

Geoespacialização dos sistemas hidroambientais de nascentes na Bacia Hidrográfica do Mundaú, Pernambuco-Alagoas

Geospatialization of hydroenvironmental systems of springs in the Mundaú River Watershed, Pernambuco-Alagoas

Geovânia Ricardo dos Santos 

Doutora em Geografia
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
e-mail, geovania.grs@ufpe.br

Lucas Costa de Souza Cavalcanti 

Doutor em Geografia
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
e-mail, lucas.cavalcanti@ufpe.br

Resumo

A diversidade e complexidade do sistema-nascente e suas interações com a paisagem, tornam-no um dos ambientes mais ricos e significativos, do ponto de vista ambiental e social. O objetivo da pesquisa é efetuar identificação, levantamento e mapeamento dos sistemas hidroambientais de nascentes e sua interação com a paisagem na Bacia Hidrográfica do Mundaú, nos Estados de Pernambuco e Alagoas. Foram consideradas as nascentes com base critérios conceituais, que surgem de maneira natural, com ou sem alteração estrutural. As nascentes levantadas foram identificadas, mapeadas e registradas com GPS Garmin 64x. Para a identificação, cada nascente recebeu um código alfanumérico. Foram realizados levantamentos das condições ambientais das nascentes, mensuradas o comportamento hidrológico, pelo método direto volumétrico e aspectos da morfologia do relevo, aspecto de exfiltração e sazonalidade. O levantamento da pesquisa contabilizou 49 nascentes, distribuídas nas 6 sub-bacias do Mundaú; Os principais cenários identificados nos ambientes de nascentes incluem retirada da vegetação ripária, expansão da agricultura, uso de agrotóxicos provocando contaminação do solo e da água; Os maiores volumes de água destacaram-se no Alto e Médio curso; A vegetação é fundamental para a estabilidade e proteção dos solos e encostas, além da infiltração e recarga dos aquíferos. Foram encontradas nascentes no Médio curso e Satuba em péssimas condições ambientais.

Palavras-chave: Nascentes; Afloramento de água subterrânea; padrões de afloramento; Avaliação ambiental; Intervenção antrópica.



<https://doi.org/10.28998/contegeo.10i.24.19648>.

Artigo publicado sob a [Licença Creative Commons 4.0](#)

Submetido em: 09/05/2025

Aceito em: 10/09/2025

Publicado: 27/10/2025

e-Location: 19648

Abstract

The diversity and complexity of the spring system and its correlations with the landscape make it one of the richest and most important environments from both an environmental and social perspective. The objective of the research is to identify, survey, and map the hydro-environmental systems of springs and their interaction with the landscape in the Mundaú River Watershed, in the states of Pernambuco and Alagoas. The springs were considered based on conceptual criteria, which emerge naturally, with or without structural alteration. The surveyed springs were identified, mapped, and recorded with Garmin GPS 64x. For identification, each spring was assigned an alphanumeric code. Surveys of the environmental conditions of the springs were conducted, measuring the hydrological behavior using the direct volumetric method and aspects of the relief morphology, exfiltration aspect, and seasonality. The survey recorded 49 springs, distributed across the 6 sub-basins of Mundaú; The main scenarios identified in spring environments include the removal of riparian vegetation, agricultural expansion, and the use of pesticides causing soil and water contamination; The largest volumes of water were prominent in the Upper and Middle courses; Vegetation is essential for the stability and protection of soils and slopes, as well as for the infiltration and recharge of aquifers; Springs were found in the Médio course and Satuba in terrible environmental conditions.

Keywords: Springs; Groundwater outcrop; Outcrop water patterns; Environmental assessment; Anthropic intervention.

INTRODUÇÃO

As nascentes são sistemas ambientais onde ocorre o afloramento natural da água subterrânea de modo perene ou temporário, integrando-se à rede de drenagem superficial (CANTONATI *et al.*, 2020; FELIPPE, 2013). Ambientes de interfaces, as nascentes conectam água, matéria e energia (REISS, 2013) e são responsáveis pela formação inicial das redes de drenagem, essenciais na manutenção das bacias hidrográficas, da preservação dos ecossistemas terrestres e aquáticos e do fornecimento de água para as populações locais.

Os ambientes de nascentes estão integrados a diversos fatores da paisagem ao longo do percurso entre a recarga e descarga de água (TÓTH *et al.*, 2022). A geomorfologia, principal fator que regula o comprimento dos canais, a velocidade do movimento da água e dos sedimentos, além do armazenamento de água da precipitação no solo e nas rochas (WU *et al.*, 2019), este aspecto é um componente importante no estudo das nascentes, pois a forma como ocorre a exfiltração e a variável geomorfológica fornece indícios sobre a energia dos fluxos que as originam.

Em um único sistema-nascente, pode-se notar uma diversidade de características hidrogeomorfológicas e ecohidrogeológicas: aspectos tipológicos estabelecidos em função da heterogeneidade e dinâmica da paisagem. Como resultado, a diferenciação dos padrões estruturais das nascentes possibilita a aplicação de interpretações e a compreensão dos principais processos que as governam no ambiente.

Para entender as relações funcionais, estruturais e os processos em diferentes escalas das nascentes, é preciso um conceito espacial que reconheça sua abordagem integrada e multiescalar (REISS, 2013). A classificação das nascentes utilizando a hidrogeomorfologia tem demonstrado ser abrangente e eficiente, enquanto as abordagens hidrogeológicas se restringem à descrição dos aquíferos, concentrando-se principalmente no “ponto” de surgência da água subterrânea. Em contrapartida, as descrições geomorfológicas e hidroecológicas possibilitam uma caracterização e interpretação abrangentes das nascentes (STEVENSON *et al.*, 2021).

Diante das reflexões conceituais, surge uma necessidade fundamental: identificar e mapear as nascentes que surgem naturalmente no ambiente, considerando que muitas intervenções antrópicas tem causado mudanças na morfogênese e nos processos das nascentes. É provável que muitas nascentes tenham perdido sua capacidade de retenção e exfiltração de água ou até mesmo esgotado, em razão das alterações provocadas pelo uso e cobertura da terra. A questão que norteia esta pesquisa é entender em que contexto se insere os sistemas-nascentes avaliadas nas diferentes particularidades da bacia do Mundaú.

A abordagem em escala de bacia é apropriada para explicar os processos de fluxo das águas subterrâneas que acontecem em ordem local e regional (TÓTH *et al.*, 2022). Além de preencher uma lacuna no entendimento da relação entre nascentes e a paisagem, o contexto ambiental da bacia hidrográfica e o mapeamento em larga escala, o objetivo deste trabalho busca então realizar identificação, levantamento e mapeamento dos sistemas hidroambientais de nascentes e sua interação com a paisagem na Bacia Hidrográfica do Mundaú, nos Estados de Pernambuco e Alagoas.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Localização geográfica da área de estudo

As nascentes pesquisadas encontram-se inseridas em diferentes contextos da paisagem e são contribuintes de diversos rios da bacia do Mundaú. A bacia localiza-se nos estados de Pernambuco e Alagoas, Nordeste Brasileiro (Figura 1).

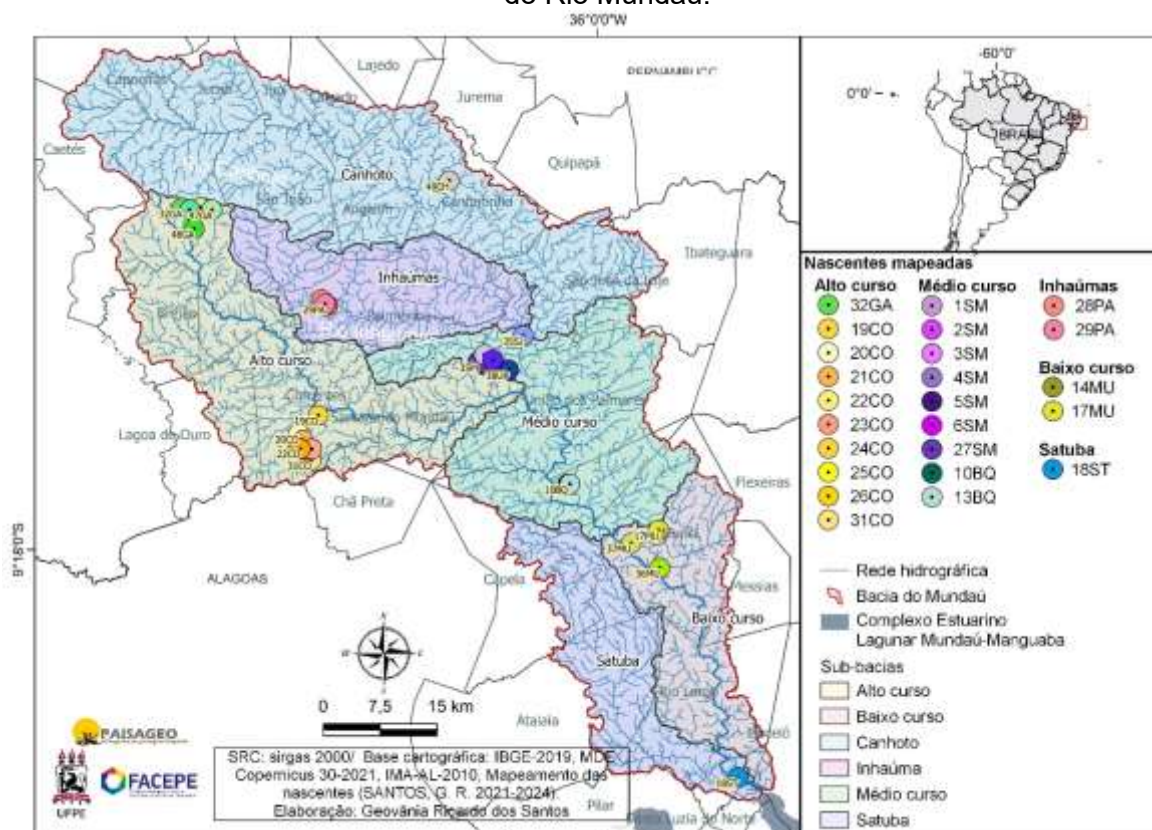
As nascentes iniciais do Rio Mundaú, têm início no município de Garanhuns-PE e desaguam no Estado de Alagoas, no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM). Um dos sistemas estuarinos mais relevantes do país, que vem passado por um acelerado processo de degradação ambiental.

Da totalidade da bacia, área que corresponde a 4.457,87 km² e perímetro de 382,68 km, está localizada 54,90% (2.447,50 km²) em Pernambuco e 45,10% (2.010,37 km²) em Alagoas (MELO e MONTEIRO, 2022). A bacia divide-se em 6 sub-bacias: Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.

A bacia do Mundaú detém um padrão de drenagem dendrítico, paralela e treliça, com canais que variam de 1^a a 7^a ordem (GOMES *et al.*, 2016). Em relação ao clima da região da bacia, segundo a classificação de Köppen (KÖPPEN e GEIGER, 1928) está sob o Tropical Chuvoso com Verão Seco (As'), em quase sua totalidade, Verão Seco e Temperado (Csa) e Verão Seco e Quente (Csb). A distribuição das médias históricas de precipitação, para o período de 1981-2022, varia de 57,92 a 172,33 mm/mensais (WORLD CLIM, 2024).

O contexto geológico da bacia Hidrográfica remonta do período Pré-Cambriano na porção norte da bacia. Enquanto no Médio e Baixo curso da bacia, porção contida em Alagoas, além de ser composta pela continuidade do Pré-cambriano pernambucano, a bacia apresenta uma faixa úmida costeira, pertencente ao Grupo Barreiras, constituída como tabuleiros costeiros ou encostas dos tabuleiros, detendo diferentes camadas arenosas e argilosas. Por fim, a formação geológica do Holoceno, formação está mais recente (CORRÊA *et al.*, 2010; JACOMINE *et al.*, 1975).

Figura 1- Localização das nascentes estudadas e hipsometria (m) na Bacia hidrográfica do Rio Mundaú.



Fonte: Autoria própria (2025).

Levantamento, identificação e mapeamento de campo das nascentes na bacia

As nascentes foram selecionadas com base em critérios conceituais definidos por Felipe e Magalhães Júnior (2013), Felipe (2013), Felipe (2009), em que: a) nascente surgem de maneira natural; b) a exfiltração da água subterrânea ocorre de forma perene ou temporária; c) a formação de um canal de drenagem à jusante. Assim, ao longo dos anos de 2021 a 2024, as nascentes foram catalogadas.

Com base em nascentes já conhecidas em propriedades rurais no município de Santana do Mundaú (Médio curso), as demais nascentes foram mapeadas ao longo das campanhas de campo de pesquisa para haver cobertura de dados nas sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú.

Como mencionado anteriormente, a pesquisa considerou os aspectos conceituais das nascentes naturais, bem como, incluídas as nascentes

antropogênicas, que passaram por algum tipo de modificação estrutural, de acordo com os conceitos apresentados por Felipe (2013; 2009).

As nascentes levantadas foram identificadas, mapeadas e registradas em fotografias. Para a identificação, cada nascente recebeu um código alfanumérico. As letras foram atribuídas ao município de localização geográfica para facilitar a catalogação e a discussão dos resultados. As coordenadas geográficas de cada nascente foram registradas utilizando o GPS Garmin 64x, em sistema de coordenadas planas. As coordenadas de cada nascente foram organizadas numa planilha no formato “.csv” e importadas para o software de SIG Qgis 3.16.2 <https://www.qgis.org/pt_BR> para conversão em arquivo *Shapefile* e utilizadas na base cartográfica.

Análise dos padrões de configuração de nascentes

A integração dos processos, a configuração e a dinâmica da paisagem, conforme discutido por autores como Rodriguez *et al.* (2022), Tricard (1976) e Berthand (2004), envolve entender a paisagem de modo geossistêmico, a partir de um sistema complexo e em constante transformação, no qual as interações entre os elementos naturais e antrópicos determinam sua configuração e funcionamento.

Com base nesta assertiva, os padrões gerais das nascentes identificadas na pesquisa foram os seguintes: 1) Característica da paisagem e da nascente. Isso envolveu a compreensão dos ambientes Eucrenal (ambiente de transição aquático-terrestre da nascente) e Hypocrenal (canal de 1ª ordem formado pela nascente) (REISS, 2013); 2) Morfologia do relevo, na qual a água de nascente exfiltra; 3) volume de vazão, para isso, foi preciso realizar mensuração de algumas vazões de nascentes, utilizando-se o método direto volumétrico (TUCCI e SILVEIRA, 2009), $Q = (v/t) \sum Q/n$, onde: Q - a vazão média; v - o volume do testemunho (em metros cúbicos); t - o tempo (em segundos) e n - o número de repetições das medidas; 4) Determinação do aspecto de exfiltração, como a nascente aflora no solo/rocha; 5) Sazonalidade, padrão de repetição ou não do fluxo hidrológico.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O mapeamento desta pesquisa revelou 49 nascentes distribuídas na bacia do Mundaú (Figura 2 e Gráfico 1). São nascentes que se encontram em cenários completamente modificados pelas mudanças do uso e cobertura da terra, sobretudo, mudanças na configuração do sistema nascente, como modificações para reservatórios de contenção. Alguns destes empregam técnicas de solo-cimento, que incorporam material plástico na composição, o que representa um risco significativo de contaminação da água por nano/microplásticos.

Essa prática gera problemas, como a descaracterização da exfiltração das nascentes e limitações na proteção, já que a legislação ambiental, Lei nº 12.651/2012, 4.653/2023 e 2.777/2023, exigem uma proteção mais abrangente. Além disso, há risco de contaminação química devido ao plástico e ao cimento usados na cobertura. Estudos científicos, como o de Amato-Lourenço *et al.* (2021) indicam que micropartículas de plásticos poluem todo o planeta – ar, água e solo. O estudo encontrou nanopartículas com diâmetros inferiores a 5 µm acumuladas em mais de 50% de pulmões analisados, representando risco potencial à saúde humana. Outro estudo, de Oliveira *et al.* (2025) encontrou presença e acúmulo de microplásticos em estruturas ligadas a fetos e placentas de gestantes.

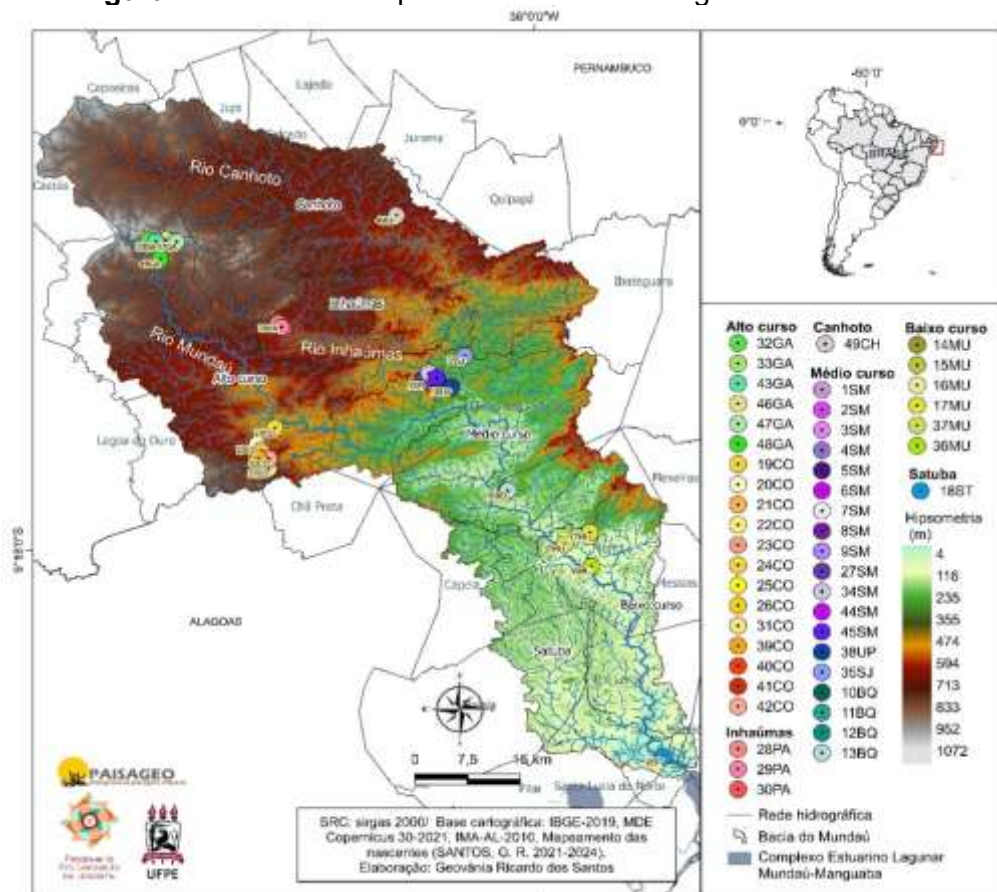
O processo de recuperação e conservação de nascentes envolve medidas de proteção do solo e reflorestamento da vegetação, permitindo que haja incremento da recarga dos aquíferos, o que não foi observado no padrão da paisagem das nascentes pesquisadas. Os principais cenários observados nos ambientes de nascentes são o desmatamento da vegetação ripária nativa, assim como, expansão da agricultura, indicativos de contaminação química e microbiológica do solo e das águas por agrotóxicos e ocupação urbana.

Considerando o contexto hidrogeológico da bacia, entende-se que a distribuição das nascentes é amplamente influenciada pelo volume e extensão da recarga de águas subterrâneas, além do relevo, permeabilidade, estrutura e falhas geológicas (CARTWRIGHT e JOHNSON, 2018). Algumas características podem ser extraídas e comparadas com as variações morfoestruturais da bacia do mundaú, destacam-se maiores elevações localizadas nas sub-bacias do Alto curso, Inhaúmas,

Canhoto e uma pequena porção ao Norte do Médio curso, cuja localizações estão situadas na Cimeira Estrutural Pernambuco-Alagoas.

No setor central do Médio curso, unidades de depressão modeladas por processos morfogenéticos, ao passo que, os Depósitos sedimentares do Quaternário estão presentes nas sub-bacias do Baixo curso e Satuba (Quadro 1 e Figura 2). Essas variações corroboram com as propriedades de retenção, fluxo e permeabilidade hidrológica das características dos aquíferos da região. Na bacia do Mundaú, os aquíferos são de origens fissural, ou seja, a água é armazenada entre rochas duras fraturadas, isso significa que a depender das características hidrodinâmicas no subsolo, da intensidade e abertura de fraturas, há um bom volume de água (APAC, 1998).

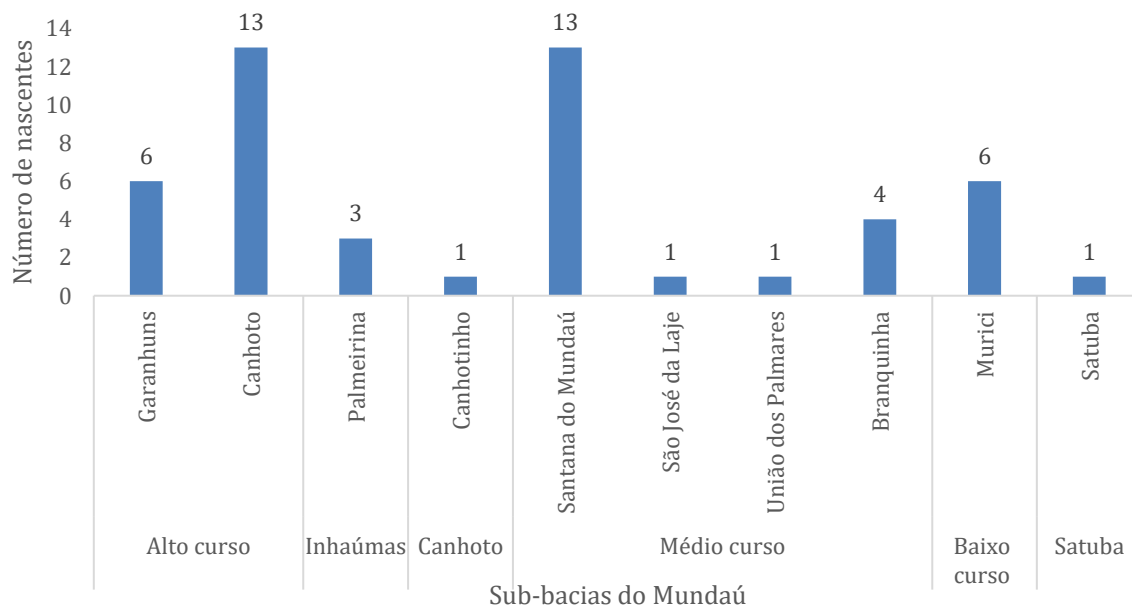
Figura 2- Nascentes mapeadas na Bacia Hidrográfica do Mundaú.



De forma distribuída os sistemas de nascentes presentes nas sub-bacias foram contabilizados: no Alto curso (19 nascentes), nos municípios de Garanhuns e Correntes; no Médio curso (19 nascentes), nos municípios de Santana do Mundaú,

São José da Laje, União dos Palmares e Branquinha; no Baixo curso (6 nascentes), em Murici; no Inhaúmas (3 nascentes), em Palmeirina; no Canhoto (1 nascente), em Canhotinho e no Satuba (1 nascente), município de Satuba (Figura 2 e Gráfico 1).

Gráfico 1- Número de nascentes levantadas nas respectivas sub-bacias e municípios da Bacia do Mundaú.



Fonte: Autoria própria (2025).

A partir das observações de campo, nota-se que os ambientes dos sistemas de nascentes, em Garanhuns (Alto curso), a transição entre encostas íngremes e os terraços fluviais, intensificam a energia de transporte de sedimentos, evidentemente visualizados nas cicatrizes erosivas reativadas pelo incremento do fluxo superficial concentrado de chuva e efluentes (AZAMBUJA e CORRÊA, 2015). As nascentes de grande volume, em média de vazão de 5,50 L/s (SANTOS et al., no prelo) estão relacionadas à constituição litológica, denominada Quartzito felspático, que desempenha um fator importante no aquífero (APAC, 1998), bem como e a morfogênese regional da Borborema (GOMES et al., 2016).

Por outro lado, os sistemas de nascentes localizadas em Correntes e no Médio curso, em particular Santana do Mundaú, São José da Laje e União dos Palmares, se inserem em respostas de descarga distintas, pela característica da variação das formas de relevo, que inclui relevo ondulado e forte ondulado. Uma parcela das nascentes encontradas no Médio curso exfiltram em fraturamento de rochas.

Considerando o relevo como fator determinante na ocorrência e dinâmica das nascentes (SILVA *et al.*, 2024), o trecho do Médio curso, que se estende de União dos palmares até Murici, detém uma menor declividade, em torno de $<1,72 - 11,31^\circ$, caracterizando-se como uma área de deposição dos sedimentos trazidos do Alto curso (GOMES *et al.*, 2016). Sendo assim, as nascentes localizadas em Branquinha, Murici e Satuba estão ligadas a relevos com altitudes mais baixas da bacia do mundaú (4 - 235 m), alternando-se entre relevos ondulado e suaves ondulosos e planos, representados pelos Tabuleiros Costeiros, Planícies e Terraços Fluviais.

De modo geral, as nascentes com descarga perene ao longo do ano (Tabela 1), como as encontradas no Alto e Médio curso, são comumente associadas a unidades geológicas extensas e de alta permeabilidade primária ou com estrutura litológica de rochas metamorizadas, ao exemplo das nascentes encontradas, onde sua gênese está associada à falhas geológicas que interligam o subterrâneo ao superficial (VALENTE e GOMES, 2005).

Tabela 1- Sazonalidade das nascentes pesquisadas na bacia.

Perene	Intermitente	Sazonal
46	2	1

Fonte: Autoria própria (2025), dados de pesquisa (2021-2023).

Sínteses e padrões de configurações de nascentes

Com base em características específicas observadas no número amostral de nascentes levantadas na bacia, reúnem-se uma síntese dos padrões predominantes na configuração das nascentes, portanto, destacam-se algumas para discussão.

As nascentes 32GA e 33GA (Figura 2A e C), notavelmente volumosas, exibiram características particulares. Ao ser realizada medição de vazão, a nascente 32GA apresentou uma média de vazão de 5,50 L/s, um valor significativamente maior em comparação as vazões das demais sub-bacias. Já a nascente 33GA era igualmente volumosa, com formação de diversos canais de 1ª ordem, mas não pode ser mensurada no local, por não haver captação para medição. A alta vazão nessas áreas sublinha a influência da estrutura geológico-geomorfológica na dinâmica hidrológica da água, isso porque, a estrutura morfológica de exfiltração, caracterizada por Duto e Olho, é uma característica predominante em nestas nascentes, posteriormente, com exfiltrações múltiplas (dois Dutos e dois Olhos). Esta estrutura de exfiltração, segundo

Felippe (2013) confere as nascentes originadas nesse contexto maiores vazões, em detrimento das nascentes que exfiltram apenas por fraturas de rochas. Entre medições realizadas nos trabalhos de campo, o autor encontrou vazão com 1,84 L/s e 1,34 L/s. Na configuração em Duto e Olho há uma forte relação entre a energia dos fluxos e a convexidade das encostas que as antecedem, uma vez que os dutos são feições exclusivamente erosivas (FELIPPE, 2009).

Contudo, esses fatores também são controlados e influenciados pela estrutura geológica local. Ao se analisar a litologia, observa-se que os aquíferos dessa região são de origem fissural e compostos por rochas quartzíticas, o que resulta em uma particularidade: a concentração do fluxo subterrâneo, com grande intensidade no volume de água, e a ocorrência de diversas nascentes em um mesmo ambiente (CPRM, 2021; APAC, 1998).

Os aquíferos fissurais, com poros pequenos e desconectados, forçam a água a se deslocar pelas descontinuidades físicas da rocha, onde ganha maior energia (FELIPPE, 2009). Esse fenômeno, que resulta em uma concentração de energia, foi verificado na nascente 33GA (Figura 2C), onde o fluxo de água é intenso (Figura 2D), criando diversos canais de 1ª ordem. A acentuação do declive nas encostas, que varia entre 21-45% nas encostas, também é crucial para a dinâmica das nascentes, principalmente nas épocas chuvosas (junho a agosto), quando esse relevo inclinado intensifica o transporte de material erosivo (Figura 2B). Como as nascentes se localizam na ruptura de relevo, os fluxos escoam rapidamente para as áreas mais baixas, transportando grandes quantidades de sedimentos e, conseqüentemente, gerando erosão excessiva (Figura 2B).

Figura 2- Ambiente de afloramento da nascente 32GA (A), carreamento dos sedimentos na nascente 32GA, no período chuvoso (B), exfiltração da nascente 33GA (C) e deflúvio dos canais de 1ª ordem (D).



Fonte: Autoria própria (2021-2023).

Quase todos os ambientes de exfiltração das nascentes estão amplamente modificados por diversas atividades relacionadas ao uso e cobertura da terra. Embora estejam associados a um sistema aquífero subterrâneo, as condições superficiais desempenham um papel crucial na dinâmica da nascente. Em particular, o fluxo de água da nascente 31CO ocorre em condições atípicas para uma área de preservação permanente. A alteração dos ambientes naturais é uma realidade subjacente e, assim como a nascente 31CO (Figura 3A), muitas nascentes perderam sua vegetação nativa devido à expansão da agricultura (Figura 3B).

A nascente 31CO apresenta uma alta vazão média de 1,00 L/s (Santos et al., no prelo), um volume significativo de água que se deve à sua morfologia em duto, facilitando o fluxo hídrico, apesar da substituição da vegetação nativa por pastagem. A infiltração pontual da água está relacionada a um fluxo de alta energia, como já mencionado. A quantidade de água que infiltra no solo, proveniente da precipitação pluvial pode variar na superfície, devido a vegetação, uso do solo e compactação (KAMPF *et al.*, 2013). Essa variabilidade espacial favorece uma maior disponibilidade de água em determinadas áreas. Diante dessas variações, o ambiente pode apresentar diversas respostas. De acordo Marston (2010) uma possibilidade é que o ambiente se ajuste a um novo equilíbrio dinâmico, outra é que ambiente seja resiliente, ou ainda, o ambiente perturbado pode passar por uma resposta inicial à perturbação, seguida de um período de recuperação.

Figura 3- Estrutura de concreto em torno do afloramento da nascente 31CO (A), acúmulo de água advinda da nascente 31CO, formado a partir de intervenção humana (B).



Fonte: Autoria própria (2021-2023).

A cavidade erosiva da declividade anterior à nascente (Figura 4A), apresenta uma alta propensão à erosão, o que demonstra sua fragilidade. Isso também se deve à sua posição geomorfológica, situada em uma base de encosta, aos processos de encosta envolvidos e às ações humanas. Os solos possuem uma textura de aparência arenosa-argilosa, sendo transportada pela exfiltração, deflúvio das águas da nascente e da encosta. Além disso, os processos erosivos são intensificados pela configuração do relevo em vale fluvial (Figura 4B). Gomes *et al.* (2016) discutem o impacto do aumento da declividade, indicando que uma energia de transporte mais intensa leva maiores erosões locais, por outro lado, em declividades mais suaves, a energia de transporte de sedimentos é reduzida, resultando em maior deposição, influenciando diretamente a morfogênese local.

Parte das nascentes está situada em áreas de talvegue, que intensifica ainda mais ainda a erosão. Isso acontece porque a erosão linear provoca uma incisão vertical no solo até que o nível freático atinja a superfície. Assim, essas nascentes apresentam uma morfologia relacionada a mantos de intemperismo superficial e, em certas situações, até mesmo a afloramentos rochosos (FELIPPE, 2013).

Figura 4- Formação de cavidade erosiva na nascente 1SM (A), fundo de vale e encostas de declividade acentuada no ambiente de nascente (B).



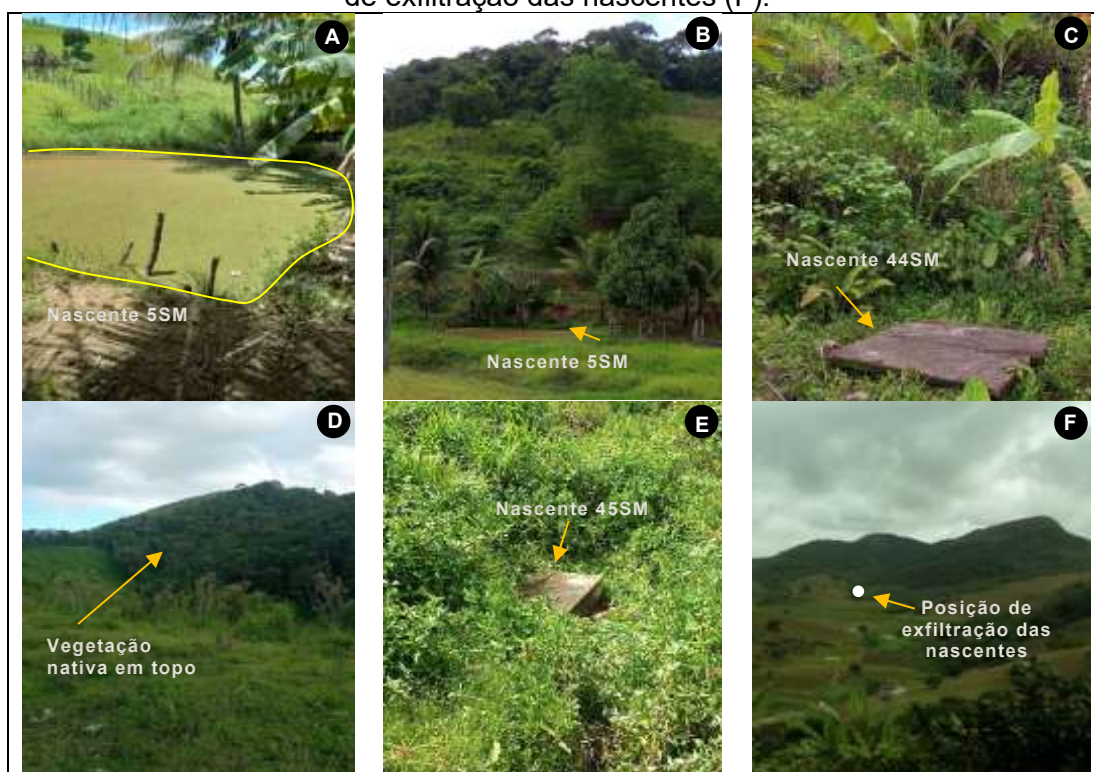
Fonte: Autoria própria (2021-2023).

A vegetação ripária nativa é completamente ausente, com apenas alguns fragmentos preservados nos topos dos morros. Especificamente, essas nascentes (Figura 5A a 5F) estão localizadas em áreas que precedem encostas rochosas com

rupturas de declives, entre curvaturas côncavas e convexas, onde o solo foi amplamente alterado ao longo do perfil de encosta, apresentando afloramentos rochosos e a presença irregular de matações e blocos rochosos. Ao longo da encosta do morro a recarga hidráulica ocorre nas áreas acima, infiltrando entre blocos rochosos e aporte de solo. As nascentes exfiltram nas áreas de sopé da encosta.

A vegetação preservada no topo do morro contribui para uma maior infiltração e proteção da água no solo, fornecendo rugosidade ao fluxo hidráulico, estabilizando a encosta por meio das raízes, oferecendo resistência ao cisalhamento para prevenir resistir a erosão por fluxo superficial e protegendo contra a erosão causada pelas chuvas (MARSTON, 2010). Estas especificações evidenciam a interdependência entre vegetação e encosta. A vegetação é um fator determinante para a estabilidade do solo em encostas íngremes, reduzindo o escoamento superficial e favorecendo a infiltração de água (KAMPF *et al.*, 2013).

Figura 5- Nascente 5SM localizada na base da vertente (A) fragmento de vegetação nativa em topo do morro (B), nascente 44SM (C), fragmento de vegetação em relevo íngreme (D), nascente 45SM (E) e panorama do ambiente de exfiltração das nascentes (F).



Fonte: Autoria própria (2021-2023).

A água que chega a uma rede de canais flui através do subsolo, percorrendo materiais e espaços vazios que podem ser preenchidos com água, criando caminhos para o fluxo superficial (KAMPF *et al.*, 2013). O ambiente de exfiltração da nascente 6SM (Figura 6A) se distingue por sua ocorrência em um contexto único em relação às outras nascentes: um patamar de encosta com afloramento rochoso, lajedo e raízes de árvores (Figura 6B).

Esta configuração ambiental confere à nascente uma interdependência com esses fatores. A relação geológico-geomorfológica, os picos de precipitação e as raízes das plantas são elementos interdependentes e cruciais nos sistemas de nascentes (CANTONATI *et al.*, 2020). Estudos a respeito da redistribuição hidráulica das raízes das plantas têm mencionado a influência na redistribuição do movimento de água no solo, Yang *et al.* (2022) relatam que embora a quantidade de água transportada pela redistribuição hidráulica por algumas espécies sejam baixas em comparação com a precipitação, ela é reconhecida como um fator importante na elevação de água das camadas profundas para as mais rasas do solo.

Figura 6- Ambiente de exfiltração da nascente 6SM (A), talus em encosta, anterior a nascente 6SM (B) e presença de raízes em locais de umidade.



Fonte: Autoria própria (2021-2023).

Particularidades de depósitos de material detrítico (talus rochoso), a montante, ditam o armazenamento de água no ambiente da nascente 6SM. Este quesito é observado em campo e comprovado pelas assertivas testadas por Felipe (2013; 2009), onde a encosta altamente íngreme, ocorre um campo de blocos rochosos, grandes pedregulhos empilhados e fraturamento rochoso do qual há diversos pontos

de descarga de água associada as raízes de árvores frutíferas e plantas herbáceas de pequeno porte. A drenagem do pequeno canal de 1ª ordem flui pela vertente da encosta para áreas de vale. Nos períodos de estiagem, observou-se redução do fluxo de descarga de água do sistema de nascente. Ainda segundo Kampf et al. (2013) onde o fluxo que exfiltra na superfície terrestre, antes ocorreu através de blocos rochosos, a estrutura e a litologia dos blocos rochosos são controles importantes sobre a localização da exfiltração, sendo assim, as localizações das nascentes estão vinculadas a estes contatos estratigráficos.

As nascentes 17MU e 37SJ, a exfiltração de água ocorre através das fraturas das rochas em um lajedo exposto (Figura 7A e 7C), em dois cenários distintos. A nascente 17MU, em particular, apresenta uma configuração de ruptura de declive (Figura 7B), destacando-se das demais nascentes. Seu ambiente de ocorrência assemelha-se a uma cavidade topográfica situada em uma área de transição entre a agricultura e a vegetação nativa. Parte do deflúvio posterior é direcionada para o vale da encosta, ao passo que outra parte é captado para irrigação de plantações.

A perenidade do fluxo de água ao longo do ano, em tais condições hidrogeomorfológicas de exfiltração permite avaliar a capacidade da permeabilidade do leito rochoso e da zona de recarga, atribuindo à nascente um status de importância (CARTWRIGHT *et al.*, 2020). Nascente que exfiltram de um aquífero rochoso podem percorrer uma ou mais unidades (por exemplo, aluvião) antes descarregarem para a superfície (SPRINGER *et al.*, 2008).

No caso da nascente 35SJ (Figura 7C e 7D), ela se encontra em um ambiente altamente modificado, com intensas intervenções humanas, como grandes plantações de cana-de-açúcar e ocupação urbanas. Esse cenário remonta aos períodos de expansão da cana-de-açúcar nas regiões interioranas do Nordeste Brasileiro.

A influência humana tem causado alterações preocupantes nos sistemas de águas doces. As características estruturais das nascentes, o estado da água e a conservação desses ambientes já estão comprometidas em todas as áreas. Métodos baseados na observação do ambiente têm possibilitado inferir avaliações integradas acerca dos corpos hídricos. Um exemplo eficaz para a avaliação da qualidade da água é o Protocolo de Avaliação Rápida (PAR), no Brasil difundido por Callisto et al. (2002), criado pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (BARBOUR et al., 1999).

Figura 7- Nascente 17MU (A) e 37SJ (C) exfiltrando em lajedos rochosos, relevo íngreme com topo coberto por vegetação nativa e demais encostas com agricultura (B) e extensão do lajedado rochoso na vertente de encosta, atrelado a nascente 37SJ (D).



Fonte: Autoria própria (2021-2023).

Dentre as nascentes avaliadas, destacam-se as nascentes 10BQ, 13BQ (Figura 8A a 8D) a e 18ST (Figura 8E e 8F) onde alguns critérios organolépticos (aspecto/transparência e odor da água) sinalizam indicativos de alterações pela atividade antrópica, sugerindo que a água se encontra inapropriada ao consumo humano. Outro critério observado nas campanhas de campo, remete ao consumo da água das nascentes pela comunidade em áreas rurais. As nascentes são os principais meios de acesso à água, portanto, a garantia da potabilidade da água é um desafio e necessita de uma abordagem ambiental amplas e complexas.

Foram registrados próximos as nascentes, uso de agrotóxicos, construção de residências e excesso de nutrientes em nascentes represadas. Problemas estes preocupantes que afetam o equilíbrio das nascentes e, conseqüentemente, grave a saúde pública, pela veiculação hídrica de doenças. A recuperação da singularidade das nascentes e a compensação dos impactos, segundo Amor et al. (2012) nunca serão plenamente alcançadas enquanto esses ambientes continuarem sendo afetados.

Figura 8- Nascente 10BQ (A), ocupações próximas ao ambiente de exfiltração das nascentes (B), nascente 13BQ em processo de eutrofização (C), plantações na APP da nascente (D), nascente 18ST (E), aparatos urbanos próximo a nascente (F).



Fonte: Autoria própria (2021-2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da pesquisa contabilizou 49 nascentes, distribuídas nas sub-bacias da bacia do Mundaú, sendo computadas 19 nascentes no Alto curso, 3 no Inhaúmas, 1 no Canhoto, 19 no Médio curso, 6 no Baixo curso e 1 no Satuba. Os principais cenários observados nos ambientes de nascentes são o desmatamento da vegetação ripária nativa, assim como, expansão da agricultura, indicativos de contaminação química e microbiológica do solo e das águas por agrotóxicos e ocupação urbana;

A partir das observações de campo, nota-se que os padrões estruturais das nascentes estão relacionados a configuração do relevo, da vegetação e da constituição litológica disposta no solo;

A dinâmica hidrogeológica das nascentes nas sub-bacias do Mundaú, Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas e Canhoto estão relacionadas a aquíferos fissurais e fraturas, resultando em concentração de fluxo subterrâneos variados e na maioria perene. No Alto curso, particularmente, nas nascentes 32GA e 33GA, em Garanhuns, as intensidades no volume de água deve-se à constituição litológica do quartzito

felspático, que desempenha excelente reservatório subterrâneo, além da configuração estrutural de exfiltração em Duto e Olho;

Apesar das intervenções antrópicas, como a substituição da vegetação nativa por pastagem, a nascente 31CO, no Alto curso, apresenta um volume significativo de água que se deve à sua morfologia em duto, facilitando o fluxo hídrico;

A vegetação nativa nos ambientes de nascente é um fator importante, na proteção e conservação do solo, das encostas, pois as raízes ajudam na estabilidade, promovendo a infiltração e recarga da água nos aquíferos;

As características estruturais das nascentes, o estado da água e a conservação desses ambientes já estão alteradas em todos os ambientes. A condição organoléptica da água nas nascentes 10BQ, 13BQ (Médio curso) e 18ST (Satuba) indicam sugerindo que a água se encontra inapropriada ao consumo humano, sendo que a água das nascentes são os principais meios de abastecimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE, pelos incentivos através da concessão da bolsa de doutorado da primeira autora; processo IBPG-1045-7.06/21.

REFERÊNCIAS

AMOR, Adam H.; ZDON, Andy; FRAGA, Naomi S.; COHEN, Brian; MEJIA, Maura Palacios; MAXWELL, Rachel; PARKER, Sophie S. Statistical evaluation of the similarity of characteristics in springs of the California Desert, United States. **Front. Environ. Sci.**, Exeter, v. 10, n. 24, p. 1-10, out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1020243>

AMATO-LOURENÇO, Luís Fernando; CARVALHO-OLIVEIRA, Regiani; RIBEIRO JÚNIOR, Gabriel; GALVÃO, Luciana dos Santos; ANDO, Rômulo Augusto; MAUAD, Thais. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. **Journal of Hazardous Materials**, Missouri, v. 416, n. 15, p. 126124, aug, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

AZAMBUJA, Renata Nunes; CORRÊA, Antônio Carlos de Barros. Geomorfologia e áreas de expansão urbana do município de Garanhuns-PE: uma abordagem espaço-temporal dos eventos morfodinâmicos para o planejamento territorial. **Revista Geo**

UERJ, Rio de Janeiro, v. 2, n. 27, p. 202-233. jul./dez. 2015. DOI: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2015.16739>

APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco**: Recursos hídricos subterrâneos. APAC: Pernambuco, 269 p, 1998.

BERTHAND, Georges. Paisagem e geografia física global. esboço metodológico. **Revista Ra'e Ga**, Curitiba, v. 8, n. 1, p. 141-152, 2004. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v8i0.3389>

BARBOUR, Michael T.; GERRITSEN, Jeroen; SNYDER, Blaine D.; STRIBLING, James B. **Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers**: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish. 2. ed. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 1999. 337 p. Acesso: <https://www3.epa.gov/region1/npdes/merrimackstation/pdfs/ar/AR-1164.pdf>

CALLISTO, Marcos; FERREIRA, Wander Ribeiro; MORENO Pablo; GOULART, Michael; PETRUCIO M. Aplicação de um protocolo de avaliação rápida da diversidade de habitats em atividade de ensino e pesquisa (MG-RJ). **Acta Limnologica Brasiliensia**, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 91-98, jan. 2002. Acesso: <https://jbb.ibict.br/handle/1/708>

CANTONATI, Marco; STEVENS, Lawrence E.; SEGADELLI, Stefano; SPRINGER, Abraham E.; GOLDSCHIEDER, Nico; CELICO, Fulvio; FILIPPINI, Maria; OGATA, Kei; GARGINI, Alessandro. Ecohydrogeology: the interdisciplinary convergence needed to improve the study and stewardship of springs and other groundwater-dependent habitats, biota, and ecosystems. **Ecological Indicators**, Lecce, v. 110, n. 3, p. 1-15, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105803>

CARTWRIGHT, Jennifer M.; DWIRE, Kathleen A.; FREED, Zach; HAMMER, Samantha J.; MCLAUGHLIN, Blair; MISZTAL, Louise W.; SCHENK, Edward R.; SPENCE, John R.; SPRINGER, Abraham E.; STEVENS, Lawrence E. Oases of the future? Springs as potencial hydrologic refugia in drying climates. **Climate-Change refugia**, Washington, v. 18, n. 5, p. 245-253, jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/fee.2191>

CARTWRIGHT, Jennifer. M.; JOHNSON, Henry M. Spring as hydrologic refugia in a changing climate? A remote-sensing approach. **Ecosphere**, Washington, v. 9, n. 3, p. 1-22, mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.2155>

CORRÊA, Antônio Carlos de Barros; TAVARES, Bruno Azevêdo Cavalcanti; MONTEIRO, Kleython de Araújo; CAVALCANTI, Lucas Costa de Souza; LIRA, Daniel Rodrigues. Megageomorfologia e morfoestrutura do Planalto da Borborema. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 31, n. 1-2, p. 35-52, jan/dez. 2010. DOI: <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20100003>

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa geológico da província da Borborema**. Brasília: CPRM, 2021. 1 mapa. Escala 1:1000.000.

FELIPPE, Miguel Fernandes; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. **O estudo hidrogeomorfológico de nascentes**. In.: MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Hidrogeomorfologia: formas, processos e registros sedimentares fluviais. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil LTDA, 2020. p. 123-140.

FELIPPE, Miguel Fernandes. **Gênese e dinâmica de nascentes: contribuições a partir da investigação hidrogeomorfológica em região tropical**. 2013, 254 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

FELIPPE, Miguel Fernandes. **Caracterização e tipologia de nascentes em unidades de conservação de Belo Horizonte - MG com base em variáveis geomorfológicas, hidrológica e ambientais**. 2009. 275 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

GOMES, Daniel Dantas Moreira; LIMA, Djenane Regina Maia de; VERÍSSIMO, César Ulisses Vieira; DUARTE, Cynthia Romariz. Mapeamento e caracterização dos sistemas ambientais da bacia hidrográfica do Rio Mundaú – PE/AL. **Caderno de geografia**, Belo Horizonte, v. 26, n. 2, p. 272-299, dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26nesp2p272>

JACOMINE, Paulo Klinger; CAVALCANTI, Antonio Cabral; PESSÔA, Sérgio Costa Pinto; SILVEIRA, Clotário Olivier da. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Alagoas**. 1. ed. Recife: EMBRAPA, 1975, 532 p.

KAMPF, Stephanie; MIRUS, Ben B. **Subsurface and Surface Flow Leading to Channel Initiation**. In: SHRODER, J.; WOHL, E. Tratado sobre Geomorfologia. San Diego: Academic Press, 2013. p. 22-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00228-1>

KÖPPEN, Wladimir; GEIGER, Rudolf. **Klimate der Erde**. 1.ed. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. 379 p.

MARSTON, Richard A. Geomorphology and vegetation on hillslopes: interactions, dependencies, and feedback loops. **Geomorphology**, Selbustrand, v. 116, n. 3, p. 206-217, apr. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.028>

MELO, Jonas Herisson Santos de; MONTEIRO, Kleython de Araújo. Relação entre os controles estruturais e a rede de drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 13, n. 41, p.152-166, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21170/geonorte.2022.V.13.N.41.152.166>

OLIVEIRA, Camila Wanderley L.; OLIVEIRA, Lais, F. A. M.; GARCIA, J.; WEINGRILL, Rodrigo, B.; URSCHITZ, Johann; SOUZA, Samuel T.; FONSECA, Eduardo Jorge. S. OSPINA-PRIETO, Sterphanie; BORBELY, Alexandre U. First evidence of microplastic accumulation in placentas and umbilical cords from pregnancies in Brazil. **An Acad.**

Bras. Cienc. São Paulo, v. 97, n. 3, set./dez, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520241298>

REISS, Martin. An integrative hierarchical spatial framework for spring habitats. **Journal of Landscape Ecology**, Warsaw, v. 6, n. 2, p. 65-77, feb. 2013. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10285-012-0068-2>

RODRIGUEZ, José Manuel Mateo; SILVA, Edson Vicente da; CAVALCANTI, Agostinho de Paula Brito. **Geoeecologia das paisagens**: uma visão Geossistêmica da análise ambiental. 6. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2022. 329 p.

SILVA, Marcus Henrique Martins e; SILVA, Fernando Luiz; MORAIS, Marco Antônio Vieira; PAULA, Carla da Silva. Dinâmica geoambiental e qualidade da água na bacia do baixo Paranaíba, Amazônia Mato-grossense. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 17, n. 3, p. 1812-1832, mai/jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.3.p1812-1832>

SPRINGER, Abraham E.; STEVENS, Lawrence E.; ANDERSON, D.; PARNELL, Roderic A.; KREAMER, David K.; FLORA, Stephen P. A comprehensive springs classification system: integrating geomorphic, hydrogeochemical, and ecological criteria. In: STEVENS, Lawrence. E.; MERETSKY, Vicky J. (ed.) **Aridland Springs in North America: Ecology and Conservation**. Tucson: University of Arizona Press, 2008. p. 49-75.

STEVENS, Lawrence. E. *et al.* **The Ecological Integrity of Spring Ecosystems**: a Global Review. In: DELLASALA, Dominick A.; GOLDSTEIN, Melvyn I., Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, 2021. p. 436-451. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821139-7.00111-2>

TÓTH, Ádám. KOVÁCS, Solt; KOVÁCS, József; MÁDL-SZÓNYI, Judit. Springs regarded as hydraulic features and interpreted in the context of basin-scale groundwater flow. **Journal of Hydrology**, Connecticut, v. 610, n. 4, p. 1-14, abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127907>

TRICARD, Jean. A geomorfologia nos estudos integrados de ordenação do meio ambiente. **Boletim de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 252, p. 15-42, out/dez. 1976.

TUCCI. Carlos Eduardo Morales; SILVEIRA, Alcir Luís da. **Hidrologia**: Ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 2009. 943 p.

VALENTE, Osvaldo Ferreira; GOMES, Marcos Antônio. **Conservação de nascentes**: hidrologia e manejo de bacias hidrográficas de cabeceiras. 1. ed. Viçosa: Aprenda Fácil. 2005. 210 p.

WU, Jian; EY, Lei; WU, Chenchen; CHANG, Qingrui; XIN, Zhuohang; ZHANG, Chi; ZHOU, Huicheng. Spatial variation of channel head curvature in small mountainous watersheds. **Hydrology research**, London, v. 50, n. 5, p. 1251-1266, out. 2019. DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2019.036>

WORLD CLIM. **Global climate and weather data base**. Disponível em: <https://www.worldclim.org/data/index.html>. Acesso em: junho de 2024.

YANG, Guisen; HUANG, Lei; SHI, Yafei. Magnitude and determinants of plant root hydraulic redistribution: A global synthesis analysis. **Front. Plant. Sci.**, Thailand, v. 13, n. 6, p. 1-13, jul. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918585>