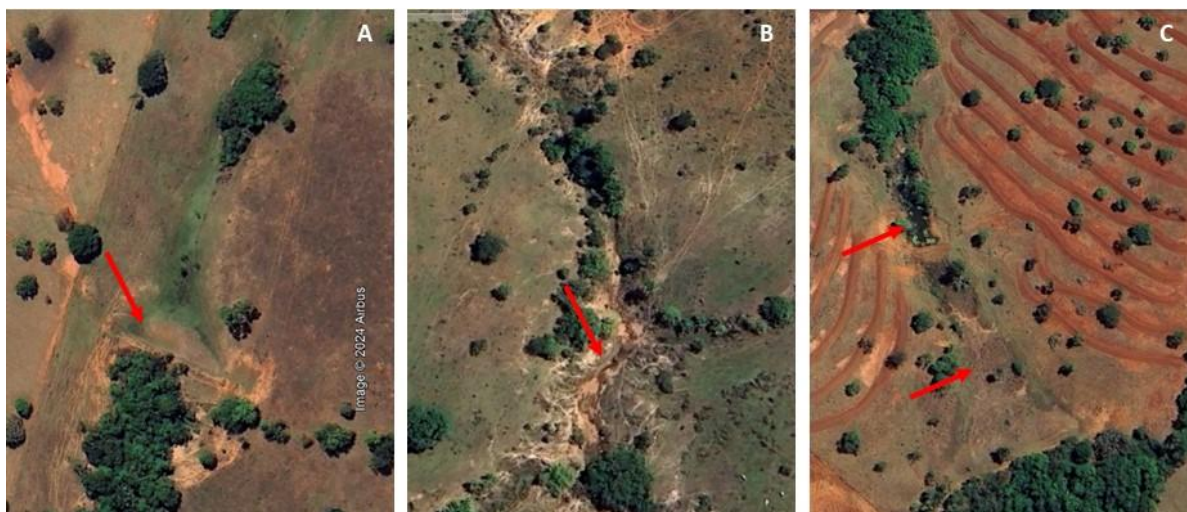
A Figura 4 apresenta a hidrografia nas bacias estudadas, com destaques (pontos vermelhos) para nascentes secas ou intermitentes. Na sequência, a Figura 5 exemplifica áreas de assoreamento em reservatórios; áreas desmatadas sem visualização de lâmina d'água no curso dos rios e região alagável sem curso consecutivo. Essas três categorias de imagens podem colaborar com padronização para classificação de nascentes secas ou intermitentes. A intermitência pode ser verificada por observação de série histórica disponível com boa resolução para o local.

Figura 4 - Hidrografia das bacias em estudo, pontos vermelhos indicam nascentes secas ou intermitentes



Fonte: Os autores (2024).

Figura 5 - Imagens de nascentes secas: A) reservatório assoreado; B) área desmatada no curso dos rios sem visualização de lâmina d'água; C) região alagável sem curso consecutivo



Fonte: *Google Earth Pro*, modificada pelos autores (2024).

Das 702 nascentes registradas, 553 apresentam-se com água e 149 secaram ou encontram-se intermitentes. A maior proporção de nascentes secas foi registrada na bacia do Ribeirão São Mateus (B1), das 178 nascentes registradas 42% estavam sem água. Essa condição coloca uma importante porcentagem dos rios de primeira ordem na situação de rios intermitentes. Entretanto, um aspecto peculiar para rios de primeira ordem é a alteração sazonal do comprimento, considerando que as nascentes são móveis (Faria, 2014).

Em Minas Gerais, a intermitência de rios é registrada para as bacias dos rios Jequitinhonha e Verde Grande, que secam antes do fim do período de estiagem, em geral a partir do mês de julho (CPRM, 2014). Apesar de não registrar intermitência na região aqui tratada, o relatório citado coloca as bacias do rio Grande e rio Paranaíba, no Triângulo Mineiro, entre aquelas áreas críticas para acompanhamento de vazão fluvial.

O registro de rios intermitentes e perenes por imagem do *Google Earth Pro* foi avaliado como de acuracidade moderada, quando testado para o mapeamento de rios na região do mediterrâneo e sub-mediterrâneo, apontando que o crescimento da vegetação no canal do rio durante o período de estiagem é um fator que inclui erro na detecção dos rios não perenes e que, devido às alterações climáticas, é provável que cada vez mais rios perenes se tornem intermitentes ou efêmeros para a região mediterrânea estudada por Kostianoy, Soloviev e Pešić (2020). Considerando a redução de chuvas e o uso intensivo da terra na região de savanas brasileiras, essa também pode ser uma realidade em andamento no Triângulo Mineiro.

Várias nascentes secas são visíveis em imagens típicas de reservatório assoreado (sistema em formato aproximadamente triangular preenchido por sedimento na cabeceira de rios de primeira ordem). O assoreamento de nascentes de altitudes mais elevadas muitas vezes acarreta o surgimento de nascentes em menores altitudes, produzindo variadas extensões de canais secos. Faria (2014) relata que bacias de primeira ordem são muito sensíveis a alterações no uso do solo e que sob intenso uso agrícola elas recebem volume de sedimento muito superior à sua capacidade de transporte, o que pode levar ao desaparecimento de canais de primeira ordem.

A sazonalidade de nascentes que já foram perenes resulta em redução temporal do afloramento da água subterrânea, como registrado por Martins *et al.* (2022) em um dos afluentes urbanos do Ribeirão Frutal. Nas proximidades da Serrinha, a intermitência ou o encurtamento dos rios pode caracterizar indisponibilidade de águas superficiais para diversas propriedades rurais, acarretando demanda de gastos para obtenção de água subterrânea.

Da mesma forma que as águas superficiais, a disponibilidade das águas subterrâneas depende de processos de recarga controlado pelo clima, solos, geologia, topografia, hidrologia, bem como vegetação e uso da terra (Moeck *et al.*, 2020). Assim, os processos que afetam a disponibilidade de água das nascentes atualmente também afetarão a disponibilidade das reservas subterrâneas em prazos mais longos. No caso de aquíferos confinados a sustentabilidade do uso é ainda mais preocupante, pois trata-se de recursos hídrico com tempo de residência que pode atingir milhares de anos, como exemplificado para o Aquífero Tubarão com 15.000 anos de tempo médio de residência (Ezaki *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, a agricultura tem substituído tanto as áreas de vegetação nativa quanto as áreas de atividade pecuária, que era historicamente a principal atividade econômica do município de Frutal (Pinto-Pereira *et al.*, 2017), essa mudança representa aumento da demanda dos recursos hídricos para irrigação. No entorno das nascentes estudadas, as três principais classes de usos são a monocultura de cana-de-açúcar, as pastagens e o mosaico de uso. A soja também é uma classe de uso importante em algumas nascentes, mas ocorre principalmente na atividade de rotação de cultura com a cana-de-açúcar.

A escala disponível no MapBiomas não favoreceu o maior detalhamento de algumas áreas de vegetação ciliar, comprimento total dos cursos d'água e áreas alagáveis, já nas imagens do *Google Earth* os cursos d'água podem ser mensurados de forma mais precisa.

Além das análises morfométricas com caracterização das bacias em sua totalidade, como apresentado anteriormente, foram avaliados recortes mais detalhados em *buffers* de 2 km de raio, caracterizando a porcentagem de uso e cobertura da terra para três nascentes perenes em cada bacia. Segue a descrição dessa avaliação por bacia, os valores de porcentagem de uso podem ser vistos na Tabela 2:

- Em duas nascentes de B1, foi observada predominância de pastagem; na outra nascente, a cana-de-açúcar e pastagem ocuparam áreas equivalentes;
- Em duas nascentes de B2, foi observada predominância de pastagem; na outra nascente, os valores foram semelhantes para as três principais classes de usos (cana-de-açúcar, mosaico de uso e pastagem);
- Em B3, a monocultura de cana-de-açúcar e o mosaico de usos ocupam maior área que as pastagens no entorno de todas as nascentes. Nessa bacia, também foi registrado cultivo de soja e formação florestal, ambas próximas ao valor de 10% do *buffer* no entorno da nascente;
- Em B4, as pastagens ocupam a maior proporção em duas nascentes. Nessa bacia, uma das nascentes apresenta importante ocupação florestal (12,66%) e representativa área urbanizada em seu entorno (26,98%);
- Em B5, uma das nascentes apresenta-se em grande parte ocupada por mosaico de uso, seguido de pastagem; nas outras duas nascentes a monocultura ocupa a maior parte do entorno das nascentes, representadas por áreas de cana-de-açúcar e soja.

Tabela 2 - Porcentagem de uso do solo nos *buffers* no entorno de cada nascente analisada

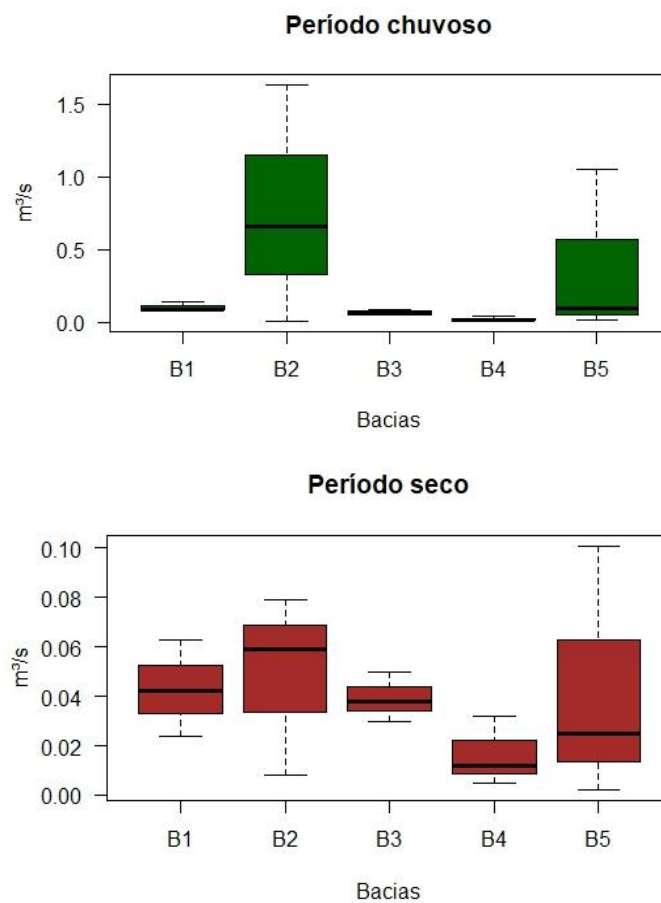
Nascentes	Formação Florestal	Área Urbanizada	Soja	Cana	Mosaico de Usos	Pastagem
B1A	0,00	0,00	0,00	37,04	26,74	36,23
B1B	0,00	0,00	0,00	0,00	38,07	61,93
B1C	0,00	0,00	0,00	11,38	18,94	69,68
B2A	0,00	0,00	11,34	25,14	33,24	30,27
B2B	0,00	0,00	0,00	31,30	26,12	42,58
B2C	0,00	0,00	0,00	13,83	13,70	72,47
B3A	0,00	0,00	0,00	36,33	36,43	27,24

B3B	0,00	0,00	0,00	38,63	34,21	27,16
B3C	9,58	0,00	9,97	26,88	29,52	24,05
B4A	0,00	0,00	9,28	12,48	37,43	40,81
B4B	12,66	0,00	13,36	0,00	31,90	42,08
B4C	0,00	26,98	0,00	29,38	28,31	15,33
B5A	0,00	0,00	0,00	0,00	60,20	39,80
B5B	0,00	0,00	21,16	49,71	14,02	15,12
B5C	0,00	0,00	29,60	20,37	29,49	20,54

Fonte: Os autores (2024).

A vazão das nascentes, medidas no local em duas épocas do ano (estação seca e chuvosa), apresentou uma distribuição em escala 15 vezes maior no período chuvoso, quando comparada ao período seco (Figura 6). Nos dois períodos, B2 apresentou a maior mediana e B4 a menor. B2 e B5 foram as que apresentam maior variação entre as nascentes da mesma bacia.

Figura 6 - Vazão, mediana e percentil (25% e 75%), nos períodos chuvoso e seco de 2023, nas nascentes da Serrinha



Fonte: Os autores (2024).

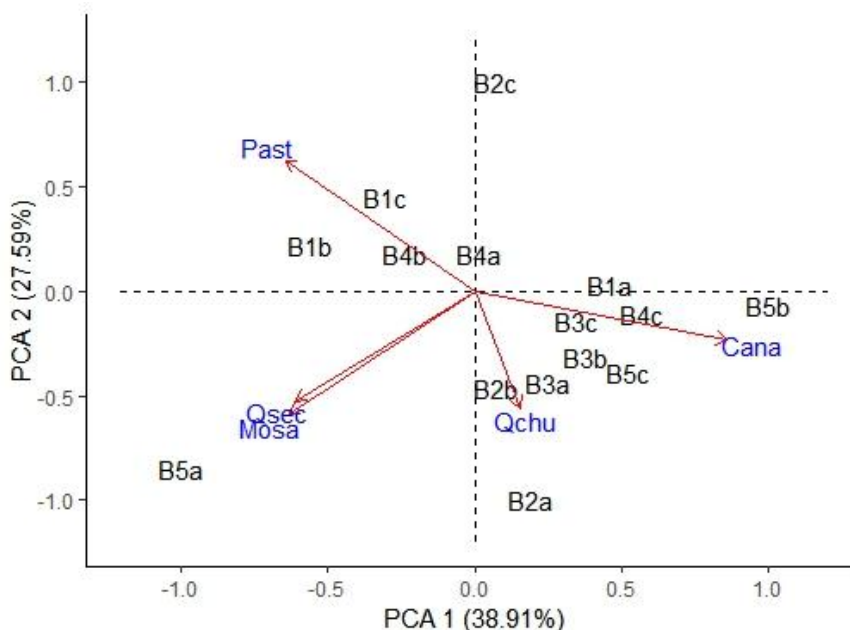
Quando considerada a ordenação multivariada para caracterizar possíveis agrupamentos das nascentes, verifica-se que não existe agrupamento por bacias, devido à elevada variabilidade dentro de cada bacia. O primeiro plano fatorial da Análise de Componentes Principais (CP) resumiu 66,5% da variabilidade original dos dados, sendo CP1 = 38,91% e CP2 = 27,59% (Tabela 3, Figura 7). A análise de Kruskal Wallis não mostrou diferenças significativas entre bacias quanto ao uso e cobertura da terra, nem em relação à vazão das nascentes.

Tabela 3 - Correlação entre variáveis das nascentes e componentes principais (CP)

Variável	Sigla	CP 1	CP 2
Monocultura de cana-de-açúcar	Cana	0,8592	-0,2368
Mosaico de uso	Mosa	-0,6314	-0,5890
Pastagens	Past	-0,6430	0,6227
Vazão período chuvoso	Qchu	0,1568	-0,5596
Vazão período seco	Qsec	-0,6089	-0,5251
% Explicação		38,9121	27,5948

Fonte: Os autores (2024).

Figura 7 - Análise de Componentes Principais (gráfico *biplot*)



Fonte: Os autores (2024).

A monocultura de cana-de-açúcar apresentou forte correlação positiva com o CP1. O mosaico de uso, as pastagens e a vazão no período seco apresentaram relação negativa com o CP1. Considerando a relação positiva das áreas de cana-de-açúcar e da vazão do período chuvoso com o CP1, seria possível inferir menor eficiência da infiltração da água no solo no período chuvoso, com prejuízos para recarga gradual das nascentes nos locais com predominância de monocultura de cana, prejudicando a vazão em épocas de estiagem. No entanto, essa inferência precisa ser testada por estudo futuro, com avaliação da capacidade de infiltração em solos do entorno de nascentes do Cerrado, comparando as áreas de cultivo de cana com outros usos (Figura 7).

O CP2 apresentou relação positiva com a pastagem e negativa com a vazão nos dois períodos (Figura 7), o que indica que a pastagem influencia negativamente a vazão em ambos os períodos do ano. O aumento do escoamento superficial é um padrão comum quando o Cerrado arborizado é substituído por usos agrícolas, com provável redução da capacidade de retenção de água comumente encontrada em solos perturbados (Anache *et al.*, 2019).

Outras variáveis podem influenciar a vazão das nascentes estudadas, a condição de conservação das áreas de preservação permanentes é uma delas. Quando se avalia a vegetação ciliar de nascentes em áreas alagáveis, é preciso considerar a necessidade de adequação da legislação para proteção de áreas alagáveis, incluindo as veredas, que já são protegidas pelo Código Florestal (Brasil, 2012), mas com necessidade de aprimoramento na delimitação da Área de Proteção Permanente (APP). Isso porque “a faixa estreita da APP inclui apenas uma pequena parte das porções sazonalmente alagadas de uma vereda, que muitas vezes pode se estender muito além da APP e não deve ser tratada separadamente ou desconsiderada” (Durigan *et al.*, 2022, p. 189).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As bacias analisadas possuem formato de ovalado a oblongo, com apenas uma delas alongada. Considerando a elevada variação de uso do solo e de valores de vazão para as repetições em cada bacia, não foi possível definir se o principal fator de influência na vazão das nascentes estudadas está mais relacionado às variáveis morfométricas ou aos diferentes tipos de uso e cobertura da terra. Entretanto, os resultados indicam necessidade de investigações mais detalhadas sobre os prejuízos da predominância de cobertura por canal para a infiltração da água no solo e perenidade das nascentes.

Considerando a baixa suscetibilidade aos processos erosivos, caracterizada pela densidade de drenagem, a seca ou intermitência de nascentes aqui observadas também pode estar relacionada com pequena área ou ausência de região florestada e ao uso agropecuário intensivo, com represamento de rios de primeira ordem, pois represamento reduz o transporte e aumenta a sedimentação nas nascentes. O maior número de nascentes secas ou intermitentes foram registradas em locais próximos às encostas da Serrinha.

Os dados aqui obtidos corroboram as informações de Durigan *et al.* (2022) sobre a necessidade mapeamento das áreas alagáveis e revisão da legislação para áreas úmidas no Cerrado, pois as nascentes muitas vezes estão incluídas na categoria chamada de áreas alagáveis. Atenção especial deve ser dada à preservação ou recomposição da vegetação das matas ciliares com vegetação das fitofisionomias originais do entorno das nascentes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPEMIG (APQ-00420-21) pelo apoio à pesquisa, à Pró - Reitoria de Pesquisa e Pós Graduação (PROPPG-UEMG) pela concessão de bolsa de incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E.; ROSALEM, L. M. P.; YOULTON, C.; OLIVEIRA, P. T. S. Hydrological trade-offs due to different land covers and land uses in the Brazilian Cerrado. *Hydrology and Earth System Sciences*, Munich, v. 23, n. 3, p. 1263-1279, 2019. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1263-2019>.
- ANTÔNIO, P. I.; CARRILLO, A. D.; MILLAN, R. N.; FUZZO, D. F. S.; PANARELLI, E. A. Nascentes no cerrado do Triângulo Mineiro: características da paisagem e disponibilidade de água. In: MARQUES, R. F. P. V.; SANTOS, C. S. S.; RITA, F. S.; BARBOSA, R. A.; OLIVEIRA, A. S.; ALVES, G. S. (Org.). *Alterações Antrópicas & Meio Ambiente*. Campina Grande: EPTEC, 2023, p. 155-165.

BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, entre outras providências. Diário oficial da União de 09/01/1997, p. 470, col. 1.

BRASIL. **Resolução do CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002**. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente, Publicada no DOU n. 90, de 13/05/2002, Seção 1, pág. 68.

BRASIL. **Código Florestal**. Lei nº 12.651, de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Acompanhamento da estiagem na região sudeste do Brasil, relatório 2**. Belo Horizonte, 65p., 2014. Disponível em:

https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/22312/2/secaestiagem_sureg_sp_relatorio_002_2014.pdf. Acesso em: 1 out. 2024.

DURIGAN, G.; MUNHOZ, C. B.; ZAKIA, M. J. B.; OLIVEIRA, R. S.; PILON, N. A. L.; VALLE, R. S. T.; WALTER, B. M. T.; HONDA, E. A.; POTT, A. Cerrado wetlands: multiple ecosystems deserving legal protect a unic and irreplaceable treasure. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 20, p. 185-196, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2022.06.002>.

EZAKI, S.; GASTMANS, D.; IRITANI, M. A.; SANTOS, V.; STRADIOTO, M. R. Geochemical evolution, residence times and recharge conditions of the multilayered Tubarão aquifer system (State of São Paulo – Brazil) as indicated by hydrochemical, stable isotope and ¹⁴C data. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, London, v. 56, p. 495-512, 2020. <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1797714>.

FARIA, A. P. Transporte de sedimentos em canais fluviais de primeira ordem: respostas geomorfológicas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 2, p. 191-202, 2014. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i2.410>.

FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L. E. Os substratos geológicos e os coeficientes morfométricos em bacias hidrográficas do carste dolomítico no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 3, n. 3, p. 181-189, 2010. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v3i3.232662>.

HOFMANN, G. S.; SILVA, R. C.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; OLIVEIRA, L. F. B.; ALVES, R. J. V.; HASENACK, H.; SCHOSSLER, V.; AQUINO, F. E.; CARDOSO, M. F. Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. **Scientific Reports**, v. 13, 1123, 2023 <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38174-x>

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População Estimativa [2020]**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/frutal/panorama>. Acesso em: 3 maio 2024

KOSTIANOY, A. G.; SOLOVIEV, D.; PEŠIĆ, V. Application of Google Earth in Mapping Intermittent Rivers of Montenegro. In: PEŠIĆ, V., PAUNOVIĆ, M., KOSTIANOY, A. G. (eds). **The rivers of Montenegro**. The handbook of environmental chemistry. Switzerland: Springer Nature, 2020. p. 253-263. https://doi.org/10.1007/978-3-030-4488-2_14

LIMA, J. E. S.; ALMEIDA, C. S. C. **Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas**: relatório diagnóstico Sistema Aquífero Bauru–Caiuá no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2012. Disponível em <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22252>. Acesso em: 1 out. 2024.

LOPES, E. E.; NOGUEIRA, R. E. Proposta metodológica para validação de imagens de alta resolução do Google Earth para a produção de mapas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: INPE, 2011. P. 2308-2315. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.05.18.29/doc/p1538.pdf>. Acesso em: 28 maio 2024.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomias–Coleção 3.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. 2023. Disponível em: http://mapbiomas.org/pages/database/mapbiomas_collection. Acesso em: 1 jun. 2023.

MAPBIOMAS. **RAD2023**: Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2023 - São Paulo, Brasil - MapBiomias, 2024, 154 p. Disponível em: <http://alerta.mapbiomas.org>. Acesso em: 1 jun. 2024.

MARTINS, H. L.; PANARELLI, E. A.; BORGES, J. S.; MILLAN, R. N. Represamento de veredas e conhecimento sobre a estrutura física de reservatórios rasos para mitigar impacto ambiental urbano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 625-632, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210151>.

MOECK, C.; GRECH-CUMBO, N.; PODGORSKI, J.; BRETZLER, A.; GURDAK, J. J.; BERG, M.; SCHIRMER, M. A global-scale dataset of direct natural groundwater recharge rates: A review of variables, processes and relationships. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 717, p. 137042, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137042>

MORAES, R. F. Análise das mudanças do uso e da cobertura da terra em municípios com áreas de mineração na microrregião de Itabira, a partir de dados do MAPBIOMAS entre 1987 e 2017. **Revista Engenharia de Interesse Social**, v. 5, n. 6, p. 77-96. 2020.

PEREIRA, T. T. C.; ALMEIDA, I. C. C.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; PINHEIRO, L. S.; MATUK, F. A., Hydopedology of a High Tableland with Cerrado, Brazilian Central Plateau: the Frutal Catchment Case Study. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 42, e0160523, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160523>.

PINTO-PEREIRA, D. G. S.; PANARELLI, E. A.; PINHEIRO, L. S.; GONÇALVES, A. V. M.; PEREIRA, L. P. Environmental Protection Areas: the case of the Bebedouro Stream Watershed. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 105-124, 2017. <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC20150047R2V2012017>.

SANTOS, R. F. **Vulnerabilidade Ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: MMA, 2007. Disponível em: https://fld.com.br/wp-content/uploads/2019/07/Vulnerabilidade_Ambiental_Desastres_Naturais_ou_Fenomenos_Induzidos.pdf. Acesso em 1 out. 2024.

SHEKAR, P. R.; MATHEW, A. Morphometric analysis of watersheds: A comprehensive review of data sources, quality, and geospatial techniques. **Watershed Ecology and the Environment**, Beijing, v. 6, p. 13-25, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.12.001>.

SOARES, L. S.; LOPES, W. G. R.; CASTRO, A. C. L.; ARAUJO, G. M. C. Análise morfométrica e priorização de bacias hidrográficas como instrumento de planejamento ambiental integrado. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 31, p. 82-100, 2016. <https://doi.org/10.11606/rdg.v31i0.107715>

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

SUKRISTIYANTI, S.; MARIA, R.; LESTIANA, H. Watershed-based morphometric analysis: a review. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Bandung, v. 118, 012028, 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012028>

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. M. Impactos potenciais das alterações do Código Florestal nos recursos hídricos. **Biota Neotropica**, v. 10, n. 4, p. 67-76, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032010000400010>.

VILLELA, S. M., MATTOS, A. 1975. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mcgraw Hill, 1975.

R DEVELOPMENT CORE TEAM, **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2021. Disponível em: <http://www.r-project.org/index.html>. Acesso em: 1 out. 2024.

Recebido em: 20/07/2024

Aceito para publicação em: 21/10/2024