



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
NÍVEL DOUTORADO

GEOVÂNIA RICARDO DOS SANTOS

**SISTEMAS HIDROAMBIENTAIS DE NASCENTES NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO MUNDAÚ, NORDESTE DO BRASIL**

Recife

2025

GEOVÂNIA RICARDO DOS SANTOS

**SISTEMAS HIDROAMBIENTAIS DE NASCENTES NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO MUNDAÚ, NORDESTE DO BRASIL**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Geografia.

Área de concentração: Regionalizações e Análise Regional.

Linha de Pesquisa: Dinâmica superficial e climática das paisagens naturais tropicais úmidas e semiáridas

Orientador: Prof. Dr. Lucas Costa de Souza Cavalcanti

Recife

2025

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santos, Geovânia Ricardo dos.

Sistemas hidroambientais de nascentes na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, Nordeste do Brasil / Geovânia Ricardo dos Santos. - Recife, 2025.
245f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2025.

Orientação: Lucas Costa de Souza Cavalcanti.

Inclui referências, apêndices e anexos.

1. Afloramento de água subterrânea; 2. Diagnóstico ambiental; 3. Estrutura hidromorfológica; 4. Monitoramento hidrológico; 5. Qualidade hidroquímica. I. Cavalcanti, Lucas Costa de Souza. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

GEOVÂNIA RICARDO DOS SANTOS

**SISTEMAS HIDROAMBIENTAIS DE NASCENTES NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO MUNDAÚ, NORDESTE DO BRASIL**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Geografia.

Aprovada em: 24/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lucas Costa de Souza Cavalcanti (Orientador- Presidente da banca)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Osvaldo Girão da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Daniel Rodrigues de Lira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Miguel Fernandes Felipe (Examinador Externo)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Aichely Rodrigues da Silva (Examinador Externo)
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

Dedico

A minha amada mãe, Helena Ricardo da Silva, meu maior exemplo de força, determinação e resiliência. Minha maior incentivadora, que sempre acreditou no meu potencial e segurou nas minhas mãos nos momentos de fragilidade humana. Te amo sempre!

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa uma pequena parcela da minha jornada aqui na Terra. Todo conhecimento e títulos obtidos até aqui e no futuro, nunca serão usados como instrumentos de opressão contra os demais e sim de soma por um mundo melhor.

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as dádivas e inspirações que me foram concedidas na construção deste trabalho; ao Plano espiritual, a qual particularmente acredito na sua atuação; quando me senti sem forças, o sobrenatural me conduziu, proporcionando-me ânimo e estímulo na condução desta pesquisa; nesta temática tão desafiadora, que provou mudanças na minha zona de conforto pessoal e profissional.

À minha mãe, Helena Ricardo, minha grande inspiração de vida, mulher forte e guerreira, pelo seu apoio, conselhos, valores e orações. Se alcancei este título, foi graças ao apoio contínuo ao longo da minha vida. Apesar de não ter tido muitas oportunidades, ela sempre reconheceu a importância e a transformação pessoal que a educação pode realizar.

À minha família, em particular, meu amado Tio George Silva, agente essencial no decorrer desta pesquisa, pelo apoio e assídua ajuda dada à mim, na visitação e no mapeamento das nascentes; ao meu primo Luiz Otávio, tão assíduo em contribuir nos campos; meu primo Flaviano Galdino pela força dada a mim em fazer a vazão das nascentes em Santana do Mundaú e me transportado pelas estradas de tão difícil acesso. A Tia Maria do Carmo e Celso Galdino, por permitir testar suas nascentes.

Ao meu orientador Profe. Dr. Lucas Cavalcanti pela orientação, diplomacia, paciência e confiança depositadas em mim.

À banca avaliadora, Professores Dr. Osvaldo Girão da Silva, Dr. Daniel Rodrigues de Lira, Dr. Miguel Fernandes Felipe e Dra. Aichely Rodrigues da Silva, pelas contribuições, disponibilidade, olhar crítico na correção e proposição de melhorias, fundamentais a este trabalho.

Ao Mavíael Rosa dos Santos e sua esposa Edileuza Calisto dos Santos, grandes amigos que levarei pra vida inteira, pessoas de grande coração e simplicidade que conheci neste percurso, que se comprometeram nas medições de vazão em Correntes e ao Júnior Matias por me ajudar com a localização das nascentes em Correntes.

Ao Cícero Lourenço de Lima “de Palmeirina”, Sr. Cícero e Dona Cícera “de Murici” e Sr. Mariano e Dona Rita “de Branquinha”, pela parceria de campo, na localização das nascentes.

A Dona Cícera, do Sítio Garrote em Canhotinho, pela sua gentileza e acolhimento ao permitir que realizasse análise em sua nascente.

À Marlene, que junto com a Mariápolis Santa Maria, me acolheu em sua casa em Igarassu-PE durante meu estágio docência e as pessoas tão especiais pra mim que conheci durante minha permanência em Igarassu: Antonieta, Céu, Netinha, Lumi, Tude, Sere, Eleuza e seu esposo Augusto.

À Nadiane Atanásio, Nadiele, Dona Nazaré e Dona Lúcia, pessoas que tenho muita estima, de coração de tamanho do mundo, amizades tão significativas que somam na minha vida, que abriram as portas de sua casa pra mim nos campos de pesquisa em Correntes. Minha família de coração.

Ao Daniel “pequeno cientista” e sua família, pela grande ajuda com as coletas de campo no sítio Duas Barras, em Santana do Mundaú.

Ao Profe. Dr. Iaponan Cardins de Sousa Almeida, pela sua generosidade e solicitude na partilha de dados, fotos e informações acerca das nascentes de Garanhuns.

À Fundação de Amparo à Ciência e a Tecnologia de Pernambuco - FACEPE, pelo incentivo por meio da bolsa de estudo, essencial ao andamento do projeto de pesquisa.

Ao Grupo de Pesquisa Geografia de Paisagens Tropicais - PAISAGEO, pelo acolhimento e objetivos em comuns na jornada científica.

Ao Laboratório de Aquicultura e Análise de Água – LAQUA/CECA/UFAL, nas pessoas do Profe. Dr. Emerson Soares, Profa. Dra. Themis de Jesus e as técnicas de laboratório, Anita, Maraísa, Fábio, Hanna e Vivian, pela parceria nas análises das amostras água.

À Profa. Dra. Regla Toujaguez La Rosa Massahud, pessoa a quem admiro, pelo apoio científico e amizade.

Ao Profe. Dr. Gilson Moura Filho, coordenador do Laboratório de Solo, Água e Planta, CECA/UFAL, por conceder suporte as análises, cedendo água destilada para manutenção de equipamentos.

Ao laboratório Central Analítica pelo compromisso e seriedade na análise de parte das amostras de água.

Aos colegas de turma, mais próximos durante esta caminhada, particularmente: Antônio Almeida “Tony”, pela capacidade e bondade em compartilhar itens que necessitei para compor os dados de pesquisa, sem esquecer também de Verônica Gurgel, Maria da Glória, João Nascimento, Felipe Marangoni e Gilberto Santos, parceiros de atividades nas disciplinas.

À Ong Amigos do Rio Correntes, pela parceria nos campos de pesquisa. Minha mais que especial gratidão.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, PPGeo-UFPE, particularmente, aos professores que promoveram debates tão propícios ao desenvolvimento da pesquisa e aos técnicos em administração, pela disponibilidade e solicitude dedicadas ao PPGeo.

À Universidade Federal de Pernambuco, pela circunstância oportuna de compor o quadro discente e desenvolver este tema de pesquisa.

À Secretaria de Desenvolvimento Rural e Meio Ambiente do município de Garanhuns, em particular a Daniele, pela gentileza em oferecer apoio na visitação de algumas localidades onde encontravam as nascentes e à Secretaria de Infraestrutura, na pessoa de Enos Remigio, pelo fornecimento de informações a respeito das nascentes em Garanhuns.

À Secretaria Municipal de Agricultura, Abastecimento e Meio Ambiente, da Prefeitura Municipal de Correntes, na pessoa do Sr. Américo Carneiro.

À Secretaria Municipal de Agricultura e Meio Ambiente, da Prefeitura Municipal de Santana do Mundaú, na pessoa do Sr. Cícero Santos, pelo fornecimento de declaração de relevância ao projeto de pesquisa.

E a todas as pessoas de coração simples que conheci, por esses interiores por onde passei - pequenos agricultores rurais – onde fui tão bem recebida. As melhores pessoas que conheci na vida, foram nestas vivências. Com um coração aberto e sem esperar nada em troca.

Minha sincera gratidão!

“O Senhor é a minha força e o meu escudo, Nele confiou o meu coração e fui socorrido, assim o meu coração salta de alegria e com o meu canto o louvarei.”

Salmo 28:7

"A água se formou a partir do Akasha, o princípio etérico, que no polo ativo, é construtivo, doador da vida, nutriente e preservador, já no polo passivo, é igual ao fogo, desagregador, fermentador, decompositor e dissipador."

Franz Bardon

“A crença de que existe apenas uma verdade e que você próprio está em posse dela é a raiz de todos os males do mundo.”

Max Born – Físico e matemático alemão

RESUMO

Os sistemas hidroambientais de nascente são pouco compreendidos na bacia hidrográfica. A diversidade e complexidade do sistema-nascente e suas correlações com a paisagem a elegem a um dos ambientes mais ricos e importantes, do ponto de vista ambiental e social. O objetivo da pesquisa é investigar de modo multiescalar os sistemas hidroambientais de nascentes na Bacia Hidrográfica do Mundaú, em Pernambuco e Alagoas, Nordeste brasileiro. Para tal fim, a pesquisa iniciou com a realização de identificação, levantamento e mapeamento das nascentes. Os dados foram comparados com os fatores da paisagem e gerado o mapeamento de zonas de recarga subterrânea. A estrutura espacial hierárquica e o diagnóstico ambiental das nascentes foram entendidas. Utilizou um protocolo de monitoramento adaptado para as nascentes. Também foram realizados monitoramento do comportamento hidrológico em quinze nascentes e análises físico-química e microbiológicas em quatro nascentes, no Alto e Médio curso. O levantamento resultou no mapeamento de 49 nascentes na bacia do Mundaú; A dinâmica das nascentes está associada as características dos elementos naturais e antrópicas; As Zonas de recarga subterrânea Moderadas obtiveram maiores predomínio nas seis sub-bacias do Mundaú; Diante da intervenção na paisagem, muitas morfologias de exfiltração perderam sua característica naturais; Considerando as particularidades em microescala, as configurações predominantes de exfiltrações de nascente foram: na Unidade geomórfica, Base de encosta e Fundo de vale, na Morfologia de exfiltração, Fratura rochosa, no Aspecto de exfiltração, Pontual, na Mobilidade, Fixa e na Sazonalidade, Perene; O protocolo de Bioavaliação Rápida indicou que em torno de 80% dos ambientes das nascentes pesquisadas estão em condições de alteração e impacto, necessitando de práticas recuperativas e de manejo; O monitoramento hidrológico indicou ao longo do período avaliativo, médias significativas de vazão nas nascentes de Santana do Mundaú, na ordem de 0,36 L/s, em comparação com as nascentes de Correntes, que foram de 0,08 L/s; Os parâmetros físico-químicos (pH, temperatura, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, feofitina a, clorofila a, nitrito, nitrato e amônia) estão dentro dos limites permitido pelo órgão consultivo; Os teores de fósforo total e fosfato estão acima dos valores permitidos em ambos os períodos, chuvoso e de estiagem; A presença de termotolerantes nas amostras indicam bactérias potencialmente patogênicas.

Palavras-chave: Afloramento de água subterrânea. Diagnóstico ambiental. Estrutura hidromorfológica. Monitoramento hidrológico. Qualidade hidroquímica.

ABSTRACT

Hydroenvironmental spring systems remain understudied within the watershed. However, their diversity and complexity, along with their correlations with the surrounding landscape, make them some of the most ecologically and socially significant environments. This research aims to investigate the hydro-environmental systems of springs in the Mundaú River Watershed, located in the northeastern Brazilian states of Pernambuco and Alagoas, in a multiscale approach. For that purpose, the research first involved identifying, surveying, and mapping the springs. The data were cross-referenced with landscape variables, resulting in the generation of a groundwater recharge zone map. The springs' hierarchical spatial structure and environmental diagnosis were explained. An adapted monitoring protocol specific to spring systems has been employed. Fifteen springs were also monitored for hydrological behavior, and four springs in the upper and middle reaches were subjected to physical-chemical and microbiological analysis. This research resulted in the mapping of 49 springs within the Mundaú River Watershed. The dynamics of these springs are associated with the characteristics of both natural and anthropogenic elements. Zones of moderate groundwater recharge showed the greatest predominance across the six sub-watersheds of the Mundaú River Watershed. As a result of landscape alterations, many exfiltration morphologies have lost their natural characteristics. Considering microscale particularities, the predominant spring exfiltration configurations were: in the geomorphological unit—footslope and valley bottom; in exfiltration morphology—rock fracture; in exfiltration aspect—point source; in mobility—fixed; and in seasonality—perennial. The Rapid Bioassessment Protocols have indicated that about 80% of the environments of the researched springs are under altered and impacted conditions, requiring recuperative and management practices. Throughout the monitoring period, hydrological data revealed significant average discharge rates in the springs of Santana do Mundaú (approximately 0.36 L/s) when compared to those of Correntes (0.08 L/s). The physicochemical parameters (pH, temperature, electrical conductivity, total dissolved solids, pheophytin a, chlorophyll a, nitrite, nitrate, and ammonia) all comply with the advisory body's standards; the levels of total phosphorus and phosphate are above the allowed values in both the wet and dry seasons. The presence of thermotolerants in the samples indicates potentially pathogenic bacteria.

Keywords: Groundwater outcrop. Environmental diagnosis. Hydromorphological structure. Hydrological monitoring. Hydrochemical quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Modelo de cabeceira de drenagem (A), nascentes (B), canal de 1ª ordem (C) e canal de 2ª ordem (D).....	26
Figura 2 –	Ambientes de transição das nascentes.....	32
Figura 3 –	Localização das nascentes estudadas na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú. Os números e letras de identificação correspondem à catalogação da nascente.....	49
Figura 4 –	Perfil longitudinal do Rio Mundaú (Sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso).....	51
Figura 5 –	Médias históricas de precipitação (mm), no período 1970-2000 da bacia.....	52
Figura 6 –	Organograma dos procedimentos metodológicos realizados.....	56
Figura 7 –	Fatores utilizados para matriz comparada.....	59
Figura 8 –	Método volumétrico direto para monitoramento hidrológico e nascentes avaliadas.....	67
Figura 9 –	Medição dos parâmetros com medidor multiparâmetros, em nascentes de Correntes (A) e em nascentes de Santana do Mundaú (B).....	69
Figura 10 –	Amostra de água da nascente inserida na cubeta (A), leitura do branco da amostra (B), inserção do regente (C) e leitura do parâmetro após o tempo decorrido (D).....	70
Figura 11 –	Amostra de água no Becker (A), amostra de água + o meio de cultura, agitado por 3 minutos a 12% (B), tubos de ensaio com amostras cobertas com papel alumínio (C), amostras em tubos na estufa (D).....	72
Figura 12 –	Unidade geológica nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.....	76
Figura 13 –	Unidade litológica nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.....	79
Figura 14 –	Unidades geomorfológicas nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.....	82
Figura 15 –	Unidade de relevo nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.....	84
Figura 16 –	Classificação da declividade nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.....	86
Figura 17 –	Tipos de solos nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.....	88
Figura 18 –	Tipos de textura dos solos nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.....	90
Figura 19 –	Tipos de vegetação primária nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.....	92
Figura 20 –	Classificação do uso e cobertura da terra na bacia do Mundaú (BHRM), da série histórica 1985-2019 do Mapbiomas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.....	95
Figura 21 –	Diferentes usos da terra na Bacia Hidrográfica do Mundaú: em Garanhuns (A), Correntes (B a F), Branquinha (G e H), Santana do Mundaú (I e J) e São José da Laje (K e L).....	97
Figura 22 –	Recarga de águas subterrâneas e dados de poços nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba, da bacia do Mundaú.....	101

Figura 23 –	Percentual de área das classes de Recarga de águas subterrâneas na bacia e nas sub-bacias.....	102
Figura 24 –	Interpolação da vazão estabilizada dos poços (m ³ /h) nas sub-bacias Alto, Inhaúmas, Canhoto, Médio, Baixo curso e Satuba.....	105
Figura 25 –	Panorama dos sistemas hidroambientais de nascentes e hipsometria (m) nas sub-bacias do Mundaú.....	109
Figura 26 –	Sistema de captação superficial do Riacho Vila Maria e Pau Pombo, no Alto curso do Mundaú, município de Garanhuns.....	113
Figura 27 –	Características das nascentes 32GA (Vila Maria) (A e B), 33GA (Pau Pombo – Anexo ao Parque) (C e D), 43GA (Parque Rubervan) (E e F)....	114
Figura 28 –	Características das nascentes 46GA (Pau Amarelo) (A e B) 47GA (Brejo de Columinho) (C e D) e 48GA (Olho D’Água) (E e F).....	116
Figura 29 –	Sistema de captação superficial do Rio Correntes e Riacho Cordeiro, no Alto curso do Mundaú, município de Correntes.....	118
Figura 30 –	Características das nascentes 19CO (A e B), 20CO (C e D), 21CO (E e F) e 22CO (G e H), 23CO (I e J), 24CO (K e L), 25CO (M e N) e 26CO (O e P), 31CO (Q e R), 39CO (S e T), 40CO (U e V), 41CO (W e X) e 42CO (Y e Z).....	120
Figura 31 –	Sistema de captação superficial do Rio Inhaúma, na sub-bacia do Inhaúmas, município de Palmeirina.....	122
Figura 32 –	Características das nascentes 28PA (A e B) 29PA (C e D) e 30PA (E e F).....	123
Figura 33 –	Sistema de captação superficial do Riacho da Casinha, sub-bacia do Canhoto município de Canhotinho.....	125
Figura 34 –	Características da nascente 49CH com alteração (A) e panorama da nascente 49CH (B a D).....	126
Figura 35 –	Sistema de captação superficial do Rio Inhaúmas, Rio Caruru e Riacho Duas Barras, e Riacho do Timbó, sub-bacia do Médio curso, municípios Santana do Mundaú, União dos Palmares e São José da Laje.....	128
Figura 36 –	Sistema de captação superficial do Rio Inhaúmas, Rio Caruru e Riacho Duas Barras, e Riacho do Timbó, sub-bacia do Médio curso, municípios Santana do Mundaú, União dos Palmares e São José da Laje.....	130
Figura 37 –	Características da nascente 35SJ (A), panorama da nascente 35SJ (B)...	132
Figura 38 –	Características da nascente 38UP (A), panorama da nascente 38UP (B).....	133
Figura 39 –	Sistema de captação superficial do Riacho Sapucaia, sub-bacia do Médio curso, em Branquinha.....	134
Figura 40 –	Características das nascentes 10BQ (A), 11BQ (C), 12BQ (E), 13BQ (G), panorama das nascentes (B, D, F e H).....	135
Figura 41 –	Sistema de captação superficial do Afluente do Rio Mundaú, sub-bacia do Baixo curso, em Murici.....	137
Figura 42 –	Características das nascentes 14MU (A e B), 15MU (C e D), 16MU (E e F), 17MU (G e H), 36MU (I e J) e 37MU (K e L).....	138
Figura 43 –	Sistema de captação superficial do Afluente do Rio Mundaú, sub-bacia do Satuba, em Satuba.....	140
Figura 44 –	Características da nascente 18ST (A) e panorama da nascente (B).....	140
Figura 45 –	Blocos diagramas da superfície, mapas e perfis topográficos do relevo dos ambientes das nascentes mapeadas no Alto curso, Médio e Baixo	

	curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba. Identificação da nascente no canto superior direito.....	142
Figura 46 –	Representação dos valores somatórios das características de exfiltração das nascentes.....	158
Figura 47 –	Ambiente de afloramento da nascente 32GA (A), carreamento dos sedimentos na nascente 32GA, no período chuvoso (B)*, captação da água da nascente 32GA para a lavanderia manual (C), exfiltração da nascente 33GA (D) e deflúvio dos canais de 1ª ordem (E).....	161
Figura 48 –	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).....	162
Figura 49 –	Figura 49- Formação de cavidade erosiva na nascente 1SM (A), fundo de vale e encostas de declividade acentuada no ambiente de nascente (B).....	163
Figura 50 –	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).....	164
Figura 51 –	Ambiente de exfiltração da nascente 6SM (A), talus em encosta, anterior a nascente 6SM (B) e presença de raízes em locais de umidade.....	166
Figura 52 –	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).....	167
Figura 53 –	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).....	169
Figura 54 –	Protocolo de Bioavaliação Rápida (PBR) para 37 nascentes, no período de outubro de 2021 a abril de 2022.....	172
Figura 55 –	Unidades de conservação municipais, estaduais e federais na bacia do Mundaú.....	175
Figura 56 –	Intervenção realizada nas nascentes (A), eutrofização biológica da água (B), despejo de resíduos de lixo próximo a nascente 1SM (C).....	178
Figura 57 –	Vazão em Litros por dia (L/s) das nascentes monitoradas em Correntes, de janeiro de 2022 a dezembro de 2023.....	180
Figura 58 –	Vazão em Litros por dia (L/s) das nascentes monitoradas em Santana do Mundaú, de janeiro de 2022 a dezembro de 2023.....	181
Figura 59 –	Índices pluviométricos do município de Correntes e Santana do Mundaú, de janeiro a junho de 2022.....	182
Figura 60 –	Climograma com médias históricas (1970-2000) de precipitação pluvial e temperatura °C, dos municípios de Correntes (A) e Santana do Mundaú (B).....	183
Figura 61 –	Média de vazão (L/s) ocasional em nascentes, do Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.....	184
Figura 62 –	Magnitude de vazão em L/s em nascentes, do Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.....	186
Figura 63 –	Matriz de correlação da vazão (L/s) das nascentes em Correntes (A) e Santana do Mundaú (B).....	189

Figura 64 –	Valores de pH (A) e temperatura (B) nas nascentes avaliadas 19CO, 20CO, 1SM e 2SM. *NS indica que não houve diferença estatística pelo teste de Tukey.....	191
Figura 65 –	Valores de condutividade elétrica (A) e Sólidos totais dissolvidos (B), 19CO, 20CO, 1SM e 2SM. *NS indica que não houve diferença estatística pelo teste de Tukey.....	192
Figura 66 –	Níveis de feofitina a (A) e clorofila a (B), nas nascentes 19CO, 20CO, 1SM e 2SM. *NS indica que não houve diferença estatística pelo teste de Tukey.....	194
Figura 67 –	Parâmetros de nitrito avaliado com fotômetro (A), nitrito avaliado com espectrofotômetro (B), nitrato (C), nas nascentes 19CO, 20CO, 1SM e 2SM. *NS indica que não houve diferença estatística, ab indicou diferença estatística pelo teste de Tukey.....	195
Figura 68 –	Determinações de amônia (A), fosforo total (B) e fosfato (C) nas nascentes 19CO, 20CO, 1SM e 2SM. *NS indica que não houve diferença estatística pelo teste de Tukey.....	197
Figura 69 –	Dendograma de similaridade entre os parâmetros físico-químicos no período chuvoso e estiagem (A) e entre as amostras de água das nascentes (B). A letra j refere-se ao mês junho, d indica o mês de dezembro.....	198

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Classificação de nascentes quanto à origem geológica.....	30
Quadro 2 –	Coleção de data e dados tabulares utilizados na pesquisa.....	56
Quadro 3 –	Valores finais atribuídos a zona de recarga de águas subterrâneas.....	62
Quadro 4 –	Sistema espacial hierárquico de nascentes.....	64
Quadro 5 –	Parâmetros e valores do estado de conservação atribuídos para cada nascentes.....	66
Quadro 6 –	Metodologias, ranges e reagentes utilizados na análise das amostras de água.....	69
Quadro 7 –	Classificação das águas doces e seus destinos, de acordo com as classes de uso.....	73
Quadro 8 –	Nascentes mapeadas na Bacia Hidrográfica do Mundaú.....	110
Quadro 9 –	Caracterização da estrutura hidromorfológica das nascentes.....	155
Quadro 10 –	Unidades de conservação contidas na Bacia Hidrográfica do Mundaú.....	175

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Municípios inseridos total ou parcial na bacia do Mundaú.....	50
Tabela 2 –	Escala de valores de peso, definição e descrição, para comparação dos fatores.....	60
Tabela 3 –	Ordem da matriz e valor de índice de consistência aleatória.....	62
Tabela 4 –	Classificação de magnitude da vazão (L/s) das nascentes.....	68
Tabela 5 –	Concentração dos Parâmetros físico-químicos e microbiológicos analisados na pesquisa, com base nas classes de águas doces, destinadas ao estabelecidos pelo CONAMA nº 357.....	73
Tabela 6 –	Distribuição da área (km ²) e percentagem (%), das classes de Uso e Cobertura da Terra, na bacia do Mundaú.....	98
Tabela 7 –	Estatística descritiva para os valores de vazão (L/s) das nascentes monitoradas em 2022 e 2023, períodos de estiagem e chuvoso.....	188
Tabela 8 –	Coliformes totais e Coliformes termotolerantes para as águas superficiais em quatro nascentes, em Correntes e Santana do Mundaú.....	200

LISTA DE SIGLAS

AHP	PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO
APP	ÁREA DE PROTEÇÃO PERMANENTE
BHRM	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUNDAÚ
CONAMA	CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE
CPRM	COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS
COP-30	COPERNICUS 30 MT
EMBRAPA	EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA
GEE	GOOGLE EARTH ENGINE
IPA	INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
MDE	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO
PBR	PROTOCOLO DE BIOAVALIAÇÃO RÁPIDA
SEMARH	SECRETARIA DO ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS DE ALAGOAS
SIRGAS	SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS
SIG	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA
UTM	UNIVERSAL TRANSVERSE MERCATOR
UC	UNIDADE DE CONSERVAÇÃO
UCT	USO E COBERTURA DA TERRA
BQ	BRANQUINHA
CO	CORRENTES
CH	CANHOTINHO
GA	GARANHUNS
PA	PALMEIRINA
MU	MURICI
SM	SANTANA DO MUNDAÚ
SJ	SÃO JOSÉ DA LAJE
ST	SATUBA
UP	UNIÃO DOS PALMARES
L/s	LITROS POR SEGUNDOS
m ³ /s	MILÍMETROS POR SEGUNDO

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	OBJETIVOS.....	24
2.1	Geral.....	24
2.2	Específicos.....	24
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
3.1	Os sistemas hidroambientais de nascentes: classificações e novas definições conceituais.....	25
3.1.1	Estrutura espacial dos sistemas hidroambientais de nascente.....	31
3.2	Dinâmica subterrânea e superficial dos sistemas de nascentes.....	34
3.3	Diagnósticos ambientais para avaliação da qualidade da água em nascentes.....	36
3.3.1	Aspectos físico-químicos e microbiológica da água.....	36
3.3.2	Análise integrada das nascentes pelo Protocolo de Bioavaliação Rápida.....	40
3.4	Uso de geotecnologias e análise multicritério como aliada na avaliação de recarga de águas subterrâneas.....	43
3.5	Intervenções antrópicas no ambiente das nascentes.....	45
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	48
4.1	Contexto físico-ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú.....	48
4.2	Síntese dos procedimentos.....	54
4.2.1	Dados vetoriais, matriciais e tabulares utilizados.....	56
4.3	Levantamento, identificação e mapeamento de campo das nascentes na bacia...	57
4.4	Caracterização das nascentes mapeadas em comparação com componentes ambientais regionais.....	58
4.5	Geoespacialização da recarga de águas subterrâneas na bacia, pelo método AHP.....	58
4.6	Classificação espacial hierárquica dos sistemas hidroambientais de nascentes..	62
4.7	Avaliação da estrutura e comportamento hidrogeomorfológico das nascentes...	64
4.8	Aplicação de índice de avaliação para monitoramento do estado de conservação das nascentes.....	65
4.8	Monitoramento e análise do comportamento hidrológico das nascentes selecionadas.....	67
4.9	Análise dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos de qualidade da água.....	68
4.10	Tratamento estatístico.....	74
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
5.1	Caracterização das nascentes no contexto regional da bacia do Mundaú.....	75
5.1.1	Mapeamento geoespacial da recarga de águas subterrâneas na bacia do Mundaú.....	99
5.2	Levantamento e geoespacialização dos sistemas hidroambientais de nascentes.....	106
5.3	Sistemas hidroambientais de nascentes da bacia do Mundaú: relações funcionais na paisagem.....	111
5.4	Caracterização hidrogeomorfológica das nascentes: estrutura e comportamento.....	141
5.5	Síntese das configurações de nascentes.....	159
5.5.1	Maiores magnitude de vazão entre as sub-bacias: 32GA e 33GA.....	159
5.5.2	Vazão volumosa em meio a uma paisagem de pastagem: 31CO.....	161
5.5.3	Nascente em intenso processo erosivo: 1SM.....	162

5.5.4	Nascentes com fragmentos de vegetação em topo de encosta: 5SM, 44SM e 45SM.....	163
5.5.5	Nascente difusa de patamar de encosta com afloramento rochoso à montante: 6SM.....	165
5.5.6	Nascentes perenes em Lajedo rochoso: 17MU e 35SJ.....	167
5.5.7	Nascentes com maiores indicativos de poluição: 10BQ, 13BQ e 18ST.....	168
5.6	Aplicação do Protocolo de Bioavaliação Rápida na avaliação dos ambientes de nascentes: medidas protetivas e conservacionistas dos recursos naturais.....	170
5.6.1	Cenário e desafios no abastecimento em espaços rurais.....	177
5.8	Monitoramento do comportamento hidrológico nos ambientes de nascentes.....	178
5.8.1	Estatística descritiva do monitoramento hidrológico das nascentes para os períodos avaliativos.....	187
5.8.2	Matriz de correlação entre a vazão das nascentes.....	189
5.9	Qualidade hidroquímica da água em nascentes.....	190
5.9.1	Propriedades físico-química da água superficial de nascentes.....	190
5.9.2	Similaridade entre as variáveis e nascentes.....	197
5.9.3	Propriedades microbiológicas das amostras de água.....	199
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	201
7	RECOMENDAÇÕES.....	205
	REFERÊNCIAS.....	206
APÊNDICE 1 -	Caracterização do sistema de nascente em relação aos fatores ambientais da bacia do Mundaú.....	227
APÊNDICE 2 -	Valores obtidos na validação do Processo Analítico Hierárquico – AHP, para os fatores combinados.....	230
APÊNDICE 3 -	Normalização dos valores obtidos no AHP.....	231
APÊNDICE 4 -	Valor de performace dos valores obtidos, a partir da combinação dos fatores.....	232
APÊNDICE 5 -	Valores de Consistência.....	233
APÊNDICE 6 -	Soma, performace score, lambda máxima, índice de consistência e razão de consistência para os fatores combinados.....	234
APÊNDICE 7 -	Aplicação do Protocolo de Bioavaliação Rápida nas nascentes mapeadas no Alto curso do Mundaú – Garanhuns e Correntes...	235
APÊNDICE 8 -	Aplicação do Protocolo de Avaliação Rápida nas nascentes mapeadas no Inhaúmas – Palmeirina.....	236
APÊNDICE 9 -	Aplicação do Protocolo de Avaliação Rápida nas nascentes mapeadas no Médio curso do Mundaú - Santana do Mundaú.....	237
APÊNDICE 10 -	Aplicação do Protocolo de Avaliação Rápida nas nascentes mapeadas em Médio curso do Mundaú – São José da Laje, União dos Palmares e Branquinha.....	238
APÊNDICE 11 -	Aplicação do Protocolo de Avaliação Rápida nas nascentes mapeadas em Baixo curso do Mundaú e Satuba– Murici e Satuba.....	239
APÊNDICE 12 -	Distribuição da área (km²) e percentagem (%), da recarga de águas subterrânea na bacia e nas sub-bacias.....	240
APÊNDICE 13 -	Valores médios de vazão em L/s, das nascentes monitoradas em Correntes e Santana do Mundaú.....	241
APÊNDICE 14 -	Valores de precipitação pluvial (mm/mês) em Correntes e Santana do Mundaú.....	242
ANEXO 1 -	Relatório de análise dos parâmetros feofitina A, clorofila A e nitrato, em junho de 2022.....	244

ANEXO 2 -	Relatório de análise dos parâmetros feofitina A, clorofila A e nitrato, em dezembro de 2022.....	245
------------------	---	------------

1 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). Alguns têm percursos de fluxo subterrâneo curtos e breves tempos de armazenamento das águas subterrâneas, enquanto outras, têm caminhos de fluxo de centenas de quilômetros e tempos de residência de 10^4 a 10^6 anos (CANTONATI et al., 2020). Estes processos estão associados a geomorfologia, principal reguladora do comprimento e da velocidade do movimento da água e dos sedimentos, bem como o armazenamento da água da precipitação nas rochas (WU et al., 2019).

A complexidade do sistema-nascente vai muito além da descarga da água, perpassando aspectos geomorfológicos que integram a fisiografia estrutural (FELIPPE e MAGALHÃES, 2020). As nascentes são diversas em características hidrogeomorfológicas e ecohidrogeológicas. Diversos aspectos tipológicos de nascentes estão em consonância com a heterogeneidade e dinâmica da paisagem, portanto, a diferenciação dos padrões das nascentes, permitem possibilidades de interpretação e compreensão dos principais processos que as regem no ambiente.

Reconhecendo a abordagem integrada e multiescalar das nascentes, é necessário um conceito espacial projetado para auxiliar na compreensão das relações funcionais, estruturais e dos processos em diferentes escalas (REISS, 2013). A classificação das nascentes por meio da hidrogeomorfologia tem se mostrado ampla e eficaz, visto que, abordagens hidrogeológicas apenas se concentram na descrição dos aquíferos, limitando-se principalmente ao “ponto” de surgência da água subterrânea, enquanto descrições geomorfológicas e hidroecológicas direcionam-se para características do ecossistema além do ponto de exfiltração (STEVENS et al., 2021).

Novos sistemas de classificação surgiram com necessidades de garantir análises eficientes, integrando características pertinente a geomorfologia do canal da nascente, o contexto biogeográfico da nascente, a biota associada, os valores culturais, usos e gestão. A falta de um sistema abrangente de classificação de nascentes resulta apenas em inventários,

avaliações ecológicas e medidas de conservação inadequados para esses ecossistemas, portanto, a integração das características hidrológicas, geológicas e ecológicas das nascentes fornece meios muito necessários para classificá-las, perante aos diferentes tipos e distribuição das características da paisagem (SPRINGER et al., 2008).

Além disso, uma série de outros fatores são relevantes, como as características climáticas, edáficas, topográficas (CARTWRIGHT et al., 2020) e físico-químicas e microbiológicas (KIWANUKA et al., 2021). A última, revela os mecanismos de interação entre as águas subterrâneas e o meio ambiente, além de fornecer subsídios para a gestão das águas subterrâneas, estudo de análise e evolução química das águas subterrâneas, com foco na segurança ecológica, alimentar e no abastecimento de água para populações locais (ZHANG et al., 2023).

Diante das reflexões conceituais acerca da importância dos sistemas hidroambientais de nascentes. A elaboração da tese tem o propósito de contribuir explorando o tema nascentes, objeto este, pouco compreendido na bacia hidrográfica, e sobretudo, ignorada no campo da geomorfologia fluvial, tal pois, ora pela restrição e confusão conceitual, relegando como simples pontos iniciais da rede de drenagem, ora na confusão com as cabeceiras de drenagem, concepção esta errônea. A diversidade do sistema-nascente e suas correlações com a paisagem, elencam-na a um dos ambientes mais importantes e ricos, particularmente, na unidade de bacia hidrográfica.

Tratando-se de ambientes totalmente alterados e frágeis do ponto de vista ambiental, passíveis de extinção, a demanda por levantamento, mapeamento e caracterização do sistema-nascente se faz com urgência. No caso da bacia hidrográfica do Mundaú, significativamente relevante aos Estados de Pernambuco e Alagoas, por sua dinâmica fluvial e diversidade morfoestrutura e litológica, a compreensão multiescalar adotada nesta pesquisa, demonstra a complexidade de processos a qual estão interligadas. Portanto, esta pesquisa é uma contribuição relevante para o entendimento, gestão e proteção dos recursos hídricos da região. Além do mais, parte das nascentes estão localizadas em ambientes topograficamente declivosos e afastados, dificultando o acesso e o dispêndio de tempo e de recursos.

A hipótese é que as nascentes são sistemas hidrodinâmicos inter-relacionados em diversas escalas da paisagem, com os diversos contextos dos fatores ambientais, como a geologia, litologia, geomorfologia, solos, topografia, uso da terra, entre outros, sendo que alguns desses fatores tem maior influência na dinâmica hidrológica, nos processos e na estrutura das nascentes. Sendo assim, uma questão principal norteia esta pesquisa: Quais as relações

multiescalares nos sistemas hidroambientais de nascentes na Bacia Hidrográfica do Mundaú, em Pernambuco e Alagoas, Nordeste brasileiro?

Em termos gerais, a tese está organizada em sete seções. Esta primeira seção, introdutória, destaca a abordagem e linha de desenvolvimento da temática da pesquisa, justificando a relevância, hipótese e questão orientadora da pesquisa. A seguir, a segunda seção, detalha os objetivos geral e específicos. A terceira seção, apresenta a fundamentação teórica, destacando conceitos, propostas e abordagens direcionadas ao sistema-nascente. A quarta seção, compõe o delineamento investigativo de metodologias utilizadas para explorar o tema da pesquisa. Os procedimentos recorridos fundamentam-se na concepção de análise integrada da paisagem.

Na quinta seção, a análise da série de dados de nascentes levantadas de campo, seguiu do regional para o local. A seção dos resultados e discussões reúne a geoespacialização das nascentes e suas relações com as particularidades dos componentes ambientais. Além da realização de um sistema espacial hierárquico de nascentes, avaliação sistemática do estado ambiental das nascentes, um detalhamento estrutura das nascentes, monitoramento do comportamento hidrológico e análise da qualidade hidroquímica das águas das nascentes. Por fim, a sexta e sétima seção, são dadas as considerações finais e conclusões quanto a pesquisa, recomendações necessárias para garantir ações de preservação no sistema-nascente.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Investigar de modo multiescalar os sistemas hidroambientais de nascentes na Bacia Hidrográfica do Mundaú, em Pernambuco e Alagoas, Nordeste brasileiro.

2.2 Específicos

- a. Efetuar identificação, levantamento e mapeamento das nascentes na bacia do Mundaú;
- b. Caracterizar as nascentes com os componentes ambientais regionais;
- c. Realizar mapeamento geoespacial da condição da recarga das águas subterrâneas;
- d. Enquadrar as nascentes em uma estrutura espacial hierárquica, para entendimento dos diversos diagnósticos ambientais das nascentes;
- e. Avaliar o estado de conservação das nascentes por meio de Protocolos de Bioavaliação;
- f. Detalhar a estrutura e comportamento dos aspectos hidrogeomorfológicos das nascentes;
- g. Monitorar o comportamento hidrológico em nascentes selecionadas, em dois municípios do Alto e Médio curso, relacionando com a sazonalidade pluviométrica dos períodos chuvoso e de estiagem;
- h. Analisar a qualidade físico-química e microbiológica em quatro nascentes selecionadas no Alto e Médio curso do Mundaú.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Os sistemas hidroambientais de nascentes: classificações e novas definições conceituais

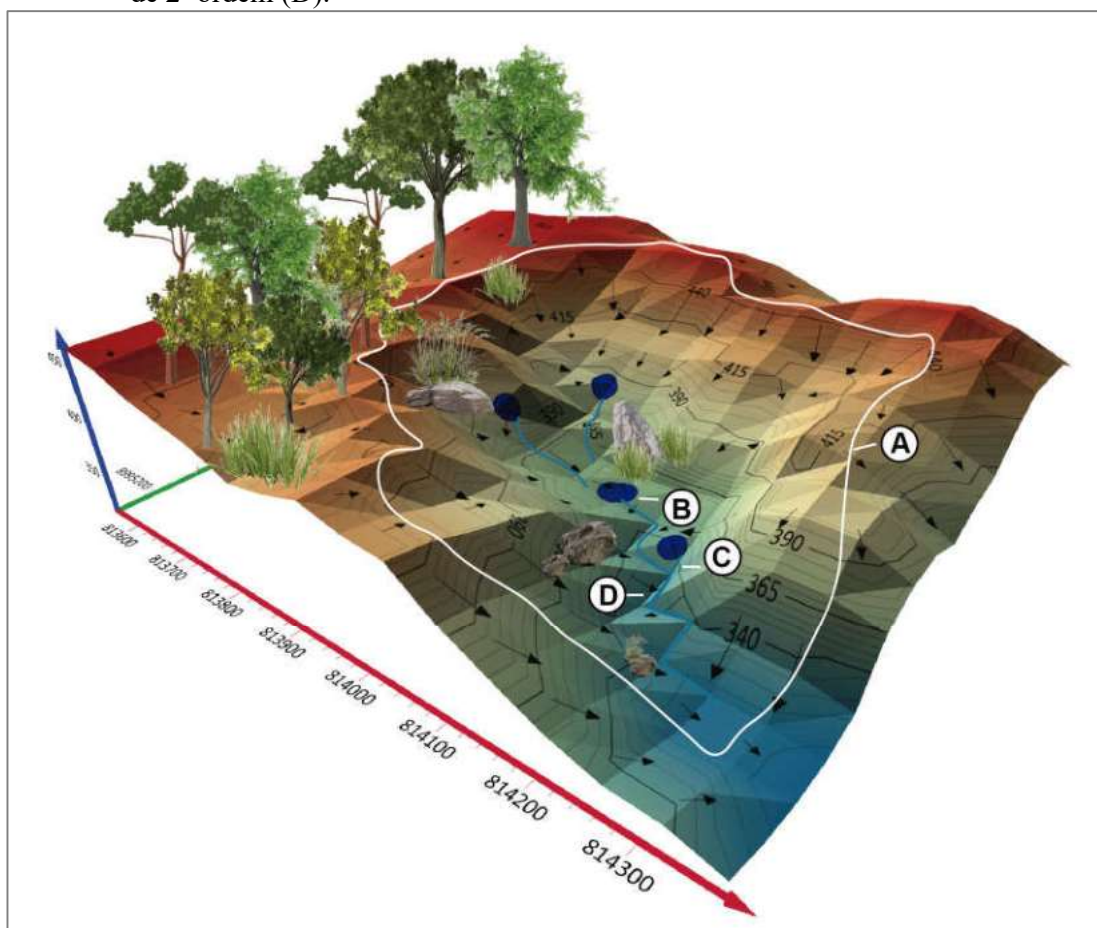
Os conceitos e classificações atuais estão direcionados na tentativa de definir um entendimento compreensível acerca dos sistemas de nascentes. Concepções unilaterais entediam o termo nascentes como simples pontos, áreas ou fontes, desconexas da dinâmica da paisagem. A visão geossistêmica e a perspectiva da complexidade é a que ganha apoio na ciência contemporânea, principalmente de que o papel da sociedade não pode ser separado do contexto de formação da paisagem. Felipe (2013) apontam que no campo de geomorfologia, as nascentes são frequentemente consideradas apenas como pontos iniciais de drenagem dos canais superficiais, sendo muitas vezes, negligenciadas em estudos que investigam as cabeceiras de drenagem. Ainda, Moura et al., (2021) e Moura (2020) mencionam que há uma grande dificuldade de compreensão sobre o tema, que chega a uma confusão conceitual entre cabeceira de drenagem e nascente.

A compreensão das nascentes exige a superação das restrições conceituais limitadas que as reduzem a noções vagas e imprecisas, que limitam a percepção de sua complexidade e relações dinâmicas envolvidas. Muitos termos conceituais são usualmente utilizados; na literatura científica nacional vê-se uma variada disparidade e dissonância em relação aos termos. Como se apresenta: “Afloramento natural do lençol freático” (BRASIL, 2021a), “Olho D’Água” (CONAMA, 2002), “Fontes” (CALHEIROS et al., 2009), “Gênese do rio” (BAPTISTA, 1971), “Cabeceira de rio/local onde brota a água da superfície da terra” (GUERRA e GUERRA, 2009) e Cacimbas (ABAS, 2021).

Os termos presentes na literatura estrangeira são comumente usados como sinônimos de “*Spring*”, mas não correspondem exatamente ao mesmo conceito, nem estabelecem um consenso quanto à sua definição, como por exemplo: “*Springwater*” (KHADKA e RIJAL, 2020; WHITE, 2010; FOTOUHI e KREŠIĆ, 2010), “*Groundwater spring*”, (POURTAGHI e POURGHASEMI, 2014; CORSINI et al., 2009), “*Groundwater-dependent ecosystems- (GDEs)*” (TÓTH et al., 2022), “*Hydrogeological Windows*” (POZDNYAKOVA et al., 2016), “*Channel head*” (JULIAN, 2018; WOHL, 2018; KAMPF e MIRUS, 2013; JULIAN et al., 2012), “*Springhead*” (GREEN et al., 2014) e “*Water table outcrops*” (BRESCIANI et al., 2016). Conceitos estes confusos, que de acordo com Felipe e Magalhães Júnior (2020) não se configuram como uma nascente, do ponto de vista acadêmico.

Outro termo bastante comum na literatura nacional é o de “cabeças de canais”, termo ambíguo. Cabeças de canais ou “*Channel heads*” (Figura 1), como encontrado na literatura internacional, refere-se aos fluxos superficiais concentrados de encosta e os “*Channel heads*”, podem ou não ser resultantes do fluxo de nascente (JULIAN, 2018; JULIAN et al., 2012; KAMPF e MIRUS, 2013; WOHL, 2017; MONTGOMERY e DIETRICH, 1988). Nesta concepção, as nascentes seriam tratadas como qualquer local com disponibilidade de água na formação dos canais de 1ª ordem, o que é conceitualmente conflitante. Segundo Felipe (2009) as cabeceiras de drenagem correspondem, geralmente, a formas côncavas à semelhança de anfiteatros erosivos que concentram fluxos pluviais e sedimentos, funcionando como pequenas bacias de captação de água e sedimentos, as cabeceiras possuem destacada importância na proteção e conservação das nascentes.

Figura 1- Modelo de cabeceira de drenagem (A), nascentes (B), canal de 1ª ordem (C) e canal de 2ª ordem (D).



Na literatura científica, as primeiras investigações científicas sobre nascentes partiu do francês Arago em 1835 (KREŠIĆ, 2010), em contrapartida, um dos conceitos mais antigos na definição das nascentes remete a Bryan (1919) a qual refere-se que as nascentes são um local onde a água sai do solo, através dos poros em uma área considerável e flui como córregos, alimentando rios ou em alguns casos formando “pântanos” - área alagáveis à jusante; as mesmas são continuamente reabastecidas pelas camadas subterrâneas, exceto as aberturas totalmente artificiais, como poços artesianos, estes, não são consideradas nascentes.

Novas óptica conceituais e definições avançam nas discussões. Na proposta de um novo conceito para a delimitação de nascente; Felipe et al. (2013), Felipe (2013), Felipe (2009) leva em conta que alguns elementos devem preceder no entendimento da definição de nascente: a) surgimento da origem de forma natural; b) a exfiltração da água subterrânea de forma perene ou temporária; c) a formação de um canal de drenagem a jusante. Concernente a complexidade, multiescalaridade e multidisciplinariedade, o conceito proposto por Felipe (2013) reiteram que as nascentes são um “sistema ambiental natural em que ocorre o afloramento da água subterrânea de modo temporário ou perene, integrando à rede de drenagem superficial”.

Felipe e Magalhães Júnior (2013) buscando investigar a construção conceitual das nascentes com a opinião de especialistas (painel Delphi) citam que um aspecto não consensual é a consideração das nascentes como sistemas ambientais. Uma vez que a carga teórica é extremamente densa, nesse sentido, os sistemas não são facilmente aceitos por aqueles que desconhecem seus pressupostos. Ainda segundo os autores, sob uma perspectiva mecanicista, as nascentes não poderiam ser consideradas sistemas, visto que não são constituídas de partes individualizáveis. Ademais, alguns especialistas podem sugerir que a abordagem das nascentes como sistemas ambientais apenas torna mais complexa a compreensão do termo pela sociedade.

Inegavelmente, por meio das nascentes surgem a iniciação dos canais, portanto, é um fenômeno de limiar em que a superfície ou o fluxo subterrâneo se concentra e percorre suficiente para exfiltrar e criar uma rede hidrográfica (WOHL, 2018). Assim, uma nascente pode ser relegada espacialmente ao sistema a que pertence. Destacando sua correlação com os aspectos físicos regionais ao nível de detalhamento (SILVA et al., 2022) e sua dinâmica, quanto as características hidrológicas, estruturas geológicas, topológicas, fraturas (densidade, abertura e conectividade) e ecológicas das nascentes, variáveis que vão fornecer subsídios de classificação aos tipos de nascentes na paisagem (POURTAGHI e POURGHASEMI, 2014; SPRINGER et al., 2008).

Springer et al. (2008) mencionam que os sistemas de classificação variaram de acordo com as necessidades de classificação e a quantidade e qualidade das informações coletadas

sobre as nascentes. Nesse sentido, os modelos não são uniformes para todas os ambientes de nascentes na superfície terrestre. Além disso, Amor et al. (2022) cita que não se pode esperar que qualquer hidrossistema de nascente seja semelhante em sua condição em vias de equilíbrio e naturalidade estrutural.

Diferentes critérios têm sido utilizados na classificação das nascentes, seja com base na origem, nas variações ambientais da paisagem ou em outros interesses ditados pelos interesses dos pesquisadores. Ao longo do tempo, uma série de pesquisadores tem direcionado seus esforços à investigação dos fatores geomorfológicos, ecohidrológicos e antropogênicos em ambientes de nascentes, destacando aqui alguns dos trabalhos relevantes na literatura científica:

Stevens et al. (2021) utilizaram-se de um sistema de nomenclatura por chave dicotômica para distinguir a geomorfologia, função ecossistêmica e a ocorrência de espécies raras ou endêmicas; Reiss e Chiffard (2015) investigaram a estrutura e função ecohidrológica de substratos de nascentes; Reiss (2013) apresentou uma abordagem teórica hierárquica do conceito estrutural espacial hierárquica para nascentes, com base na ecohidrológica; Krešić e Stevanovic (2010) exibiram uma coletânea sobre estudos de nascentes, acerca do mundo; Springer et al. (2008) apresentou um sistema de classificação de nascentes, incorporando geomorfologia, hidrologia, geoquímica, ecologia e gestão de critérios; Todd e Mays (2005) estuda a importância das nascentes e aplicabilidade de um estudo de caso no aquífero Edwards, no estado do Texas, EUA; Fetter (2001) destaca a influência do relevo como mecanismo para a formação das nascentes; Linsley e Franzini (1979) cita a relação do fluxo de nascente com os aquíferos de variadas extensões e permeabilidades; Meinzer (1965) propôs uma classificação de magnitude de descargas de água em nascentes; Davis e De Wiest (1967) mencionam os tipos de nascentes sob a perspectiva geológica; Bryan (1919) define o termo nascente e classifica os processos em torno da origem geológica das nascentes.

Nas pesquisas nacionais é importante destacar alguns estudos expressivos: Moura (2020) propôs um procedimento de avaliação de qualidade ambiental de nascentes, para a gestão ambiental e dos recursos hídricos; Luiz (2019) analisou a complexidade das nascentes, reforçando nascente como sistema complexo; Rosso Pinto (2019) analisou os parâmetros, indicadores e ferramenta ao monitoramento de nascentes, para propor ferramenta de avaliação integrada; Marangon (2017) investiga a determinação dos fatores hidrogeomorfológicos em três nascentes, em Rio Negrinho – Santa Catarina; Menezes (2017) estudou a influência de variáveis ambientais e a distribuição da fauna bentônica em nascentes tropicais de área protegidas; Silveira (2016) investigou a contribuição dos fatores ambientais e estruturação da comunidade de invertebrados em nascentes em Juiz de Fora – Minas Gerais; Queiroz (2015) propõem a

aplicação de modelos conceituais no emprego de instrumentos de proteção para as nascentes; Oliveira (2014) avaliou as contribuições das nascentes para a sustentabilidade hidroambiental de agricultores familiares em assentamentos rurais; Felipe (2013) aprofunda sobre os processos hidrogeomorfológicos que levam à genese das nascentes; Miqueloni (2011) investigou as perdas de solo em uma área de nascentes; Felipe (2009) propõe uma tipologia de nascentes por avaliação por multicritérios e o estudo precursor de Valente e Gomes (2005), uma das primeiras publicações que especifica nas nascentes, embora ainda restrito, propuseram uma classificação básica para as nascentes, enfatizando a origem geológica e vazão.

Assertivamente, diversos processos podem ser compreendidos a cerca do sistema hidroambiental de nascente. Os temas são inesgotáveis e complexos, exigindo uma abordagem integrada e multidisciplinar para entendimento dos processos ligados a paisagem, em diversas escalas de análise. Springer et al., (2008) mencionam que muitas das análises tenham se concentrado na água e no ponto de descarga, termos mais recentes e adequados têm sido desenvolvidos para classificar nascentes além do ponto de descarga; caracterizar a geomorfologia do canal da nascente, o contexto biogeográfico da nascente, biota associada, e valores culturais, usos e gestão. A falta de um sistema abrangente de classificação de nascentes resultou em inventários, avaliações ecológicas e medidas de conservação insuficientes e inadequadas para esses ecossistemas.

De forma mais simplificada e baseados na literatura hidrogeológica estrangeira, como Linsley e Franzini (1979) e Meinzer (1965), Valente e Gomes (2005) apresentaram uma classificação básica para as nascentes, enquadrando-as quanto à sua origem geológica e sua vazão. Esta classificação foi uma das primeiras no Brasil, discutindo a relação das nascentes com a sua origem hidrogeológica, classificando-as em três posições geológicas: 1) lençóis freáticos (apenas depositados sobre as camadas impermeáveis), 2) artesianos (confinados entre duas camadas impermeáveis), podendo surgir por contatos das camadas impermeáveis com a superfície, 3) afloramento dos lençóis em área de depressão de terreno, 4) falhas geológicas ou 5) por canais cársticos.

Ainda segundo os autores, as nascentes de contato/encosta e as de depressão (Quadro 1) são mais comuns, são provenientes de lençóis freáticos. As nascentes de encostas, normalmente surgem no sopé dos morros, já as de depressão podem aflorar em pontos de borbulhamento bem definidos, conhecidos com olhos d'água ou por pequenos vazamentos superficiais espalhados por uma área que se apresenta encharcada, sendo conhecida com nascentes difusas. As originadas de lençóis artesianos (Quadro 1), podem ocorrer em encostas, aflorando entre duas camadas impermeáveis, responsável pelo confinamento dos lençóis. Por fim, as nascentes de

falhas geológicas (Quadro 1) ocorrem em pequenas falhas geológicas, onde água aflora entre as fissuras da rocha e de rochas cársticas (Quadro 1), por meio de canais e galerias formadas em rochas carbonatadas, que podem ser alimentaas pela água da chuva.

Quadro 1- Classificação básica de nascentes quanto à origem geológica.

Origem geológica	Nascentes	Características
Lençóis freáticos	Encosta	Sobre as camadas impermeáveis/ surgem no sopé dos morros
	Depressão	Ocorrem em áreas de depressão, aflorando em pontos de borbulhamento ou encharcamento do solo
	Difusas	Pequenos vazamentos superficiais, formando olhos d'águas ou encharcamento do solo
Artesianos "Aquíferos"	Lençóis artesianos	Podem ser de contato/encosta, ocorrendo em regiões montanhosas, com fortes declives. O afloramento se dá entre duas camadas impermeáveis, que confinam os lençóis
Falhas geológicas	Falhas geológicas	Provenientes de pequenas falhas geológicas, a água pode aflorar entre essas fissuras
Rochas cársticas	Rochas cársticas	Ambientes de rochas carbonatadas/Formação de canais e galerias, alimentadas pela água da chuva, através de dolinas

Fonte: Valente e Gomes (2005), elaboração pela autora.

Quanto a classificação de vazão, as nascentes dos cursos d'água são tidos como: perenes, intermitentes, temporários/efêmeros. As nascentes perenes se manifestam durante o ano inteiro, embora em épocas muito secas e em locais formado de material muito poroso, o seu ponto de afloramento pode ficar muito difuso. As nascentes intermitentes, afloram durante a estação chuvosa e secam durante estação seca; as mesmas, em anos muito chuvosos, podem dar a impressão de serem perenes. As nascentes temporárias ou efêmeras ocorrem somente em resposta direta à precipitação (VALENTE e GOMES, 2005).

Em alguns casos mais recentes, a aplicação de modelos matemáticos e algoritmos estatísticos representa um espectro no fornecimento e na tomada de decisão na classificação de nascentes. A título de exemplo, Felipe (2009) emerge com a proposta de reclassificação de nascentes pela estimativa estatística de máxima verossimilhança, método "*grade of membership*" – GoM, que se baseia na teoria dos conjuntos nebulosos, considerando uma variedade de critérios característicos de modo relacional (morfologia da nascente, tipo de exfiltração, existência de contato, vazão média anual, razão de vazão, migração, profundidade média do manto geológico, posição dos afloramentos rochosos e sazonalidade). A partir da

combinação de valores atribuídos a cada critério, uma nova nomenclatura foi elaborada pelo autor: k1 - freática, k2 - dinâmica, k3 - sazonal erosiva, k4 - flutuante, k5 - sazonal de encosta e k6 - antropogênica.

Um crescente tema na literatura científica que tem ganhado destaque é a ecohidrogeologia/ecohidrologia das nascentes, proposta por finalidade convergir a interdisciplinaridade de abordagens para melhor compreender as ligações entre superfície e subsuperfície. Esta vertente ressalta a importância de investigar as nascentes como ecótono/ecossistema, sendo necessário integrar todas as características fisiogeográficas, inseridas nas zonas de transição relacionadas à nascente (STEVENS et al., 2021; CARTWRIGHT et al., 2020; CANTONATI et al., 2020; REISS e CHIFFLARD, 2015; REISS, 2013).

3.1.1 Estrutura espacial dos sistemas hidroambientais de nascente

O contexto ambiental das nascentes envolve um conjunto abrangente de características condicionantes da paisagem, inter-relacionadas e dinâmicas, que ditam a sua organização sistêmica e sua multiplicidade de componentes: litológicas, geomorfológicas, pedológicas, hidrológicas, climáticas e da ação antrópica. Seguindo a classificação Geossistêmica de Sochava (1978) as nascentes estão inseridas em correspondência a *Fácies locais*, “menor unidade de avaliação no geossistema”.

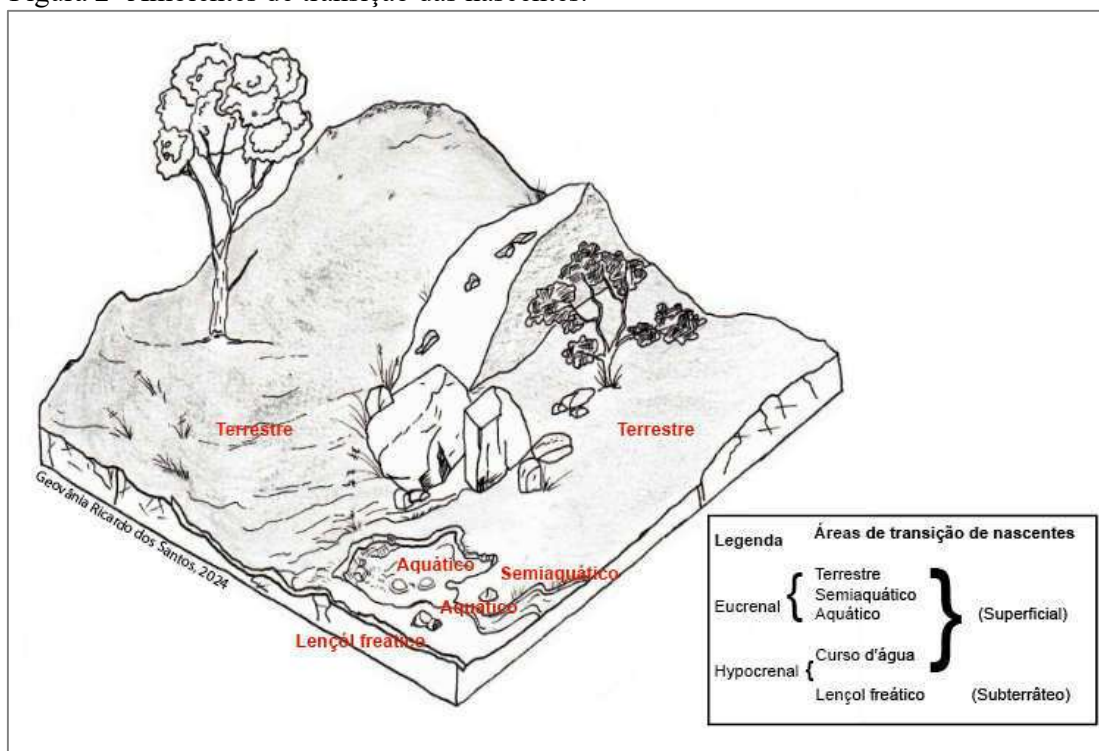
O interesse pelo método sistêmico foi difundido à medida que as investigações das relações complexas foram observadas. O “sistema” é um todo complexo, único, organizado, formado por conjunto, combinação de objetos ou partes, que muda constantemente devido ao metabolismo de suas partes inter-relacionadas em um todo integral e que suas funções (fluxos de energia, matéria e informação) atua como um todo (RODRIGUEZ et al., 2022).

Entre os diversos argumentos e contra-argumentos, a abordagem de investigativa, fundamentada em uma estrutura espacial hierárquica para habitats das nascentes, contribui para ilustrar e compreender as relações funcionais, estruturais e de processos em diferentes escalas (Quadro 4 e Figura 2). Cada tipo de substrato é organizado na escala de micro-habitat (ou nanoescala) e pode ser visto como a menor unidade de habitat como uma área menor relativamente homogênea onde a dinâmica ocorre (REISS, 2013).

Embora as nascentes tenham tamanho pequeno, suas estruturas e funções são componentes integrados, interligados aos diversos elementos da paisagem. Devido sua complexidade, diversos processos podem ser observados em cada substrato. Nesse contexto,

destaca-se a importância, do ponto de vista ecohidrológico de estudar as nascentes como um ecótono, incluindo suas zonas de transições: áreas aquáticas, terrestres e semiaquáticas (Figura 2). Estas diferenciações podem auxiliar na compreensão nas relações abióticas e bióticas. Lista-se aqui algumas propriedades potenciais a investigação, como tipo e estrutura da vegetação, material rochoso de origem, posição/inclinação topográfica, regime de fluxo da nascente, rugosidade da superfície e textura do solo (REISS e CHIFFLARD, 2015).

Figura 2- Ambientes de transição das nascentes.



Fonte: A autora, adaptado de Reiss e Chiffard (2013).

Stevens et al. (2021) destaca a importância da geomorfologia para a criação de um modelo conceitual, funcional e tipológico do ecossistema de nascente, enfatizando a proeminência da geomorfologia de origem específica do local. Em outras palavras, a integração das interações físicas, bióticas e antrópicas pode fornecer os tipos de nascentes mais definitivos e menos ambíguos para diferenciar os vários tipos de nascentes. Cantonati et al. (2020) enfatizam a importância da colaboração multidisciplinar como estratégia para expandir as perspectivas conceituais na identificação de processos e indicadores ecohidrogeológicos.

Para entender o comportamento e a dinâmica das nascentes, é preciso inseri-las no contexto dos sistemas de fluxo de águas subterrâneas em escala de bacia, pois a caracterização apenas local das nascentes não oferece informações sobre o sistema como um todo. Além de

descrever adequadamente os processos de fluxo de águas subterrâneas, a abordagem em escala de bacia pode ser aplicada a qualquer tipo de material geológico, incluindo aquíferos porosos, fraturas e cársticos, desde que os efeitos locais sejam representativos de uma região mais extensa (TÓTH et al., 2022).

As nascentes são ambientes locais que fazem parte de um sistema hidrogeológico mais extenso, como as bacias subterrâneas. Nesse sentido, do ponto de vista hidrogeológico, os modelos de classificação de nascentes se agrupam com base em características específicas da paisagem (TÓTH et al., 2022; KREŠIĆ, 2010). Por exemplo, em bacias subterrâneas com continuidade hidráulica, o fluxo de águas subterrâneas é predominantemente impulsionado pela ondulação do lençol freático que acompanha as variações topográficas. Esse fenômeno é conhecido como fluxo de águas subterrâneas regionais por gravidade - “*Gravity-Driven Regional Groundwater Flow – GDRGF*” (MÁDL-SZÖNYI e TÓTH, 2015). Se houver um conjunto de dados mais abrangente disponível, incluindo parâmetros como ecologia, geoquímica, geomorfologia e uso da terra, pode-se fazer uma classificação mais acurada dos ecossistemas de nascente, produzindo um resultado refinado que enfatiza a relevância de indicadores mais específicos (TÓTH et al., 2022).

A ecohidrogeologia das nascentes tem recebido pouca atenção da ciência e pouco reconhecida como merecedora de proteção pelos agentes públicos e pelas comunidades de gestão/governança. O estudo das nascentes tem sido dificultado pelo conhecimento altamente incompleto de sua distribuição, densidade e tipos em paisagens (CANTONATI et al., 2020). As características climáticas, edáficas (relacionadas ao solo), geológicas e topográficas, em escalas amplas para zonas de recarga e em microescalas para locais de descarga, forneceram subsídios ao entendimento da nascente, sendo assim, auxiliarão na identificação de refúgios estáveis (CARTWRIGHT et al., 2020).

Uma estrutura espacial para estudar as dimensões e classificações das nascentes podem esclarecer as relações entre a rede fluvial e a bacia hidrográfica. Dessa forma, cada nível de processo espacial-funcional pode ser subdividido em esquema detalhado de parâmetros. Para ilustrar, alguns itens prioritários são particularmente úteis na elaboração de classificações: Medições *in loco* (testes físico-químicos e organolépticos); Hidrogeomórficos (aspecto de exfiltração, tipo de nascente, sazonalidade, mobilidade); Estado morfoestrutural (substrato, forma topográfica, direção de fluxo de água, situação em encosta, inclinação, exposição aos raios solares); Fauna (presença de invertebrados, como animais anfíbios, fauna edáfica); Vegetação (espécies dominantes, composição dos estratos) (REISS, 2013).

3.2 Dinâmica subterrânea e superficial dos sistemas de nascentes

Por um longo período, a identificação hidrogeológica de variáveis potenciais focou-se nas águas subterrâneas e no ponto de descarga. Contudo, a relevância dos ecossistemas de nascentes vai muito além do ponto de exfiltração, estendendo-se tanto rio abaixo quanto lateralmente para fora da nascente (STEVENS et al., 2021). Nas nascentes que se originam as redes de canais, determinando o início do fluxo de água e sedimentos. Além disso, a partir das nascentes, dependem a formação estrutural da paisagem e de processos geomorfológicos, que controlam o comprimento e velocidade do movimento da água e dos sedimentos, o armazenamento da água da chuva e a vazão (WU et al., 2019).

A presença das nascentes está principalmente ligada ao movimento das águas subterrâneas em direção à superfície, além de uma variedade de fatores geoambientais (RAHMATI, 2018; OH et al., 2011). Dentre essas variáveis, destacam-se as características hidrológicas, as formações geológicas, topológicas, fraturas (densidade, abertura e conectividade) e os elementos ecológicos das nascentes, que oferecem suporte para a classificação dos tipos de nascentes na paisagem (POURTAGHI e POURGHASEMI, 2014; SPRINGER et al., 2008). Assim, as nascentes são elementos da superfície do solo que, em certos momentos, são afetados pela dinâmica superficial e, em outros, pelo fluxo das águas subterrâneas (STEVENS et al., 2021).

Os ambientes das nascentes estão integrados a vários elementos da paisagem, desde a recarga de água até a exfiltração. Ao longo desse trajeto, há uma mudança entre a água superficial e a água proveniente do subsolo, sendo que esta última condiciona uma característica significativa no componente físico-químico da água. Isso ocorre porque as características da qualidade da água estão diretamente relacionadas ao local de descarga e a todo o sistema de fluxo. Nesse cenário, ressalta-se a importância de uma abordagem abrangente na caracterização das nascentes, uma vez que são ambientes que demandam uma perspectiva multidisciplinar e transdisciplinar em todas as escalas de avaliação (TÓTH et al., 2022).

Sob essa ótica, o processo de exfiltração de água da nascente ocorre pela diferença de elevação entre carga hidráulica do aquífero e a superfície terrestre naquele ponto. Isso ressalta a importância da geologia na formação dos aquíferos, bem como na acumulação e movimentação das águas subterrâneas, além de afetar a qualidade química dessas águas, em virtude das interações entre rocha e água (KHADKA e RIJAL, 2020). Estudos demonstraram a inter-relação hidráulica entre blocos de rochas e aquíferos, evidenciando como essas relações

fazem parte do sistema dos padrões de fluxo das águas subterrâneas e das manifestações das nascentes (TÓTH, et al., 2022).

Outros fatores importantes, como a presença de fraturas e falhas geológicas, raízes de plantas, camadas de solo ou rochas com diferentes níveis de permeabilidade, além de afloramentos rochosos a jusante ou a montante da nascente, contribuem para o afloramento da água subterrânea e para o sistema de fluxo de água (PESCIOTTI et al., 2010). Essa interação difere conforme os sistemas de fluxo, que são classificados em níveis: local, intermediário ou regional.

O relevo, que exerce um papel crucial no transporte e na sedimentação fluvial, afeta tanto o processo de infiltração da água no solo quanto a interação entre blocos de rocha e água. De modo geral, a absorção pelo solo durante a infiltração e recarga do lençol freático superficial diminui à medida que o declive do solo aumenta. Contudo, é importante destacar que os diferentes tipos de solo também influenciam nesse processo (OLIVEIRA et al., 2018). No que diz respeito aos padrões de escoamento, os fatores da paisagem, como topografia, geologia, clima, vegetação e uso da terra, determinam os mecanismos que iniciam o fluxo (JULIAN, 2018).

Os sistemas de fluxo de água localizado nas áreas superficiais da bacia apresentam variações entre altitudes elevadas e reduzidas, com temperaturas da água baixas e ampla flutuação na vazão. Por outro lado, os sistemas de fluxo intermediário têm profundidades subterrâneas maiores, com trajetos mais extensos e temperatura da água de descarga ligeiramente mais altas. Finalmente, nos sistemas de fluxo regional, a única área de descarga é a depressão topográfica, situada na parte mais profunda da bacia subterrânea, onde a temperatura da água é elevada, o tempo de deslocamento é extenso e a vazão é reduzida (TÓTH et al., 2022).

No fluxo hídrico de base, as nascentes e as águas subterrâneas sustentam maioria das redes de fluxo perene natural em paisagens. Isso resulta na formação de ecossistemas de nascentes, caracterizados por uma rica biodiversidade, vegetação típica, diversidade geomorfológica e produtividade biocultural. Esses ecossistemas envolvem interações físicas, biológicas e humanas. No entanto, a comunidade científica ainda não chegou a um acordo sobre a sua classificação devido à diversidade de micro-habitats. Desse modo, a classificação das nascentes transcende uma mera condição geológica ou geomorfológica, sendo entendida como um ecoidrosistema (STEVENS et al., 2020).

Na hidrogeologia, rochas fraturadas incluem todos os tipos de rochas, principalmente as plutônicas ou metamórficas. O fraturamento das rochas abrange qualquer forma de ruptura,

incluindo juntas e falhas. As fraturas desempenham um papel essencial no fluxo de águas subterrâneas, uma vez que podem facilitar o movimento da água em rochas impermeáveis. Esse fenômeno é denominado “porosidade secundária”, em oposição a outros tipos de rochas, que apresentam “porosidade primária” (porosidade dos poros) (TROEGER e CHAMBEL, 2021).

3.3. Diagnósticos ambientais para avaliação da qualidade da água em nascentes

3.3.1 Aspectos físico-químicos e microbiológicos da água

Os diversos usos de água englobam uma variedade de fatores ligados à qualidade e a quantidade. A qualidade da água das nascentes é definida pela interação entre águas superficiais e subterrâneas, porém sua qualidade é majoritariamente afetada pelas práticas locais de descarte de resíduos e descarga de águas residuais e lançamento de águas residuais. Isso ocorre porque as toxinas podem penetrar no solo e nas rochas, impactando os recursos hídricos subterrâneos e provocando mudanças físicas e substanciais na qualidade da água (DAGHARA et al., 2019). A configuração do ciclo hidrológico permite a alteração de estado físico da água e sua interação com os variados ambientes, conferindo-lhe uma composição química ao longo das diversas fases do ciclo (PIRATOBA et al., 2017).

As nascentes, por serem ambientes sensíveis aos processos de poluição, evidenciam os processos de exfiltração das águas subterrâneas, que geralmente apresentam uma qualidade superior à das águas superficiais em áreas afetadas pela atividade humana. Quando a água chega à superfície e interage com o ambiente externo, ela pode passar por diversas reações geoquímicas, que são afetadas pela composição dos materiais do substrato, pelas condições climáticas, pela cobertura vegetal e pelas ações humanas (FELIPPE et al., 2013; MAGALHÃES JÚNIOR et al., 2018). Portanto, é necessário realizar periodicamente a avaliação do grau de potabilidade, que deve garantir a ausência de contaminantes orgânicos, inorgânicos e de organismos patogênicos, conforme as normas estabelecidas pelos órgãos competentes e pelo Ministério da Saúde (NASCIMENTO et al., 2019).

A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, estabelece os valores aceitáveis para as propriedades físico-químicas e microbiológicas das águas doces, salinas e salobras. A qualidade das águas é definida pelos limites individuais de cada substância e propriedade avaliada, de acordo com os diferentes usos a que se destina. De acordo com Santos et al. (2019), o monitoramento da qualidade das águas

é essencial para evitar problemas mais sérios, pois possibilita a adoção de medidas antes que os contaminantes alcancem níveis prejudiciais à saúde humana e aos ecossistemas.

A qualidade hidroquímica da água é indicada por vários parâmetros, como pH, sólidos totais, sólidos totais dissolvidos, sólidos totais suspensos, alcalinidade, CO₂ livre, oxigênio dissolvido, dureza, teor de cloro, teor de sódio, dentre outros. A contaminação por nitrato resulta de dejetos humanos e animais, teor de nitrogênio do solo, restos de plantas, efluentes industriais e produtos químicos, infiltração e silagem através do sistema de drenagem (DAGHARA et al., 2019).

A qualidade potável da água de nascente é determinada por parâmetros físico-químicos, que variam ao longo do tempo e também é produto das diferenças na percolação de águas residuais, como a geologia, interações rocha-água e intemperismo químico (MAYA et al., 2024). Sendo assim, os valores indicativos revelam as pressões antrópicas, indicam os possíveis impactos e as pressões presentes em toda a bacia de contribuição. Apesar de oferecer uma visão parcial que precisa ser complementada com dados ambientais de outras naturezas, o estado das águas das nascentes e dos cursos d'água de baixa ordem pode auxiliar na gestão e a proteção ambiental (MAIA et al., 2021).

De acordo com o CONAMA, a qualidade da água é determinada pelos valores aceitáveis dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos, que estabelecem os padrões de potabilidade. A resolução do CONAMA estabelece exemplos de parâmetros analisados em estudos, como: a) físicos (turbidez, condutividade elétrica), b) químicos (pH, nitrito, nitrato, amônia, fósforo total) e c) biológicos (coliformes termotolerantes, coliformes totais, feofitina e clorofila “a”). A composição da água de nascente é controlada pela descarga natural (com propriedades físicas, químicas e biológicas variáveis), pela natureza dos minerais presentes na área (AHSAN et al., 2021) e pelas atividades antrópicas (AMEEN, 2019).

Dentre os compostos dissolvidos na água, destacam-se: os nutrientes que contribuem para a eutrofização, como os compostos de nitrogênio (amônia, nitrito, nitrato) e de fósforo (fosfato); compostos de ferro e manganês, que têm a capacidade de passar pelas estações de tratamento de água na forma dissolvida (reduzida quimicamente), mas que posteriormente podem se precipitar por meio de oxidação química, na rede de distribuição, resultando em água com coloração avermelhada ou amarronzada, compostos orgânicos, metais pesados, além de alguns cátions (sódio, potássio, cálcio, magnésio) e ânions (carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloretos) (BRASIL, 2006).

A turbidez é um indicador da qualidade da água que mede a clareza relativa da água, levando em conta a presença de partículas orgânicas e minerais em suspensão, além de

substâncias que causam coloração. Níveis elevados de turbidez, causados por partículas sólidas em suspensão, geralmente resultam da presença de transporte rápido que conectam a água superficial ao aquífero. Valores baixos de turbidez, dependendo de outras variáveis, podem indicar a ausência de contaminação (AMEEN, 2019). Nas águas subterrâneas, a turbidez é um indicativo de poluição, resultante da decomposição de matéria orgânica e do descarte inadequado de resíduos sólidos domésticos, industriais e águas residuais (DAGHARA et al., 2019).

Ademais, a condutividade elétrica (EC) é utilizada para estimar os Sólidos Totais Dissolvidos (TDS), e há uma correlação significativa entre TDS e EC. A condutividade elétrica fornece uma medida direta dos Sólidos Totais Dissolvidos, permitindo o controle da concentração de compostos químicos dissolvidos e da contaminação mineral na água. Os valores elevados de TDS em um corpo hídrico podem ser decorrentes do intemperismo natural de determinadas rochas sedimentares ou de atividades antrópicas, como descarga de irrigação, efluentes domésticos e efluentes de esgoto. Na maioria dos locais amostrados, os valores de TDS foram significativamente mais altos durante a estação chuvosa (AMEEN, 2019).

A condutividade elétrica (CE) é uma medida da presença de sais dissolvidos na água, responsáveis por conduzir a corrente elétrica. A dureza total (mg/L) é definida como a soma dos teores de magnésio e carbonato de cálcio. O elevado teor de magnésio pode afetar o uso doméstico da água e altos níveis de dureza estão associados a problemas de saúde, como doenças cardíacas e formação de cálculos renais (DAGHARA et al., 2019).

Vários fatores estão inter-relacionados, como o aumento da temperatura, que favorece a solubilidade de diversas substâncias químicas. A distribuição das substâncias dissolvidas na água de rios e lagos é afetada pelo pH (potencial hidrogeniônico) e pela temperatura (BRASIL, 2006). O pH é um parâmetro fundamental para determinar o grau de acidez ou alcalinidade de uma solução ou da água. Ele é usado para avaliar a qualidade da água e o nível de contaminação em corpos d'água (AMEEN, 2019).

Os níveis de nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), amônia (NH_4^+) e fosfato na forma total (PO_4^{2-}) em ambientes aquosos refletem as condições ambientais da bacia hidrográfica. Suas concentrações, variando em maior ou menor grau, pode indicar manutenções ou alterações espaciais causadas pelas atividades humanas (SOUZA E GASTALDINI, 2014; SALLA et al., 2018; PINHEIRO et al., 2013).

O Nitrato é formado por meio de um processo biológico conhecido como nitrificação, no qual bactérias nitrificantes, como as do gênero *Nitrosomonas*, oxidam a amônia para nitrito e, em seguida, para nitrato. Em águas cloradas, esse processo resulta em uma diminuição das

concentrações do cloro residual, já que o cloro (agente oxidante) é utilizado na oxidação bacteriana do nitrogênio amoniacal (amônia) para nitrogênio nitroso (nitrito) (BRASIL, 2006).

O nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-) são parâmetros importantes na avaliar da qualidade da água, sendo considerados indesejáveis na água potável em virtude dos possíveis distúrbios de saúde, que podem causar, como metemoglobinemia em bebês, câncer gástrico, bócio, mal formações congênitas e hipertensão. As concentrações naturais de NO_2^- e NO_3^- nas águas subterrâneas são geralmente baixas, mas aumentam devido a atividades antrópicas, como atividades agrícolas e descarga de efluentes domésticos e de fossas sépticas. Quando os níveis de nitrito e nitrato se movem facilmente em aquíferos com alta permeabilidade, podem se acumular em altas concentrações em zonas estagnadas de baixa permeabilidade por longos períodos (LIU et al., 2021).

A poluição por nitrito e nitrato, conforme Liu et al. (2021) está frequentemente associada às atividades agrícolas em áreas cultivadas e ao lançamento de águas residuais domésticas. Quando há contaminação em grande escala das águas subterrâneas, isto pode estar relacionado ao uso extensivo de fertilizantes. A presença de fluxo preferencial ao longo dessas estruturas geológicas pode favorecer a contaminação das águas subterrâneas. É evidente que a maioria das áreas com altos riscos de concentrações de nitrato está localizada principalmente em regiões montanhosas, onde a rede de esgoto é pouco desenvolvida.

O nitrogênio e o fósforo presentes nos rios e lagos são nutrientes essenciais a cadeia alimentar. O fósforo quando presente em níveis elevados na água, estimula o crescimento de algas e plantas aquáticas, o que pode comprometer a qualidade da água para consumo humano ou para atividades recreativas (BARRETO et al., 2014).

A água não deve conter contaminações microbiológicas patogênicas para o ser humano, pois essas podem causar diversas doenças graves e de difícil tratamento (DAGHARA et al., 2019). A presença de microrganismos no ambiente aquático está principalmente relacionada à transformação de matéria dentro do ciclo dos diversos elementos. A presença de grandes quantidades de bactérias é um indicativo de contaminação fecal, uma vez que essas bactérias são comuns em esgotos domésticos. Assim, quando a água é contaminada por esgotos domésticos, é muito provável encontrar coliformes em qualquer amostra de água, ao contrário de metais pesados, que se diluem amplamente na água e muitas vezes não são detectados nas análises laboratoriais (BRASIL, 2006).

Dentre as inúmeras variáveis limnológicas passíveis de estudo, uma das mais relevantes para o interesse ambiental é o diagnóstico periódico de clorofila “a”. Esse pigmento verde,

presente na estrutura molecular de muitas espécies algais, é um excelente bioindicador da biomassa fitoplanctônica dos ambientes aquáticos, segundo Cangrejo e Rondón (2017).

A concentração de clorofila “a” juntamente com a feofitina, que é um subproduto, é um parâmetro útil em estudos sobre produtividade primária e na interpretação de resultados de resultados de análises físicas e químicas. Este indicador reflete o estado fisiológico do fitoplâncton (conjunto de microrganismos fotossintetizantes da água) e é fundamental para avaliar o grau de eutrofização de ambientes aquáticos que ocorre devido ao crescimento excessivo de algas e cianobactérias, causado pelo enriquecimento de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo (CETESB, 2014). Esse processo está relacionado à circulação das massas de água, que transportam substâncias dissolvidas, incluindo nutrientes, até a superfície, favorecendo o crescimento descontrolado de algas e plantas, o que resulta na eutrofização (BRASIL, 2006).

A eutrofização é um fenômeno biológico caracterizado pelo crescimento de organismos aquáticos autotróficos, particularmente algas (fitoplâncton) e plantas aquáticas (macrófitas), devido ao acúmulo de elementos químicos dissolvidos na água, como oxigênio, carbono, nitrogênio e fósforo (LINS et al., 2018). O acúmulo excessivo de algas, particularmente cianobactérias potencialmente tóxicas, altera a qualidade da água, gerando aumento de acidez e promovendo a decomposição de gás oxigênio (O_2) nas camadas submersas, o que torna a água imprópria para consumo (BARRETO et al., 2014).

Outro fator importante refere-se à sazonalidade pluviométrica e seu impacto no comportamento geoquímico dos sistemas hidrográficos analisados. Durante os períodos chuvosos, ocorrem frequentes evento de escoamento pluvial que transportam poluentes acumulados nas superfícies urbanas, sendo frequentemente prejudicada a qualidade dos sistemas hídricos. Assim, as águas das nascentes e cursos d'água podem ser significativamente enriquecidas por aportes geoquímicos durante as chuvas (MAIA et al., 2021).

3.3.2 Análise integrada das nascentes pelo Protocolo de Bioavaliação Rápida

Os Protocolos de Avaliação Rápidas (PARs) são relatórios metodológicos valiosos para a avaliação e monitoramento da conservação das nascentes. A abordagem dessas ferramentas é direcionada a diversas áreas de pesquisa, sendo amplamente utilizadas tanto no contexto nacional quanto internacional (MACHADO et al., 2018). O PAR foi desenvolvido com base no relatório “*Surface water monitoring: a framework for change*”, da Environmental Protection Agency – EPA dos Estados Unidos. A partir da criação dos protocolos, inicialmente

disseminado como “*Rapid bioassessment protocols* (RBPs)”, diversos relatórios foram elaborados para fornecer dados fundamentais sobre a vida aquática, com o objetivo de apoiar o gerenciamento da qualidade da água, como a triagem de problemas, classificação de locais e o monitoramento de tendências (BARBUOR et al., 1999).

Desde então, os protocolos têm sido adaptados a diferentes temas, conforme a relevância de cada pesquisa. Exemplos disso são as adaptações realizadas em estudos no Brasil: Silva (2019) avaliou os processos de eutrofização das águas superficiais em Bacias Hidrográficas na Ilha de Santa Catarina; Rodrigues e Castro (2008) ajustaram o protocolo de avaliação rápida para trechos de rios de alto e baixo curso situados em campos rupestres, no Parque Estadual do Itacolomi, em Ouro Preto-MG; e Callisto et al. (2002) utilizaram o protocolo como ferramenta pedagógica e de pesquisa para compreender a diversidade de habitats em ambientes fluviais.

O Protocolo de Avaliação Rápida (PAR) é uma ferramenta de gestão ambiental eficaz na avaliação dos diversos aspectos dos ecossistemas fluviais, sendo especialmente útil no monitoramento dos recursos naturais. Dado que os recursos financeiros destinados ao monitoramento e à avaliação ambiental no setor público frequentemente são limitados, o PAR se apresenta como uma excelente opção para órgãos ambientais públicos, pois contribui para a tomada de decisões nas políticas públicas. Com a análise dos dados coletados, é possível obter uma visão abrangente da realidade ambiental, especialmente no que se refere aos recursos hídricos (MACHADO et al., 2018; RODRIGUES e CASTRO, 2008).

Os PARs abordam diversos aspectos, como a possibilidade de envolver a comunidade na aplicação e interpretação dos resultados, o que contribui para a educação ambiental da população sobre os recursos hídricos e a importância de sua conservação e preservação (MARTINS e BISPO, 2021). A utilização dos PARs como ferramenta de avaliação, em conjunto com as análises tradicionais de qualidade da água, confere à avaliação ambiental uma abordagem holística no monitoramento, diferenciando-se de um cronograma focado apenas nos aspectos físico-químicos e microbiológicos da água, como tem sido adotado por algumas agências brasileiras (RODRIGUES e CASTRO, 2008).

O Protocolo de Avaliação Rápida deve ser aplicado regularmente para avaliar as condições momentâneas, do estado atual e as características visuais do habitat (RODRIGUES et al., 2020). Inicialmente, diversos parâmetros descritivos são atribuídos a pontuações, e dependendo da convenção estabelecida para esses parâmetros, os valores obtidos são somados. Uma pontuação baixa indica áreas impactadas, uma pontuação intermediária sugere áreas alteradas e valores elevados indicam áreas em boa condição de conservação. O objetivo é

identificar os processos de distúrbios antrópicos ao longo do curso do habitat e avaliar a integridade física do meio aquático (FERNANDES et al., 2022; SILVA, 2019).

É neste contexto que os PARs se destacam como instrumentos valiosos, levando em consideração a análise integrada da qualidade da água, com uma metodologia simples, acessível e viável para aplicação por profissionais treinadas. Em uma avaliação que prioriza os aspectos físicos do habitat, também são necessários parâmetros relacionados à geomorfologia, ecogeomorfologia, hidrologia e sedimentologia (RODRIGUES e CASTRO, 2008), sendo a proposta relevante para a análise desses variados parâmetros.

Campos et al. (2021) ao avaliar ecossistemas fluviais em uma paisagem urbana e a aplicabilidade do PAR como referencial prático na educação, destacaram a necessidade de adaptar a ferramenta à área de estudo. A pesquisa evidenciou a aplicabilidade do PAR como um processo recursivo e sistemático, permitindo sua utilização tanto na avaliação de ecossistemas fluviais sob uma perspectiva ecossistêmica quanto como ferramenta no processo de ensino e aprendizagem, além de fomentar discussões sobre questões socioambientais na sociedade contemporânea.

A aplicação de PAR requer a definição de convenções específicas para as características da área de estudo, pois variações podem ocorrer dependendo da aplicação do protocolo. Outro aspecto importante é o fator de identificação ambiental do observador, que pode influenciar as pontuações obtidas, representando uma limitação na interpretação da dinâmica espacial. Portanto, a inclusão de maior diversidade - físicos, químicos e biológicos, aprimora a caracterização ambiental dos protocolos, fornecendo informações mais consistentes e robustos (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2020).

Isso ocorre porque os ecossistemas aquáticos são compostos por componentes e processos muito mais amplos do que aqueles abordados por uma análise focada. Uma análise mais abrangente deve integrar todos os fatores ecológicos envolvidos, bem como a inter-relação entre estas características. Neste contexto, os indicadores utilizados devem incluir aspectos da hidrologia, biologia, qualidade da água, habitat físico e da geomorfologia do sistema lótico (RODRIGUES e CASTRO, 2008).

O principal benefício da abordagem de avaliação rápida é que ela fornece aos gestores públicos um método para comparar a condição geral das bacias hidrográficas, identificando problemas que precisam de atenção e priorizando estratégias em toda a bacia hidrográfica para melhorar ou aprimorar as condições atuais, portanto, a abordagem do PAR deve ser projetada para ser flexível o suficiente para incorporar novas fontes de dados (BRINSON et al., 2013).

Celestino et al. (2019) apontam que ao utilizar o protocolo de avaliação rápida (PAR) *in loco*, é necessário atentar para algumas questões, como a dificuldade de avaliar grandes áreas e a definição aleatória dos pontos, o que pode resultar na subestimação de alguns impactos ou na falta de detalhes. Nesse caso, os resultados acabam sendo extrapolados para representar apenas padrões gerais. Outra recomendação relevante é o treinamento e padronização dos coletores. É indicado que o mesmo pesquisador realize as coletas para reduzir o erro amostral e a subjetividade em muitos pontos. Para garantir a padronização temporal da avaliação, é necessário contar com mais de uma equipe de coleta, o que se torna inviável se a coleta for feita por um único pesquisador.

3.4 Uso de geotecnologias e análise multicritério como aliada na avaliação de recarga de águas subterrâneas

Com o advento das tecnologias de sensoriamento remoto e dos sistemas de informação geográfica (SIG), mapear os processos fluviais e as zonas de águas subterrâneas dentro de cada unidade litológica tornou-se um procedimento padrão (POURTAGHI e POURGHASEMI, 2014). Desde então, diversos modelos baseados em SIG têm sido utilizados para modelagem do potencial de água subterrânea (RAHMATI, 2018), como demonstrado por Dedour et al. (2022), Ghimire et al. (2019); Chaudhary e Kumar (2018); Thirumalaivasan e Karmegam (2001).

O desenvolvimento de técnicas para obtenção e processamento de dados topográficos, especialmente na análise morfométrica detalhada do relevo, tem sido amplamente difundido como uso de MDEs de alta resolução, capturados em diferentes períodos para identificar mudanças na dinâmica fluvial. Essas medições, realizadas por meio da densidade de detecção e alcance de luz (LIDAR), bem como pela resolução do MDE, influenciam diretamente a precisão das medições e, conseqüentemente, a incerteza associada a elas. Assim, quanto maior a densidade das medições e a resolução, maior a precisão e menor incerteza das medições (PŁACZKOWSKA et al., 2021).

Diversos métodos têm sido propostos pela comunidade científica, para a identificação de nascentes, evidenciando a variedade de abordagens possíveis na análise geoespacial. Entre esses métodos, destacam-se o uso de dados topográficos (WU et al., 2019), o método DrEICH (CLUBB et al., 2014), MDEs gerados com base em Terrestrial Laser Scanning (TLS) e Airborne Laser Scanning (ALS) (PŁACZKOWSKA et al., 2021), modelo de rede irregular triangular (TIN) e comparações de fotografias aéreas com MDE (PŁACZKOWSKA et al.,

2015). Mesmo assim, nenhum destes métodos supera a capacidade de identificação e mapeamento em campo, que é o método mais eficaz.

Clubb et al. (2014) apontam algumas limitações no uso de MDEs de baixa resolução para o auxílio de localizar as nascentes, uma vez que os processos que iniciam a rede hidrográfica ocorrem em uma escala de poucos metros. Dada a limitação de dados de alta resolução gratuitos no Brasil, os pesquisadores buscam suprir essas lacunas com a realização de trabalhos de campo.

Um método comumente utilizado para a integração de dados é sobreposição ponderada, que se baseia em conjuntos de dados macroscópicos aplicados a grandes áreas, incluindo regiões de difícil acesso. Esse método fornece uma visão geral para a análise e uma avaliação rápida e econômica das zonas das águas subterrâneas. Dentre os procedimentos mais relevantes para o uso controlado dos recursos hídricos subterrâneos, destaca-se o mapeamento hidrogeológico por meio do processo hierárquico analítico (AHP) que é considerado uma estratégia eficiente, consistente e econômica (DERDOUR et al., 2022).

O AHP (SAATY, 1977) é uma aplicação matemática multicritérios, usada para calcular e estruturar o peso das camadas temáticas, atribuindo um peso relativo conforme a importância de cada fator. Cada camada temática é escolhida com base no objetivo de estudo e no conhecimento sobre a área de pesquisa, sendo comparadas em uma matriz pareada, onde se realiza a verificação estimativa da razão de consistência (CR). O resultado final indica o peso de importância de cada fator na camada temática. Todo processo pode ser aplicável em softwares SIGs.

O AHP é uma das ferramentas de tomada de decisão multicritérios mais amplamente empregadas em planejamento, seleção da melhor alternativa, alocação de recursos e otimização. As etapas do AHP envolvem a definição do problema e dos objetivos, o desenvolvimento da hierarquia, a comparação de pares, a normalização e o cálculo de consistência. O processo segue uma regra prática: aceitar apenas matrizes de julgamento com razão de consistência (CR) $< 0,1$. Na comparação de pares, são criadas matrizes de comparação e calculados os pesos de prioridade. A normalização das entradas é feita dividindo cada entrada pela soma das colunas nas matrizes de comparação de pares. Um dos indicadores de consistência é o Índice de Consistência (IC), a partir do qual a Razão de Consistência (CR) é obtida, utilizando-se um Índice Randomizado (RI) e o IC médio para matrizes preenchidas aleatoriamente (JAYASENA et al., 2020).

Kumari e Singh (2021) utilizaram mais de dez fatores temáticos para delimitar áreas de águas subterrâneas utilizando o método AHP, incluindo litologia, geomorfologia, solo,

lineamento, densidade de lineamento, declividade, relevo, aspectos, drenagem, densidade de drenagem, uso e cobertura da terra, alcançando resultados satisfatórios. Segundo os autores, esses resultados podem ser valiosos para fornecer estratégias iniciais na escolha de novas localizações e para a gestão de recursos hídricos nas áreas de bacia e estratégias de captação de água subterrânea.

3.5 Intervenções antrópicas no ambiente das nascentes

As nascentes são ecótono, áreas de fronteira ou transição entre diferentes habitats, geralmente pequenas (com apenas alguns metros quadrados), cujas estruturas e funções estão integradas ao ecossistema do ambiente, à paisagem e aos elementos maiores desta, como as modificações do uso da terra, o material rochoso do solo, a posição e inclinação do talude, além de características hidrológicas, como o tipo de nascente (regime de fluxo), a rugosidade da superfície, a vegetação/estruturas florestais e a textura do solo, que influenciam os tipos de substrato e sua composição (REISS e CHIFFLARD, 2015).

A água das nascentes são os únicos ambientes de disponibilidade de água em áreas rurais, que suprem às necessidades domésticas e diárias da população, mesmo assim, a conservação é uma questão totalmente negligenciada. O estado de intervenção é um reflexo direto da condição da água subterrânea e dos aquíferos que as alimentam e, portanto, têm um impacto direto nos riachos e em outros corpos d'água superficiais nos quais descarregam e em todos os ecossistemas dependentes. Consequentemente, muitos dos conceitos que regem a gestão dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos também se aplicam à gestão de nascentes (MAYA et al., 2024).

A intervenção antrópica é o principal agente modificador dos processos morfogenéticos das nascentes. A ciência contemporânea reconhece que o ser humano pode influenciar direta ou indiretamente os processos geomorfológicos da paisagem, especialmente no que diz respeito ao sistema de nascente. Dessa forma, essa intervenção leva à concepção de nascentes antropogênicas (MOURA et al., 2021). Segundo Felipe et al. (2013) locais onde as condições naturais não convergem para a ocorrência de nascentes, a intervenção humana pode “criar” um ambiente propício para a exfiltração, sendo chamadas de nascentes antropogênicas.

Alterações no ambiente natural podem dificultar a identificação e diferenciação entre nascentes antropogênicas, das nascentes alteradas pela ação antrópica. São duas condições totalmente distintas, sendo as nascentes antropogênicas associadas a processos erosivos e/ou de movimentos de massa de origem antrópica, enquanto nascentes antropizadas são ambientes

alterados e degradados pela ação humana. Somente na resposta pela gênese de uma nascente, é possível classificá-la, por isso, informações providas da população local são imprescindíveis, quando não há quaisquer estudos anteriores (FELIPPE, 2009).

Principal agente modificador da paisagem, o ser humano, impacta o equilíbrio ecológico e ecohidrológico das nascentes (SANTOS e SANTOS, 2021). Por esta razão, é fundamental compreender o processo dos diferentes componentes ambientais das nascentes em nível de bacia hidrográfica para a gestão, conservação e preservação dos recursos hídricos em termos de quantidade e qualidade (PIERONI et al., 2019). A Bacia Hidrográfica do Mundaú, uma região com histórico de uso e alteração da cobertura da terra, incluindo degradação ecológica, expansão de pastagens, crescimento urbano, plantação de culturas e o constante desmatamento de vegetação nativa, tem demandado uma série de ações intervencionistas para reduzir os impactos no sistema-nascente.

Na região média da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, os impactos são claramente perceptíveis. A falta de investimentos em sistemas de tratamento de esgoto doméstico, o descarte de resíduos sólidos urbanos, a ausência de mata ciliar e a ocupação agropecuária e residencial em Áreas de Preservação Permanente são fatores que intensificam os prejuízos ambientais ao leito do rio Mundaú. Além disso, a extração clandestina de areia ocorre de forma contínua, e não há incentivos por parte das secretarias municipais para a realização de campanhas educativas que promovam a participação social no gerenciamento dos recursos naturais, bem como a implementação de obras especializadas em saneamento (FERREIRA et al., 2012).

A ausência de proteção pela vegetação nativa, o acesso facilitado às nascentes, o uso frequente e a alteração da vegetação são fatores que impactaram negativamente a avaliação dos elementos naturais, destacando a urgência de estratégias de conservação (SANTOS e SANTOS, 2021). As nascentes como sistemas ambientais, são ambientes frágeis e susceptíveis à alteração do uso e ocupação da terra no seu entorno. Nesse sentido, a quantidade e qualidade da água estão condicionadas aos fatores físicos locais, como a cobertura vegetal, a permeabilidade do solo, a presença de afloramentos rochosos e as raízes das espécies vegetais (PESCIOTTI et al., 2010).

Esses diferentes padrões de uso e cobertura da terra geram contrastes significativos nas estruturas de micro-habitat de nascentes. Isso implica que o uso da terra, como uma “propriedade ecológica de mesoescala”, determinado por diferentes tipos de uso, afeta as estruturas ecohidrológicas e a biodiversidade em microescala. Dessa forma, o modo

investigativo das nascentes *in loco* é um meio essencial e compreensão e aplicação de abordagens de avaliação dos habitats de nascente (REISS e CHIFFLARD, 2015).

Diversos contextos de uso da terra são observáveis nas nascentes, os diagnósticos revelam padrões semelhantes de impactos ambientais, incluindo: 1) remoção da vegetação nativa, 2) presença de animais de grande porte, e 3) assoreamento do solo. Medidas preventivas têm se mostrado eficazes no processo de recuperação, como exemplificado pelos registros de Pereira et al. (2020) que demonstraram após ações de educação ambiental realizadas em escolas, na comunidade, e divulgação em programas de rádio em parceria com secretaria municipal do meio ambiente, na cidade de Jaraguá-Goiás, houve uma mudança positiva no comportamento da população local, destacando a importância da orientação ambiental para a preservação das nascentes.

A ausência de cobertura vegetal nativa é uma restrição significativa para uma bacia hidrográfica. Ademais, a erosão do solo também é um fenômeno frequente, que provoca o assoreamento dos rios e a perda de áreas destinadas ao cultivo ou pastoreio, além de diminuir a infiltração das águas da chuva nas camadas subsuperficiais e subterrâneas do solo. Isso provoca o escoamento rápido das águas pluviais, resultando em danos e desastres nas áreas urbanas. Por outro lado, a presença de vegetação aumenta a capacidade de infiltração das águas da chuva, o que contribui para o reabastecimento constante dos lençóis freáticos e assegura uma maior oferta de água na bacia durante todo o ano, incluindo a água subterrânea. Além disso, ajuda na conservação do solo, na melhoria da qualidade da água e a proteção de nascentes e matas ciliares, entre outros benefícios (SILVA, 2020).

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 Contexto físico-ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú

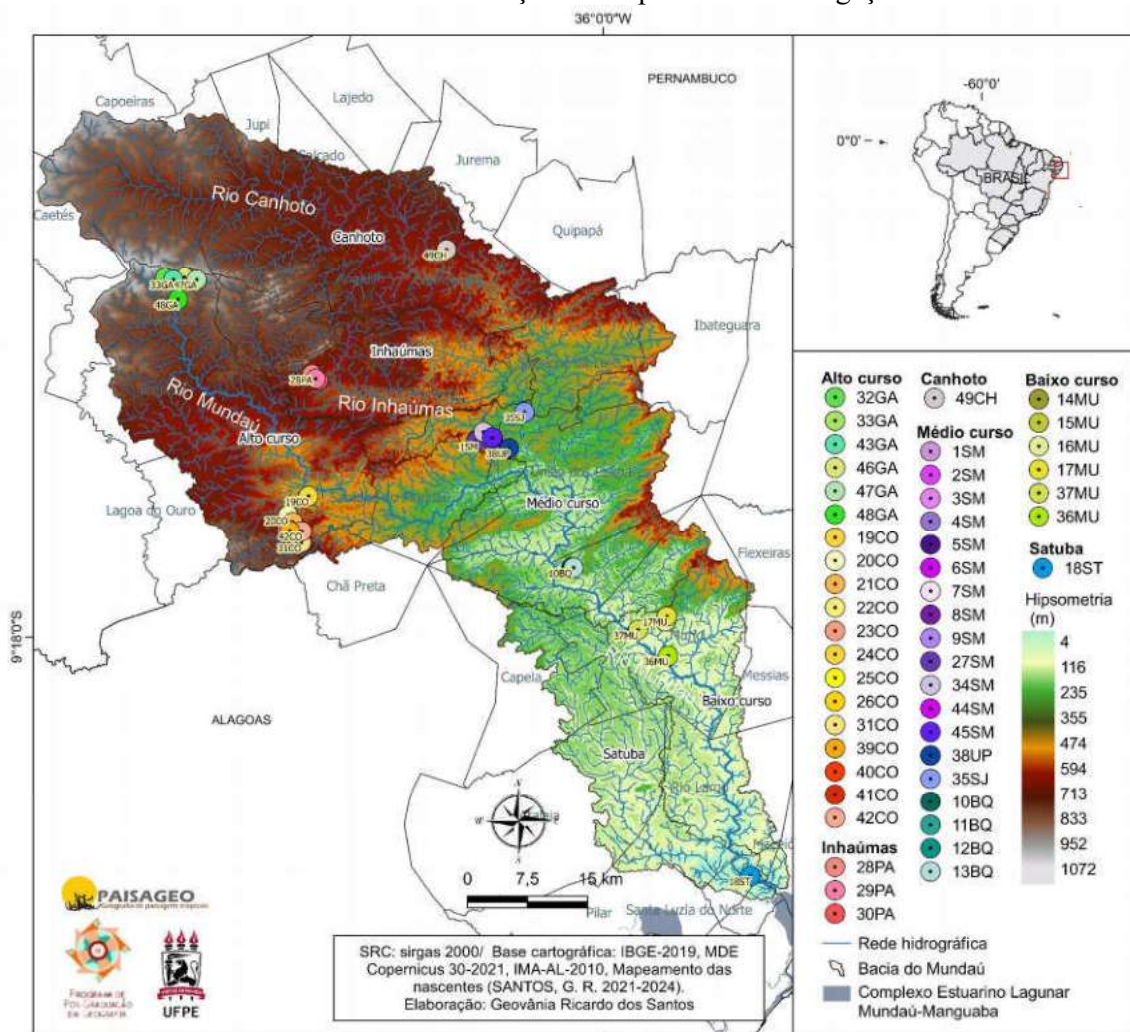
As nascentes analisadas estão situadas em variados contextos da paisagem e contribuem para diversos rios da bacia do Mundaú. A bacia localiza-se na região Nordeste do Brasil, nos Estados de Pernambuco e Alagoas (Figura 3).

As nascentes iniciais do Rio Mundaú têm início no município de Garanhuns-PE, desaguardo no território de Alagoas, no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM). Este complexo abrange um dos sistemas estuarinos mais relevantes do país e tem enfrentado 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.

O rio Mundaú, que dá nome à bacia hidrográfica é perene ao longo do ano. Os principais tributários no alto curso; são os rios Canhoto, Jibóia, Inhumas, Caruri e Ingazeira, além dos riachos do Brejo e Mundaú Mirim. No médio curso, os tributários são o rio Gravatá, rio das Antas, rio Branco Grande, rio Porto Velho e rio Cotanji, além do rio Satuba (LIMA, 2010; CENTERO e KISHI, 1994).

Figura 3- Localização das nascentes estudadas na Bacia hidrográfica do Rio Mundaú. Os números e letras de identificação correspondem à catalogação da nascente.



Fonte: A autora (2024).

A área de drenagem da bacia envolve 31 municípios (Tabela 1), sendo que 16 municípios estão no domínio de Pernambuco (Argelim, Brejão, Caités, Calçado, Canhotinho, Capoeiras, Correntes, Garanhuns, Jucati, Jupi, Lagoa de ouro, Palmeirina, São João e uma pequena parcela de Quipapá, Lajedo e Jurema) e 15 municípios em Alagoas (Atalaia, Branquinha, Capela, Chá preta, Ibateguara, Messias, Murici, Pilar, Rio Largo, Santana do Mundaú, São José da Laje, Satuba e União dos Palmares) (Tabela 1).

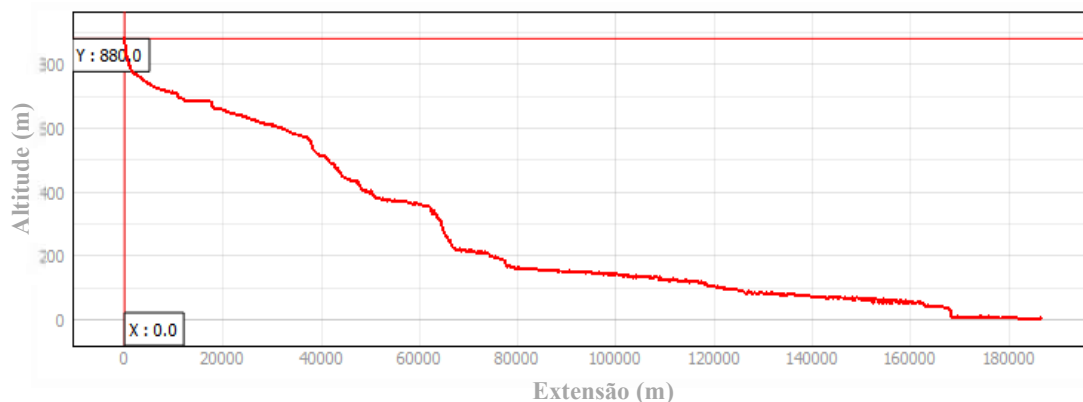
Tabela 1- Municípios inseridos total ou parcial na bacia do Mundaú.

Estado	Números de municípios	Área do município inserido na bacia (km ²)
Pernambuco	1. Argelim	118,04
	2. Brejão	110,15
	3. Caetés	57,68
	4. Calçado	56,83
	5. Canhotinho	374,16
	6. Capoeiras	86,44
	7. Correntes	317,79
	8. Garanhuns	380,51
	9. Jucati	99,06
	10. Jupi	39,23
	11. Jurema	5,30
	12. Lagoa do Ouro	81,52
	13. Lajedo	2,23
	14. Palmeirina	168,80
	15. Quipapá	6,65
	16. São João	258,33
Alagoas	17. Atalaia	154,32
	18. Branquinha	159,70
	19. Capela	83,48
	20. Chá preta	16,71
	21. Iateguara	22,59
	22. Maceió	9,19
	23. Messias	11,97
	24. Murici	383,12
	25. Pilar	17,47
	26. Rio Largo	219,39
	27. Santana do Mundaú	219,50
	28. Santa Luzia do Norte	6,32
	29. São José da Laje	253,60
	30. Satuba	28,60
	31. União dos Palmares	352,27

Fonte: A autora, com base na delimitação da BHRM com MDE Copernicus 30 mt.

A bacia do Mundaú detém um padrão de drenagem dendrítico, paralela e treliça, com canais que variam de 1ª a 7ª ordem. Ao longo do seu percurso, as cotas dos gradientes altimétricos variam de 900 a 50 metros (Figura 4), respectivamente, da nascente de cabeceira à foz (GOMES et al., 2016).

Figura 4- Perfil longitudinal do Rio Mundaú (sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso).



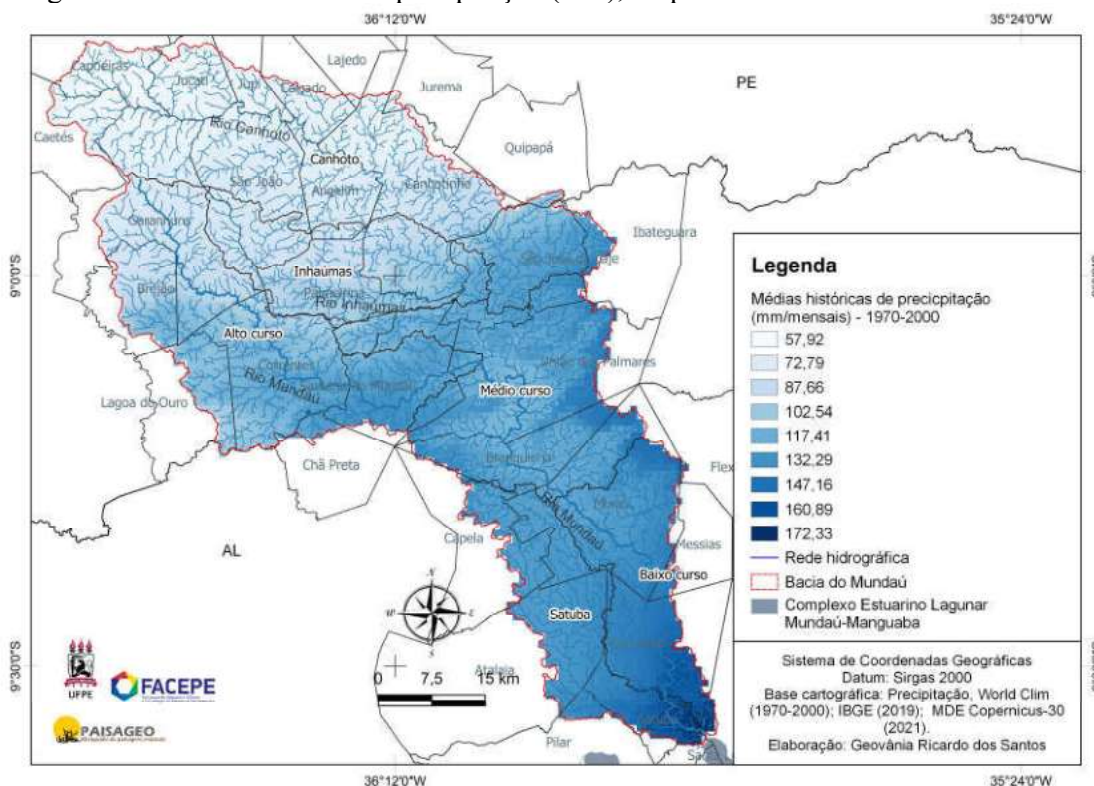
Fonte: A autora (2023), com base em MDE Copernicus 30 mt.

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), que ocorre numa pequena parcela dos municípios de Garanhuns, São João, Palmeirina, Caetés e Capoeiras e Monção (Am), na porção jusante (ALVARES et al., 2014).

No modelo climático de Gaussen, as regiões bioclimáticas são mais acentuadas e delimitadas, compreendendo clima Mediterrâneo quente ou Nordestino de seca atenuada (3cTh), na porção Norte de Oeste da bacia; Mediterrâneo quente ou Nordestino subseco (3dTh), na porção Nordeste, Leste e Sudeste; e uma pequena mancha de Mediterrâneo quente ou Nordestino de seca média (3bTh), na porção Centro-Leste (JACOMINE et al., 1973; 1975).

A distribuição das médias históricas de precipitação, para o período de 1981-2022, varia de 57,92 a 172,33 mm/mensais (Figura 5). Os valores médios de precipitação pluvial que se concentram na porção do Alto curso, variam entre as classes 72,79 e 132,29 mm/mês, na porção Médio curso, de 102,54 a 147,16 mm/mês, na porção Baixo curso, os valores se expressam nas classes de 117,41 a 172,33 mm/mês, no Canhoto, as médias variam entre 57,92 e 132,29 mm/mês, no Inhaúmas entre 72,70 e 117,41 mm/mês e no Satuba, entre os valores de 117,41 a 172,33 mm/mês (Figura 5).

Figura 5- Médias históricas de precipitação (mm), no período 1970-2000 da bacia.



Fonte: A autora (2025).

O contexto geológico da bacia Hidrográfica remonta do período Pré-Cambriano na porção norte da bacia. As rochas que se destacam são essencialmente granitos, particularmente: gnaisses, graníticos, gnaiss com hornblenda e biotita-gnaiss, milonito-gnaiss, gnaiss muscovitizado, granodiorito-gnaiss, hornblenda-gnaiss, gnaiss biotítico, gnaiss com epidoto, muscovita-biotita-gnaiss, granulito-gnaiss, anfibólio-gnaiss milonitizado, quartzo-feldspato-gnaiss e também são muito encontrados migmatitos (JACOMINE et al., 1973).

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. E, por fim, a formação geológica do Holoceno, formação mais recente, destacando-se as praias, recifes de corais e de arenito, dunas, mangues, restinga e depósitos fluviais (aluviões) e coluviais; são constituídos por sedimentos soltos ou consolidados cuja natureza granulométrica é muito variada (CORRÊA et al., 2010; JACOMINE et al., 1975).

Ainda, na desembocadura do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), bem como lagoas e pequenas depressões da faixa litorânea, normalmente

influenciados pelos movimentos das marés, encontram-se sedimentos de natureza variada, geralmente argilosos ou argilo-siltosos, onde mistura com material de natureza orgânica e sedimentos arenosos, constituindo os depósitos dos solos de mangues (LIMA, 2010; IBGE, 2007; JACOMINE et al., 1975). O domínio geomorfológico do relevo na porção pernambucana é o Contraforte da Borborema, constitui do mais elevado bloco contínuo do Nordeste brasileiro e elemento fundamental do relevo regional que comanda parte da rede de drenagem do Estado (JACOMINE et al., 1973).

A vegetação da região da bacia hidrográfica é variada, tratando-se da vegetação nativa de acordo com a classificação do IBGE (2012), na porção pernambucana, ocorre: 1) Caatinga Hiperxerófila “Savana Estépica”, caracterizada por um estrato lenhoso decidual e espinhoso; 2) Contato (Ecótono e Encrave). Dentre o Ecótono, encontram-se o contato entre tipos de vegetação com estruturas fisionômicas semelhantes, já o Encrave, diz uma área onde ocorre o mosaico entre duas regiões fitoecológicas. A maior porção entre Pernambuco e Alagoas, predomina: 3) Floresta Estacional Semidecidual, constituída de componente florestal de médio e grande porte, submetidas à queda das folhas na estação seca, vegetação é comum na faixa de clima tropical, que possui duas estações do ano bem definidas. Na porção alagoana, ressaltam-se: 5) Floresta Ombrófila Aberta e 6) Floresta Ombrófila Densa, denominada uma vegetação de folhas largas e perene que recebe intensidade de chuvas com frequência, as Abertas são árvores espaçadas livres ou completamente envolvidas de cipós, constituindo o início da paisagem colunar típica da “mata de cipó”, enquanto a Densa, caracterizam-se por um tipo de vegetação com fanerófitos - subformas de vida macro e mesofanerófitos, além de lianas lenhosas e epífitas em abundância de fatores climáticos tropicais de elevadas temperaturas (médias de 25°C) e de alta precipitação, bem-distribuída durante o ano (de 0 a 60 dias secos), o que determina uma situação bioecológica praticamente sem período biologicamente seco. Por fim, 7) Formação Pioneira, vegetação relacionada a condições ecológicas, submetidas aos processos de acumulação fluvial, lacustre, marinha e fluviomarinha.

A paisagem da região foi transformada com o processo de ocupação das áreas e do desenvolvimento da agricultura e agropecuária. O histórico de ocupação em alguns municípios, data do Brasil-Colônia, no século XVII (IBGE, 2022). Portanto, a compreensão do uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú é entendida pelo processo de organização do espaço, herdada dos portugueses, com a expansão da economia rural, destacando-se o sistema *Plantation*, a exemplo da cana-de-açúcar, que expandiu-se das regiões litorâneas para o interior (SANTOS et al., 2007).

O uso e cobertura da terra, como a expansão da agricultura, retirada da vegetação nativa, poluição e supressão dos cursos do rio Mundaú e seus afluentes, tal qual, o crescimento da urbanização é agravante das enxurradas e inundações em períodos de enchentes da bacia do Mundaú. Dados a respeito da morfometria da bacia hidrográfica indicam elevado índice de sinuosidade, com 81,46% e declividade acentuada (861 m), fator este que favorece a ocorrência de enchentes no local de abrangência (MARCUIZZO et al., 2011).

4.2 Síntese dos procedimentos

A abordagem adotada na pesquisa foi multiescalar, passando de uma análise macro (nível de bacia hidrográfica) para uma análise micro (focando nas particularidades das nascentes) (Figura 6). Nesse caso, cada item descrito a seguir diz respeito a um capítulo de análise:

Identificação, levantamento e mapeamento de campo das nascentes na bacia – Foi realizado a identificação, levantamento e mapeamento das nascentes, de modo intuitivo e de posse de dados acerca da região. Foram consideradas nascentes com a sazonalidade hidrológica, perene ou intermitente, contidas nos limites da Bacia Hidrográfica do Mundaú. Partindo da pertinência conceitual dos sistemas hidroambientais de nascentes, ambientes complexos na sua dinâmica, buscou-se a princípio localizar as mesmas e compreender seu valor espacial, já que as nascentes são as principais responsáveis no surgimento e manutenção dos rios, lagos e córregos, do equilíbrio da paisagem. Com auxílio das geotecnologias, ferramentas de geoprocessamento e sistemas de informação geográficas (SIGs), foram coletadas coordenadas geográficas das nascentes, em campanhas de campo, realizadas fotografias, sendo possível criar um banco de dados para as posteriores análises.

Caracterização das nascentes no contexto regional da bacia - Uma sobreposição entre os dados das nascentes e os componentes ambientais regionais - Geologia, Litologia, Geomorfologia, Relevo, Declividade, Solos, Textura dos solos, Vegetação primária e Uso e Cobertura da Terra – foi realizada com a finalidade de compreender e relacionar informações à nível regional e local.

Geoespacialização da recarga de águas subterrâneas na bacia, pelo método AHP – Para a identificação da condição da recarga das águas subterrâneas, os componentes/fatores ambientais foram utilizados para compor uma matriz relacional e por fim, a geração do mapa de estado da recarga subterrânea na bacia do Mundaú. O método matemático Analytic Hierarchy Process (AHP) utilizado, define pesos e elenca a importância das variáveis a partir

da integração de dados. Dados de vazão estabilizadas de poços (m^3/h) foram utilizados para comparações, de modo a validar as análises.

Estrutura espacial hierárquica e diagnóstico ambiental das nascentes – Neste tópico as nascentes foram dispostas em um sistema espacial hierárquico, de modo a organizar características de mesoescala da bacia do Mundaú e de microescala da nascente, sendo possível compreender os diversos contextos ambientais em torno da paisagem das nascentes.

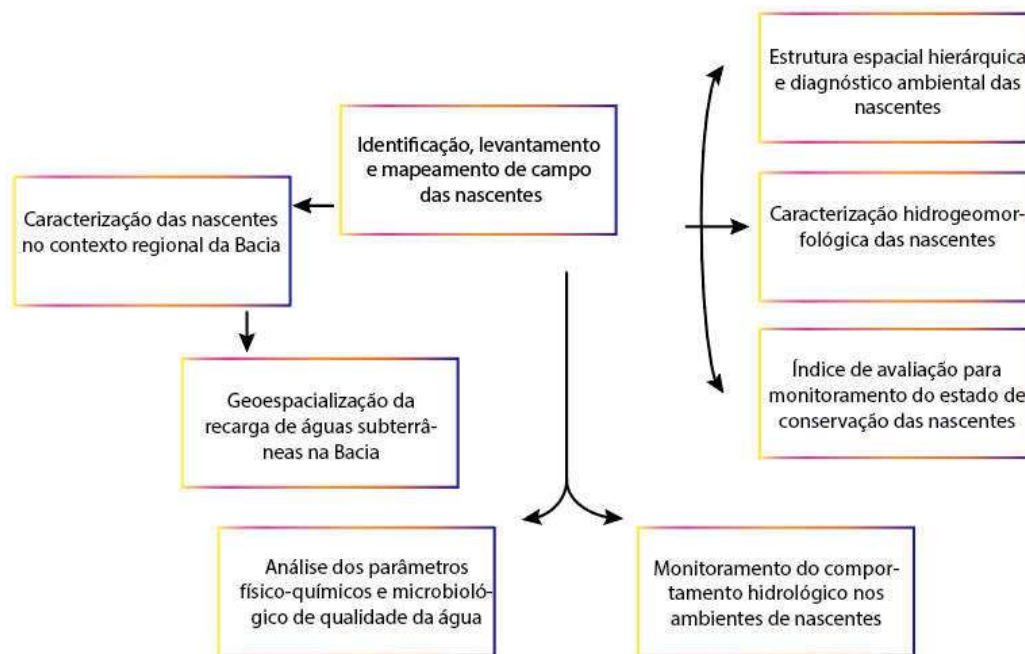
Caracterização hidrogeomorfológica das nascentes: estrutura e comportamento - A partir das observações realizadas em campo foi possível realizar uma descrição dos padrões e caracterizar a estrutura e comportamento dos aspectos hidrogeomorfológicos das nascentes estudadas.

Aplicação de índice de avaliação para monitoramento do estado de conservação das nascentes - Foi aplicado o Protocolo de Bioavaliação Rápida (PBR), adaptado ao contexto das nascentes. Com a determinação dos critérios, os valores foram quantificados a cada nascente visitada, sendo possível estimar um estado de conservação para as nascentes, a partir de diversos fatores.

Monitoramento do comportamento hidrológico nos ambientes de nascentes - Cada nascente apresenta uma configuração distinta no comportamento hidrológico. Analisar este quesito é compreender com clareza os fatores dinâmicos da água das nascentes. Portanto, foi realizado o monitoramento do comportamento hidrológico das em quinze nascentes, nas sub-bacias do Alto (Correntes-PE) e Médio curso (Santana do Mundaú-AL). O monitoramento foi realizado mensalmente, durante dois anos (2022-2023). Os dados da sazonalidade pluviométrica da região foram utilizados para comparações.

Análise dos parâmetros físico-químicos e microbiológico de qualidade da água - A qualidade da água das nascentes é um estado que depende do fluxo hidrológico, litológico e antrópico. Amostras de água foram coletadas em quatro nascentes para análise da qualidade físico-química e microbiológica em laboratório. A seleção das nascentes nas sub-bacias do Alto e Médio curso ocorreu pela insuficiência de dados nas nascentes da região e logística de campo. As coletas coincidiram com os períodos chuvoso e de estiagem da região. Os dados foram comparados com as resoluções dos órgãos públicos oficiais.

Figura 6- Organograma dos procedimentos metodológicos realizados.



Fonte: A autora (2024).

4.2.1 Dados vetoriais, matriciais e tabulares utilizados

Foi utilizada na composição das avaliações algumas bases de dados cartográficos, composta de arquivos raster, vetoriais Esri *shapefiles* (.shp) e tabulares, de órgãos públicos oficiais, como Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Banco de dados geográficos do Exército (BDGEx), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Copernicus, Mapbiomas, World Clim Org, Agência Nacional do Meio Ambiente (CPRH-PE), Instituto de Pesquisa Agrônomicas de Pernambuco (IPA), Secretaria de Estado de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH-AL) e do Instituto do Meio Ambiente (IMA-AL) (Quadro 2).

Quadro 2- Coleção de data e dados tabulares utilizados na pesquisa.

Categoria	Tipo de dado	Escala/Resolução Espacial obtida	Fonte
MDE (dados de terreno - Altitude, declividade, rugosidade, sombreamento, delimitação da bacia hidrográfica, sub-bacias e rede hidrográfica).	Raster	30 m ²	Copernicus

Imagens de satélite CBERS 4A	Raster	92 km – PAN 2m	INPE
Geomorfologia	Vetorial	1:250.000	IBGE
Geologia	Vetorial	1:250.000	IBGE
Litologia	Vetorial	1:1.000.000	CPRM
Solos	Vetorial	1:250.000	IBGE
Solos	Vetorial	1:5.000.000	Embrapa
Vegetação	Vetorial	1:250.000	IBGE
Uso e cobertura da terra (UCT), Coleção 5 – período de 1985-2019	Raster	30 m	Mapbiomas
Médias históricas (1970-2000) de precipitação pluvial e temperatura do ar	Raster	1 km ²	World Clim Org
Classificação climática de Köppen	Raster	1 km ²	Alvares et al., (2014)
Cartas topográficas: Garanhuns SC-24-X-B-VI, União dos Palmares SC-24-X-D-III, Rio largo SC-25V-C-I, Maceió SC-25- V-C-IV	Raster	1/100.000	Banco de dados geográficos do Exército (BDGEx)
Unidades de conservação (UCs)	Vetor	-	CPRH, IMA-AL, ICMbio, IBAMA e Google Earth.
Vazão de água estabilizada em poços (m ³ /h)	Tabulares	-	CPRM
Índices pluviométricos	Tabulares	-	SEMARH- AL
Índices pluviométricos	Tabulares	-	IPA-PE
Dados de nascentes mapeadas	Tabulares/Shapefile	-	Geovânia Ricardo dos Santos (2021-2024)

Fonte: A autora (2021).

4.3 Levantamento, identificação e mapeamento de campo das nascentes na bacia

As campanhas de campo ocorreram em momentos diferentes nos anos de 2021 e 2024. A partir de nascentes já previamente conhecidas em propriedades rurais no município de Santana do Mundaú (Médio curso), as demais nascentes foram mapeadas ao longo dos campos de pesquisa para garantir a coleta de dados nas sub-bacias restantes da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú. A pesquisa levou em conta nascentes que se formam naturalmente antes de um curso de água, independentemente de haver ou não intervenção humana.

As nascentes levantadas foram reconhecidas, mapeadas e fotografadas. Para a identificação de cada nascente foi dado um código alfanumérico. As letras corresponderam ao município de localização geográfica, com intuito de catalogar e melhor discutir os resultados.

As coordenadas geográficas de cada nascente foram obtidas com GPS Garmin 64x, em sistema de coordenadas planas. Neste sistema, a bacia é dividida em dois fusos: SIRGAS 2000 – UTM zone 24s, código EPSG 31984 e SIRGAS 2000 – UTM zone 25S, código EPSG 31985, posteriormente foram convertidas para SIRGAS 2000, código EPSG 4674

As coordenadas de cada nascente foi organizada numa planilha em formato “.csv” e importado para o software de SIG Qgis 3.16.2 <https://www.qgis.org/pt_BR>, para conversão em arquivo Shapefile e compor os mapas.

4.4 Caracterização das nascentes mapeadas em comparação com componentes ambientais regionais

Os dados dispostos no quadro 2 foram obtidos das plataformas digitais gratuitas. Inicialmente, com o Modelo Digital de Elevação - MDE, a base cartográfica da hidrografia da bacia do Mundaú foi criada. Posteriormente, os arquivos vetoriais: Arcabouço geológico, Litologia, Geomorfologia, Relevo, Declividade, Solos, Textura dos solos e Vegetação primária (Quadro 2 e Apêndice 1), foram organizados de acordo com a base cartográfica da bacia.

As informações foram extraídas e combinadas para cada nascentes. A tabela de atributos foi editada, permitindo a representação dos dados em mapas.

Para compreender as ações antrópicas impactantes foram obtidos dados de Uso e Cobertura da Terra (UCT), da base de dados histórica do Mapbiomas <<https://mapbiomas.org/produtos>>, coleção 5 no período de 1985-2019, com resolução de 30 metros, para geração do mapa. Os dados foram obtidos na geometria da bacia, realizado por meio dos Toolkits preparados pelo Mapbiomas, código aberto no Google Earth Engine (GEE) e editadas posteriormente em ambiente SIG Qgis 3.16.2 <https://www.qgis.org/pt_BR>.

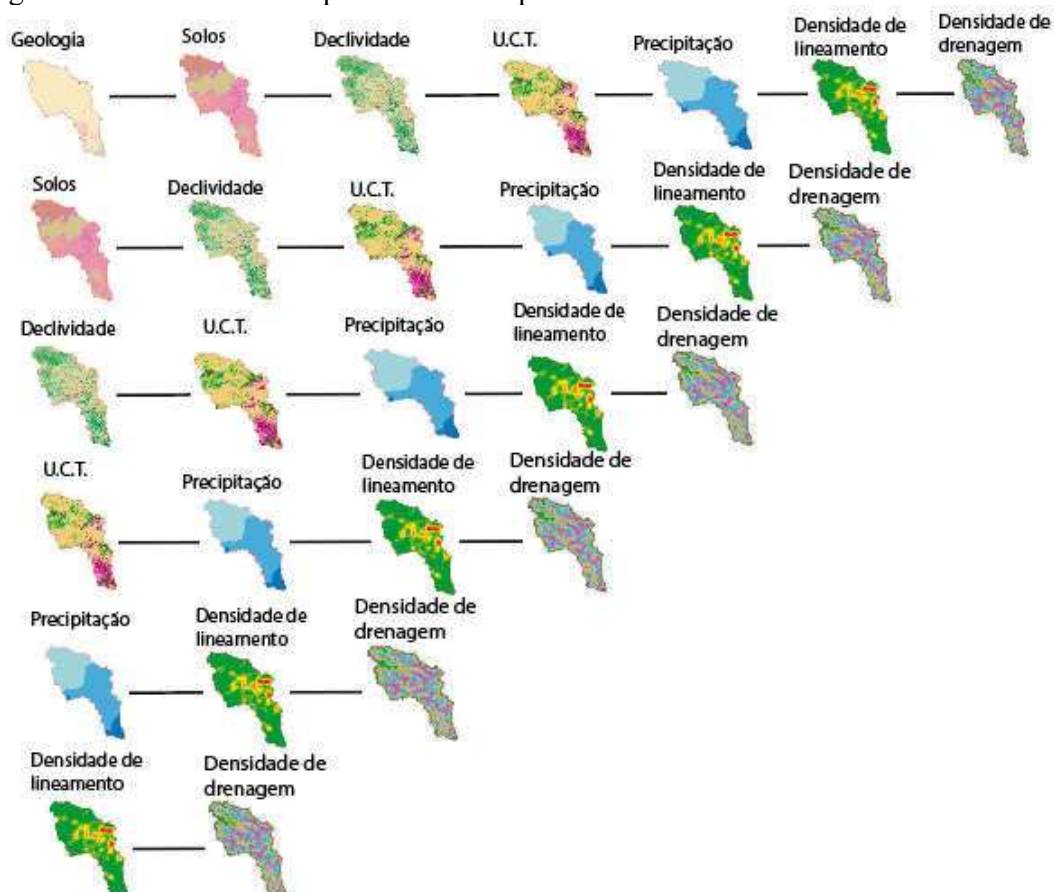
4.5 Geoespacialização da recarga de águas subterrâneas na bacia, pelo método AHP

Para a identificação e mapeamento das zonas de recarga de águas subterrâneas (ZPAS) foi utilizado o método Analytic Hierarchy Process (AHP) (SAATY,1977). Representação hierárquica que considera que os diferentes fatores intervenientes são comparação de pares, numa matriz (n x n), um peso de importância relativo é atribuído ao relacionamento entre os

dois fatores, conforme uma escala pré-definida (CHAUDHARY e KUMAR, 2018; GHIMIRE et al, 2019; FALCÃO, 2013; RIBEIRO et al, 2011; THIRUMALAIVASAN e KARMEGAM, 2001).

Na primeira etapa foram elencados por ordem de importância, os fatores utilizados para compor a matriz comparada, sendo: 1) Geologia (Litologia); 2) Solo (tipo); 3) Declividade; 4) Uso e cobertura da terra; 5) Precipitação pluvial (mm); 6) Densidade de lineamento; 7) Densidade de drenagem (Figura 7). Em uma planilha a matriz de comparação aos pares de 7 x 7 foi criada e os fatores relacionados entre si (Figura 7), sendo que posteriormente foi atribuído os valores de importância na combinação. Os fatores iguais, foram atribuídos valor 1 (um), enquanto que as comparações entre fatores diferentes foram atribuídas os valores de acordo com a escala (Tabela 2).

Figura 7- Fatores utilizados para matriz comparada.



Fonte: A autora (2022).

Numa escala que varia de 1 a 9, de acordo com (SAATY, 1977), a matriz foi devidamente preenchida com os pesos de importância dos fatores (Tabela 2):

Tabela 2- Escala de valores de peso, definição e descrição, para comparação dos fatores.

Valor do peso ou da importância	Definição do peso ou da importância	Descrição
1	Importância igual	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Fraca importância	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra
5	Forte importância	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra
7	Muito importante	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática
9	Absolutamente importante	A evidência favorece uma atividade em relação a outra, com o mais alto grau de segurança
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se busca uma condição de compromisso entre duas definições

Fonte: Saaty (1977).

Ainda, na estrutura da matriz organizada na planilha, foram realizadas: Comparação de fatores (CF), Normalização (N) , Peformance Score (PS), Cálculo de Consistência (CC) e suas respectivas somas, posteriormente, foram obtidas o valores de Lambda máximo (λ_{max}), índice de consistência (IC) e a razão de consistência (RC) (COLIN, 2011).

Matriz de comparação de fatores (CF) de comparação aos pares, representadas pela equação 1:

$$\text{Matriz CF} \begin{vmatrix} 1 & F_6 & G_6 \\ 1/A_6 & 1 & G_7 \\ 1/A_7 & 1/F_6 & 1 \end{vmatrix} \quad (1)$$

Matriz de normalização (N) dos valores de (CF), representadas pela equação 2:

$$N \begin{vmatrix} 1/1 & F_6 & G_6 \\ (1/A_6)/Sc1 & 1 & G_7 \\ (1/A_7)/Sc1 & (1/F_6)/Sc2 & 1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

Onde:

N – Normalização;

Sc1 – Soma da coluna 1;

Sc2 – Soma da coluna 2.

Valores de Peformace Score (PS), representadas pela equação 3:

$$PS = SI/St \quad (3)$$

Onde:

PS – Performace score;

SI – Soma da linha;

St – Soma total da coluna.

Matriz de Consistência (C), representadas pela equação 4:

$$\text{Consistência (C)} \begin{vmatrix} 1xPS_1 & F_6xPS_6 & G_6xPS_7 \\ (1/A_6)xPS_1 & 1xPS_6 & G_7xPS_7 \\ (1/A_7)/PS_1 & (1/F_6)/PS_6 & 1xPS_7 \end{vmatrix} \quad (4)$$

Valores de lambda máximo ($\lambda_{\text{máx}}$), representadas pela equação 5:

$$\lambda_{\text{máx}} = \text{média de } (Stc/PS) \quad (5)$$

Onde:

$\lambda_{\text{máx}}$ - Lambda máximo;

Stc – Soma total da linha de consistência (C);

PS - Peformace Score de cada linha.

Índice de consistência (IC), representadas pela equação 6:

$$IC = \frac{(\lambda_{\text{max}} - n)}{(n-1)} \quad (6)$$

Onde:

λ_{max} – Valor de lambda máximo;

n – Ordem da matriz;

Razão de consistência (RC), representadas pela equação 7:

$$CR = \frac{IC}{ICA} \quad (7)$$

Onde:

CR – Razão de consistência;

IC – Índice de consistência;

ICA – Índice de consistência aleatória.

O CR determina o grau de coerência dos valores, os pesos dos fatores sempre devem apresentar valor final inferior a 0,1. O ICA (Tabela 3) condiz com a ordem de matriz, definidos segundo os valores na tabela x:

Tabela 3- Ordem da matriz e valor de índice de consistência aleatória.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ICA	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Saaty (1977).

Na segunda etapa, em ambiente Arcgis 10.4.1, os arquivos rasters listados na primeira etapa foram padronizados, realizado reprojeção cartográfica para SIRGAS 2000, reclassificados e definidos pela sobreposição ponderada (Weighted overlay) na calculadora raster. O mapa de zona potencial de águas subterrâneas foi gerado, sendo atribuídos os valores (Quadro 3):

Quadro 3- Valores finais atribuídos a zona de recarga de águas subterrâneas.

Valor	Zona de recarga
2	Ruim
3	Razoável
4	Bom
5	Excelente

Fonte: Colin (2011) e Saaty (1977).

4.6 Classificação espacial hierárquica dos sistemas hidroambientais de nascentes

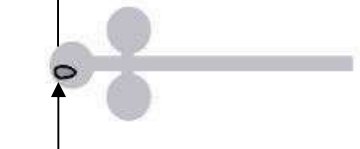
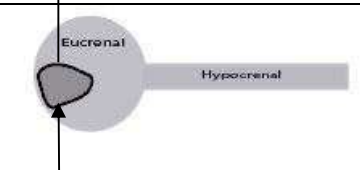
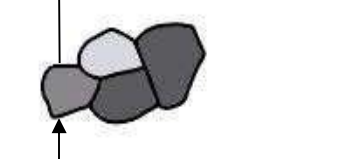
Foi implementado uma classificação espacial hierárquica de nascentes (Quadro 4), de acordo com a classificação proposta por Reiss (2013) para organizar características de mesoescala da bacia do Mundaú e de microescala da nascente. Esta classificação hierárquica fundamenta-se em conceitos da ecohidrogeologia, ecologia da paisagem e dinâmica de manchas, para classificação das nascentes em uma unidade natural-espacial de bacia

hidrográfica. O ambiente de nascente (Eucrenal) e canais de 1ª ordem formados a partir das nascentes (Hypocrenal) fazem parte de uma mesoescala de bacias. Com base nestes pressupostos, a análise das nascentes enquadrou-se com o segmento de escala que tem por finalidade proteger e enquadrar os sistemas de nascentes em um método de pesquisa espacial específico, a constar, as divisões elencadas (Quadro 4):

- Sistema de captação da microbacia;
- Sub-bacias de captação da nascente;
- Ambiente Hypocrenal – Curso d'água de 1ª ordem (30 metros);
- Ambiente Eucrenal – Nascente e entorno (App 50 metros);
- Microhábitat – Exfiltração de nascente (Figura 8).

Para delimitação dos sistemas de captação e sub-bacias de captação foram utilizados a base cartográfica gerada por meio do MDE Copernicus 30 mt e a extração de informações foi comparada com as cartas topográficas disponibilizadas pelo banco de dados do exército: Garanhuns SC-24-X-B-VI, União dos Palmares SC-24-X-D-III, Rio largo SC-25V-C-I, Maceió SC-25-V-C-IV (Quadro 2). A delimitação do ambiente Hypocrenal e Eucrenal foi comparada com o conceito de Área de Preservação Permanente, do Código florestal brasileiro, em Brasil (2021a). Para a análise descritiva do microhábitat de nascente, foram observadas as condições ambientais locais e regionais, tal como, as relações funcionais da paisagem das nascentes: particularidades geológicas e hidrogeomorfológicas, alterações na estrutura natural da nascente, qualidade ambiental, aspectos históricos e antrópicos.

Quadro 4 – Sistema espacial hierárquico de nascentes.

Escala		Método
	Sistema de captação da microbacia	Registro das nascentes
	Sub-bacia de captação da nascente	Avaliação do uso da terra
	Ambiente Hypocrenal (Cursos d'água de 1º ordem) e Eucrenal (App de 50 metros em torno da nascente)	Mapeamento da área da nascente
	Interseção de ambientes de Nascentes (Habitat)	Amostragem de vários habitats
	Exfiltração da nascente (Susstrato do micro-habitat)	

Adaptação: Reiss (2013).

4.7 Avaliação da estrutura e comportamento hidrogeomorfológico das nascentes

Com base na compreensão da integração dos processos, estrutura e dinâmica da paisagem (RODRIGUEZ et al., 2022; TRICARD, 1977; TRICARD, 1976; BERTHAND, 2004; BERTHAND e BERTHAND, 1968). Este tópico busca organizar o entendimento das nascentes como parte integrante de uma relação geossistêmica com os componentes morfodinâmicos e antrópicos, que se interconectam na paisagem. Foi utilizado Modelo Digital de Elevação (Quadro 2) para delineamento dos ambientes das nascentes, como bloco diagrama 3D da superfície, mapa e perfil topográfico do relevo. As nascentes mapeadas na pesquisa foram caracterizadas de acordo com estrutura e comportamento hidromorfológico. Os seguintes atributos foram observados:

- Sistema de captação: conjunto de estrutura e processos que direciona e armazena água de diferentes fontes: nascentes, rios e chuva, na bacia hidrográfica;
- Sub-bacia de captação: conjunto menor hierárquico de captação de água numa bacia hidrográfica;

- Uso e cobertura da terra no ambiente Hypocrenal e Eucrenal: observações de alterações antrópicas no ambiente Hypocrenal (entorno dos cursos d'água de 1ª ordem) e Eucrenal (transição aquático-terrestre das nascentes);
- Unidade geomórfica: identificação da morfologia do relevo onde encontra-se localizada a nascente;
- Morfologia da exfiltração: verificação do padrão morfológico de exfiltração, por onde a água da nascente flui do subterrâneo para o superficial;
- Aspecto de exfiltração: avaliação da forma como a nascente aflora do solo/rocha, em um ou mais locais;
- Mobilidade: avaliação da capacidade de estabelecimento ou deslocamento da nascente;
- Sazonalidade: padrão de repetição ou não do fluxo hidrológico, ao longo dos períodos chuvoso ou de estiagem;
- Média de vazão (L/s): quantidade média de fluxo hidrológico das nascentes.

4.8 Aplicação de índice de avaliação para monitoramento do estado de conservação das nascentes

Foi empregado o Protocolo Bioavaliação Rápida (PBR), investigação visual ambiental e qualidade da água. De acordo com os autores Oliveira Júnior et al., 2020; Silva, 2019; Silva, 2015; Callisto et al., 2002; Barbour et al., 1999, este protocolo permite compreender diversos aspectos da paisagem no ambiente de nascente.

O Protocolo PBR foi adaptado ao contexto das nascentes, aplicado no período de outubro de 2021 a abril de 2022, período de estiagem da região. Foram avaliadas 37 nascentes da pesquisa. Foram empregados dezoito critérios, observados de modo pontual e no entorno da nascente. Cada critério recebeu um valor atribuído pelo estado de conservação. Os somatórios foram quantificados a partir do somatório dos valores atribuídos a cada critério (Quadro 5), obteve-se as pontuações: 39-52, condição impactada, 53-67, condição alterada e 68 a 81, condição boa (SILVA, 2019).

Quadro 5- Parâmetros e valores do estado de conservação atribuídos para cada nascentes.

Critérios observados		Estado de conservação das nascentes		
		6	3	0
1	ASPECTO/TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA	Transparente	Opaca	Turva
2	ODOR DA ÁGUA	Sem cheiro	Fraco	Forte
3	DESPEJO DE ESGOTO DOMÉSTICO	Ausente	Moderado	Acentuado
4	PRESENÇA DE RESÍDUOS SÓLIDOS	Ausente	Moderado	Acentuado
5	PROTEÇÃO DA NASCENTE	Cercamento da APP no raio de 50 metros	Cercamento da nascente no raio de 15 metros ou menos	Sem cercamento
6	PRESENÇA DE VEGETAÇÃO NATIVA DE PORTE ALTO (MAIOR QUE 18 m)	Acima de 80% da vegetação	Entre 40 e 60% com vegetação nativa	Menos de 40% da vegetação nativa ou ausência total
7	MODIFICAÇÃO/ALTERAÇÃO DO TIPO ESTRUTURAL DA NC	Ausente	Parcial	Total
8	FONTE PARA ANIMAIS FAUNÍSTICOS (PEIXES, RÉPTEIS, AVES, MAMÍFEROS, FAUNA EDÁFICA)	Frequentemente Visível	Eventualmente visível	Sem presença
9	PRESENÇA DE EUTROFIZAÇÃO (MACROFITAS NA LÂMINA D'ÁGUA)	Ausência total de macrófitas	Algumas macrófitas isoladas	Presença abundante de macrófitas
10	DIVERSIDADE/PRESENÇA DE VEGETAÇÃO DE PEQUENO A MÉDIO PORTE "PLANTAS AQUÁTICAS"	Abundante	Moderado	Ausente
11	USO DE FERTILIZANTES/PESTICIDAS PRÓXIMO AS NC	Ausente	Eventualmente	Frequentemente
12	EXPANSÃO DA MANCHA URBANA PRÓXIMA DA NASCENTE	Ausente	Moderada	Intensa
13	CANALIZAÇÃO DA ÁGUA DAS NASCENTES PARA AGRICULTURA	Ausente	Moderado	Intenso
14	CANALIZAÇÃO DA ÁGUA DAS NASCENTES PARA ABASTECIMENTO HUMANO	Ausente	Moderado	Intenso
15	EROSÃO E COMPACTAÇÃO DO SOLO PRÓXIMO AS NASCENTES	Estável	Moderado	Instável
16	USO E COBERTURA DA TERRA NO ENTORNO DA NASCENTE	Vegetação natural	Campo de pastagem/agricultura/monocultura/reflorestamento	Residencial/comercial/industrial/estradas
17	PISOTEIO DAS NASCENTES POR ANIMAIS DE GRANDE PORTE	Sem indícios de pisoteio	Pisoteio eventual, desconfigurando alguns traços da nascente	Pisoteio frequente, causando assoreamento

18	CONSCIÊNCIA AMBIENTAL PELA POPULAÇÃO DO ENTORNO	Sim	Algumas práticas de conservação, embora haja modificação	Não
SOMA		X	X	X

Fonte: adaptado de Callisto *et al.* (2002).

4.8 Monitoramento e análise do comportamento hidrológico das nascentes selecionadas

O monitoramento do comportamento hidrológico foi realizado mensalmente do período de Janeiro 2022 a Dezembro de 2023, perfazendo dois anos de coleta. A mensuração hidrológica ocorreu em oito nascentes no município de Correntes-PE e sete no município de Santana do Mundaú-AL (Figura 8). A mensuração foi realizada em nascentes que já se encontravam alteradas com sistema simples de captação de água.

A análise hidrológica de cada nascente foi empregada por meio do Método Direto Volumétrico (TUCCI e SILVEIRA, 2009), método pautado na hidráulica para medição da velocidade de pequenos canais. Este método se fundamenta no tempo gasto do fluxo de água e volume do recipiente (Figura 8).

Figura 8- Método volumétrico direto para monitoramento hidrológico e nascentes avaliadas.



Fonte: A autora (2023).

Para aplicação da metodologia foi utilizado recipiente de 1 L ($0,001 \text{ m}^3$) para as nascentes com fluxo de água pequena, já as nascentes com fluxo rápido optaram-se por ser utilizado recipiente de 11 L ($0,011 \text{ m}^3$). Foi cronometrado o tempo que a água levou para atingir o volume máximo do recipiente; 6 repetições foram realizadas na medição de cada nascente. De posse dos valores de tempo, a vazão em metros cúbicos por segundo (m^3/s) foi obtida pela fórmula a seguir. Logo, os valores de vazão foram convertidos em litros por segundo (L/s).

$$Q = (v/t) \sum Q/n \quad (8)$$

Em que:

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.

Com a obtenção dos valores de vazão em litro por segundo (L/s), foi realizado a classificação por magnitude (Tabela 4) das nascentes possíveis a serem analisadas, de acordo com Meinzer (1965):

Tabela 4- Classificação de magnitude da vazão (L/s) das nascentes.

Magnitude	Vazão/segundo (L/s)
1	> 170.000
2	17.000 – 170.000
3	1.700 – 17.000
4	380 – 1.700
5	38 – 380
6	4 – 380
7	0,6 – 4
8	< 0,6

Fonte: Meinzer et al. (1965)

4.9 Análise dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos de qualidade da água

Foram duas campanhas de campo, nos meses de junho de 2022 (período chuvoso) e dezembro de 2022 (Período de estiagem). Coletaram-se 2 amostras de água para cada nascente avaliada (19CO, 20CO, 1SM e 2SM), totalizando-se 8 amostras por mês avaliado. O critério para seleção dessas nascentes baseou-se na ausência de análises físico-químicas específicas para essas áreas e na facilidade de coleta em dois municípios geograficamente próximos.

As amostras de água coletadas foram avaliadas em um laboratório particular (Anexo 1 e 2) e o outro em parceria de pesquisa, no Laboratório de Aquicultura-UFAL. As amostras de água foram coletas em garrafas PET de 1 L e garrafas autoclaváveis de 500 mL para ambos os laboratórios. Com total assepsia das garrafas e das mãos as amostras foram obtidas na superfície da lâmina d'água, posteriormente armazenadas em caixa térmica com gelo para controle da temperatura e preservação biológica.

As variáveis físico-químicas: potencial hidrogeniônico (pH), temperatura da água (°C), Condutividade elétrica (EC), Sólidos Totais Dissolvidos (TDS), foram mensuradas *in situ*, utilizando a sonda multiparâmetros (modelo HI 9829, HANNA *Instruments*) (Figura 9A e 9B). Os parâmetros químicos como, Nitrito (NO_2^-), Nitrato (NO_3^-), Amônia ($\text{NH}_3 \text{ N}$), Fósforo (P), Fosfato (PO_4^{3-}), bem como, a biomassa fitoplactônica por meio das determinações de Clorofila a ($\text{C}_{55}\text{H}_{72}\text{O}_5\text{N}_4\text{Mg}$) e Feofitina a ($\text{C}_{55}\text{H}_{76}\text{N}_4\text{O}_5$) foram analisados em laboratório através de um espectrofotômetro (Modelo HI83399, HANNA *Instruments* e espectrofotometria UV comprimento de ondas de 110 a 1300 nm – Kasvi e Merck®) (Quadro 6) (BAIRD et al., 2017).

Figura 9- Medição dos parâmetros com medidor multiparâmetros, em nascentes de Correntes (A) e em nascentes de Santana do Mundaú (B).



Fonte: A autora (2022).

Quadro 6- Metodologias, ranges e reagentes utilizados na análise das amostras de água.

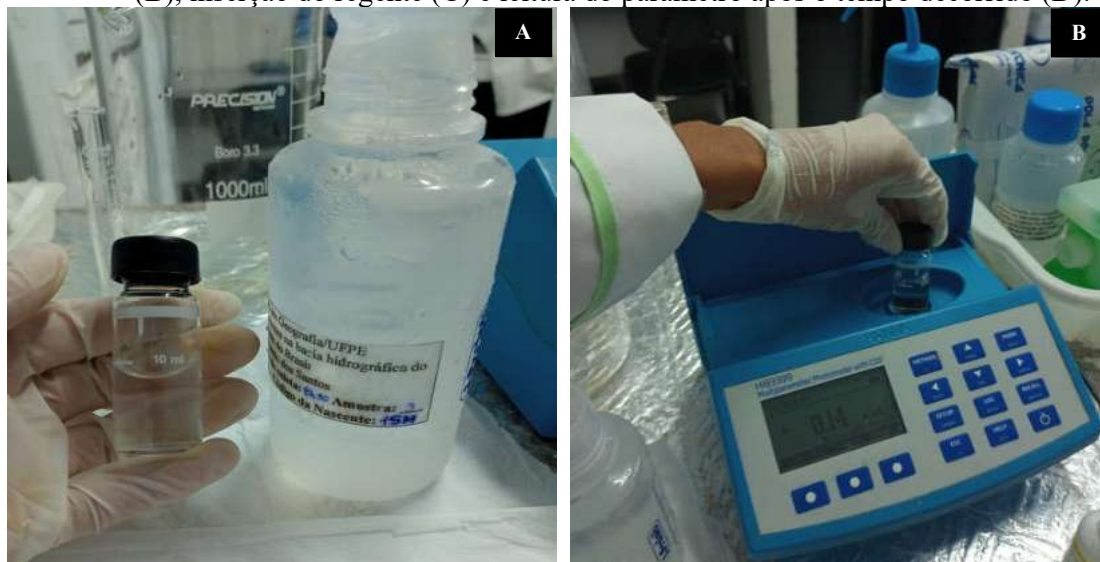
Parâmetro	Metodologia	Range de calibração	Solução/Reagente
pH	Sensor portátil	-	Buffer solution 7.01
Temperatura		-	-
Condutividade elétrica		-	Solução de calibração 1413
Sólidos Totais Dissolvidos		-	Solução de calibração 1382 ppm
Nitrito	Fotometria	Low range (L.R.)	1 pacote – Nitrito reagente
Nitrato		-	1 pacote – Nitrato reagente
Amônia		Medium range (M.R.)	4 gotas - Amônia reagente A (HI93715A-0) e B (HI93715B-0)
Fósforo e		Low range (L.R.)	

Fosfato		Low range (L.R.)	1 pacote – Fosfato reagente
Clorofila A*	SMEWW 10200H	-	-
Feofitina*	SMEWW 10200H	-	-
Nitrato*	MERCK 1.09713	-	-

Fonte: A autora (2024). Range e solução com base no manual fotômetro - HANNA Instruments. *Amostras por encomenda particular.

No Laboratório LAQUA, foram pipetados 10 mL de amostra de água das nascentes numa cubeta com tampa (Figura 10A), realizada a leitura do branco (Figura 10B), colocou-se o reagente referente para estimativa (Figura 10C) e de acordo com a necessidade proposta pelo manual, agitou-se a cubeta contendo a amostra de água + reagente para homogeneizá-la, a cubeta foi reinsertada no equipamento esperado o tempo de mensuração de cada variável e posteriormente, obtido o resultado (Figura 10D). Na necessidade da realização do procedimento de diluição, foram retirados 5 mL da amostra da cubeta, preenchido novamente com a amostra pura (sem reagente) e recolocado no fotômetro para fazer releitura. O resultado foi multiplicado por 2.

Figura 10- Amostra de água da nascente inserida na cubeta (A), leitura do branco da amostra (B), inserção do reagente (C) e leitura do parâmetro após o tempo decorrido (D).





Fonte: A autora (2022).

Para determinação dos Coliformes totais e Coliformes termotolerantes, Número Mais Provável (NMP/100mL), foi utilizado o Aquatest, meio de cultura destinado a detecção microbiológica em amostras de água (BAIRD et al., 2017). O meio de cultura Aquatest detecta os coliformes totais através enzima β -galactosidase, envolvida no metabolismo fermentativo da lactose.

Foram utilizados 100 mL de amostra de água (Figura 11A), em cada becker contendo a amostra de água + o meio de cultura. Em seguida, posto no agitador (Figura 11B), os 100 mL foram divididos 20 mL da amostra já homogeneizada em 5 tubos de ensaio estéreis, previamente identificado. Os tubos foram cobertos rapidamente com papel alumínio (Figura 11C) e foram levados a estufa a 35°C por um período de 24 horas (Figura 11D). Após o período de permanência na estufa, as amostras no tubo de ensaio foram verificadas se as amostras se encontravam na coloração amarelo intenso e os tubos de ensaio foram inseridos na câmara escura ultravioleta para análise. A presença de coliformes termotolerantes aplicou-se aos resultados, a técnica do Número Mais Provável (NMP/100mL) para 5 tubos de ensaio, após detecção pelo desenvolvimento de fluorescência azul esverdeada quando a amostra é submetida à exposição de luz ultravioleta (365nm).

Figura 11- Amostra de água no Becker (A), amostra de água + o meio de cultura, agitado por 3 minutos a 12% (B), tubos de ensaio com amostras cobertas com papel alumínio (C), amostras em tubos na estufa (D).



Fonte: A autora (2022).

A classificação e diretrizes ambientais das águas doces superficiais no Brasil enquadradas na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº357/2005. Esta resolução adota condições de qualidade das águas em cinco classes, de acordo com o uso predominante: especial, classe 1, 2, 3 e 4 (Quadro 7 e Tabela 5). A depender da classe, há uma maior ou menor exigência de proteção e quantidade de parâmetros.

Os valores obtidos a partir das análises dos parâmetros foram comparadas na classe 1, conforme os padrões de potabilidade de água estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357,

de 17 de março de 2005 (CONAMA, 2005), seção II-das águas doces, que expede e dá subsídios aos limites para cada parâmetro de água.

Quadro 7- Classificação das águas doces e seus destinos, de acordo com as classes de uso.

Classes	Classificação das águas doces, segundo a resolução CONAMA nº357, 2005
Especial	a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção; b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
Classe 1	a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.
Classe 2	a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e) à aquicultura e à atividade de pesca.
Classe 3	a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; c) à pesca amadora; d) à recreação de contato secundário e; e) à dessedentação de animais.
Classe 4	a) à navegação; b) à harmonia paisagística

Fonte: Conama Nº 357 (2005).

Tabela 5- Concentração dos Parâmetros físico-químicos e microbiológicos analisados na pesquisa, com base nas classes de águas doces, destinadas ao estabelecidos pelo CONAMA nº 357.

Parâmetros	Especial	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
pH	Não específica - Condições naturais dos corpos d'água	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
Temperatura (°C)		-	-	-	-
Condutividade elétrica (EC)		-	-	-	-
Sólidos totais dissolvidos (TDS)		< 500	< 500	< 500	-
Nitrito (NO ₂ ⁻ .N)		≤ 1,0 mg/L N	≤ 1,0	≤ 1,0	-
Nitrato (NO ₃ ⁻ .N)		≤ 10,0 mg/L N	≤ 10,0	≤ 10,0	-

Amônia (N)		$\geq 1,0$ a $5,0$ mg/L N	$\geq 1,0$ a $5,0$	-	-
Fósforo total (P)		$\leq 0,020$ mg/L	$\leq 0,030$	$\leq 0,05$	-
Fosfato (PO_4^{3-})		-	-	-	-
Clorofila “a” (Chl a)		< 10 $\mu\text{g/L}$	< 30	< 60	-
Feofitina		< 10 $\mu\text{g/L}$	< 30	-	-
Coliformes totais		-	-	-	-
Coliformes termotolerantes		200 NMP/100 mL	1.000 NMP/100 mL	2.500 NMP/100 mL	-

Fonte: Conama Nº 357 (2005).

4.10 Tratamento estatístico

Para a análise exploratória dos dados foram realizadas a estatística descritiva: soma, média, máximo, mínimo, desvio padrão e a estatística inferencial, para comparar as médias entre os grupos e verificar as diferenças significativas, para tal foi efetuado: ANOVA, teste de Tukey, dendograma de similaridade e matriz de coeficiente de correlação. Foram utilizados software de edição de planilhas: Excel e Past 4.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização das nascentes no contexto regional da bacia do Mundaú

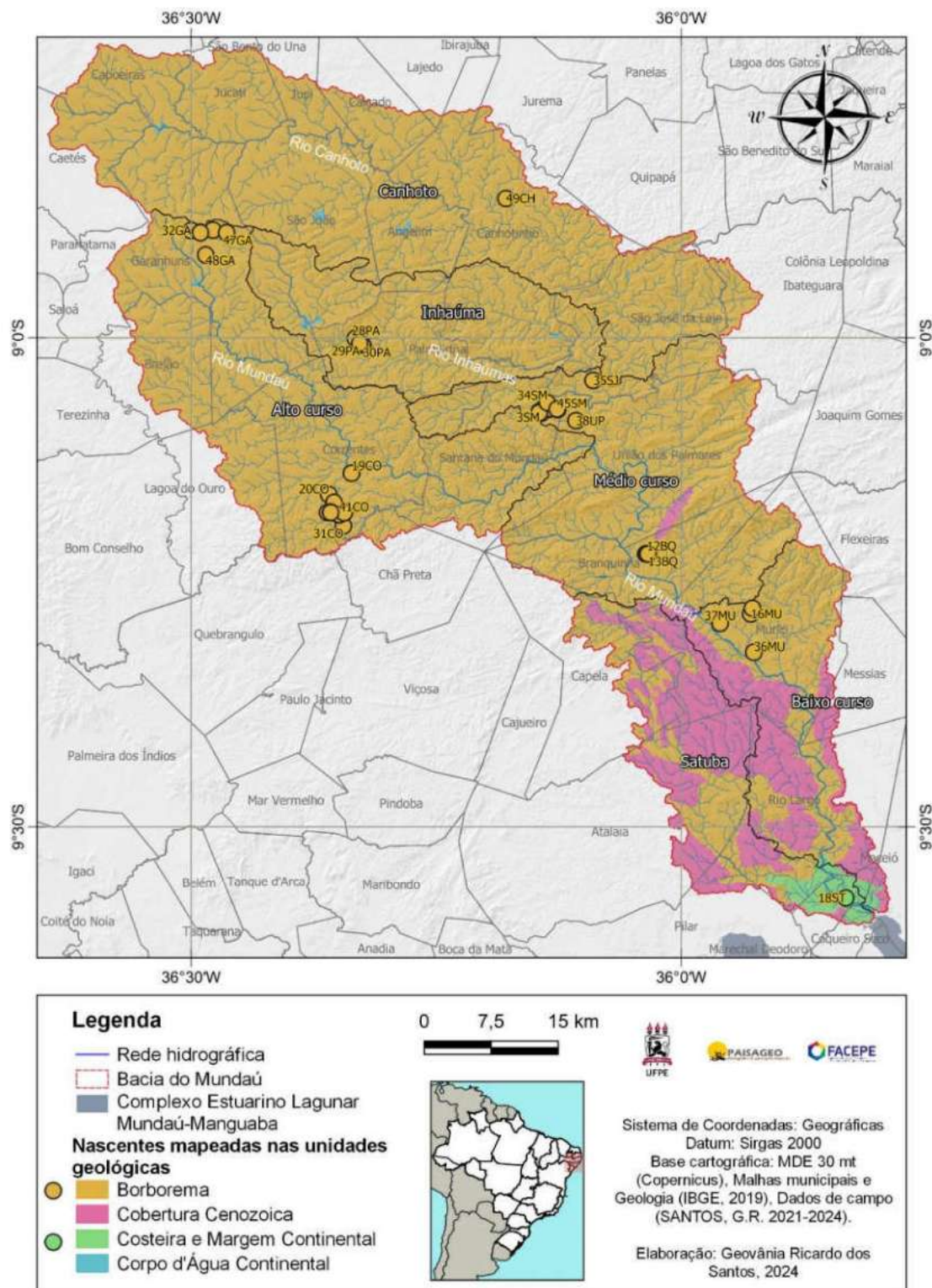
Considerando a disposição geológica da bacia do Mundaú (Figura 12 e Apêndice 1), a região faz parte da megaestrutura do Planalto da Borborema, uma morfoestrutura que influencia parte do relevo do Nordeste Oriental (CÔRREA et al., 2010) e de dispersão da rede hidrográfica dos Planaltos do município de Garanhuns, em direção à rede hidrográfica de Alagoas (ANDRADE, 1959). Evidências geológicas indicam deformações causadas por zonas de cisalhamento dúctil, com áreas costeiras e parte do interior apresentando bacias sedimentares, que fazem parte de uma crosta estendida formada durante o rifteamento da Pangeia (BEZERRA et al., 2011).

O desempenho morfométrico da bacia do Mundaú está intimamente relacionado ao entendimento hidrogeológico e litoestrutural. Como identificado por Gomes (2015) a ramificação hidrográfica da região e o padrão de drenagem são determinados pela impermeabilidade das rochas e pelo arcabouço morfoestrutural predominantemente formado por rochas metamórficas moderadamente a intensamente fraturadas. Essas características influenciam o padrão da rede de drenagem, que apresenta formatos dendríticos e de treliça. Esses aspectos são fundamentais para destacar as particularidades da hidrogeologia regional.

As variações litológicas e as propriedades hidráulicas dos diferentes tipos de rochas influenciam a probabilidade de surgimento das nascentes (GREEN et al., 2014). A análise geomorfológica, por sua vez, busca esclarecer os processos relacionados à interface entre paisagem e o ambiente aquático. Por exemplo, o processo de exfiltração de água está diretamente relacionado às características e dinâmica do relevo (FELIPPE e MAGALHÃES JÚNIOR, 2020). As nascentes estão frequentemente associadas a topografias complexas, emergindo em encostas íngremes ou sob saliências rochosas (STEVENS et al., 2021).

No arranjo da Unidade Morfoestrutura Geológica, as nascentes mapeadas estão predominantemente relacionadas ao Planalto da Borborema (Figura 12), nas sub-bacias do Alto curso, Inhaúmas, Canhoto e Médio curso. Essas áreas, localizadas em altitudes médias a elevadas, são compostas principalmente por rochas como gnaisses, quartzitos, granitos e basaltos, com exceção de algumas áreas (GOMES et al., 2016; CORRÊA et al., 2010). A nascente 18ST, localizada na sub-bacia do Satuba, está inserida na Unidade Costeira e Margem Continental (Figura 12), contida em rochas sedimentares.

Figura 12- Unidade geológica nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.



Fonte: A autora (2024)

A estrutura litológica da bacia (Figura 13 e Apêndice 1) é predominantemente composta por rochas de origem cristalina, como as metamórficas e ígneas. A interação entre rochas, solo e água desempenha relevância no armazenamento e regulação físico-química da água, à medida que circula na paisagem, alterações ocorrem na sua composição química (ANDRADE et al., 2009). Com exceção de algumas áreas sedimentares da sub-bacia do Satuba (MELO e MONTEIRO, 2022), a maioria das nascentes mapeadas na bacia, um total de 48, está associada a rochas de origem metamórfica e ígnea.

A composição rochosa é um fator importante para o comportamento das águas subterrâneas. Nas rochas mais resistentes, o fluxo de água tende a ser maior devido à presença de fraturas mais abertas, mas o volume de água armazenada é menor, pois a intensidade de fraturas é menos intensa. Por outro lado, nas rochas menos resistentes, a percolação da água é mais lenta, embora possam armazenar volumes maiores de água (APAC, 1998). Durante os trabalhos de campo, foi possível observar variações na disponibilidade de água, com algumas nascentes apresentando fluxo intenso, como as localizadas em Garanhuns, Correntes e Santana do Mundaú.

No contexto geológico mais amplo da sub-bacia do Alto curso, Inhaúmas e Canhoto, especialmente em áreas como Garanhuns, São João e Argelim, um bloco rochoso de quartzito feldspático se destaca (Figura 13), área onde estão localizadas várias nascentes mapeadas. Esta estrutura litológica favorece o aparecimento de falhas, fraturas e colapsos de blocos, resultando na formação de sumidouros e dolinas (RODRIGUES NETO, 2016; ANDRADE et al., 2009).

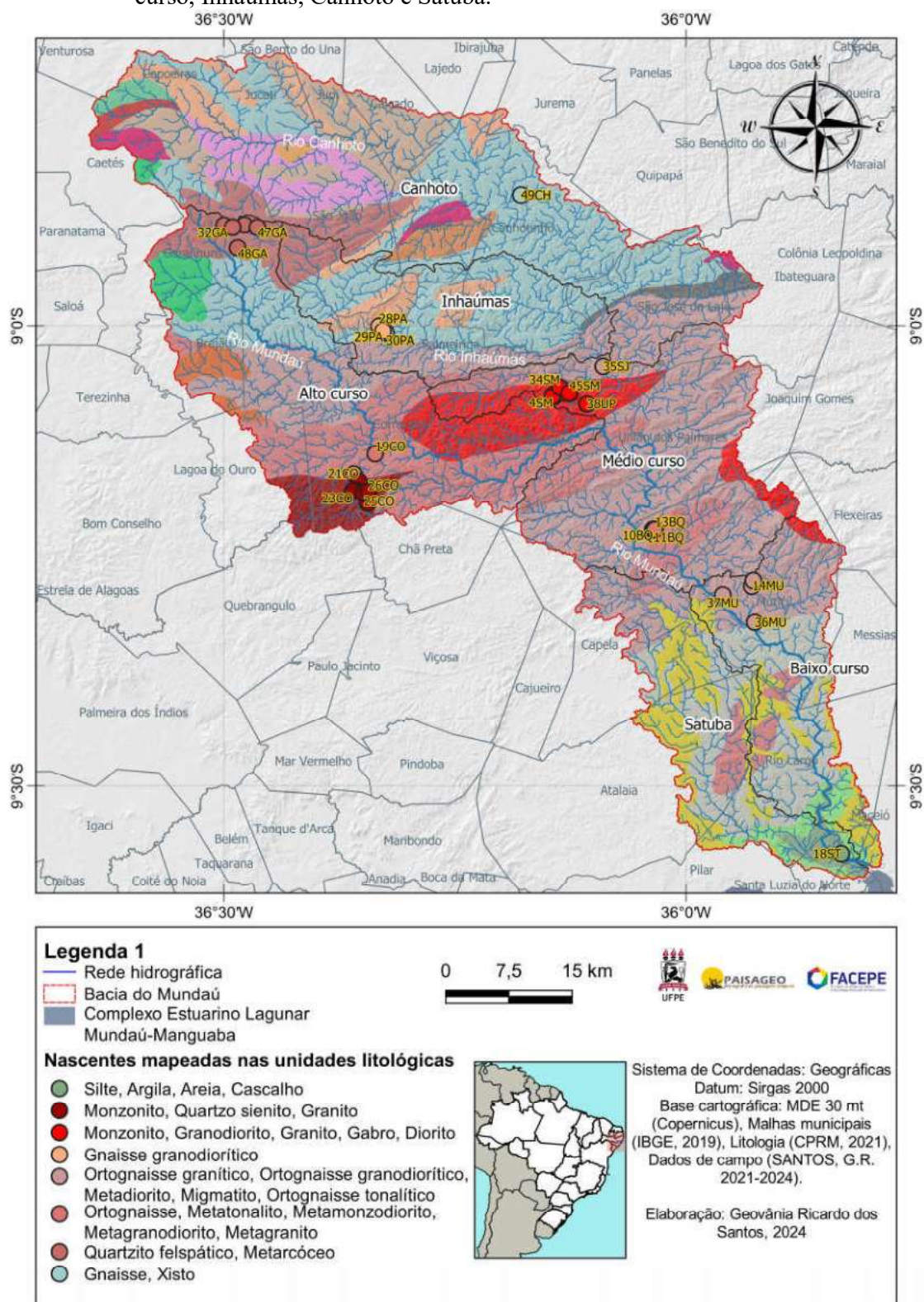
Na região sudeste do Alto curso, as nascentes 19CO e 20CO, e no Médio curso, as nascentes 10BQ, 11BQ, 12BQ e 13BQ, estão associadas à composição de Ortognaisse, Metatonalito, Metamonodiorito, Metagranodiorito e Metagranito (Figura 13). Rochas formadas pelo metamorfismo de rochas ígneas, compostas de minerais, como quartzo e feldspato. Ainda no Alto curso, as nascentes 21CO a 26CO e 31CO, 39CO, 40CO, 41CO e 42CO, localizadas em Correntes, ocorrem em uma descontinuidade litológica composta de constituição Plutônica, Monzonito, Quartzo sienito, Granito (Figura 13), resultantes de esforços tectônicos e rochas que passaram por alívio de pressão, ascendendo à superfície (APAC, 1998).

No Inhaúmas, a nascente 30PA e no Canhoto, a nascente 49CH estão associadas a rochas do tipo Gnaiss, Xisto (Figura 13), enquanto as nascentes 28PA e 29PA ocorrem em estruturas de Gnaiss granodiorítico (Figura 13). Na sub-bacia do Médio curso, todas as 13 nascentes localizadas em Santana do Mundaú e União dos Palmares estão situadas em rochas como Monzonito, Granodiorito, Granito, Gabro e Diorito (Figura 13). Além disso, as nascentes 35SJ, em São José da Laje, e 14MU a 17MU, 36MU e 37MU, em Murici, ocorrem em Ortognaisse

granítico, Ortognaisse granodiorítico, Metadiorito, Migmatito e Ortognaisse tonalítico (Figura 13).

Por fim, a nascente 18ST, localizada na sub-bacia do Satuba, está associada a unidade composta por Silte, Argila, Areia e Cascalho (Figura 13).

Figura 13- Unidade litológica nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.



Legenda 2

Unidades litológicas - Períodos

Cenozóico

-  Laterita
-  Siltito, Conglomerado, Argilito, Arenito
-  Silte, Argila, Areia, Cascalho

Mesozóico

-  Conglomerado

Neoproterozóico

-  Monzonito, Quartzio sienito, Granito
-  Monzonito, Granodiorito, Granito, Gabro, Diorito
-  Alcalinoi-feldspato granito, Ortognaisse, Ortognaisse tonalítico
-  Monzogranito, Sienogranito
-  Gnaiss granodiorítico
-  Diatexito
-  Ortognaisse granítico, Ortognaisse granodiorítico, Metadiorito, Migmatito, Ortognaisse tonalítico
-  Ortognaisse, Metatonalito, Metamonzodiorito, Metagranodiorito, Metagranito
-  Quartzio diorito, Granodiorito, Granito, Tonalito
-  Metagrauvaca, Xisto

Mesoproterozóico

-  Quartzito feldspático, Metarcóceo
-  Ortognaisse de composição tonalítica e quartzio-diorítica a diorítica, migmatizados
-  Gnaiss, Xisto
-  Metatexito
-  Leucogranito, Metagranitóide

Paleoproterozóico

-  Magnetitito, Metamafito, Magnetita quartzito, Paragranulito, Metaultramafito, Metarcóseo, Metapiroxenito, Muscovita quartzito, Quartzito, Rocha calcissilicática, Mármore dolomítico, Formação ferrífera bandada, Anfibolito
-  Ortognaisse tonalíticos e granodioríticos

Fonte: A autora (2024)

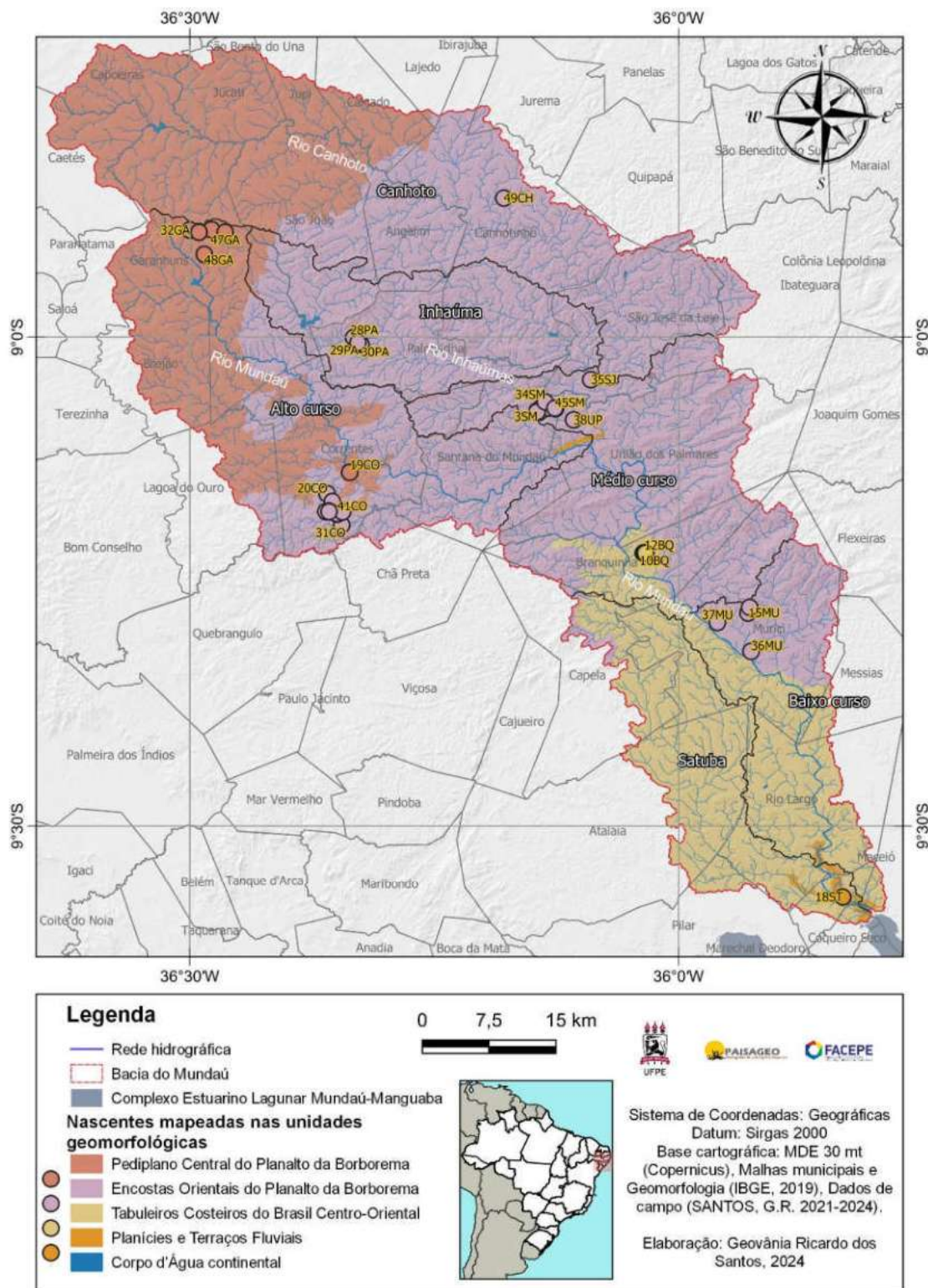
Nas Unidades geomorfológicas da bacia, as nascentes destacam-se em várias classificações: Pediplano Central, Encostas Orientais, Tabuleiros Costeiros e Planícies e Terraços Fluviais (Figura 14 e Apêndice 1). Geomorfologicamente, essas unidades constituem um fator ambiental com atuação direta nos processos relacionados às nascentes, uma vez que resultam das constantes transformações da superfície (FELIPPE et al., 2017).

Dentro dessas classificações, as nascentes localizadas no Alto curso, em Garanhuns (32GA, 33GA, 43GA e 46GA a 48GA) estão situadas no Pediplano Central, assim como a nascente 19CO, em Correntes, que corre na porção final desta unidade (Figura 14). Esta compartimentação morfoescultural corresponde a uma região de Cimeira, a superfície mais elevada da Borborema (CÔRREA et al., 2010), com compartimentos ligados a processos morfoclimáticos diferenciados, tanto em relação aos eventos tectônicos quanto em relação às variações litoestratigráficas (GOMES, 2015).

As demais nascentes do Alto curso, em Correntes, assim como todas as nascentes estudadas no Inhaúmas, Canhoto, Médio e Baixo curso, encontram-se nas Encostas Orientais (Figura 14). A característica marcante dessa unidade é a variação topográfica do relevo, que inclui superfícies e depressão residuais, além de colinas e morros dissecados. Esse tipo de relevo favorece escoamento concentrado, sendo classificado como dissecações em ravinas. A predominância de rochas metamórficas, como os complexos gnaisses - migmatíticos e granulitos, com um arcabouço moderadamente a intensamente fraturado, também é um aspecto relevante (GOMES, 2015). Essas transformações no relevo impactam diretamente na recarga do sistema de nascentes, que são ambientes dinâmicos e em constante transformação da paisagem (SILVA et al., 2022).

Ainda com base na interpretação do mapa, as nascentes em Branquinha estão localizadas nos Tabuleiro Costeiro (Figura 14). Esta Unidade é caracterizada por um substrato rochoso sedimentar, associado à Formação Barreiras, com cobertura vegetal que inclui áreas agrícolas e remanescentes de Floresta Estacional Semidecídua (PEREIRA e CESTARO, 2012). Por fim, a nascente 18ST, em Satuba, está situada nas Planícies e Terraços Fluviais (Figura 14). Essas Unidades, localizadas na porção do Baixo curso do Mundaú, são formadas por áreas tanto planas quanto inclinadas, com rochas sedimentares do cenozóico, que variam de pouco a moderadamente consolidadas (GOMES, 2015).

Figura 14- Unidades geomorfológicas nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.



Fonte: A autora (2024)

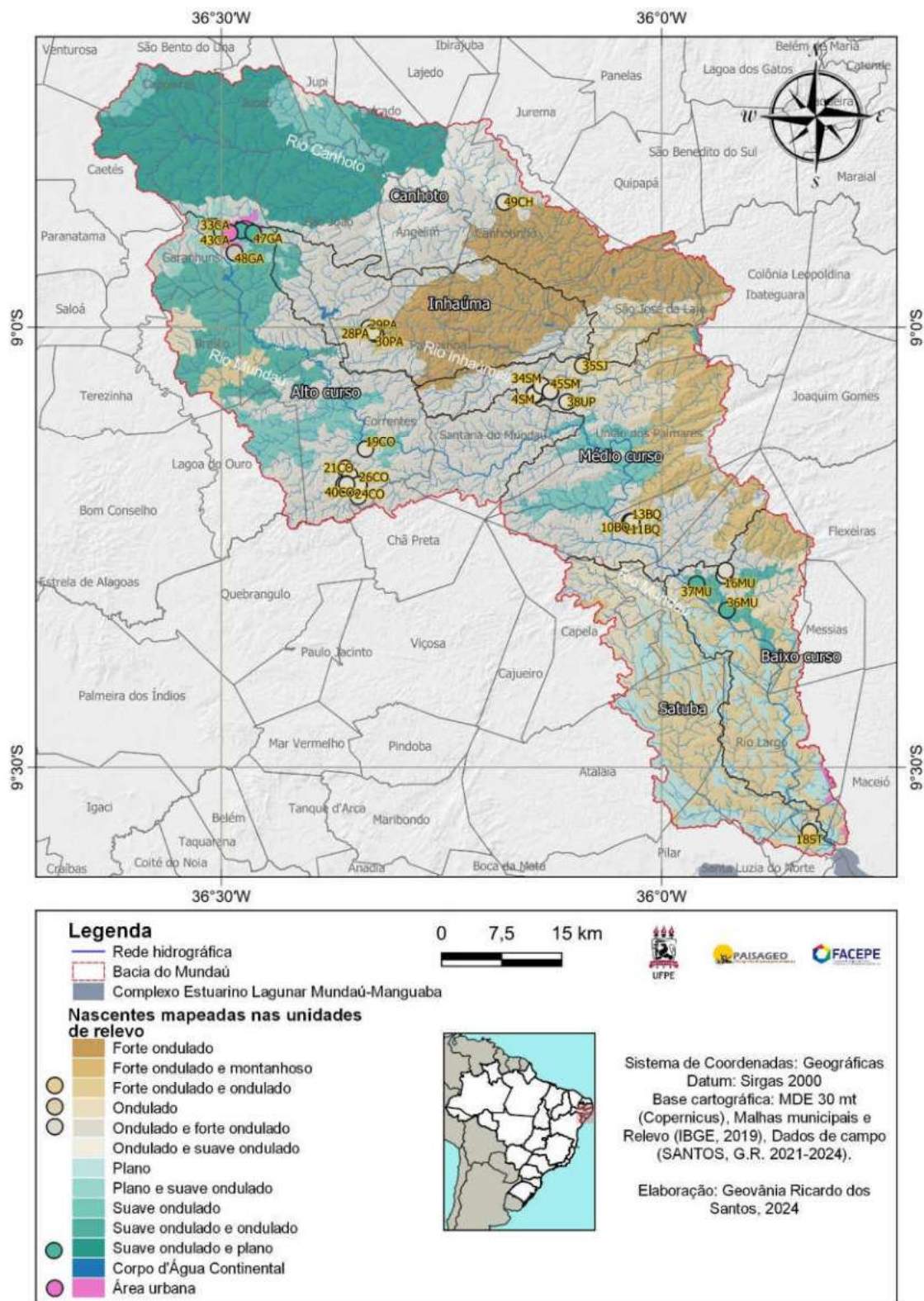
Considerando as categorias de relevo, as nascentes se distribuem em seis classificações: Forte ondulado e ondulado, Ondulado, Ondulado e forte ondulado, Plano e suave ondulado, Suave ondulado e ondulado e, por conseguinte, Área urbana (Figura 15 e Apêndice 1). O relevo é fator físico importante na infiltração de água no solo, pois quanto mais acentuado e declivoso, mais rápido é o escoamento superficial, o que pode comprometer a infiltração e a recarga do lençol superficial. No entanto, dependendo do tipo de solo, a capacidade de retenção de água pode variar, por exemplo, os Cambissolos possuem maior capacidade de infiltração de água, favorecendo a recarga do lençol superficial, em comparação aos Latossolos (OLIVEIRA et al., 2020).

Analisando a ocorrência das nascentes em relação à classificação de relevo, observa-se que, em Garanhuns, a nascente 32GA está localizada em uma área de relevo Plano e suave ondulado, ao passo que as 33GA e 43GA estão situadas em Área urbana (Figura 15). Essas nascentes estão em pequenos fragmentos de vegetação e áreas agrícolas, porém circundadas por zonas de intensa urbanização. Como destacam Azambuja e Corrêa (2015), essas áreas, voltadas para a expansão urbana no município de Garanhuns, são geomorfologicamente instáveis. Os ambientes de afloramento das nascentes passam por grande degradação devido à instabilidade, exacerbada pelo processo de urbanização, contaminação de águas residuais e erosão das encostas, locais onde várias das nascentes estão localizadas.

Comparadas às demais áreas, todas as nascentes analisadas em Correntes, Santana do Mundaú, Branquinha, de 16MU a 19MU em Murici, 18ST em Satuba e a 28PA e 29PA em Palmeirina estão situadas em um relevo Ondulado e Forte ondulado (Figura 15). A nascente 30PA em Palmeirina se encontra na transição entre Forte ondulado a ondulado, já a nascente 35SJ em São José da Laje está situada em relevo Ondulado (Figura 15).

Por fim, as nascentes 36MU e 37MU em Murici estão localizadas em relevo Suave ondulado e plano (Figura 15).

Figura 15- Unidade de relevo nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.



Fonte: A autora (2024)

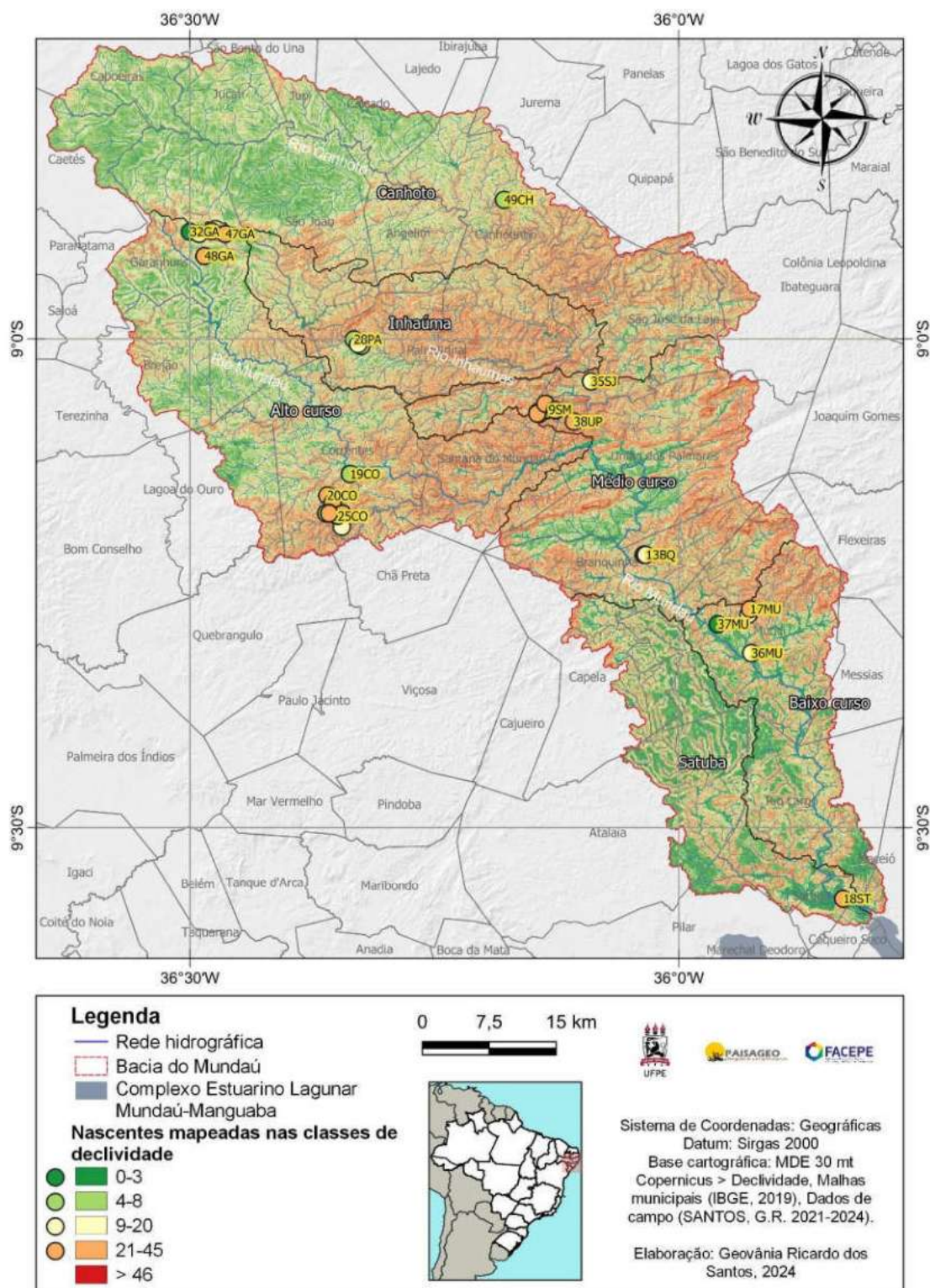
Considerando as variações de declividade observadas na bacia do Mundaú, que variam de 0% a mais de 46% (Figura 16 e Apêndice 1), nota-se que as menores declividades predominam na porção Norte e Noroeste da sub-bacia do Canhoto, assim como no Sul, nas sub-bacia do Satuba e Baixo curso (Figura 16). Por outro lado, as maiores declividades ocorrem na porção central da bacia (Figura 16), com uma maior predominância das classes a partir de 21% em toda região.

As nascentes distribuem-se conforme essas variações de declividade. No Alto curso, a nascente 32GA, encontra-se na classe de 0-3%, enquanto as nascentes 19CO, 22CO, 23CO, 39CO, 41CO estão localizadas na faixa de 4-8% (Figura 16). As nascentes 33GA, 43GA, 31CO e 40CO ocorrem na faixa de declividade entre 9-20%, e as nascentes 20CO, 21CO, 24CO, 25CO, 26CO e 42CO estão em declividades entre 21-45% (Figura 16).

Na sub-bacia do Inhaúmas, as nascentes 28PA e 30PA ocorrem em declividades de 4-8%, enquanto que a nascente 29PA se encontra na faixa 9-20% (Figura 16). No Médio curso, as nascentes situadas nas declividades de 9-20%, são: 1SM, 6SM, 8SM, 35SJ, 11BQ, 13BQ, 16MU e 36MU (Figura 16). Já as nascentes localizadas em declividade de 21-45% incluem: 2SM, 5SM, 7SM, 27SM, 34SM, 44SM, 45SM, 38UP e 10BQ (Figura 16).

No Baixo curso, a nascente 37MU está situada em declividades menores, de 0-3% (Figura 16), ao passo que as nascentes 17MU estão localizadas em declividades de 21-45%. Por fim, na sub-bacia de Satuba, a nascente 18ST ocorre em uma declividade de 21-45% (Figura 16).

Figura 16- Classificação da declividade nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.



Fonte: A autora (2024)

Além de outras características essenciais para ocorrência das nascentes, o solo é um elemento fundamental, pois está diretamente relacionado à continuidade geológico-geomorfológica da superfície terrestre e à interação com o armazenamento de água no solo, além de desempenhar um papel no transporte de propriedades físico-químicas para a água.

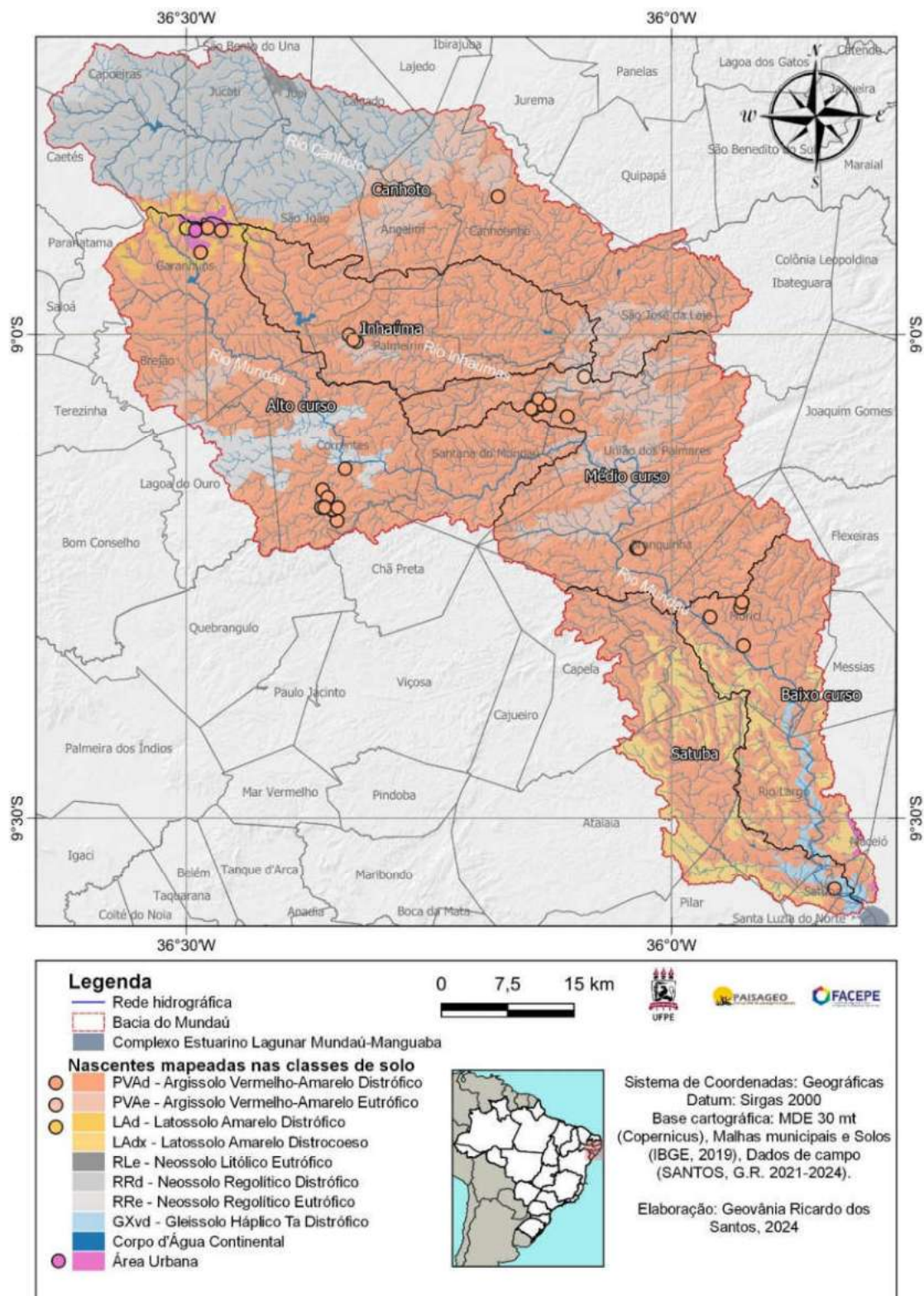
Em relação às classes do solo (Figura 17 e Apêndice 1), quatro classes se ressaltam nas nascentes mapeadas no Alto curso. As nascentes 33GA e 43GA estão localizadas em Área urbana, enquanto que a 32GA ocorre sobre Latossolo Amarelo Distrocoeso (Figura 17). Embora a nascente 33GA, esteja em área urbana, seu entorno apresenta uma superfície de solo exposto, com pequeno fragmento de algumas espécies nativas e áreas de agricultura.

O solo Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico predomina em todas as nascentes mapeadas no Inhaúma (25PA e 25PA), Canhoto (39CH), em todas as nascentes do Médio curso (Santana do Mundaú, União dos Palmares, Branquinha), Baixo curso (Murici) e no Satuba (Figura 17). A exceção é a nascente 30PA, no Inhaúmas, e na nascente 35SJ, no Médio curso, que ocorrem sobre Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (Figura 17).

De acordo com a Embrapa (2018), algumas características dos solos, como a drenagem do solo, podem ser influenciadas pelo tipo de solo. Os argissolos, por exemplo, apresentam profundidade variável, com drenagem que pode variar de imperfeita a forte. Sua cor pode ser avermelhada ou amarelada, com aumento no teor de argila do horizonte superficial para o horizonte B. Já os latossolos, geralmente bem ou moderadamente drenados, podem apresentar gleização e uma mudança pouco expressiva ou inexistente na quantidade de argila entre os horizontes A e B, sendo profundos e raramente abaixo de 1 metro de profundidade.

Essas observações evidenciam da relação solo/água no processo de recarga das nascentes. Durante o trabalho de campo, notou-se que, em quase todas as nascentes mapeadas as rochas associadas à região apresentavam minerais como grãos de quartzo e traços de mica, conferindo aos conglomerados rochosos uma superfície brilhante. Isso é indicativo, de acordo com a Embrapa (2018), de solos de forte desenvolvimento estrutural e boa drenagem.

Figura 17- Tipos de solos nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.



Fonte: A autora (2024).

A textural dos solos nas nascentes é distribuída entre as classes Média e Argilosa, Média/Argilosa e Média/Argilosa e Argilosa (Figura 18 e Apêndice 1). A disponibilidade de água no solo varia consideravelmente dependendo do tamanho dos grãos dos materiais da superficiais (TAKAHASHI e MURAYAMA, 2014), além de ser influenciada por fatores como precipitação, infiltração, estrutura do solo, matéria orgânica, entre outros (KLEIN e KLEIN, 2015).

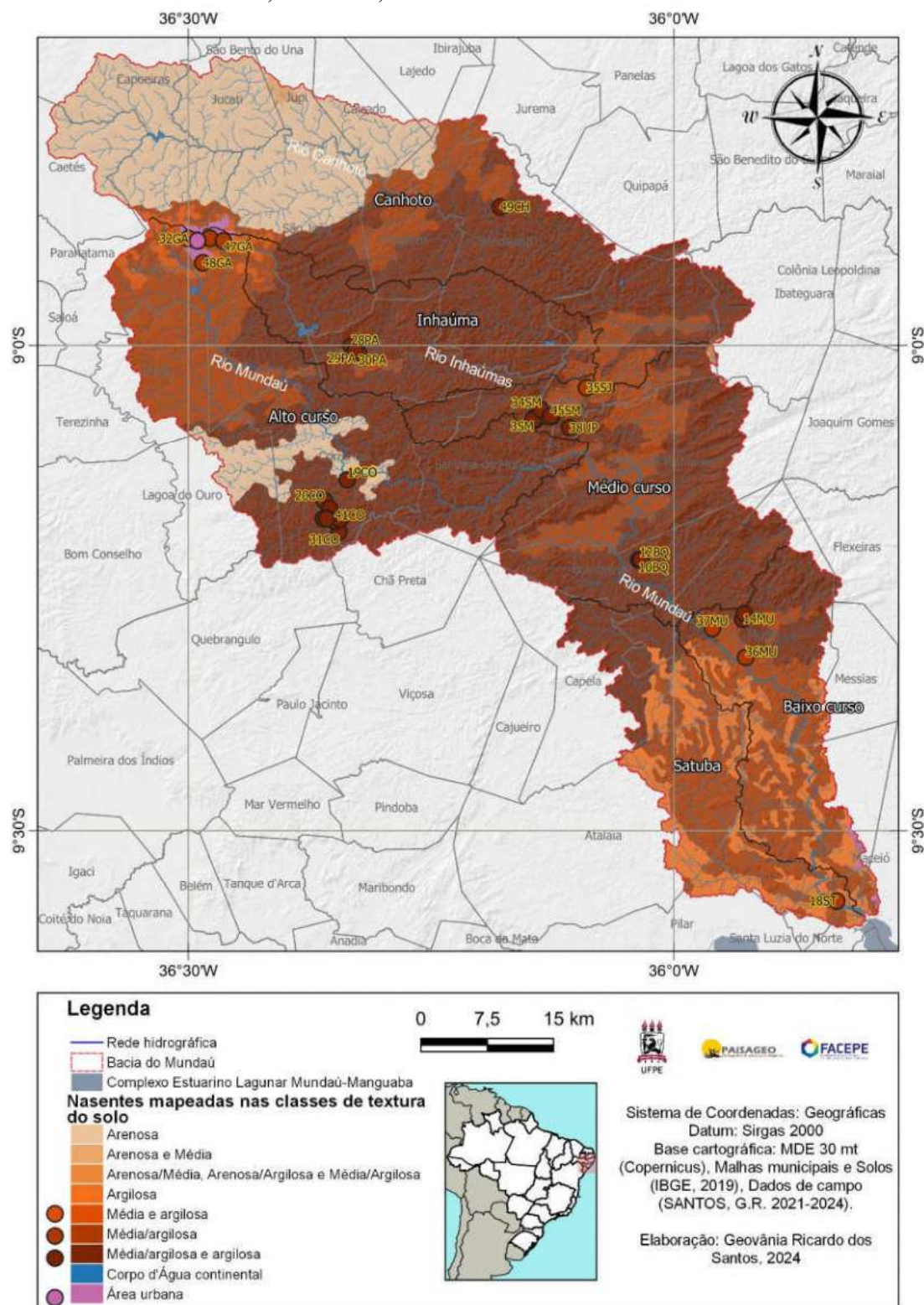
A classe entre Média e Argilosa, particularmente, ocorrem nas nascentes do Alto curso (32GA, 46GA, 47GA e 48GA), Inhaúmas (30PA), Médio curso (35SJ), Baixo curso (36MU e 37MU) e no Satuba (18ST) (Figura 18). As nascentes 33GA e 43GA estão localizadas em áreas urbanas. As demais nascentes, distribuídas pelo Alto curso, Inhaúmas, Canhoto, Médio e Baixo curso, são classificadas nas classes Média/Argilosa e Argilosa (Figura 18). A relação entre as classes textura e a água, de acordo com a Embrapa (2018) reflete o estágio de intemperismo da região, sendo que solos com textura argilosa possuem maior retenção de água.

A textura do solo está diretamente associada à taxa de infiltração de água no solo e o escoamento superficial dentro da bacia hidrográfica. Além das características morfológicas, é essencial compreender outros aspectos do solo, como a capacidade de infiltração, que influencia os processos de recarga do aquífero e o escoamento superficial, sendo um fator crucial na interação solo-água (BARBOSA et al., 2022).

A textura do solo é expressa pela proporção de seus componentes granulométricos - areia, silte e argila - e esses elementos afetam diretamente as propriedades físicas, hídricas e químico do solo (EMBRAPA, 2018). Em ambientes de nascentes, mudanças no ciclo de estruturação do solo, causadas pelo uso e cobertura do solo, como o aumento da densidade do solo, desestruturação dos agregados e redução da porosidade, podem impactar significativamente a capacidade de armazenamento e retenção de água (MANTOVANELLI et al., 2022).

A textura do solo influencia a taxa de infiltração de água. Zadeh e Sepaskhah (2016) apontam que a infiltração em solos franco-arenoso é maior do que em solos argilosos, sendo ainda menor em solos franco-argiloso. No entanto, há evidências de que a infiltração em solos franco argiloso pode aumentar devido à presença de microporos. Estudos demonstram que a infiltração sob a copa das árvores é significativamente maior, em torno de 354% em solos franco-argilosos, 152% em solos franco-arenosos e 69% em solos arenosos, em comparação com a infiltração em áreas 69%, em comparação com aqueles obtidos em áreas abertas fora das copas das árvores.

Figura 18- Tipos de textura dos solos nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.



Fonte: A autora (2024).

Em relação a vegetação primária, observa-se que as nascentes se distribuem em quatro formações originárias, características da região da bacia do Mundaú: Contato, Floresta Estacional Semidecídua, Floresta Ombrófila Aberta e Formação Pioneira (Figura 19 e Apêndice 1).

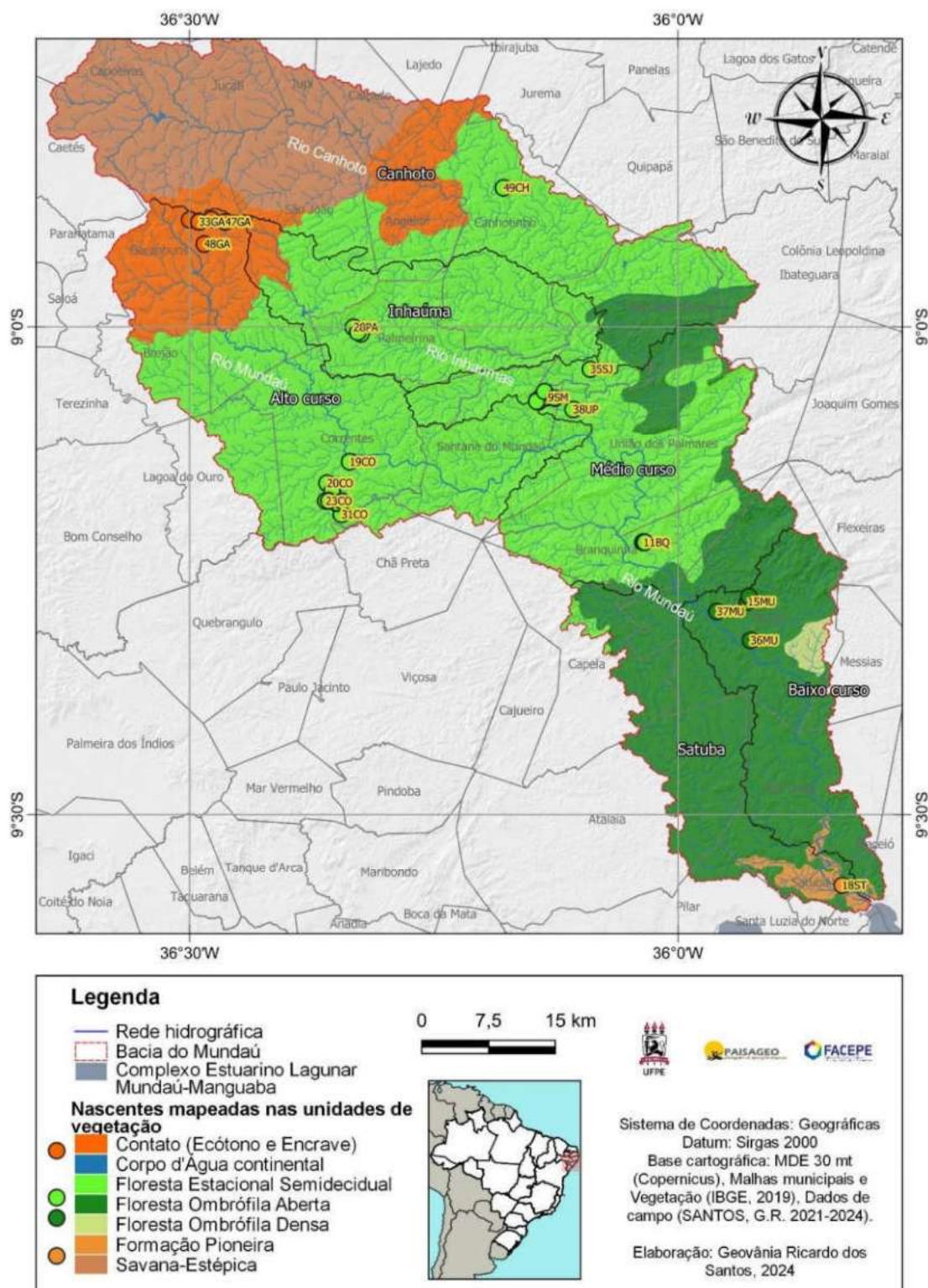
As nascentes localizadas no Alto curso, em Garanhuns, estão inseridas no domínio da vegetação de Contato (ecótono e encrave). O “Contato”, segundo o levantamento da vegetação do Brasil realizado pelo IBGE, refere-se a região de transição entre diferentes tipos de vegetação. Neste caso, encontra-se características típicas da Caatinga hiperxerófila e da Floresta Subcaducifólia. A principal característica do ecótono é a mistura florística entre dois tipos de vegetação distintas, um fenômeno influenciado pelos aspectos geológicos, geomorfológicos e climáticos da região. De acordo com o IBGE (2012), as espécies florísticas tendem a se isolar e dispersar pela paisagem, formando agrupamentos homogêneos ou uniformes, o que dificulta sua separação e identificação. Já o encrave é caracterizado por um mosaico de áreas onde duas regiões fitoecológicas se encontram.

No Alto curso, que abrange o mapeamento das nascentes no município de Correntes, nas sub-bacias do Inhaúma, Canhoto e Médio curso, predomina a Floresta Subcaducifólia “Floresta Estacional Semidecídua”, maior domínio contido na bacia. Essa vegetação é adaptada aos verões secos, e conforme o IBGE (2012), as árvores caducifólias perdem entre 20 e 50% de suas folhas durante o período de estiagem.

As nascentes localizadas no Baixo curso estão sob o domínio da Floresta Ombrófila Aberta. Já no município de Satuba, a vegetação é dominada pelas Formações Pioneiras, associadas a áreas instabilidade constante, como as planícies fluvial e aluviais, compostas por plantas adaptadas às condições ecológicas locais.

A conservação da vegetação nativa é um fator crucial para a preservação ambiental da bacia hidrográfica. Quando a vegetação nativa se mantém preservada, há uma diminuição das perdas de água, refletindo em contribuições significativas para o conteúdo de água no solo e no armazenamento superior de água. Esse processo favorece o abastecimento das vazões, especialmente, em períodos com menor incidência de chuvas (PAZ et al., 2022). A eficiência das taxas de infiltração sob a copa das árvores ocorre devido à canalização das raízes, conforme apontado por Zadeh e Sepaskhah (2016).

Figura 19- Tipos de vegetação primária nas nascentes estudadas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.



Fonte: A autora (2024)

Ao analisar o uso e cobertura terra na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, foram identificados 12 classes de uso, distribuídas entre: Formação Florestal, Formação Savânica, Mangue, Outras formações não florestais, Pastagem, Cana-de-açúcar, Mosaico de agricultura e pastagem, Infraestrutura urbana, Outras áreas não vegetadas, Afloramento rochoso, Rios/Lagos e oceanos e Outras lavouras temporários (Figura 20 e Apêndice 1).

A região da bacia hidrográfica possui um longo histórico de alterações intensas desde os períodos do Brasil-colônia (CENTENO e KISHI, 1994). De acordo com os dados do Mapbiomas, as classes predominantes de uso e cobertura da terra no espaço geográfico da área de estudo são evidenciadas, destacando-se a Pastagem, o Mosaico de agricultura e pastagem e a Cana-de-açúcar (Figura 20 e Tabela 6).

Embora as intervenções humanas nessas áreas florestais tenham sido constantes, é possível observar a presença de fragmentos de vegetação nativa, os quais desempenham importância na manutenção hidroecológica das nascentes e cursos dos rios. A preservação desses fragmentos é essencial, e ações de conservação (UCs) instituídas pelo poder público. Silva (2020) destaca que muitas nascentes já estão desmatadas ou perderam sua vegetação original nos municípios de Pernambuco.

As classes Formação florestal e Formação savânica, vegetação típica da região, são fragmentos importantes que merecem atenção da gestão pública, pois são refúgios de biodiversidade e protegem as Áreas de Preservação Permanente (APPs) das nascentes.

Vários esforços têm sido realizados para aprimorar a gestão e o planejamento dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Mundaú. O Plano de Manejo da bacia do Mundaú (COTEC, 1999), propõe um levantamento integrado, cujo objetivo é fornecer subsídios para a implementação do Comitê de Bacia Hidrográfica. Como a bacia do Mundaú é uma bacia de ordem interestadual, a organização e gestão em nível federal são essenciais. Iniciativas, como a mobilização e reuniões, têm buscando avançar na implantação integrada da bacia (CBHSF, 2022).

De acordo com Mattos et al. (2021), ao invés de ser criado um Comitê de Bacia pelo governo federal, foi constituído o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú/PE, homologado pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos em 24/09/2002, através da resolução nº 04/2002, publicada no Diário Oficial do Estado de Pernambuco em 02/10/2002. Apesar de se tratar de uma única bacia, a divisão administrativa foi realizada em dois comitês, após um longo processo de reuniões e tramitações de documentos pelos órgãos competentes. No entanto, o autor destaca que, até o momento, não foi formalizada a criação de uma diretoria provisória ou o termo de cooperação entre os três entes federados. Isso demonstra que, apesar dos

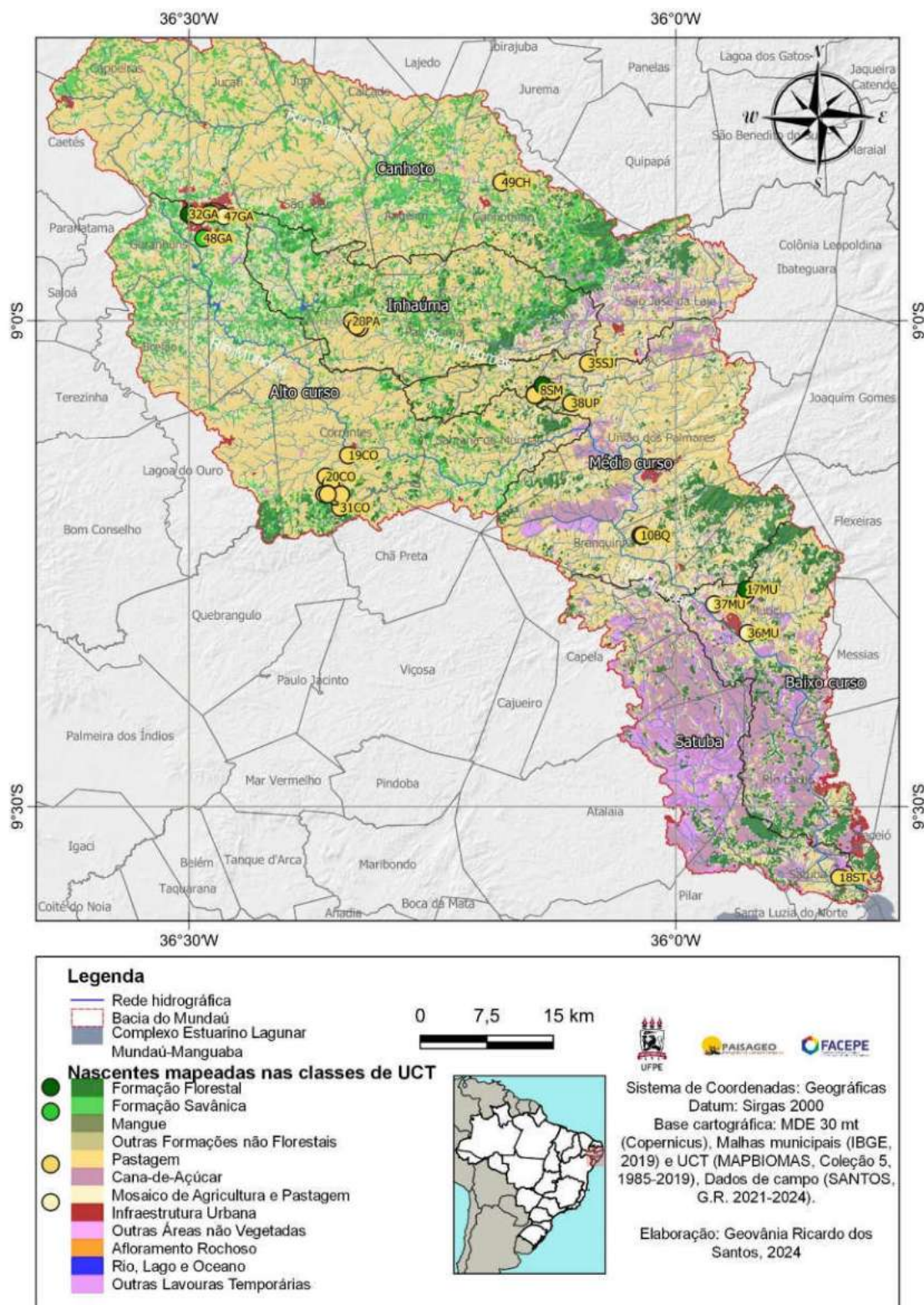
requisitos técnicos e de mobilização necessários, a criação de um Comitê de Bacia Hidrográfica depende de decisões políticas e administrativas mais amplas, ainda não alcançados.

Ao sobrepor as informações da base de dados do Mapbiomas com as nascentes mapeadas, observa-se que as mesmas estão localizadas em quatro classes de Uso e Cobertura da terra: Formação florestal, Formação savânica, Mosaico de agricultura e pastagem e Pastagem (Figura 20). Quando comparadas com observações de campo na escala local, essas classes relevam diferentes configurações.

A nascente 32GA “Vila Maria”, por exemplo, está inserida na rodeada por vegetação rasteira e área urbana. A nascente 29PA, em Palmeirina, está inserida na área urbana da cidade. Já as nascentes 36MU e 37MU estão próximas à rodovia, sendo que a nascente 36MU está em um afloramento rochoso com poucos indivíduos arbóreos, enquanto que a nascente 37MU se encontra em uma área de pastagem.

A nascente 33GA “Pau Pombo”, em Garanhuns, 36MU e 37MU, em Murici estão localizadas em áreas de Mosaico de Agricultura e Pastagem (Figura 20) e a nascente 26CO, em Correntes, está inserida na Formação savânica. As demais nascentes mapeadas estão situadas em ambiente de Pastagem (Figura 20).

Figura 20- Classificação do uso e cobertura da terra na bacia do Mundaú (BHRM), da série histórica 1985-2019 do Mapbiomas, nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.



Elaboração: A autora, (2024), com base em dados coletados em campo e Mapbiomas (1985-2019).

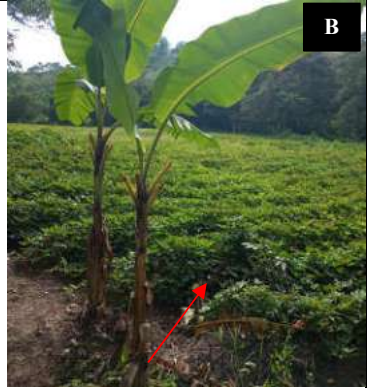
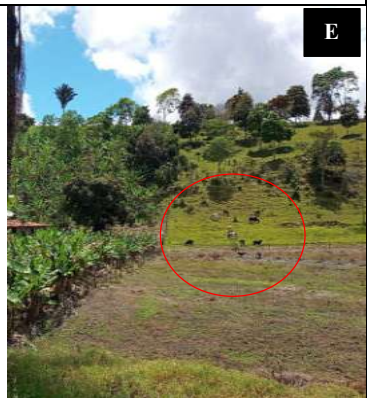
As diferentes configurações de uso e cobertura da terra refletem de maneira significativa a dinâmica territorial da bacia, particularmente nas áreas ao redor dos rios e nascentes. No Planalto da Borborema, onde se encontra o município de Garanhuns, os processos morfogenéticos passaram por várias transformações no sistema geomorfológico em tempos recentes. Atualmente, esses processos dinâmicos, que moldam a paisagem, têm a presença humana como um fator determinante, principalmente devido à expansão urbana (AZAMBUJA e CÔRREA, 2015). Os cenários atuais mostram que as nascentes profundamente modificadas, e a facilidade de acesso pontual para pessoas e animais de grande porte aumenta para a vulnerabilidade das áreas de preservação (Figura 21A).

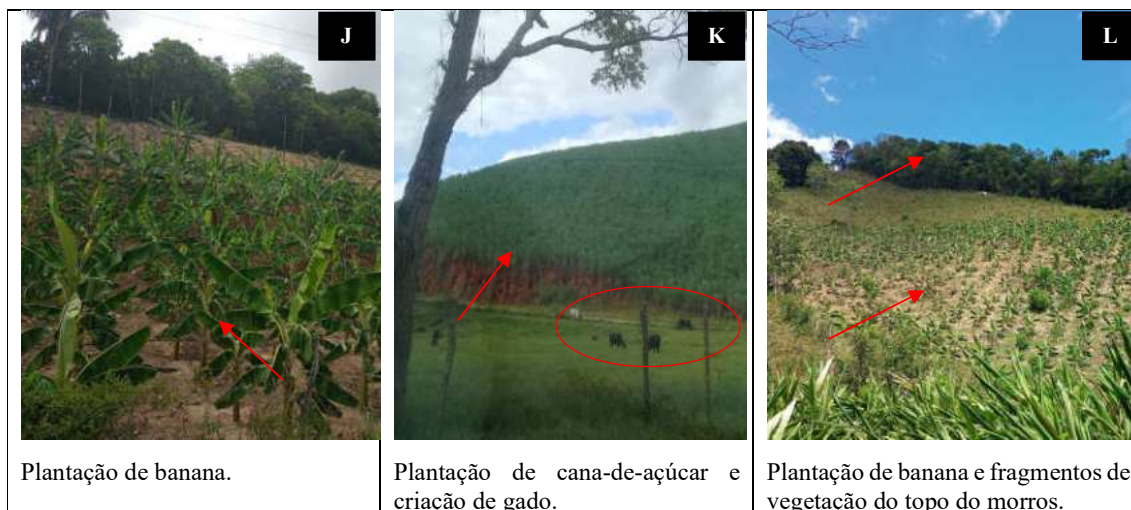
Em outras áreas, como em Correntes, as culturas de subsistência (Figura 21B e 21C) e, em Santana do Mundaú, as culturas familiares (Figura 21I e 21J), estão localizadas próximas a rios de pequena ordem e nascentes, aproveitando os recursos hídricos para irrigação. A criação de bovinos e ovinos também é comum na região, com destaque aqui para Correntes (Figura 21E), São José da Laje (Figura 21K) e Branquinha (Figura 21G), além de outros locais na bacia, onde a prática de pastagem é predominante, tanto para grandes quanto para pequenos produtores.

Ainda são observadas práticas de queima da vegetação herbácea e arbustiva (Figura 21F), frequentemente utilizadas para abrir espaço para cultivo, o que compromete a fertilidade dos solos (Figura 21H). A cana-de-açúcar, que tem grande expansão na região, também causa um contraste significativo na paisagem, especialmente nas porções Sul das sub-bacias do Inhaúmas e Canhoto, nos cursos Médio e Baixo curso, e em Satuba (Figura 21K).

Apesar das transformações nas paisagens, alguns fragmentos de vegetação nativa ainda são encontrados (Figura 21D), em diferentes tipos de relevo. Em áreas mais acidentadas, como em Santana do Mundaú, esses fragmentos são preservados, especialmente em áreas de topo, e nas encostas, as plantações. Embora as plantações não sejam uma regra nessas áreas de topo, saberes locais da população local indicam que a presença de fragmentos de vegetação proporciona um clima mais ameno e ajuda na proteção do solo, facilitando a infiltração da água durante as chuvas e, conseqüentemente, favorecendo a produtividade das plantações.

Figura 21- Diferentes usos da terra na Bacia Hidrográfica do Mundaú: em Garanhuns (A), Correntes (B a F), Branquinha (G e H), Santana do Mundaú (I e J) e São José da Laje (K e L).

		
Lançamento de lixo e animais próximos das nascentes.	Plantação de batata doce.	Plantação de banana próximo das nascentes.
		
Fragmentos de vegetação.	Criação de gado e aração do solo.	Queimada de vegetação herbácea/arbustiva.
		
Criação de ovinos.	Aração do solo em áreas de cultivo de subsistência.	Plantação de laranja.



Fonte: A autora (2019-2023).

Ao analisar a distribuição da área (km²) e a percentagem (%) das classes de uso e cobertura da terra na totalidade da bacia, observou-se que a classe Pastagem ocupa a maior extensão, com 2.387,63 km², apresentando 58,06% (Tabela 6). Em contraste, as classes com menor área foram Mangue, com área de 0,004 km² – 0,00010% e Outras formações não florestais, com 0,50 km² – 0,01% (Tabela 6).

No que se refere aos de vegetação nativa, a classe Formação florestal abrange 384,88 km² – 9,36%, seguida pela Formação savânica, com 369,06 km² – 8,97% (Tabela 6). Como a Formação savânica apresenta um dossel mais espaçado, essa classe foi agrupada no Mapbiomas, refletindo a presença de espécies vegetais típicas da Caatinga, como mencionam, do tipo Subcaducifólia.

Tabela 6- Distribuição da área (km²) e percentagem (%), das classes de Uso e Cobertura da Terra, na bacia do Mundaú.

Código identificação	Uso e cobertura da terra	Área (km ²)	%
3	Formação florestal “Floresta Subperenefólia”	384,88	9,36
4	Formação savânica “Florestas Subcaducifólia e Caatinga”	369,06	8,97
5	Mangue	0,004	0,00010
13	Outras formações não florestais	0,50	0,01
15	Pastagem	2.387,63	58,06
20	Cana-de-Açúcar	375,30	9,13
21	Mosaico de agricultura e pastagem	363,85	8,85
24	Infraestrutura urbana	46,93	1,14
25	Outras áreas não vegetadas	1,35	0,03
29	Afloramento Rochoso	0,72	0,02

33	Rios/Lagos (Corpos d'água)	9,46	0,23
41	Outras lavouras temporárias	172,85	4,20

Elaboração: A autora (2024), com base em Mapbiomas.

5.1.1 Mapeamento geoespacial da recarga de águas subterrâneas na bacia do Mundaú

Os resultados obtidos a partir do método AHP revelam uma análise de favorabilidade das zonas de recarga de águas subterrâneas na bacia do Mundaú (Apêndice 2 a 6). O delineamento das zonas de recarga na bacia do Mundaú identificou quatro categorias: Ruim, Razoável, Moderado e Excelente (Figura 22). Observa-se que as zonas Moderada predominam em todas as seis sub-bacias da bacia do Mundaú (Figura 22), seguidas das zonas Excelente, localizadas nas sub-bacias do Alto, Canhoto e Médio curso (Figura 22).

As zonas de categoria Razoável e Ruim são mais frequentes nas sub-bacias do Baixo curso e Satuba (Figura 22). As diferentes classes de recarga de água subterrânea são influenciadas os diferentes fatores ambientais da bacia. As áreas de recarga ruim encontram-se em ambientes de Tabuleiros costeiros, sugerindo formações rochosas resistentes e antigas, datadas do Paleoproterozóico e rochas menos resistente de baixa permeabilidade e porosidade, do período Cenozóico (Figura 13), ainda assim, a avaliação através do mapa demonstra que a bacia do mundaú detém alta capacidade de recarga de águas no subsolo.

A maior capacidade de recarga está associada à composição específica das rochas, ao grau de fraturamento e à presença de declives moderados, que favorecem a infiltração de água. Contudo, a percolação e infiltração de águas superficiais nos aquíferos são fortemente influenciadas pela geologia local (DERDOUR et al., 2022).

De acordo com Gomes (2015), a morfometria da bacia do Mundaú apresenta uma hidrografia ramificação e bem drenada, com rios de sétima ordem, sendo o padrão influenciado pela impermeabilidade de certos tipos de rochas, como as cristas e relevos residuais no Alto Mundaú, Canhoto e Inhaúma. Na sub-bacia do Médio curso, predomina a presença de rochas metamórficas moderadamente a intensamente fraturadas, enquanto as sub-bacia do Satuba e Baixo curso do Mundaú são compostas por depósitos sedimentares do Quaternário.

A aplicação de Sistema de Informação Geográfica e Método de Análise Hierárquica, como defendido por Pande et al. (2021), mostra que a sobreposição dos parâmetros utilizados na estimativa proporciona uma análise essencial para a gestão dos recursos hídricos. A delimitação dessas zonas pode melhorar a gestão das águas subterrâneas na bacia hidrográfica

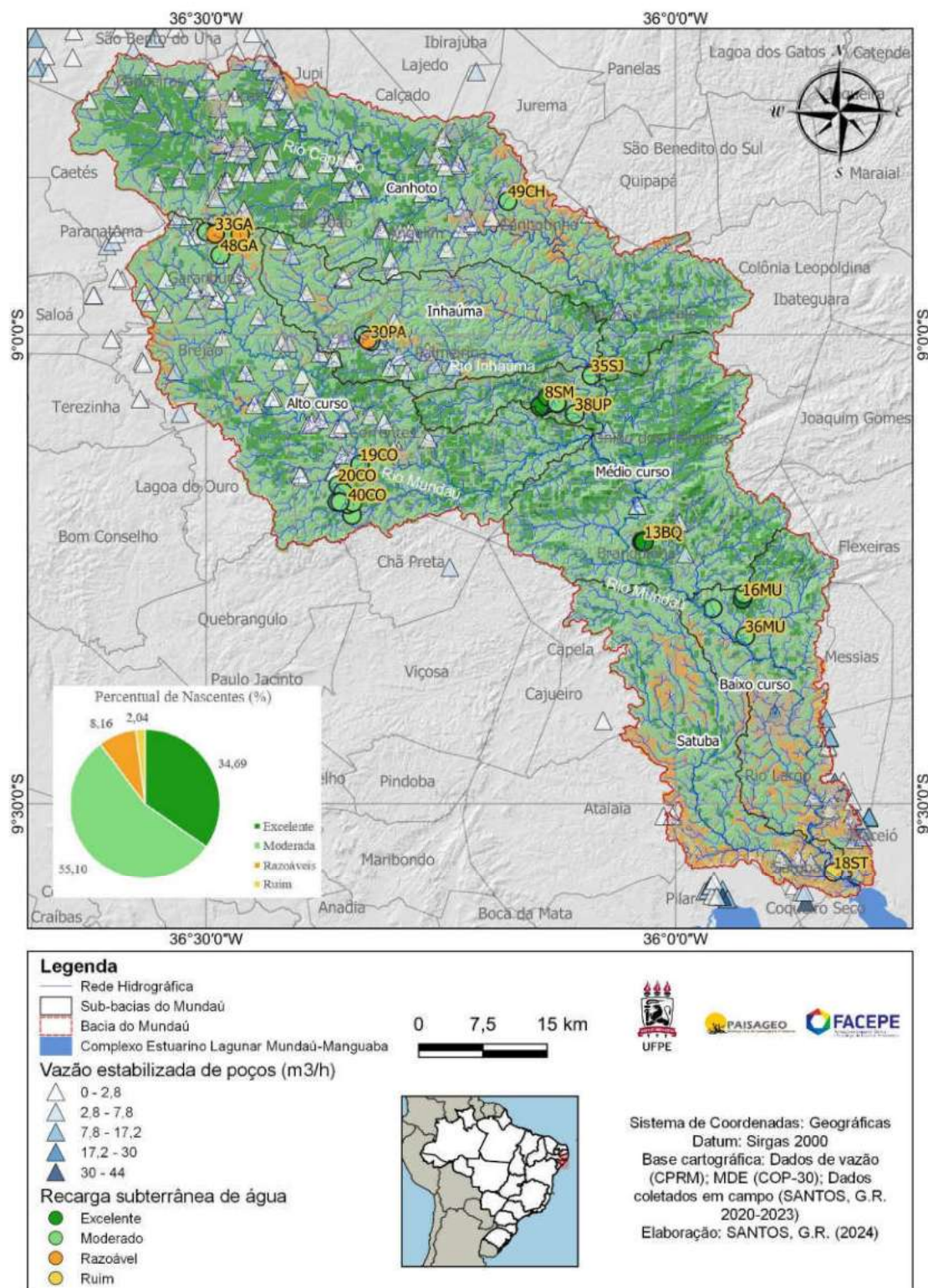
e, conforme Derdour et al. (2022) fornecer informações cruciais para a formulação de políticas públicas, além de apoiar decisões e orientar pesquisas sobre prospecção hidrogeológica.

Embora as nascentes sejam ambientes locais, foi realizada a sobreposição entre as nascentes mapeadas e os setores das zonas de recarga. Observou-se que a parte das nascentes estão conectadas a zonas de recarga Moderada (Figura 22). Das 49 nascentes mapeadas nas sub-bacias, 17 (35,69%) estão situadas em zonas Excelente, 27 (50,10%) em zonas Moderadas, 4 (8,16%) em zonas Razoáveis e 1 (2,04%) em zona Ruim (Figura 22).

As nascentes localizadas em zonas de recarga Excelente são mais frequentes no Médio e Baixo curso (Figura 22), enquanto as que estão em zonas Moderadas predominam Alto curso e Inhaúmas (Figura 22). Já as nascentes em zonas Razoáveis são mais comuns no Alto curso, e apenas no Satuba encontra-se uma nascente zona Ruim (Figura 22).

Os dados de vazão estabilizada (m^3/h) dos poços subterrâneos foram também sobrepostos ao mapa de recarga de água subterrânea (Figura 22). Deparou-se com algumas lacunas nas informações de vazão, especialmente nas sub-bacias do Satuba, Médio e Baixo curso. No entanto, as informações disponíveis indicam que as vazões dos poços subterrâneos variam entre 0,03 e 44 m^3/h na bacia o Mundaú, distribuídas em cinco classes (Figura 22). No Alto curso, Inhaúmas e Canhoto, as vazões estão concentradas nas classes 0 - 2,8 m^3/h e 2,8 - 17,2 m^3/h , ao passo que no Satuba, Médio e Baixo curso, há uma distribuição em todas as cinco classes de vazão (Figura 22).

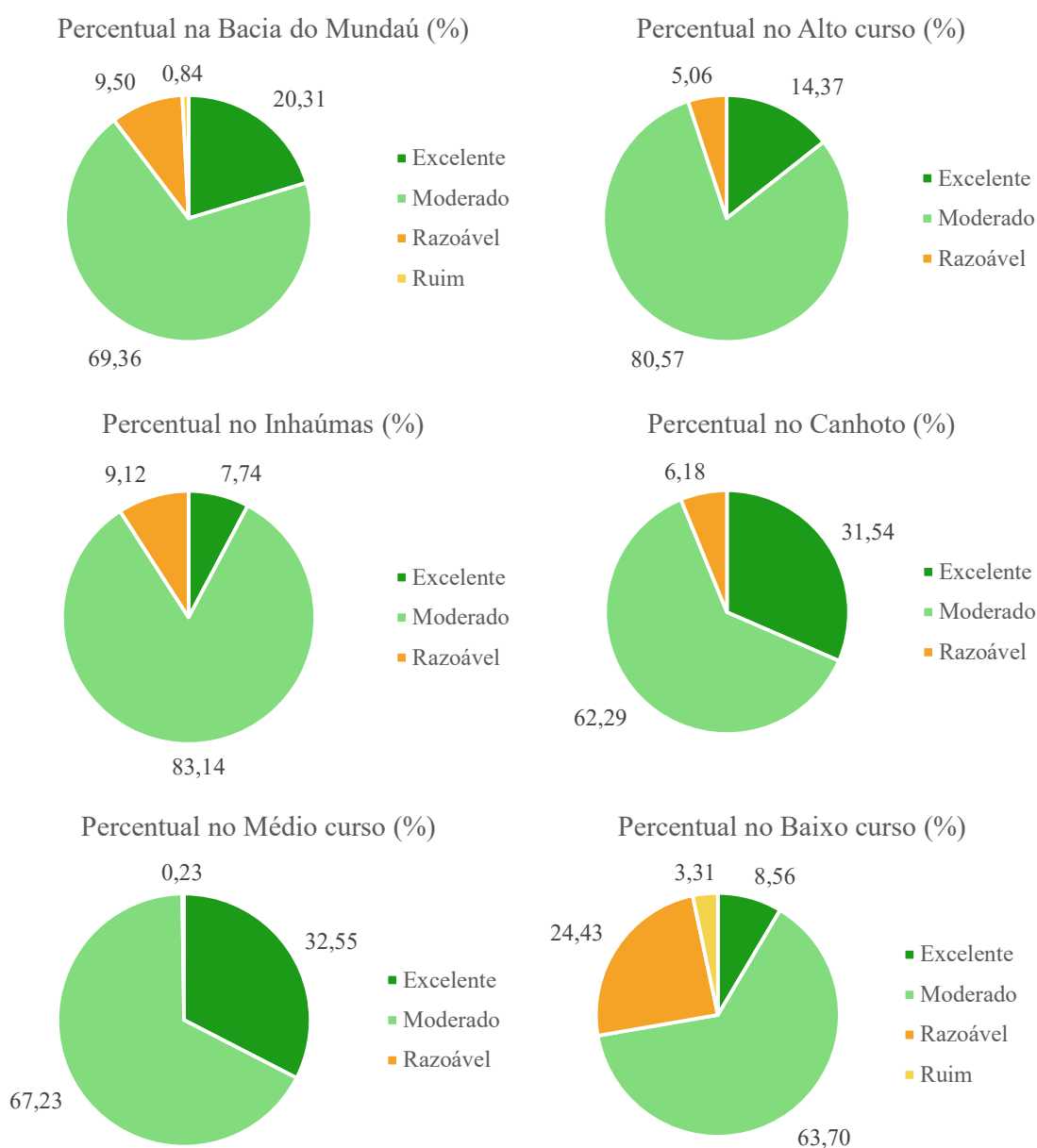
Figura 22- Recarga de águas subterrâneas e dados de poços nas sub-bacias Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba, da bacia do Mundaú.

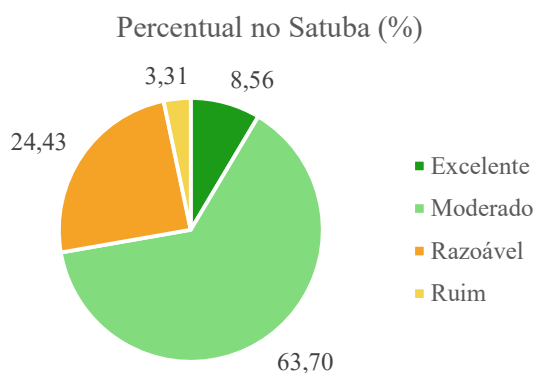


Fonte: A autora (2024).

A distribuição percentual das zonas de Recarga de águas subterrâneas foi estimada para a bacia e suas respectivas sub-bacias: Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba (Figura 23 e Apêndice 12). De acordo com a análise, as zonas de recarga Moderadas abrangem mais de 62% da área da bacia e suas sub-bacias (Figura 23). As sub-bacias do Médio curso e Canhoto apresentam os maiores percentuais de zonas classificadas como Excelente, com 32,55% e 31,54%, respectivamente (Figura 23). Por outro lado, as sub-bacias do Baixo e Satuba mostram valores percentuais consideráveis nas categorias Razoável e Ruim (Figura 23).

Figura 23- Percentual de área das classes de Recarga de águas subterrâneas na bacia e nas sub-bacias.





Fonte: A autora (2024).

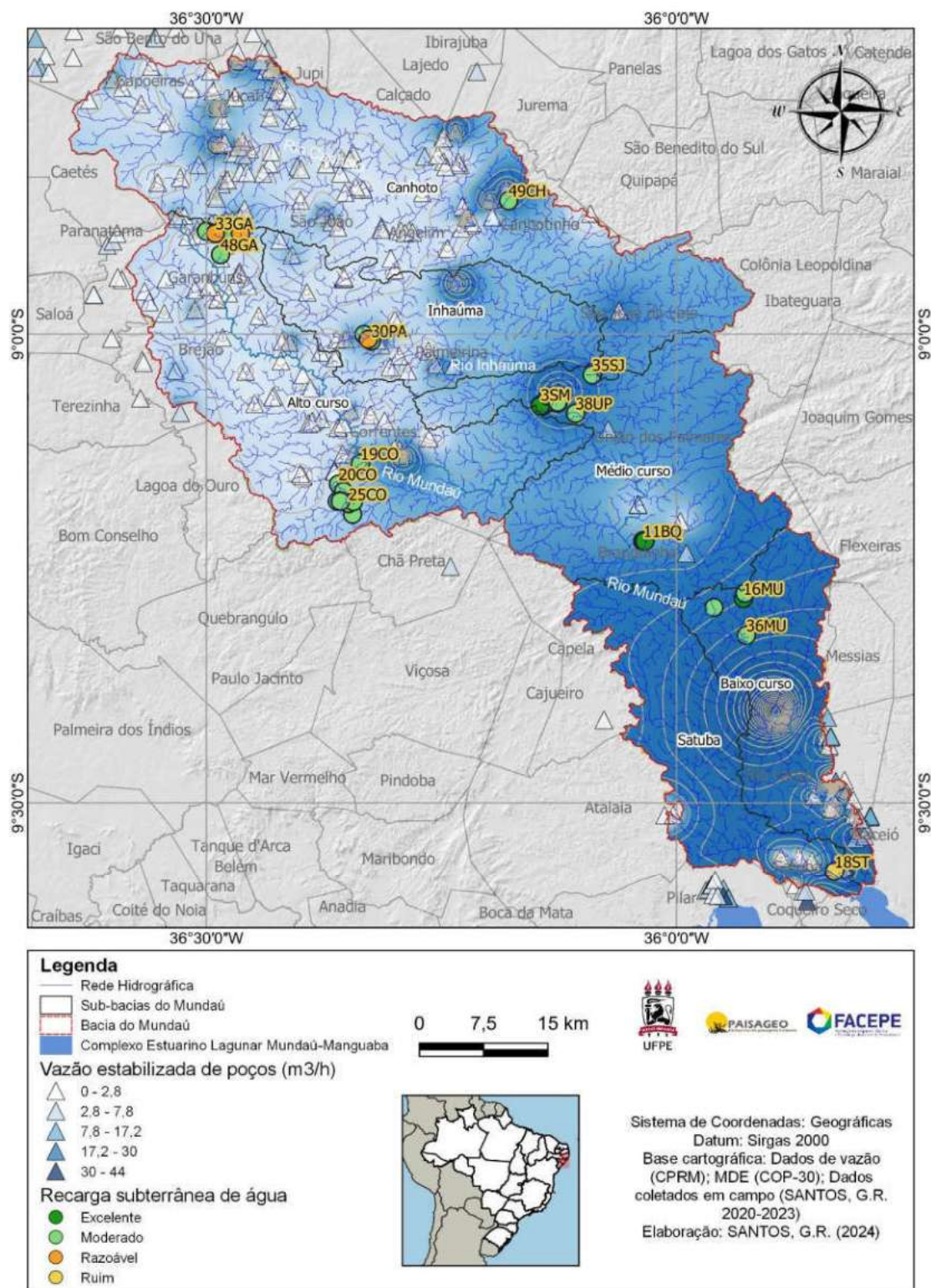
Os resultados da vazão estabilizada dos poços (m^3/h), obtidos por meio do método ponderado de distância inversa (IDW), variam entre 0 e $44 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figura 24). O mapa revela que a maior parte dos poços apresenta baixos rendimentos de vazão, especialmente no Alto curso, Inhaúmas e Canhoto. Todos municípios que compõem a porção pernambucana da bacia do Mundaú estão aderidas na delimitação do eixo Semiárido brasileiro, onde a segurança hídrica é um desafio constante, o que justifica o grande número de poços de captação de água. Um ponto importante a ser observado é o risco de esgotamento dos aquíferos, já que o uso indiscriminado pode levar seu esgotamento e a instabilidade dos ecossistemas, neste caso, é essencial a gestão responsável da regulação dos poços. Das 292 coordenadas geográficas de poços na região e suas proximidades, 225 estão localizadas nas sub-bacias supracitadas (Figura 24) o que evidencia o uso intenso das águas subterrâneas, particularmente pela atividade agrícola, que ao longo do tempo se tornou um dos principais responsáveis pela exaustão dos aquíferos (PANDE et al., 2021).

No Alto curso, Inhaúmas e Canhoto, as vazões são mais baixas, variando entre 0 e $7,8 \text{ m}^3/\text{h}$, com alguns pontos isolados apresentando vazões entre $2,8$ a $7,8 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figura 24). Já no Médio e Baixo curso, bem como no Satuba, a interpolação de dados revelou vazões entre $2,8$ a $7,8 \text{ m}^3/\text{h}$, com alguns pontos isolados nas faixas de $7,8 - 17,2$ e $17,2 - 30 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figura 24). Os maiores rendimentos de recarga subterrânea são observados nas nascentes do Médio curso.

Em estudos realizados para a África, os rendimentos dos poços foram classificados em cinco categorias: taxas de poços entre 0 e $0,1 \text{ L/s}$ foram consideradas extremamente baixas, $0,1$ e 2 L/s como baixas, de 2 e 5 L/s como muito altas, 5 a 20 L/s como Moderadas, e valores superiores a 20 L/s com altamente promissores numa bacias de águas subterrâneas (MACDONALD et al., 2010).

Dos 292 poços na série de dados, 189 apresentam vazões variando de 0,03 a 2,8 m³/h, 72 poços têm vazões entre 2,8 e 7,8 m³/h, 25 poços estão na faixa de 7,8 e 17,2 m³/h, 4 poços apresentam vazões entre 17,2 e 30 m³/h, e 2 poços localizados nas áreas periféricas da bacia possuem vazões entre 30 e 44 m³/h (Figura 24). Embora haja algumas limitações relacionadas a este método, os resultados são valiosos. O mapa de recarga de água subterrâneas representa um passo inicial fundamental para fornecer informações acerca das águas subterrâneas, sendo útil na orientação da gestão ambiental e fornecendo informações valiosas aos formuladores de políticas públicas (DERDOUR et al., 2022).

Figura 24- Interpolação da vazão estabilizada dos poços (m^3/h) nas sub-bacias Alto, Inhaúmas, Canhoto, Médio, Baixo curso e Satuba.



Fonte: A autora (2024).

5.2 Levantamento e geoespacialização dos sistemas hidroambientais de nascentes

Como resultado do mapeamento, foram identificadas 49 nascentes na bacia do Mundaú (Quadro 8). São nascentes que se inserem em paisagens completamente modificadas pelas mudanças resultantes da atividade humana, especialmente, as que afetam a estrutura do sistema nascente, desmatamento da vegetação ripária nativa, assim como a expansão da agricultura. Além disso, há indícios de contaminação química e microbiológica do solo e das águas por agrotóxicos e ocupação urbana.

No que diz respeito aos sistemas de nascentes nas sub-bacias, contabilizaram-se: no Alto curso (19 nascentes), municípios de Garanhuns e Correntes, no Médio curso (19 nascentes), 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 (Quadro 8).

A função ambiental de preservar a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade dos sistemas de nascentes é efetivada por alguns dispositivos legais da lei brasileira. Um exemplo é a Lei do Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651/2012), confirmada pela Ação Direta de Inconstitucionalidade nº 4.903/2018. Essa lei considera as nascentes perenes e intermitentes, independentemente da situação topográfica, como Área de Preservação Permanente (APP) e proteção ambiental, exigindo um raio mínimo 50 metros de composição de vegetação.

Quando avaliado o contexto de bacia sabe-se que a distribuição das nascentes é amplamente controlada pelo volume e extensão da recarga de águas subterrâneas, o relevo, a permeabilidade, estrutura e falhas geológicas (CARTWRIGHT e JOHNSON, 2018). Algumas características gerais podem ser extraídas e comparadas com as variações morfoestruturais da bacia do mundaú, em destaque, 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 (Figura 25 e Quadro 8). Essas variações corroboram a capacidade dos sistemas de nascentes de retenção, fluxo e permeabilidade hidrológica.

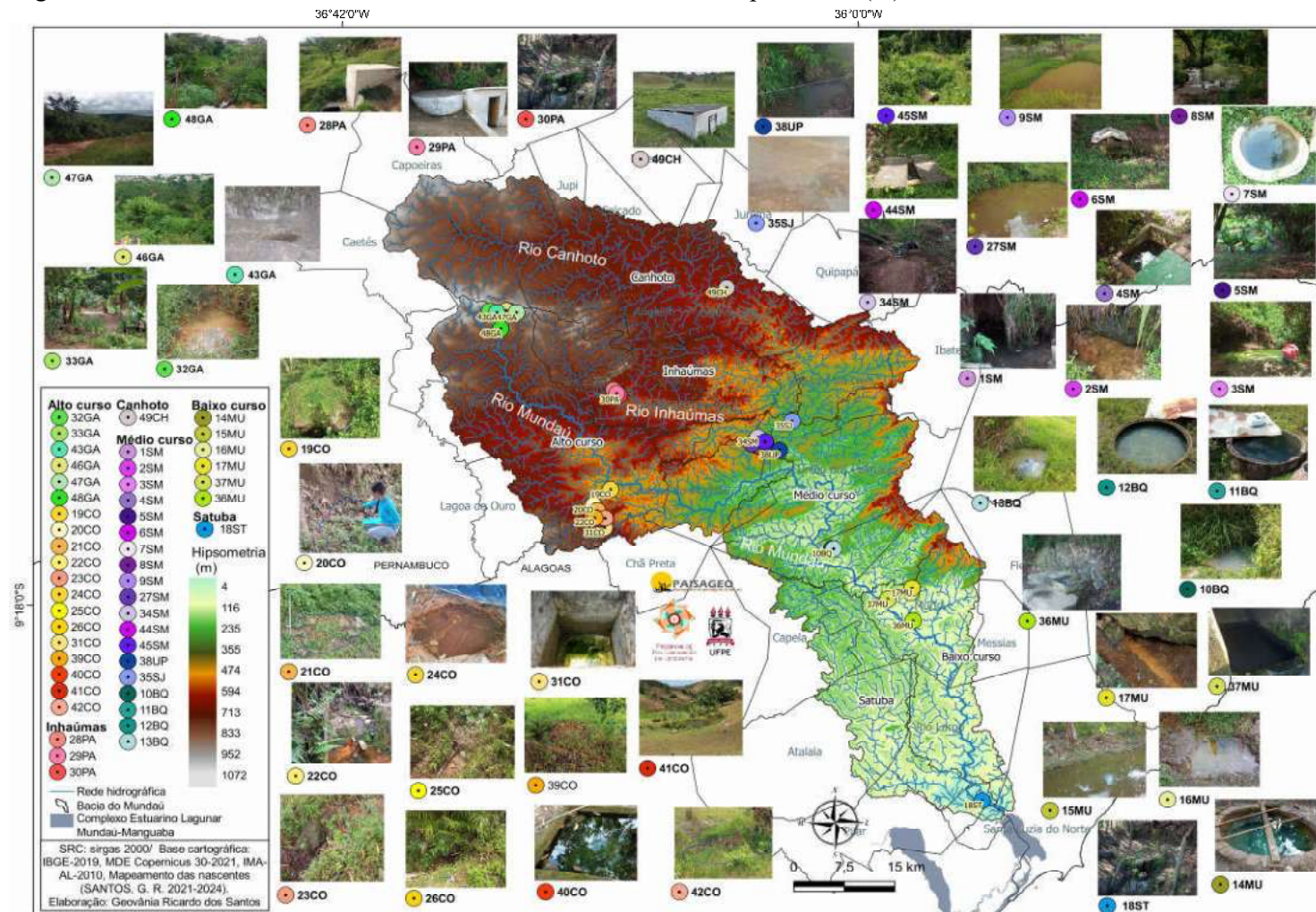
Nos ambientes de sistemas de nascentes situados no Alto curso, em Garanhuns (Figura 25) apesar do contraste com a energia de transporte de sedimentos e as amplas declividades sujeitas a erosões, são nascentes de grande volume, relativamente estáveis, estreitamente relacionadas a unidade litológica “Quartzito felpático” (Figura 14) e a morfogênese regional.

Em contrapartida, os sistemas de nascentes localizadas em Correntes até as do Médio curso, em particular Santana do Mundaú, São José da Laje e União dos Palmares, se inserem em diferentes respostas de descarga pela sua altimetria variadas pelo relevo ondulado e forte ondulado (Figura 15). Algumas das nascentes identificadas no Médio curso estão associadas a fraturas 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, caracterizando-se como um área de deposição dos sedimentos trazidos do Alto curso (GOMES et al., 2016). Sendo assim, as nascentes localizadas em Branquinha, Murici e Satuba, estão associadas a relevos que intercalam entre ondulado e suaves ondulosos e planos (Figura 25), de menores cotas altimétricas, representadas pelos Tabuleiros Costeiros, Planícies e Terraços Fluviais (Figura 25).

Nascentes de grande volume com descarga relativamente estável, como as encontradas no Alto e Médio curso, são comumente associadas a unidades geológicas extensas e de alta permeabilidade primária ou com estrutura geológica ou falhas que fornecem permeabilidade secundária, enquanto que as nascentes em áreas de baixa permeabilidade geológica, encontradas em todas as sub-bacias, geralmente são alimentadas por águas subterrâneas que se movem por caminhos de fluxo curtos e rasos (CARTWRIGHT e JOHNSON, 2018).

Figura 25- Panorama dos sistemas hidroambientais de nascentes e hipsometria (m) nas sub-bacias do Mundaú.



Fonte: A autora (2024).

Quadro 8- Nascentes mapeadas na Bacia Hidrográfica do Mundaú.

Sub-bacias	Município	Código	Localização	Coordenadas UTM	
				X	Y
Alto curso	Garanhuns	32GA	Bairro de Santo Antônio - Nascente Vila Maria	0774966	9016321
		33GA	Anexo ao Parque Rubervan Der Linden – Nascente Pau Pombo	0775999	9016078
		43GA	Parque Ruber Van Der Linden – Nascente temporária	0775991	9016075
		46GA	Nascente Pau Amarelo	0777550	9016328
		47GA	Nascente Brejo do Columinho	0778576	9015784
		48GA	Nascente Olho D'Água	0776683	9013776
	Correntes	19CO	Sítio São Francisco	0792785	8988675
		20CO	Sítio Situação	0790200	8986289
		21CO	Sítio Cafuringa	0790775	8985428
		22CO	Sítio Capivara	0790378	8984340
		23CO	Sítio Capivara	0791397	8984275
		24CO	Sítio Capivara	0791397	8984017
		25CO	Sítio Capivara	0791359	8983931
		26CO	Sítio Amolar	0791913	8984243
		31CO	Sítio Cordeiro	0791808	8982748
		39CO	Sítio Capivara	0790054	8994528
		40CO	Sítio Capivara	0791358	8983998
		41CO	Sítio Capivara	0791329	8984038
		42CO	Sítio Capivara	0791910	8984223
Inhaúmas	Palmeirina	28PA	Sítio Tiba	0793319	9004013
		29PA	Cidade de Palmeirina	0793798	9003453
		30PA	Sítio Clóvis	0794141	9003255
Canhoto	Canhotinho	49CH	Sítio Garrote	0810335	9019686
Médio curso	Santana do Mundaú	1SM	Sítio Duas Barras	0814047	8995469
		2SM	Sítio Duas Barras	0814036	8995461
		3SM	Sítio Duas Barras	0813926	8995591
		4SM	Sítio Duas Barras	0813932	8995586
		5SM	Sítio Duas Barras	0815007	8995854
		6SM	Sítio Duas Barras	0814680	8996005
		7SM	Sítio Duas Barras	0814139	8995427
		8SM	Sítio Duas Barras	0814493	8996019
		9SM	Sítio Duas Barras	0815169	8995899
		27SM	Sítio Duas Barras	0813885	8995464
		34SM	Sítio Duas Barras	0814798	8996578
		44SM	Sítio Duas Barras	0815955	8995804
		45SM	Sítio Duas Barras	0815899	8995861
	São José da Laje	35SJ	Sítio Tatu	0819963	8999060

	União dos Palmares	38UP	Sítio Timbó (Povoado Rocha Cavalcanti)	0817988	8994528
	Branquinha	10BQ	Assentamento agrário	0825708	8979319
		11BQ	Assentamento agrário	0825797	8979309
		12BQ	Assentamento agrário	0825809	8979352
		13BQ	Assentamento agrário	0825966	8979310
Baixo curso	Murici	14MU	Sítio Mumbuca	0178217	8972619
		15MU	Sítio Mumbuca	0178213	8972604
		16MU	Sítio Mumbuca	0178181	8972574
		17MU	Sítio Mumbuca	0178365	8973214
		36MU	Trecho da rodovia BR 104	0178566	8968245
		37MU	Trecho da rodovia BR 104	0174753	8971486
Satuba	Satuba	18ST	Região metropolitana de Satuba	0189108	8940488

Fonte: A autora, com base em trabalho de campo (2021-2023).

5.3 Sistemas hidroambientais de nascentes da bacia do Mundaú: relações funcionais na paisagem

Na porção do Alto curso da bacia do Mundaú, as seis nascentes mapeadas foram localizadas em unidades integrativas e funcionais, compostas por elementos estruturais que determinam o padrão de captação (REISS, 2013). No Sistema de captação do Riacho Vila Maria, estão as nascentes 32GA (Nascente Vila Maria) e 48GA (Olho d'Água), enquanto que no Sistema de captação do Pau Pombo, encontram-se as nascentes 33GA (Nascente Pau pombo), 43GA (Nascente Ruber Van), 46GA (Pau Amarelo) e 47GA (Brejo do columinho) (Figura 26A e 26E). As figuras 26B, C e D ilustram suas respectivas sub-bacias e ambientes de transição. Estas nascentes estão situadas entre o perímetro urbano e a zona rural de Garanhuns, em feições geomorfológicas de fundo de vale.

Essas nascentes foram mencionadas em registros históricos da formação da cidade devido ao seu significativo fluxo de água. Silva (2012) destaca a importância das águas de Garanhuns, desde a década de 30 a utilização das águas minerais da região. Segundo essa referência, o abastecimento de água da cidade provinha dessas nascentes, como a nascente Pau pombo (33GA), uma das primeiras nascentes utilizadas pela população. Esses registros históricos ilustram a intervenção humana nesses ambientes ao longo do tempo.

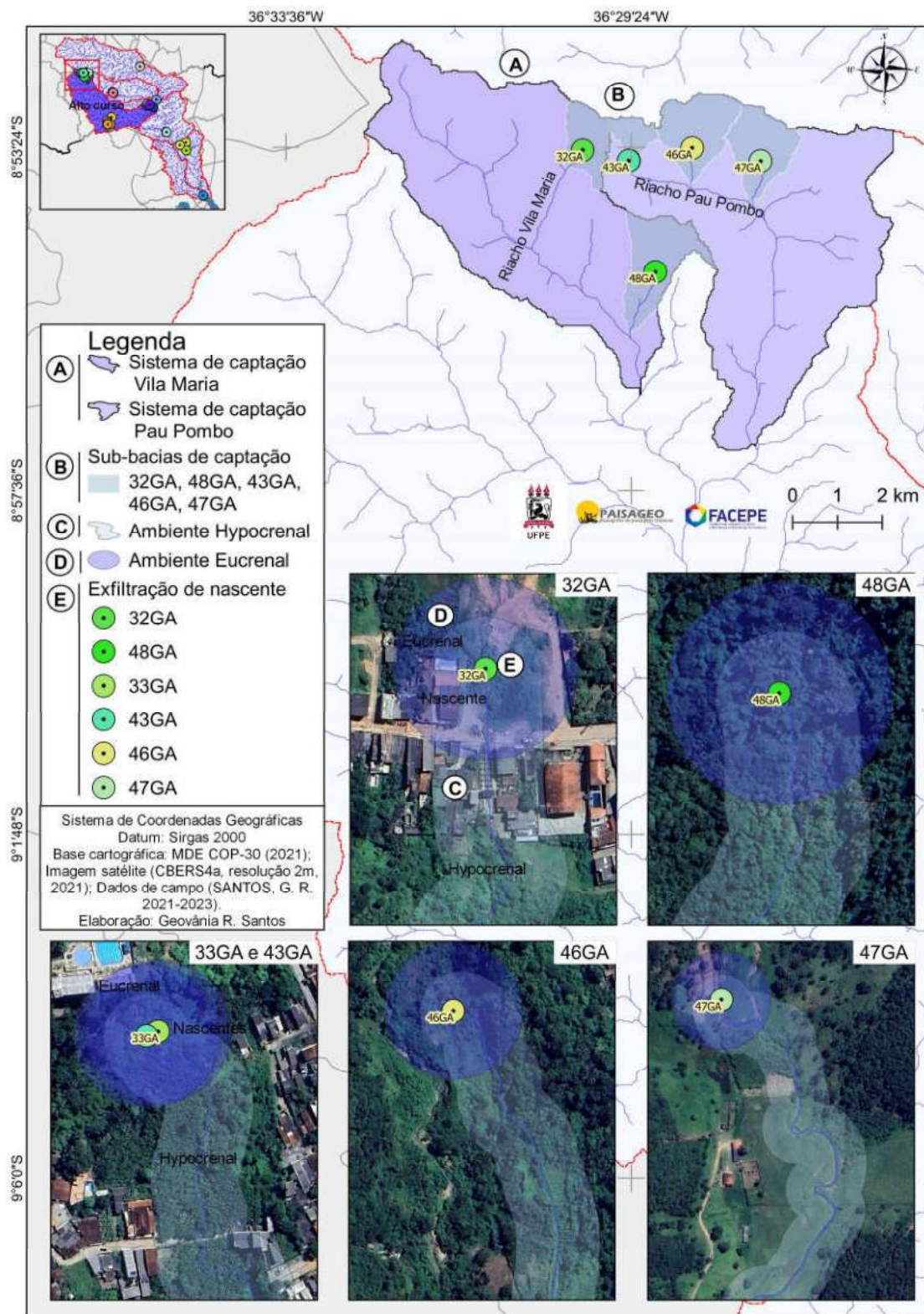
Ao considerar os fatores naturais e antrópicos, um aspecto principal diferencia essas nascentes em relação ao restante da bacia, especialmente seus aspectos estruturais regionais. Isso se deve à Cimeira estrutural Pernambuco-Alagoas (CORRÊA et al., 2010), a superfície de topo do Planalto da Borborema lhe confere uma dinâmica morfoclimática diferenciada:

temperatura amenas, tipos de vegetação de transição entre caatinga e mata atlântica, altitudes elevadas e relevo entre áreas planas e vales profundos.

A sub-bacia do Alto curso da Bacia Hidrográfica do Mundaú apresenta um diferencial hidrológico quanto à suscetibilidade de águas subterrâneas, em virtude de sua posição na unidade litológica denominada, conhecida como Unidade Quartzítica de Garanhuns. Composta por rochas quartzíticas, metarcósios e grauvacas, essa unidade é coberta por um manto arenoso intemperizado que pode atingir mais de 40 metros de espessura. Esse depósito recente desempenha papel crucial como aquífero, oferecendo água de boa qualidade mineral (APAC, 1998).

Outras nascentes da cidade incluem a Nascente Bom pastor, Olho d'Água, Serra Branca "Sementeira", São Vicente e Fazenda Trindade (SOARES, 2015; CAVALCANTI, 2013), algumas das quais estão sob concessão de outorga para exploração e são operadas pela companhia pública de água da prefeitura municipal.

Figura 26 – Sistema de captação superficial do Riacho Vila Maria e Pau Pombo, no Alto curso do Mundaú, município de Garanhuns.



Durante as visitas de campo, diversos fatores relacionados à pressão ambiental foram identificados nas áreas adjacentes das nascentes (Figuras 27A, C e E), entre os quais se destacam: a) intervenções na morfologia das nascentes, b) presença de animais pisoteando as áreas ao redor das nascentes, c) despejo de lixo, d) descarte de águas residuais, e) degradação da vegetação nativa, com a introdução de cultivos, f) compactação do solo em razão da urbanização e g) erosão do solo.

As nascentes 32GA (Figura 27A e B), 33GA (Figura 27C e D) e 43GA (Figura 27E e F) estão localizadas nas imediações da área urbana de Garanhuns, o que facilita o acesso a essas nascentes. As nascentes 32GA e 33GA (Figura 27A a D) possuem um grande fluxo de água, e conforme relatos dos moradores, a cidade se expandiu ao redor dessas nascentes, utilizando a água fornecida, o que demonstra os efeitos históricos da ação humana. Nascentes de grande volume como essas, possuem características que podem conferir maior resiliência hidrológica em um contexto de mudanças climáticas, como por exemplo, longos caminhos de fluxo subterrâneo, associados a unidades geológicas com alta permeabilidade e longos tempos de residência de águas subterrâneas (CARTWIGHT e JOHNSON, 2018).

A nascente 33GA está situada em uma área que originalmente pertenceria ao poder público, mas que atualmente está sob posse particular, com uma vasta plantação frutífera. Já a nascente 43GA encontra-se na borda do Parque Ruber Van Der Linder. Sendo uma nascente intermitente, ela corre o risco de ser extinta. Todas as nascentes mapeadas, incluindo estas, precisam de medidas mais eficazes para sua conservação. De acordo com os moradores locais, o aterramento do solo levou à extinção de outras duas nascentes nas proximidades.

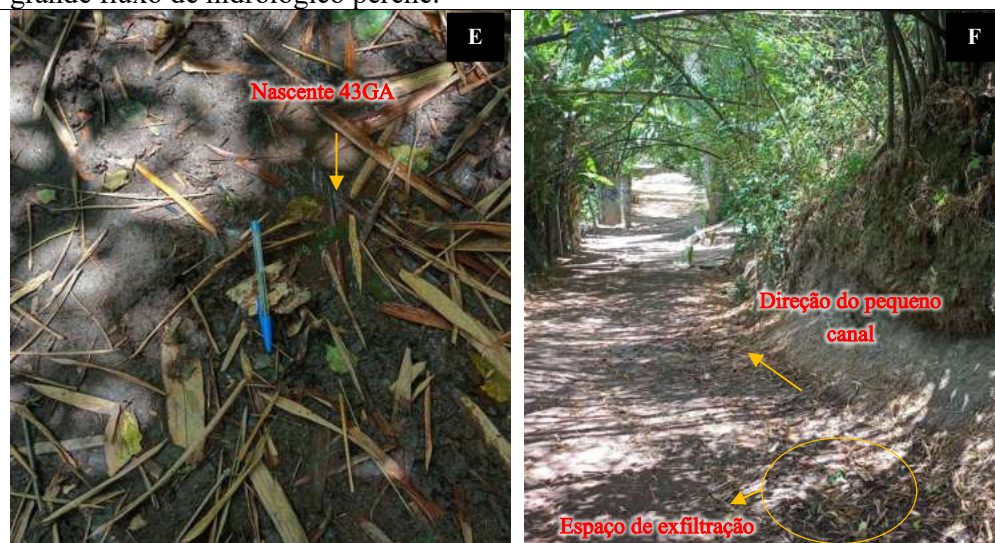
Figura 27- Características das nascentes 32GA (Vila Maria) (A e B), 33GA (Pau Pombo – Anexo ao Parque) (C e D), 43GA (Parque Rubervan) (E e F).



Descrição: Nascente em ruptura de relevo, com exfiltração tipo duto, aspecto de exfiltração múltipla, de grande fluxo hidrológico perene.



Descrição: Nascente em fundo de vale, com exfiltração em olho, múltiplo, de grande fluxo de hidrológico perene.

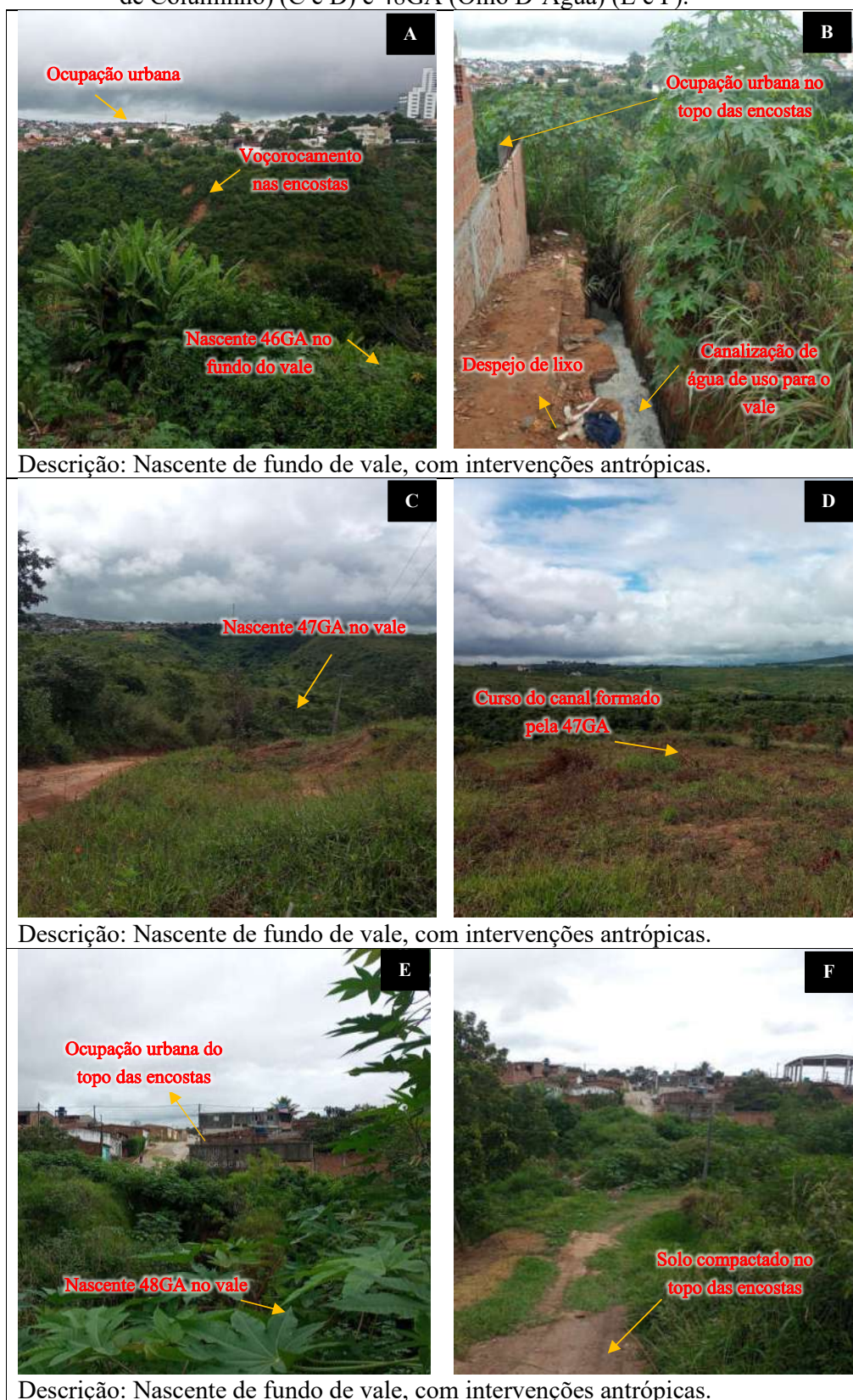


Descrição: Nascente em sopé de encosta com intervenção, aflorando em uma área de solo, difusa, de fluxo baixo intermitente.

Fonte: A autora (2022-2023).

Quanto às nascentes 46GA, 46GA e 48GA (Figura 28A, C e E), sua configuração espacial está localizada em áreas de grande inclinação, com processos erosivos intensos nas encostas. Embora sejam menos acessíveis por estarem situadas no fundo de vale, essas nascentes sofrem alterações constantes. A expansão urbana tem progredido nas áreas de topo das encostas, principalmente por meio de construções irregulares, o que tem causado uma série de efeitos, como canalizações de água de uso, descarte inadequado de resíduos e o intenso processo erosivo de voçorocamento (Figura 28B, D e F), que compromete a rede hidrográfica.

Figura 28- Características das nascentes 46GA (Pau Amarelo) (A e B) 47GA (Brejo de Columinho) (C e D) e 48GA (Olho D'Água) (E e F).



Fonte: A autora (2022-2023).

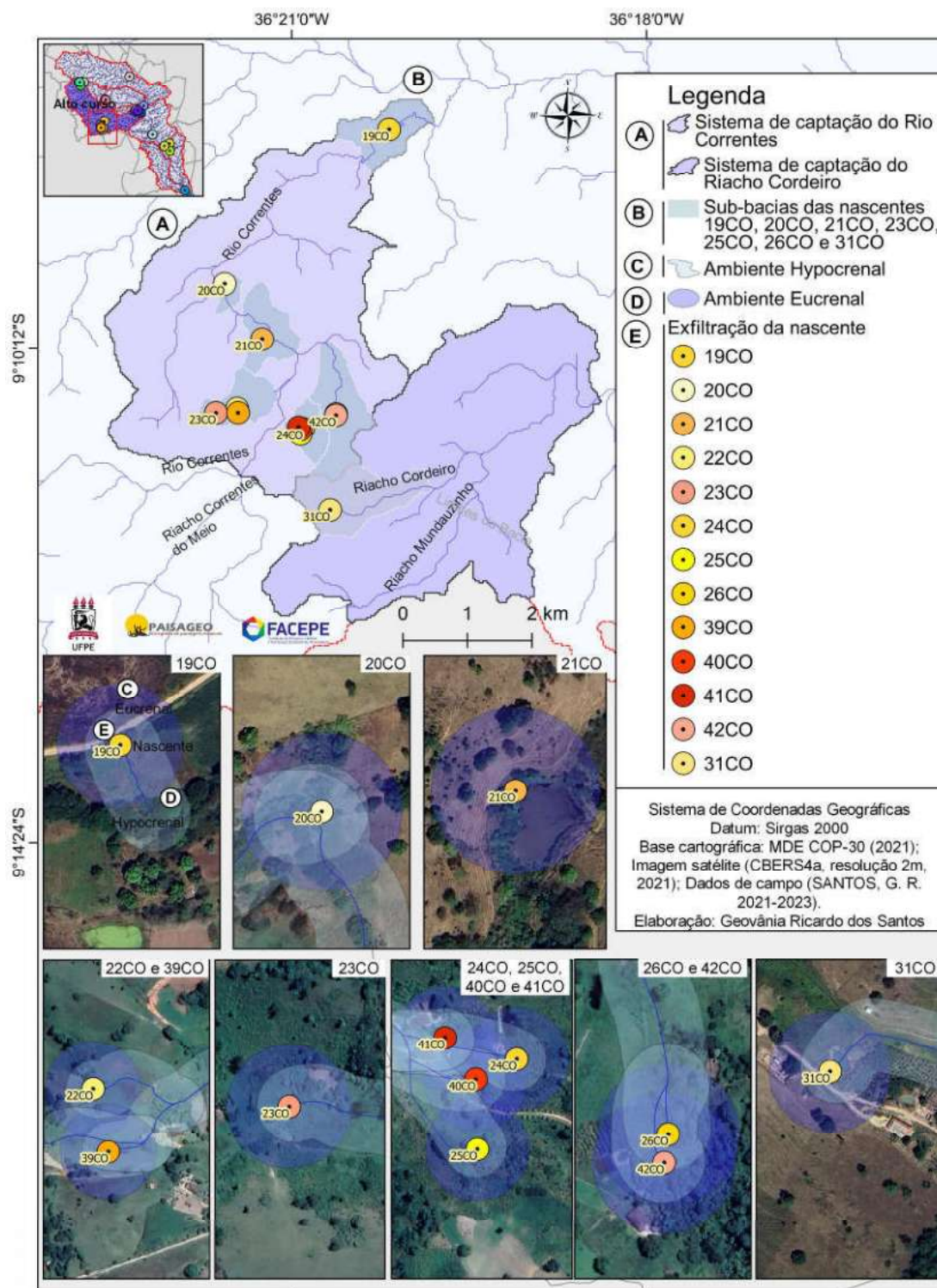
No Alto curso do Rio Mundaú, 12 nascentes mapeadas estão situadas no Sistema de captação do Rio Correntes, incluindo as nascentes 19CO, 20CO, 21CO, 22CO, 23CO, 24CO, 25CO, 26CO, 39CO, 40CO, 41CO e 42CO, e uma nascente, 31CO, está no Sistema de captação do Riacho Cordeiro, integrando sete sub-bacias de captação (Figura 29). Essas nascentes estão localizadas em áreas rurais.

Vale destacar que algumas dessas nascentes foram submetidas a intervenções utilizando a técnicas solo-cimento, principalmente aquelas que já estavam descaracterizadas. Ademais, o pisoteio causado por animais de pastejo gera impactos. De acordo com a legislação, o “Código Florestal Brasileiro” (Lei nº 12.651/2012) estabelece normas para a proteção das nascentes, incluindo a delimitação das Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reserva Legal (RL), visando a preservação da paisagem, biodiversidade, recursos hídricos, e a estabilidade geológica e do solo (BRASIL, 2021a).

O Artigo 4º da Lei estabelece que as áreas de APP em torno das nascentes e olhos d’águas perenes, devem ter um raio mínimo de 50 metros. Além disso, o Artigo 61º permite a continuidade de atividades como ecoturismo, turismo rural, agricultura, pecuária e silvicultura continuem em áreas de APP, desde que a recomposição da vegetação no raio mínimo de 15 metros seja realizada.

Recentes modificações na Lei de nº 14.653/2023 aprovaram medidas para intervenção recuperação de nascentes em áreas críticas para o abastecimento de água público ou para a conservação da biodiversidade, em regiões em processo de desertificação ou com remoção significativa retirada da vegetação nativa. Além disso, o projeto de Lei de nº 2.777/23, propõe alterações no Código Florestal, incluindo a ampliação das APPs para englobar margens de enchentes e a definição de nascente para incluir todos os cursos d’água intermitentes (BRASIL, 2021a; BRASIL, 2021b). Embora as normativas jurídicas sejam essenciais para garantir a preservação dos recursos naturais, na prática elas nem sempre são efetivamente aplicadas. A sensibilização ambiental da comunidade local é fundamental para a gestão, manejo, conservação e proteção de nascentes. No entanto, essa responsabilidade geralmente recai sobre o trabalho árduo de Ongs, uma vez que raramente é realizada de forma sistemática pelas prefeituras, especialmente em cidades menores.

Figura 29 – Sistema de captação superficial do Rio Correntes e Riacho Cordeiro, no Alto curso do Mundaú, município de Correntes.



Fonte: A autora (2024).

Em relação às condições ambientais, especialmente no entorno das nascentes, observa-se uma série de intervenções. Historicamente, essa região foi amplamente explorada pela agricultura e pecuária (SANTOS et al., 2007), o que deixou marcas na paisagem atual. Nas nascentes estudadas (Figura 30A a Z), não há fragmento de vegetação nativa, restando apenas pequenas herbáceas e arbustos. Além disso, há sinais de contaminação por agrotóxicos usados para eliminar herbáceas, compactação do solo devido à proximidade de animais de pastagem e alterações na exfiltração das nascentes.

A maioria das nascentes está situada no sopé de encostas íngremes, com exceção da nascente 40CO, localizada em uma Meia encosta (Figura 30U e V). Quanto à formação de cursos d'água, todas as nascentes formam, exceto a 21CO, onde um açude próximo impede o curso de água (Figura 30E e F). Com exceção das nascentes 39CO e 42CO (Figuras 30S, T e X e Z), todas as outras apresentam estruturas de captação de água, usadas no abastecimento de água para os moradores locais. Nas áreas rurais, ter acesso à água de boa qualidade é um desafio; por isso, as nascentes desempenham um papel crucial como para o consumo dos habitantes locais.

Para reduzir problemas relacionados a doenças infecciosas, os moradores da região adotaram uma técnica rústica do solo-cimento (Figura 30A a Z) nas nascentes. Essa técnica consiste na remoção parcial de sedimentos da nascente, seguida do preenchimento com blocos de rocha local, e a cobertura com lona plástica e uma mistura de solo argiloso e cimento.

No entanto, essa prática gera problemas, como a descaracterização da exfiltração das nascentes e limitações na proteção, já que a legislação ambiental exige 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% dos pulmões analisados, representando risco potencial à saúde humana. Outro estudo, de Adhikari et al. (2022), detectou partículas microplásticas em órgãos humanos, como pulmão, fígado, baço e rim, além de substâncias associadas ao bisfenol A (BPA), um composto químico usado na fabricação de plásticos.

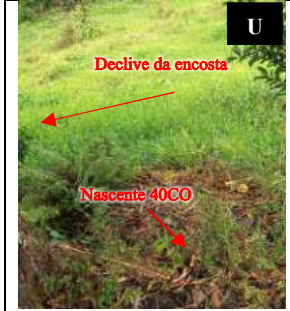
Nesse cenário, embora se espere uma melhoria na qualidade das águas ou a prevenção da contaminação por animais de pastagem, na verdade, outros riscos de contaminação podem surgir. Isso ocorre porque a água, mesmo quando parece cristalina ou inodora, não é um indicativo confiável de que está livre de contaminação química ou biológica. A verdadeira

qualidade da água só pode ser garantida por meio de monitoramento adequado, preservação e conservação dos ambientes de nascentes.

Boas práticas de proteção dos recursos naturais nas propriedades rurais desempenham um papel fundamental na conservação e proteção dessas áreas, mas a falta de conhecimento e de incentivos para a adoção de boas práticas ambientais compromete a qualidade ambiental da região. É evidente a ausência de um órgão técnico que promova uma troca eficaz de informações e práticas entre os moradores locais. A qualidade da água está em situação de vulnerabilidade, pois é comum na região que grandes produtores rurais utilizem “jatinhos aéreos” que aplicam agrotóxicos, com o intuito de controlar pragas e regular o crescimento de vegetação herbácea.

Figura 30- Características das nascentes 19CO (A e B), 20CO (C e D), 21CO (E e F) e 22CO (G e H), 23CO (I e J), 24CO (K e L), 25CO (M e N) e 26CO (O e P), 31CO (Q e R), 39CO (S e T), 40CO (U e V), 41CO (W e X) e 42CO (Y e Z).

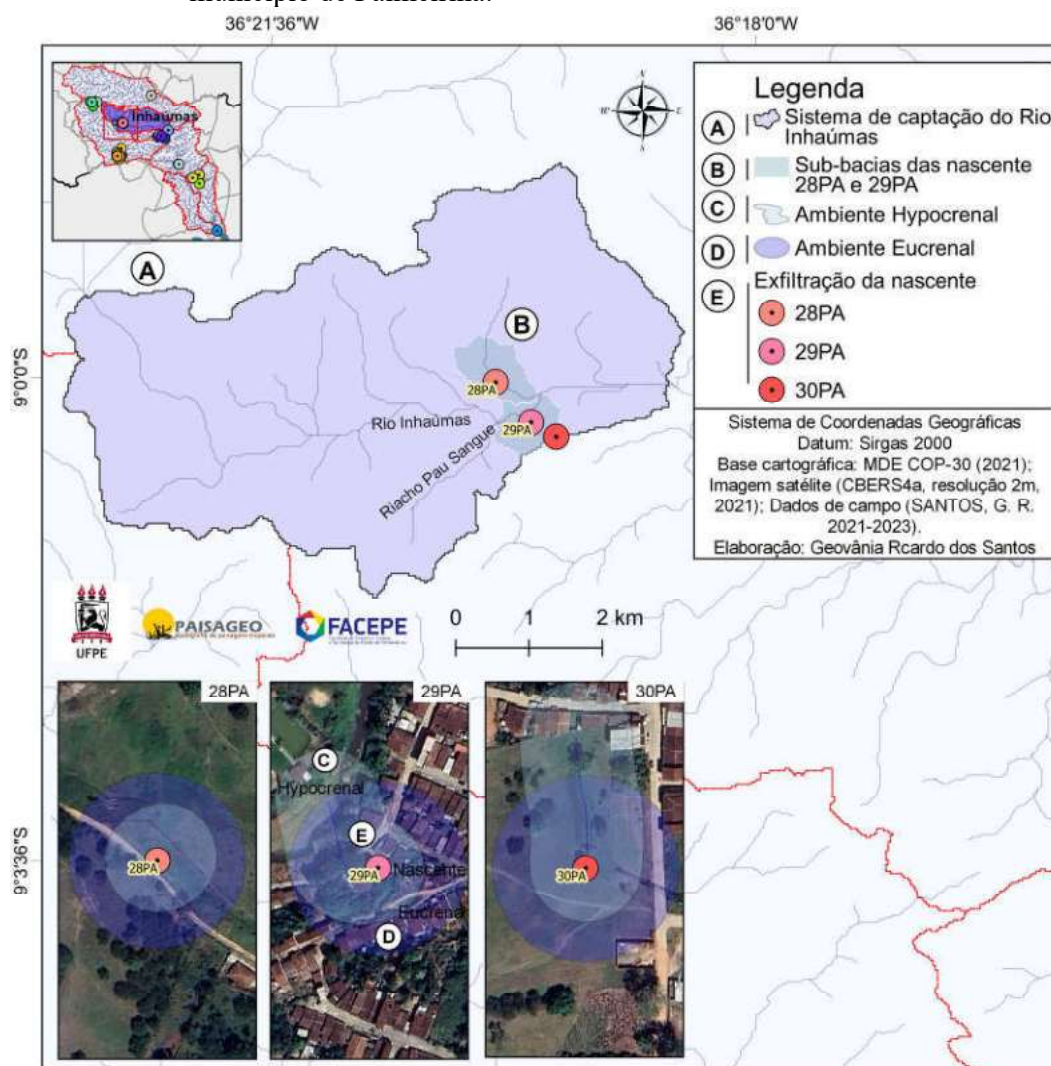


Descrição: Nascente em lajedo rochoso, exfiltrando em fratura rochosa, perene, baixo fluxo hidrológico.	Descrição: Nascente em sopé de encosta, com intervenção, perene, com baixo fluxo hidrológico.
 Nascente 25CO	 Nascente 26CO
Descrição: Nascente em fundo de vale, com intervenção, perene, de baixo fluxo hidrológico.	Descrição: Nascente em sopé, com intervenção, perene, de baixo fluxo hidrológico.
 Nascente 31CO	 Nascente 39CO
Descrição: Nascente em sopé de encosta, em duto, pontual, perene, de grande fluxo hidrológico.	Descrição: Nascente em sopé de encosta, exfiltrando em fratura rochosa, perene.
 Nascente 40CO	 Nascente 41CO
Descrição: Nascentes em segmento de encosta, com intervenção antrópica, perene.	Descrição: Nascente em fundo de vale, com intervenção antrópica, perene, de grande fluxo hidrológico.
 Nascente 42CO	 Nascente 42CO
Descrição: Nascente em ruptura do relevo, com intervenção antrópica e difusa.	

Na sub-bacia do Inhaúmas, foram mapeadas três nascentes: 28PA, 29PA e 30PA (Figura 31), localizadas dentro do Sistema de captação do Rio Inhaúmas (Figura 31). O sistema hidrológico é composto por duas sub-bacias de captação, correspondentes às nascentes 28PA e 29PA (Figura 31), sendo duas dessas localizadas nas proximidades do perímetro urbano e uma em área rural. Todas nascentes sofreram alterações em sua estrutura natural.

Essas nascentes são frequentemente utilizadas para consumo, com captações feitas por meio de mangueiras, além de registros de água e estruturas de concreto que contêm a água, impedindo seu curso natural. Embora estejam situadas em áreas com solo coberto e construções ao redor, os habitantes afirmam que a água das nascentes mantém o processo de exfiltração. Contudo, as alterações realizadas não garantem a qualidade da água e o equilíbrio dos sistemas.

Figura 31 – Sistema de captação superficial do Rio Inhaúma, na sub-bacia do Inhaúmas, município de Palmeirina.



Fonte: A autora (2024).

Como mencionado anteriormente, a configuração natural das nascentes foi alterada para estruturas de concreto no seu entorno (Figuras 32), outros impactos foram observados nas nascentes analisadas, incluindo a ausência de vegetação nativa de porte arbóreo-arbustivo na APP e na bacia de contribuição da nascente, obstrução dos cursos d'água de 1ª ordem, compactação do solo, expansão urbana nas áreas circundantes, alto risco de contaminação por águas residuais e presença de lixo plástico (Figura 32A a F).

A preservação e conservação das nascentes constitui um grande desafio, pois esses ambientes, frequentemente negligenciados em sua relevância para a manutenção da bacia hidrográfica, funcionam em uma escala de microambiente. Existem diversas ações e medidas sustentáveis que devem ser planejadas para reduzir os efeitos nas nascentes, uma responsabilidade que envolve todos os setores da sociedade.

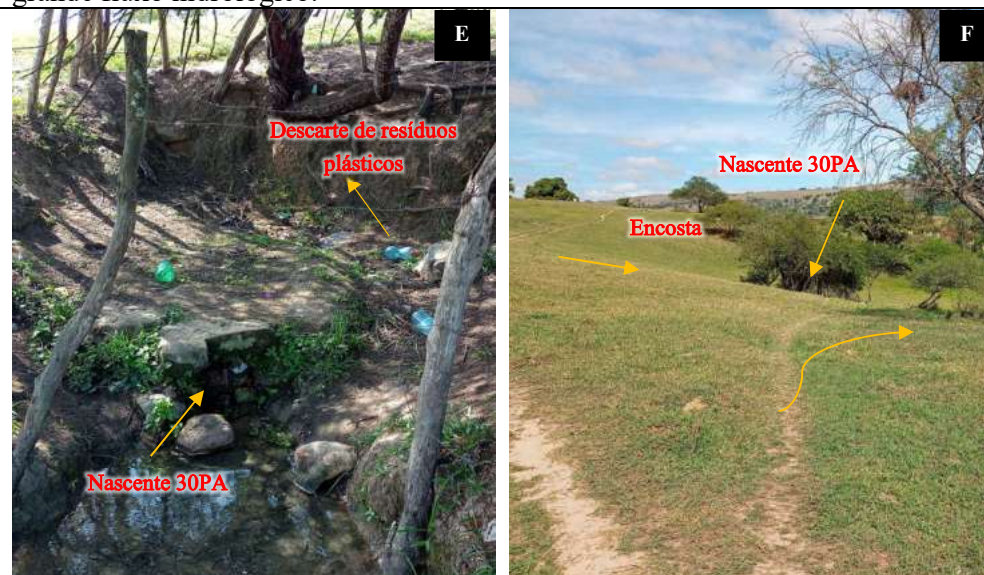
Figura 32- Características das nascentes 28PA (A e B) 29PA (C e D) e 30PA (E e F).



Descrição: Nascente em sopé de encosta, com intervenções morfológicas, perene.



Descrição: Nascente em sopé de encosta, com intervenção antrópica, perene, de grande fluxo hidrológico.

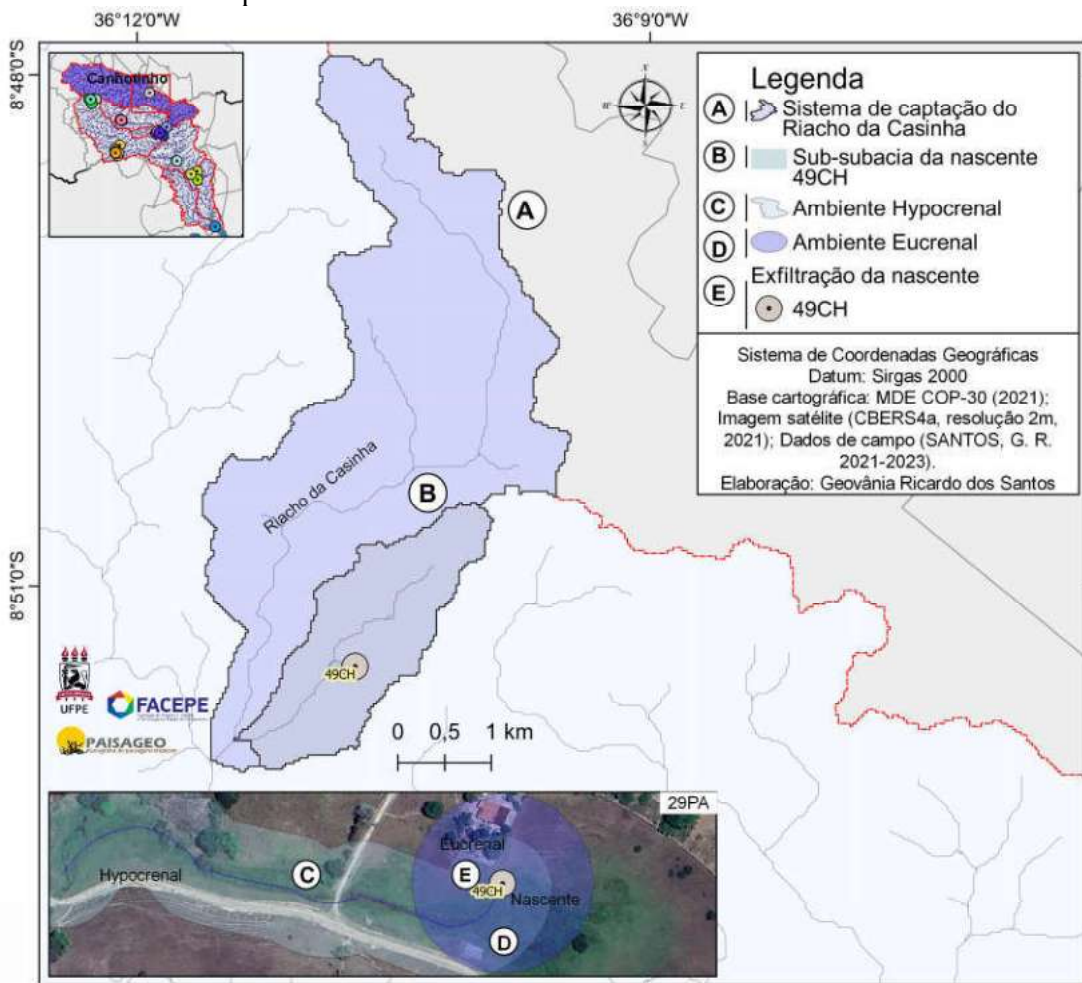


Descrição: Nascente em ruptura de relevo, com intervenção antrópica, perene.

Fonte: A autora (2022-2023).

No Sistema de captação Riacho da Casinha (Figura 33), foi identificada apenas uma nascente, a 49CH (Figura 34A a 34D), juntamente com sua correspondente sub-bacia de captação (Figura 33). Localizada em zona rural, essa nascente apresenta as mesmas problemáticas observadas em outros sistemas de nascentes, como: modificação na estrutura natural da exfiltração, captação de água para uso doméstico e para um parque aquático, supressão da vegetação, transformação em áreas de pastagem e cultivo, além de ocupação e alterações na paisagem e na nascente (Figura 33).

Figura 33 – Sistema de captação superficial do Riacho da Casinha, sub-bacia do Canhoto município de Canhotinho.



Fonte: A autora (2024).

Modificações e captações inadequadas do uso da água das nascentes podem resultar em danos irreversíveis, como a redução ou extinção permanente das nascentes. Em contrapartida, o abastecimento de água em zonas rurais é um desafio que não deve ser desprezado. Novas soluções e implementações de tecnologias devem ser concebidas para atender a população local, promovendo o manejo das águas das nascentes e acesso a água para consumo em níveis aceitáveis de potabilidade. A adoção de medidas estratégicas para a recuperação da vegetação nativa é uma alternativa na redução de impactos, no entanto, é essencial a implementação de planos de gestão e restauração de nascentes executadas corretamente.

Quanto às características estruturais, a nascente possui grande volume de água e mantém uma sazonalidade perene ao longo do ano, conforme observações de campo e relatos pelos moradores locais. Nascentes com fluxo estável durante o ano são ecologicamente significativas

(CARTWRIGHT et al., 2020). Essas características estão associadas às condições da paisagem, com relevo suave e localização em uma posição de ruptura de declive em Meia encosta (Figura 34B a 34D).

Figura 34- Características da nascente 49CH com alteração (A) e panorama da nascente 49CH (B a D).



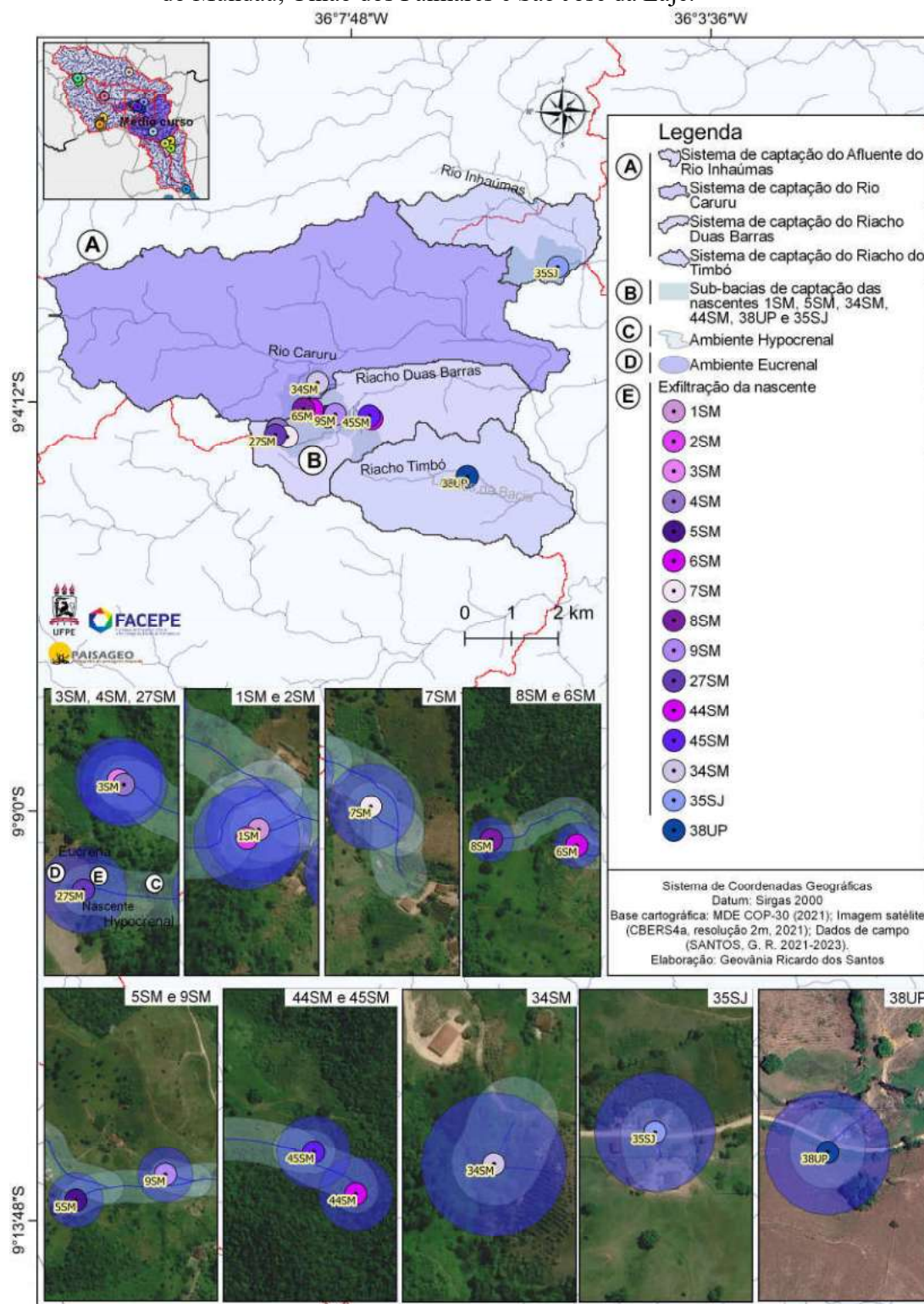
Na região da sub-bacia do Médio curso (Figura 35), foram identificadas 15 nascentes nos municípios de Santana no Mundaú (1SM, 2SM, 3SM, 4SM, 5SM, 6SM, 7SM, 8SM, 9SM, 27SM, 34SM, 44SM e 45SM), União dos Palmares (38UP) e São José da Laje (35SJ). Foram identificados quatro Sistemas de captação, que incluem o Afluente do Rio Inhaúmas, Rio

Caruru, Riacho Duas Barras e Riacho do Timbó (Figura 35), e seis padrões de sub-bacias de captação, que são responsáveis pela divisão superficial (1SM, 5SM, 34SM, 44SM, 38UP e 35SJ) (Figura 35). Predominantemente, as nascentes estão localizadas em áreas rurais, em um contexto de qualidade ambiental alterada pelo uso e cobertura do solo. Nesse cenário, a população local depende integralmente dos recursos ecossistêmicos fornecidos pelas águas das nascentes.

No processo de colonização da região, o cultivo da cana-de-açúcar teve um papel significativo, sendo um dos principais responsáveis pelos impactos na paisagem natural (SANTOS et al., 2007). A agricultura é um dos pilares econômicos do município, com a produção constante de banana, laranja e a pecuária predominando (IBGE, 2023). Esses setores são os principais responsáveis pela supressão dos fragmentos remanescentes de vegetação nativa, especialmente nas áreas de nascente.

Uma das questões mais preocupantes na região é o uso indiscriminado de agrotóxicos nas lavouras, que representam uma ameaça potencial para a contaminação dos rios superficiais e dos lençóis freáticos que abastecem as nascentes, cujas águas são frequentemente utilizadas para consumo.

Figura 35 – Sistema de captação superficial do Rio Inhaúmas, Rio Caruru e Riacho Das Barras, e Riacho do Timbó, sub-bacia do Médio curso, municípios Santana do Mundaú, União dos Palmares e São José da Laje.



Fonte: A autora (2024).

Levando em conta as condições antrópicas mencionadas, diversas nascentes (Figura 36A a Z) foram identificadas com variados níveis de interferência humana ao longo da história da região.

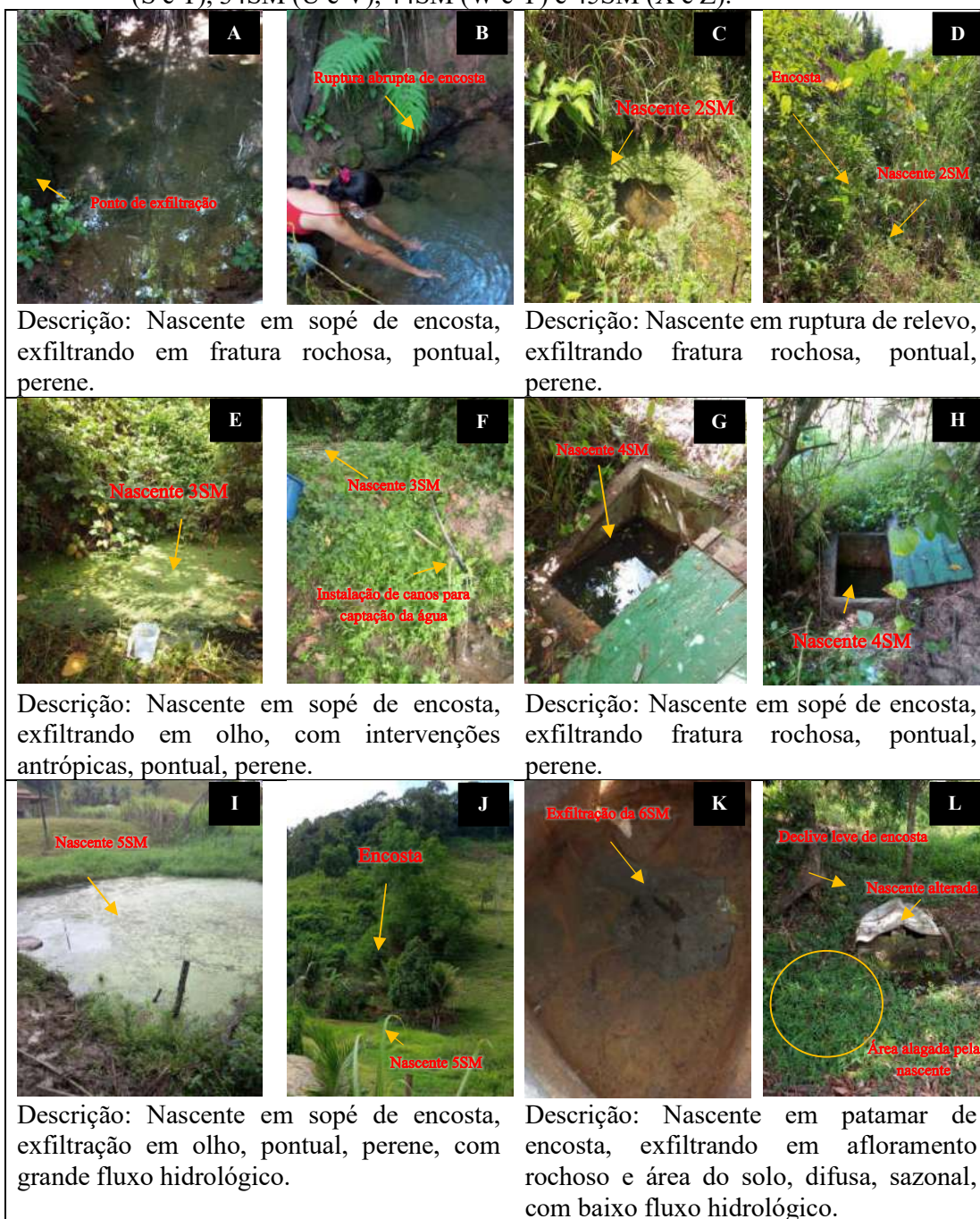
Mesmo nas nascentes que não possuem estruturas de concreto no entorno, como as nascentes 4SM, 6SM, 7SM, 34SM, 44SM e 45SM (Figura 36G, H, K, L, M, N, U, V, W, Y, X e Z), observou-se modificações significativas em sua estrutura natural, como a retirada de sedimentos para maior retenção de água, como ocorre nas nascentes 5SM e 8SM (Figuras 36I, J, O, P). Além dessas alterações estruturais, algumas nascentes são utilizadas para captação de água para consumo, enquanto outras abastecem pequenas lavouras, e em alguns casos, a água é represada para formar barramento de canal.

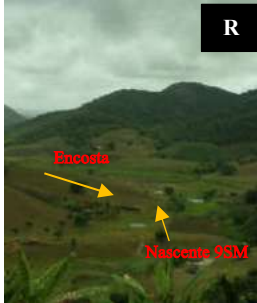
Em relação à vegetação nativa, fragmentos arbóreos de certa preservação ainda podem ser encontrados na região, embora não estejam localizados nas Áreas de Preservação Permanente (APPs) das nascentes. Esses fragmentos estão preservados nas áreas de topo dos morros, enquanto as encostas são utilizadas para cultivo de diversas culturas. Apenas algumas nascentes encontradas, como as 34SM, 44SM e 45SM (Figuras 36U, V, W, Y, X e Z), estão próximas de fragmentos arbóreos, ainda assim fora das áreas de APP.

Em áreas rurais, o tratamento de resíduos sólidos é inexistente, e o lixo é descartado de forma irregular, nas proximidades das nascentes e de pequenos cursos d'água. Além disso, as residências não possuem fossas sépticas para captação de esgoto sanitário, como é o caso da nascente 7SM (Figura 36M e 36N), localizada em uma área de fundo de vale, onde recebe esgoto de casas situadas à montante, com a água sendo utilizada para consumo humano pela população local.

Algumas nascentes apresentaram sinais de eutrofização, como as nascentes 2SM, 3SM, 5SM, 8SM e 9SM, cujas águas, consumidas pela população, apresentam risco à saúde. Segundo Lins et al. (2018) e Barreto et al. (2014), águas eutrofizadas são altamente tóxicas devido à proliferação excessiva de organismos aquáticos, fitoplâncton e macrófitas, tornando o consumo inviável e perigoso.

Figura 36- Características das nascentes 1SM (A e B), 2SM (C e D), 3SM (E e F), 4SM (G e H), 5SM (I e J), 6SM (K e L), 7SM (M e N), 8SM (O e P), 9SM (Q e R), 27SM (S e T), 34SM (U e V), 44SM (W e Y) e 45SM (X e Z).



 Nascente 7SM	 Fragmento de vegetação Plantação de banana Nascente 7SM	 Encosta Nascente 8SM	 Nascente 8SM
Descrição: Nascente em fundo de vale, com intervenção antrópica, pontual, perene.		Descrição: Nascente em patamar de encosta, exfiltrando em fratura rochosa, pontual, perene.	
 Nascente 9SM	 Encosta Nascente 9SM	 Nascente 27SM	 Declive de encosta Nascente 27SM
Descrição: Nascente em sopé de encosta, com eutrofização da água.		Descrição: Nascente em sopé de encosta, exfiltrando em fratura rochosa, pontual, perene.	
 Nascente 34SM	 Declive de encosta Nascente 34SM	 Encosta Nascente 44SM	 Declive da encosta Nascente 44SM
Descrição: Nascente em sopé de encosta, exfiltrando fratura rochosa, pontual, perene.		Descrição: Nascente em sopé de encosta, exfiltrando em olho, pontual, perene.	
 Nascente 45SM	 Fragmento de vegetação Nascente 45SM		
Descrição: Nascente em sopé de encosta, exfiltrando em fratura rochosa, pontual perene.			

Fonte: A autora (2022-2023).

A nascente 35SJ, localizada no Sítio Tatu, situa-se nos limites do Médio curso do Mundaú (Figura 37A). Sua configuração natural é peculiar, diferenciando-se das demais nascentes já encontradas na região. A água exfiltra através de uma fratura no lajedo exposto, situado no centro de uma estrada de acesso aos povoados locais. A intervenção antrópica é significativa, pois no local do lajedo foi construída uma casa, e seus moradores captam a água da nascente por meio de mangueiras (Figura 37B). A vegetação da área é predominantemente impactada pelo cultivo da cana-de-açúcar e pela pecuária.

Morfológicamente, a exfiltração da nascente 37SJ ocorre por meio de uma fratura em um lajedo rochoso (Figura 37A), localizado ao final de uma base de uma encosta. A capacidade de acumulação de água está relacionada à quantidade e a interconexão das fraturas do lajedo. Quanto à disponibilidade de água, o fluxo é variável, mas permanece perene, mesmo durante períodos de estiagem.

Uma preocupação significativa é que o consumo de água pendente exclusivamente das nascentes, que estão situadas em ambientes alterados e com alta vulnerabilidade à contaminação química. É possível que uma parte da população já tenha ingerido água de nascentes contaminadas por agrotóxicos utilizados nas lavouras locais, somado à ausência de saneamento básico nas áreas rurais.

Quadro 37- Características da nascente 35SJ (A), panorama da nascente 35SJ (B).



Descrição: Nascente em lajedo rochoso, exfiltrando em fratura rochosa, perene.

Fonte: A autora (2022).

Ainda no Médio curso, a nascente 38UP está localizada no Sítio Timbó (Figura 38A). Ao redor da nascente, encontra-se uma vegetação de porte herbáceo, utilizada para pastagem da criação de animais, sem qualquer cercamento de proteção, exceto por uma cerca de arrame que delimita a estrada e a propriedade rural onde a nascente se encontra (Figura 38B).

A exfiltração ocorre entre alguns conglomerados de rochas fragmentadas, originando um pequeno curso de água que deságua, alguns metros adiante, em um rio.

Figura 38- Características da nascente 38UP (A), panorama da nascente 38UP (B).

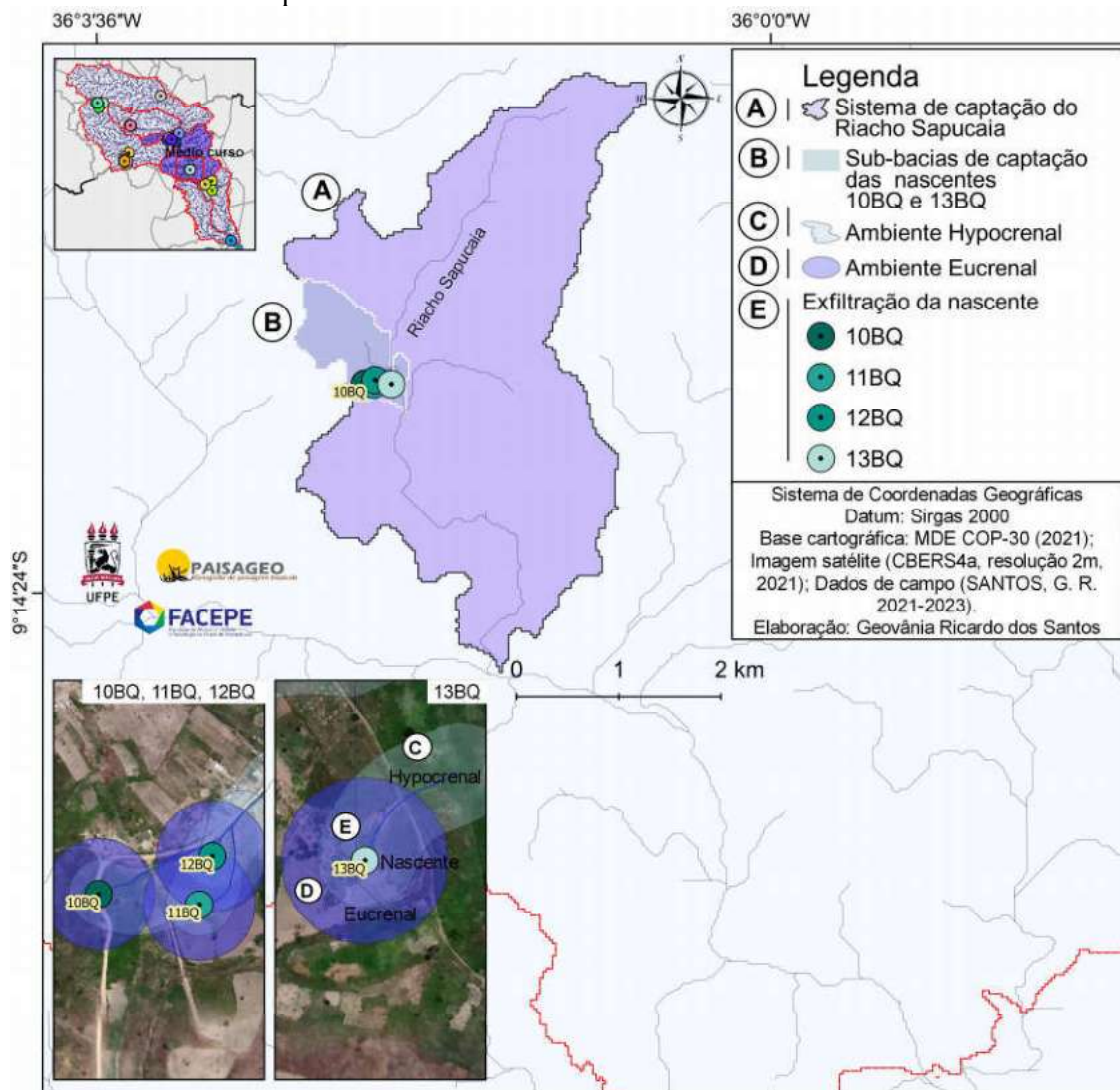


Descrição: Nascente em sopé de encosta, exfiltrando em fratura rochosa, perene.

Fonte: A autora (2022-2023).

No Sistema de captação do Riacho Sapucaia, foram mapeadas quatro nascentes: 10BQ, 11BQ, 12BQ e 13BQ (Figura 39), distribuídas em 2 sub-bacia de captação (Figura 39). Localizadas no assentamento agrário, essas nascentes estão inseridas em um contexto de uso intenso do solo e de pastagem. Os arredores das nascentes não possuem cercas de proteção e não apresentam vegetação nativa de grande porte, sendo cobertos apenas por vegetação rasteira. O solo apresenta sinais de compactação e é frequentemente tratado com produtos químicos para correção, aplicados pelos moradores locais, próximo as nascentes.

Figura 39– Sistema de captação superficial do Riacho Sapucaia, sub-bacia do Médio curso, em Branquinha.



Fonte: A autora (2024).

A nascente 10BQ (Figura 40A e B) está acessível a animais ovinos e caprinos, que circulam nas proximidades, além de estar exposta ao descarte de resíduos sólidos. A água é canalizada para as residências locais e utilizada para consumo pelos moradores do assentamento agrário. Já as nascentes 11BQ e 12BQ foram alteradas, apresentando estruturas de concreto que as transformaram em reservatórios (Figura 40C a F).

Não existe vegetação de proteção nas proximidades das nascentes. O solo, em algumas áreas, está compactado e desprovido de vegetação. Além disso, não há cuidados adequados com as nascentes, o que resulta em água turva em todas elas e facilita o acesso dos animais de pastejo.

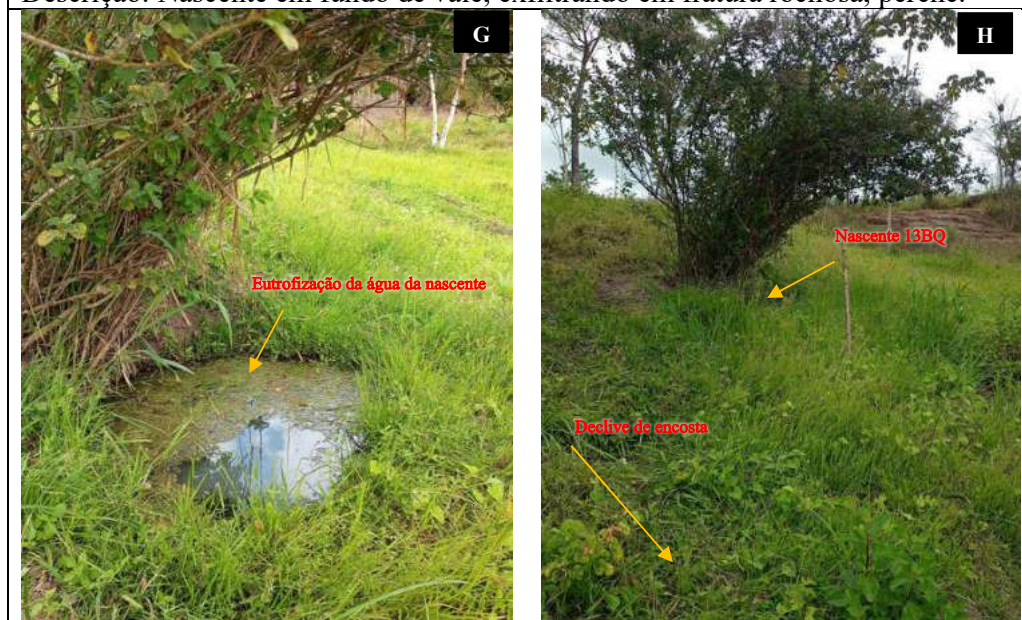
Na nascente 13BQ, observou-se a presença de matéria orgânica em processo de eutrofização (Figura 40G e H). De acordo com observações de campo não há nenhum tipo de tratamento realizado na água. Comparadas com as demais nascentes, as situadas nos assentamentos estão em um estágio avançado de degradação, expondo os moradores a riscos de doenças, já que não há cuidados regulares com a água. A água dessas nascentes está particularmente vulnerável à contaminação química por agrotóxicos e à contaminação biológica, tanto por fezes de animais quanto de seres humanos. Nas residências locais, não há banheiros e o sistema de fossas sépticas é inexistente.

Figura 40- Características das nascentes 10BQ (A), 11BQ (C), 12BQ (E), 13BQ (G), panorama das nascentes (B, D, F e H).





Descrição: Nascente em fundo de vale, exfiltrando em fratura rochosa, perene.

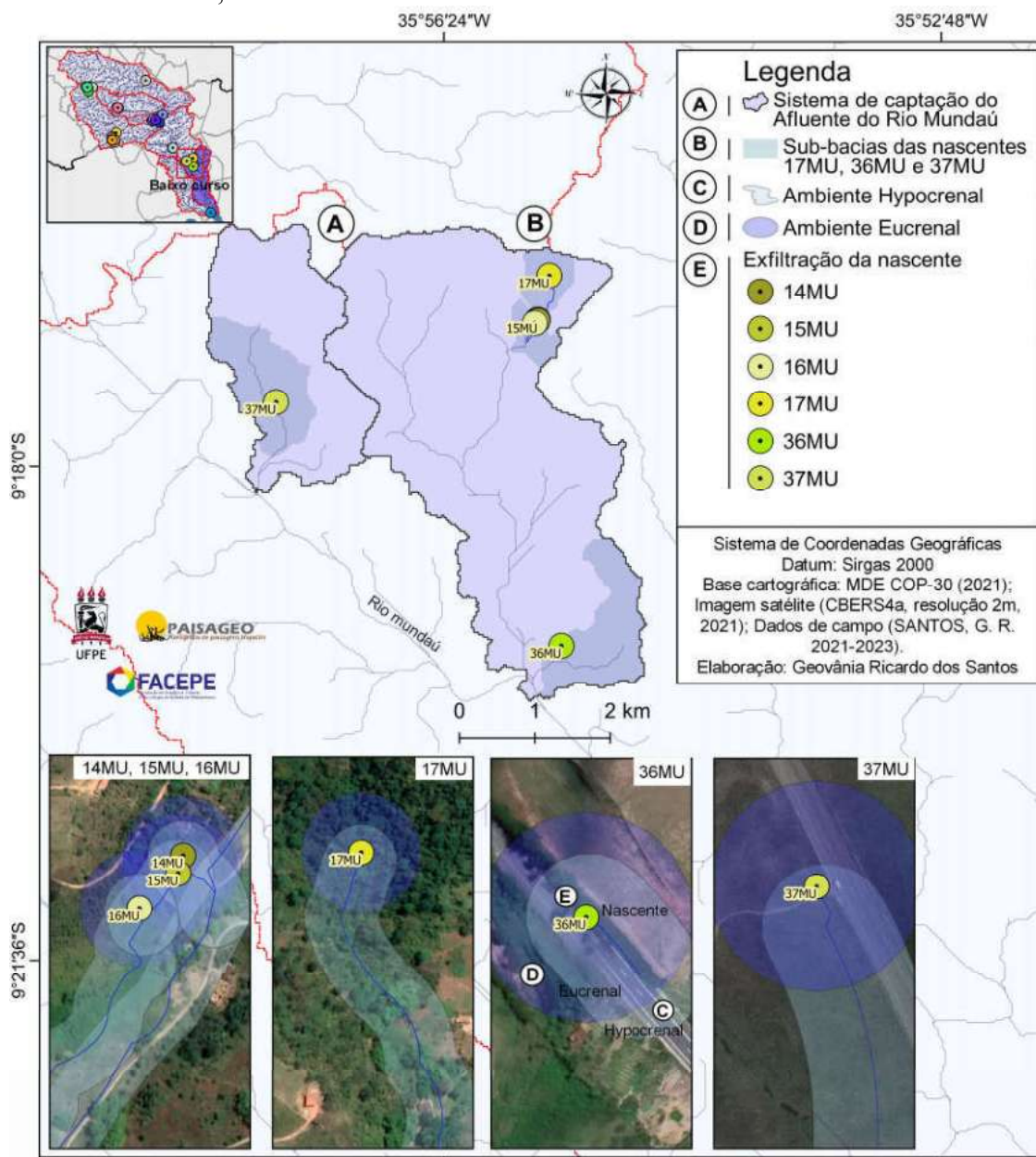


Descrição: Nascente em crista de encosta, com processo de eutrofização, associada a raízes de plantas.

Fonte: A autora (2023).

No Sistema de captação do Aflente do Rio Mundaú, sub-bacia do Baixo curso do Mundaú, 6 nascentes foram mapeadas (14MU, 15MU, 16MU, 17MU, 36MU e 37MU) (Figura 41). Os locais onde localizam-se as nascentes estão em locais de assentamentos, demarcadas pelo Instituto de Terras e Reforma Agrária de Alagoas – INCRA, com exceção as nascentes 36MU e 37MU situadas na borda da rodovia BR-104 (Figura 41).

Figura 41 – Sistema de captação superficial do Afluente do Rio Mundaú, sub-bacia do Baixo curso, em Murici.



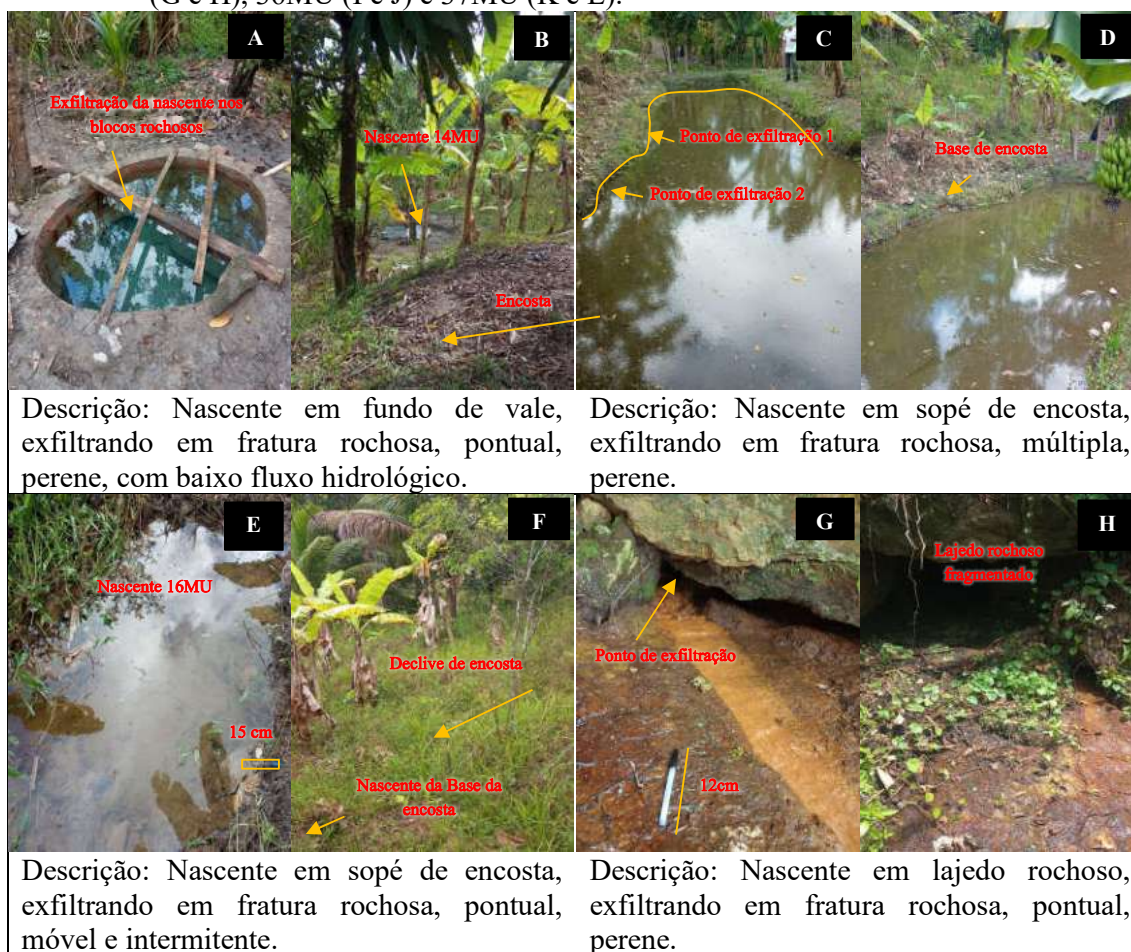
Fonte: A autora (2024).

As nascentes mapeadas estão localizadas próximas aos limites da Estação Ecológica de Murici (ESEC Murici). Algumas modificações foram realizadas na estrutura natural das nascentes 14MU, 36MU e 37MU (Figura 42A e B, I a L). A nascente 15MU, que exfiltra em dois pontos distintos, foi adaptada para criação de peixes (Figura 42C e D). As nascentes 14MU e 17MU (Figura 42A e B, G e H) são utilizadas para consumo. Apesar dos sistemas de captação

e reservatórios, a água segue seu curso livre em todas as nascentes, a exceto a nascente 36MU (Figura 42I e J), onde o curso de água ocorre apenas quando o reservatório transborda.

Nos arredores das nascentes, há uma combinação de vegetação nativa e culturas diversificadas, dentro do contexto do assentamento agrário. Entre as nascentes analisadas, a 17MU (Figura 42G e H) se destaca pela sua configuração peculiar, com a água exfiltrando por uma fratura entre dois grandes blocos de lajedo rochoso, um superior e outro inferior, próximo ao corredor ecológico da ESEC de Murici.

Figura 42- Características das nascentes 14MU (A e B), 15MU (C e D), 16MU (E e F), 17MU (G e H), 36MU (I e J) e 37MU (K e L).



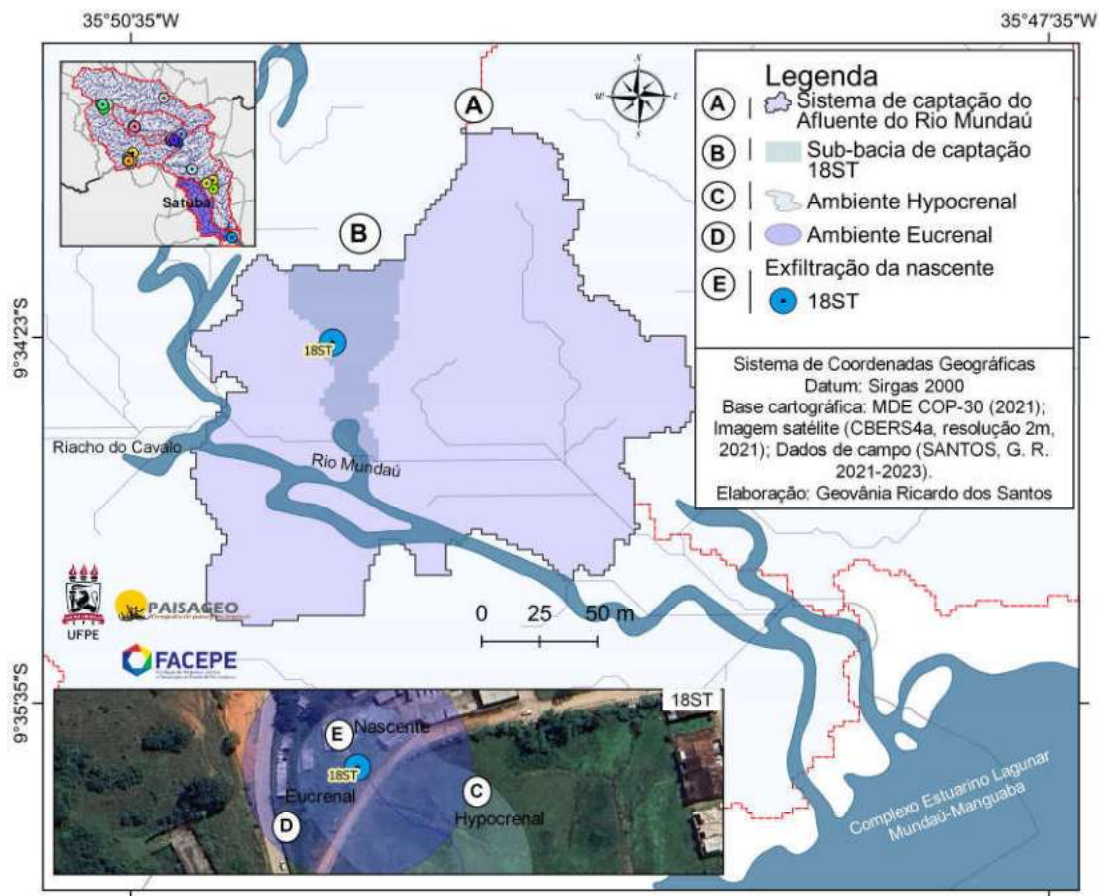


Fonte: A autora (2022-2023).

Na sub-bacia do Satuba, foi mapeada uma nascente (18ST) no Sistema de captação do Afluente do Rio Mundaú (Figura 43). Está situada em uma estrada de acesso aos bairros da cidade, na zona rural. Moradores locais relatam que diversas nascentes situadas a jusante da nascente mapeada foram extintas. Além desta nascente, que já apresenta modificações em sua estrutura natural (Figura 44A), há outra nascente, há a aproximadamente 30 metros de distância, cercada por uma empresa de pré-moldados de concretos, que utiliza a água para seus próprios fins (Figura 44B).

A região está passando por constantes transformações devido ao crescimento urbano. Diversas construções de casas estão sendo erguidas na área de topo do morro, e a área é bastante transitada. A menos de 50 metros de distância, há uma oficina de carros.

Figura 43 – Sistema de captação superficial do Afluente do Rio Mundaú, sub-bacia do Satuba, em Satuba.



Fonte: A autora (2024).

Figura 44- Características da nascente 18ST (A) e panorama da nascente (B).



Descrição: Nascente em sopé de encosta, com intervenção antrópica, perene.

Fonte: A autora (2022).

5.4 Caracterização hidrogeomorfológica das nascentes: estrutura e comportamento

A representação da superfície e os perfis topográficos do relevo ilustram a direção dos fluxos (setas) e os níveis dos compartimentos estruturais que abrange os sistemas hidroambientais de nascentes (Figura 45). Particularmente nas nascentes do Alto curso em Garanhuns, as curvas de nível revelam encostas de declividade acentuada, especificamente nos ambientes que antecedem as nascentes 46GA, 47GA e 48GA, sujeitos a processos de erosivos e deposição sedimentar que ocorrem, sobretudo, devido a energia dos escoamentos das águas pluviais intensificadas pela ação antrópica (Figura 45). Os blocos diagramas demonstram as superfícies planas dos topos de encosta (Figura 45). Como observam Azambuja e Côrrea (2015), particularmente em Garanhuns, ocorrem superfícies tabulares, rupturas de gradiente convexas, a partir das quais os fluxos superficiais se deslocam.

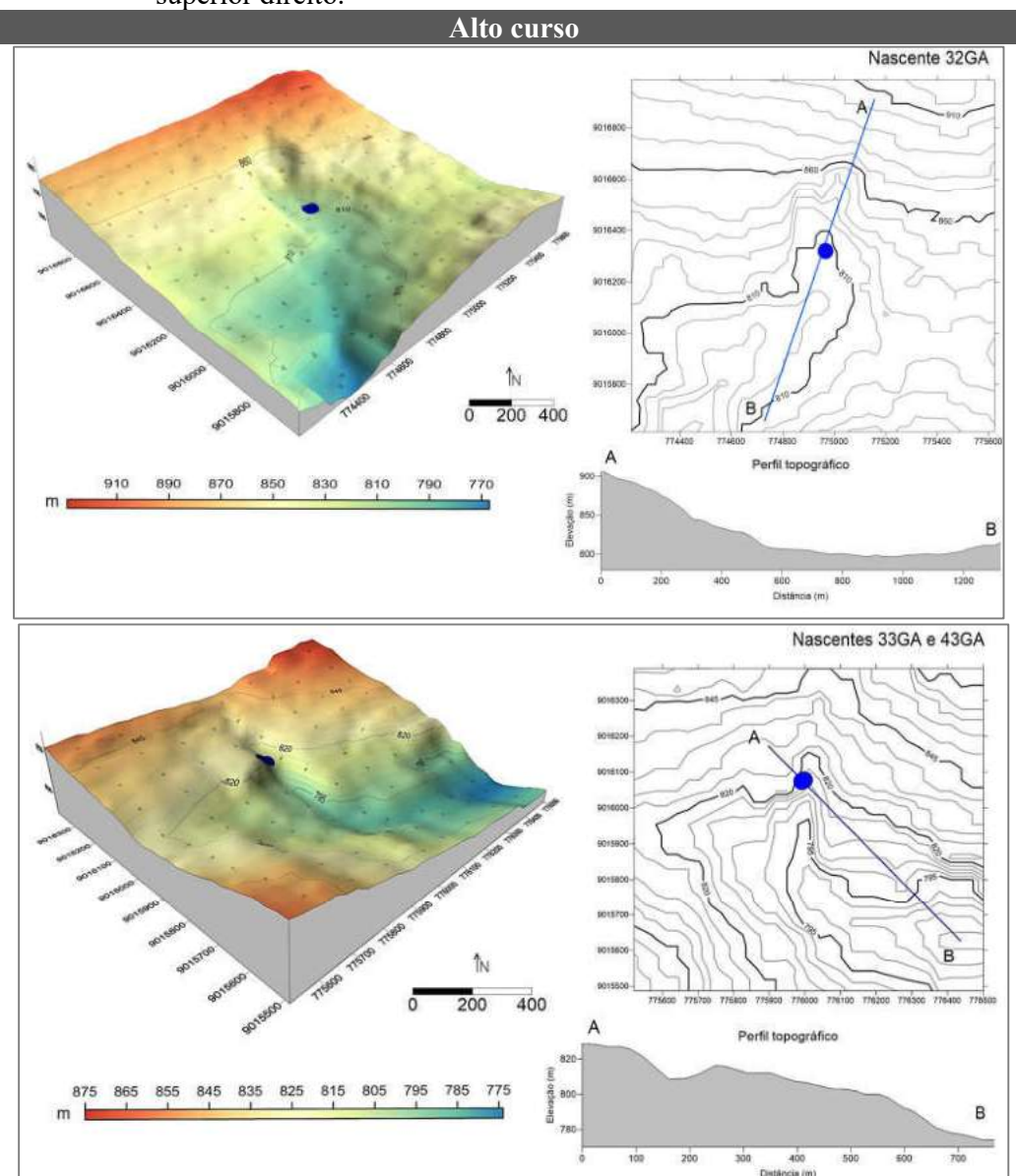
Ainda em relação às nascentes de Garanhuns, as áreas instáveis localizam-se em posições na vertente (em amarelo na figura 45), apresentam cotas altimétricas que variam na ordem de 765 a 840 metros (Figura 45), enquanto que os ambientes de estabilidade estão em cotas que chegam a 910 m (Figura 45). A formação das nascentes ocorre nos níveis altimétricos mais baixos (ponto em azul), conforme indicado no bloco diagrama e no mapa topográfico do relevo (Figura 45).

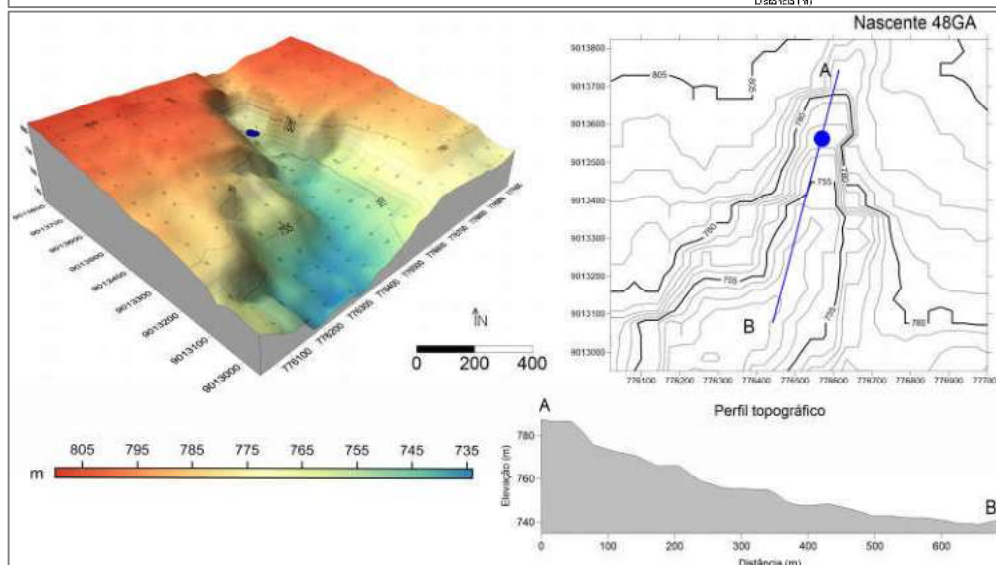
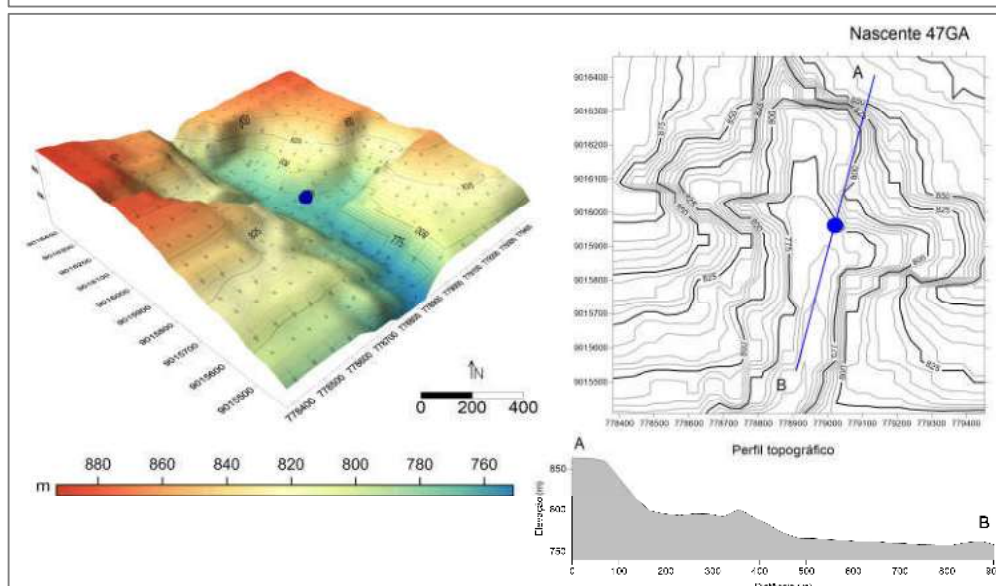
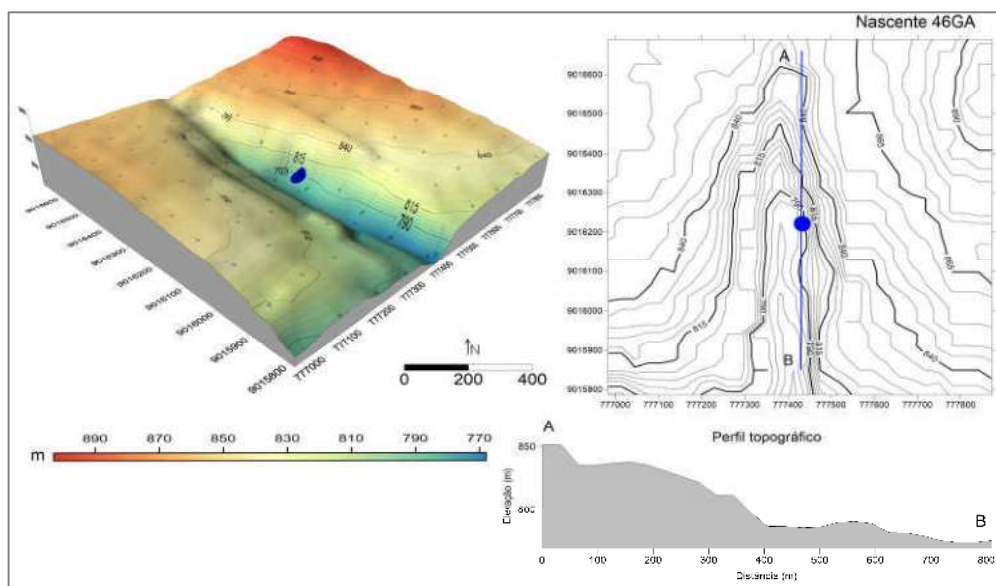
No Alto curso, das nascentes localizadas em Correntes e nos ambientes de nascentes do Inhaúmas (Palmeirina), Canhoto (Canhotinho) e Médio curso (Santana do Mundaú, União dos Palmares e São Jose da Laje), é possível observar gradientes de declividade acidentados, morros arredondados que se intercalam e variam com amplas áreas de depressões (Figura 45). A encosta da Borborema, segundo Ab'Saber (2007), apresenta uma variedade de níveis de patamares de relevo, a Encosta da Borborema é uma representação, incluindo morros de altitudes e fundos de vale, como o vale do Rio Mundaú. Em relação as cotas encontradas em Correntes (Alto curso) variam entre 380 a 740 metros (Figura 45), no Inhaúmas, entre 525 e 630 metros (Figura 45), no Canhoto, entre 540 e 620 metros (Figura 45), no Médio curso, 140 e 460 metros (Figura 45).

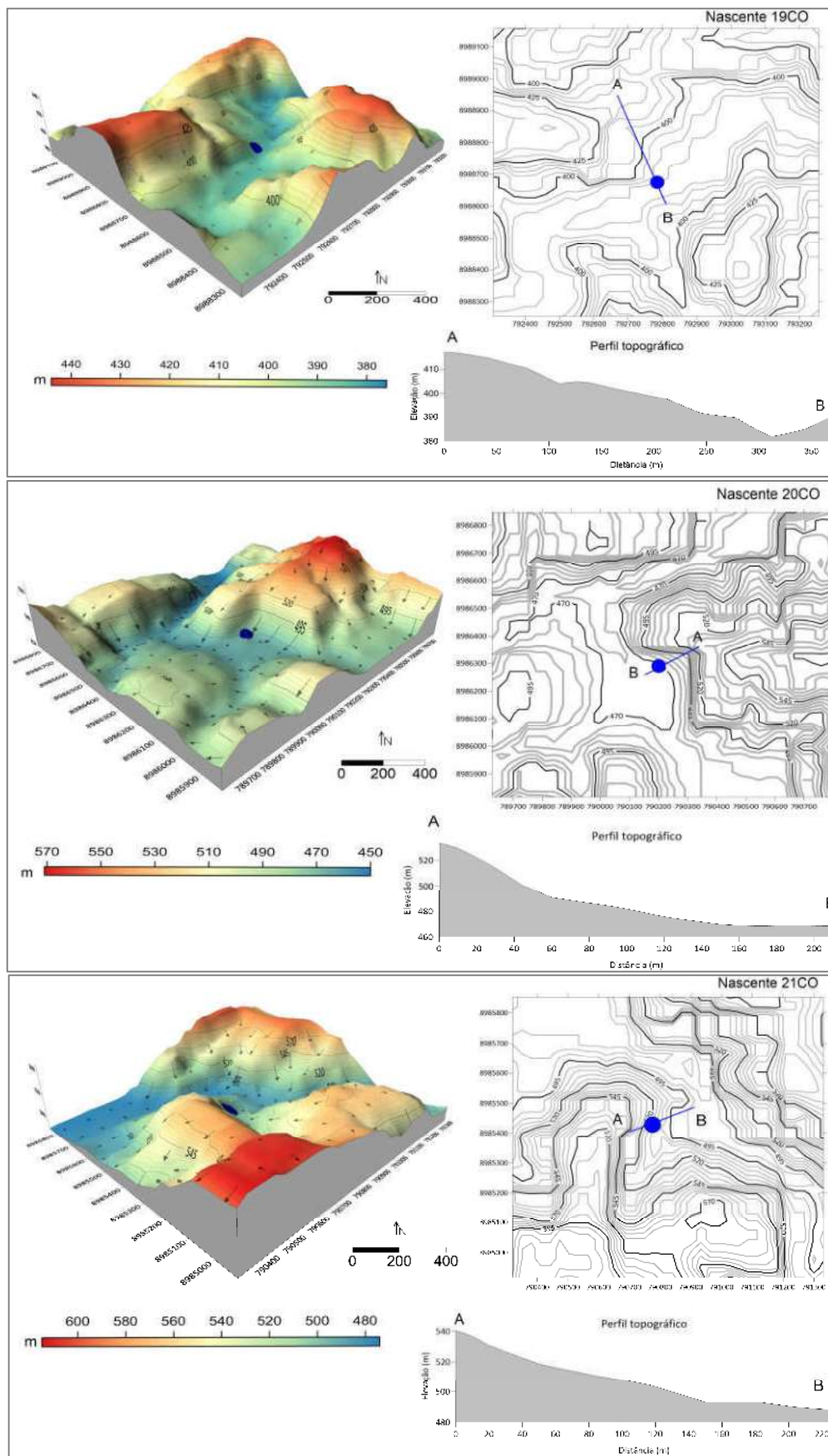
No Baixo curso, predominam áreas de relevo dissecado, rampas de colúvio e regiões mais rebaixadas do vale do Mundaú, conforme ilustrado nos blocos diagramas referentes as nascentes 36MU e 37MU (Figura 45). Especialmente nas áreas de afloramento das nascentes, rochas metamorfizadas são predominantes nesta unidade (CPRM, 2005a). As cotas altimétricas variam entre 80 e 360 metros nas nascentes localizadas em Murici (Figura 45). Na sub-bacia do Satuba, basicamente, a formação geológica é essencialmente composta pela Formação

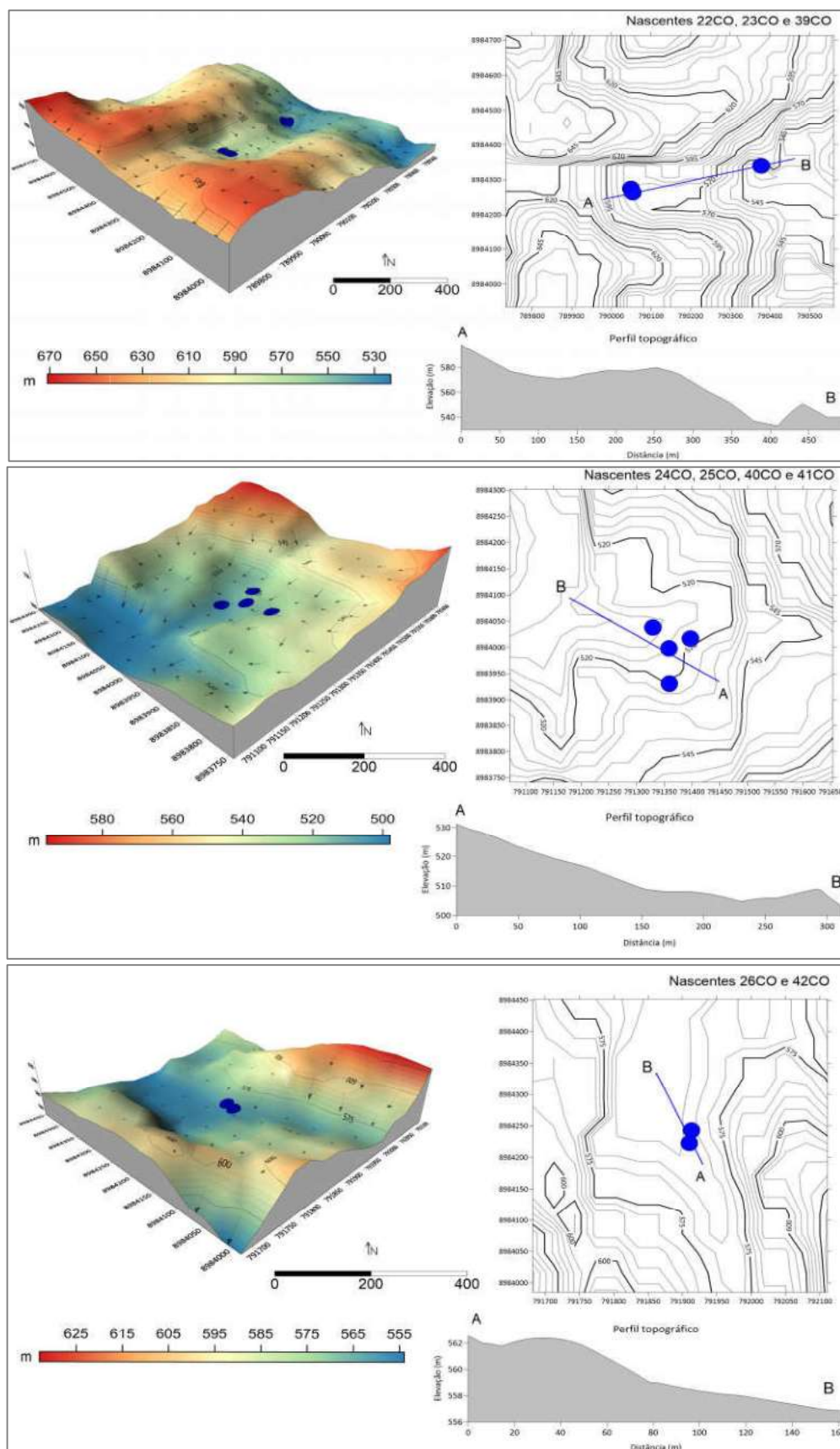
Barreiras, com rochas originadas de depósitos sedimentares (CPRM, 2005b), apresentando cotas entre 185 e 285 m.

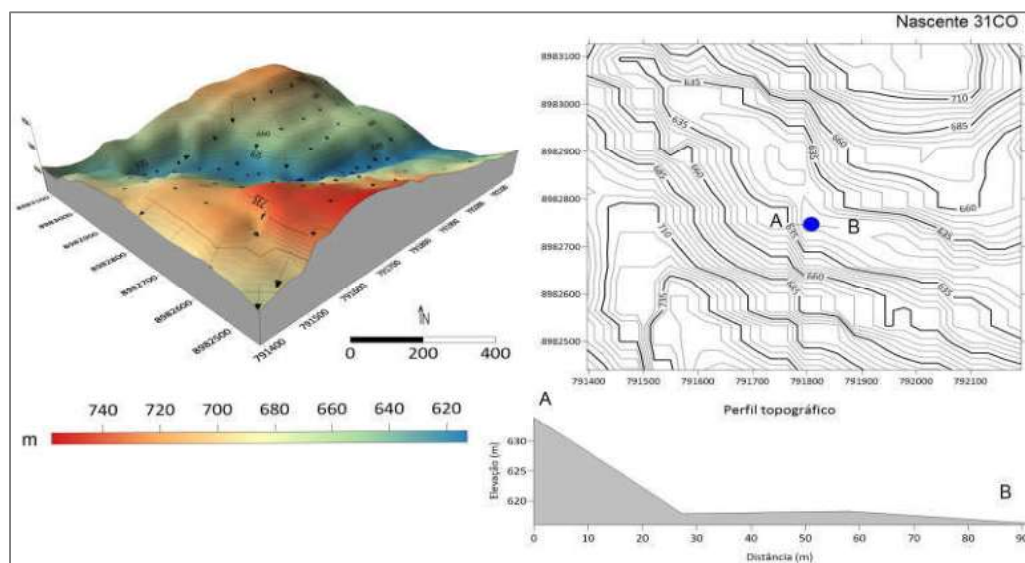
Figura 45 – Blocos diagramas da superfície, mapas e perfis topográficos do relevo dos ambientes das nascentes mapeadas no Alto curso, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba. Identificação da nascente no canto superior direito.



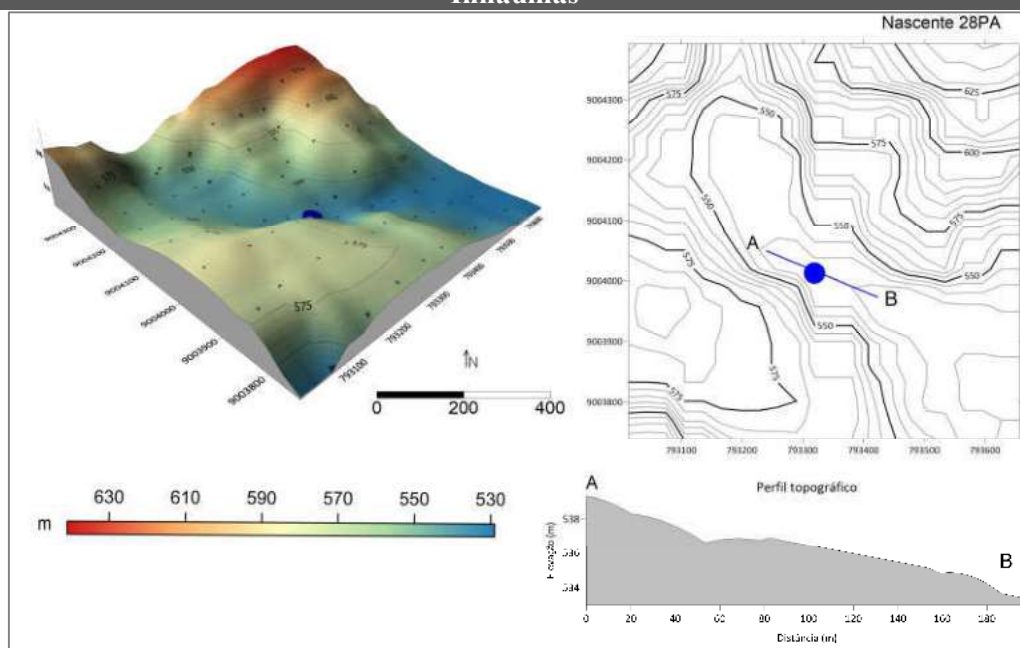


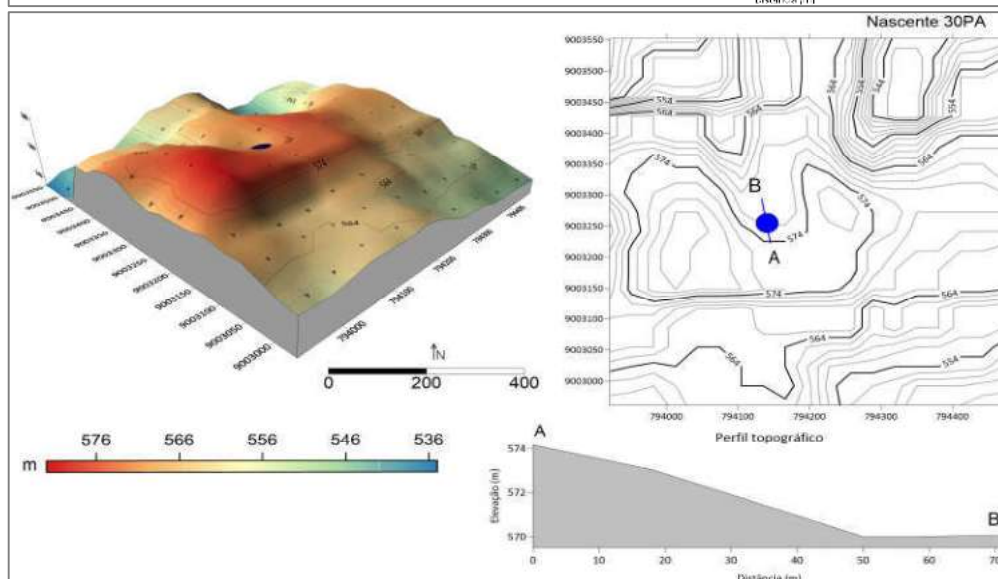
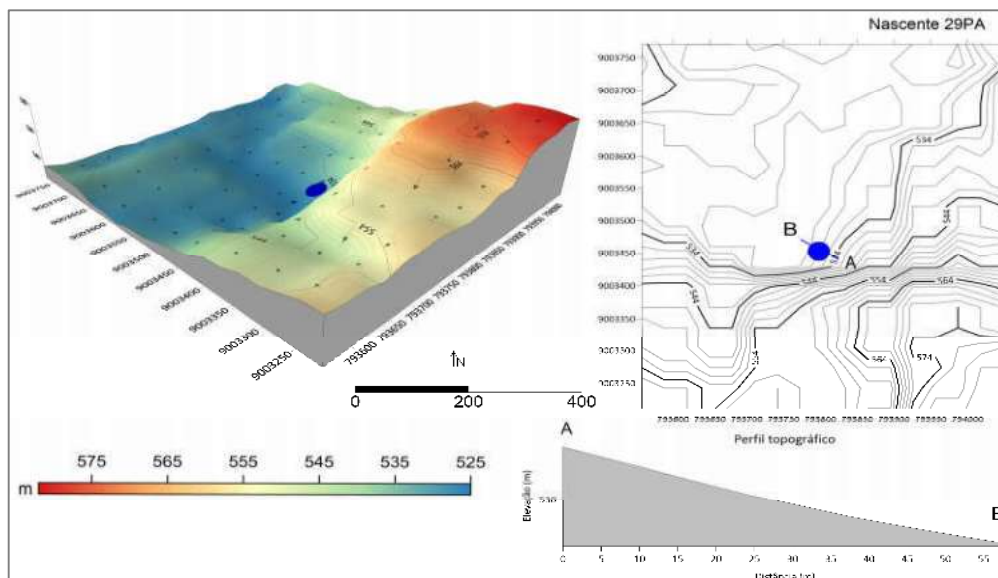




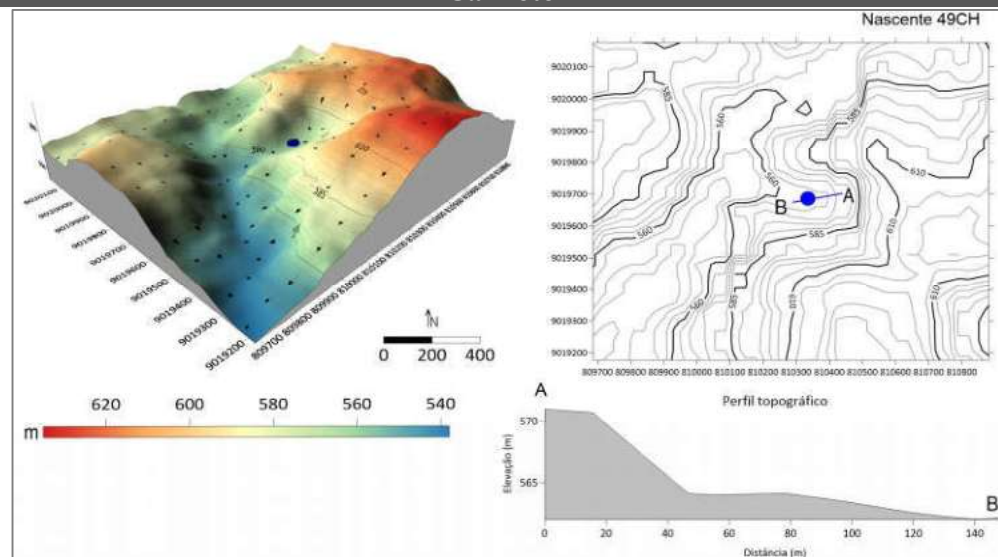


Inhaúmas

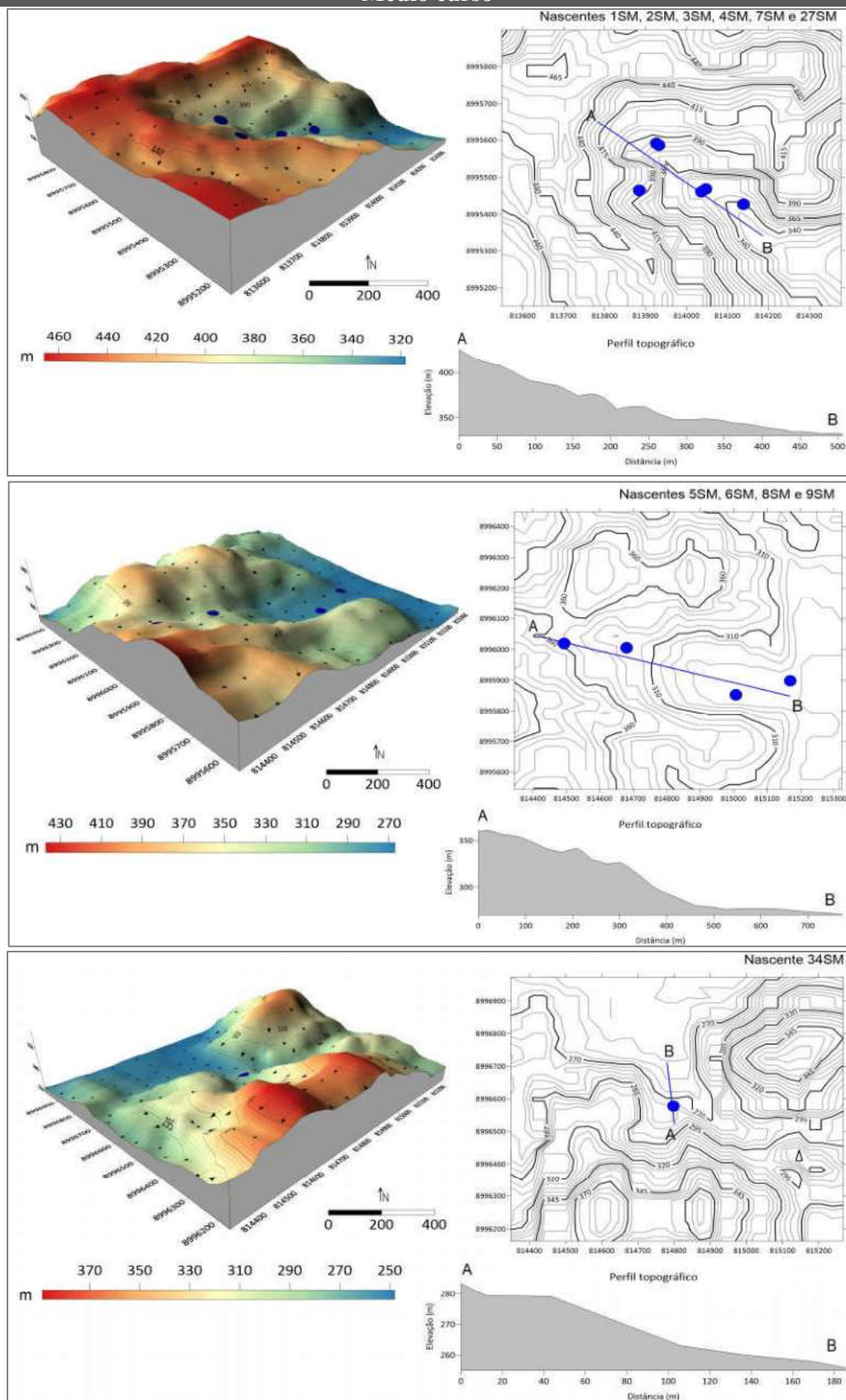


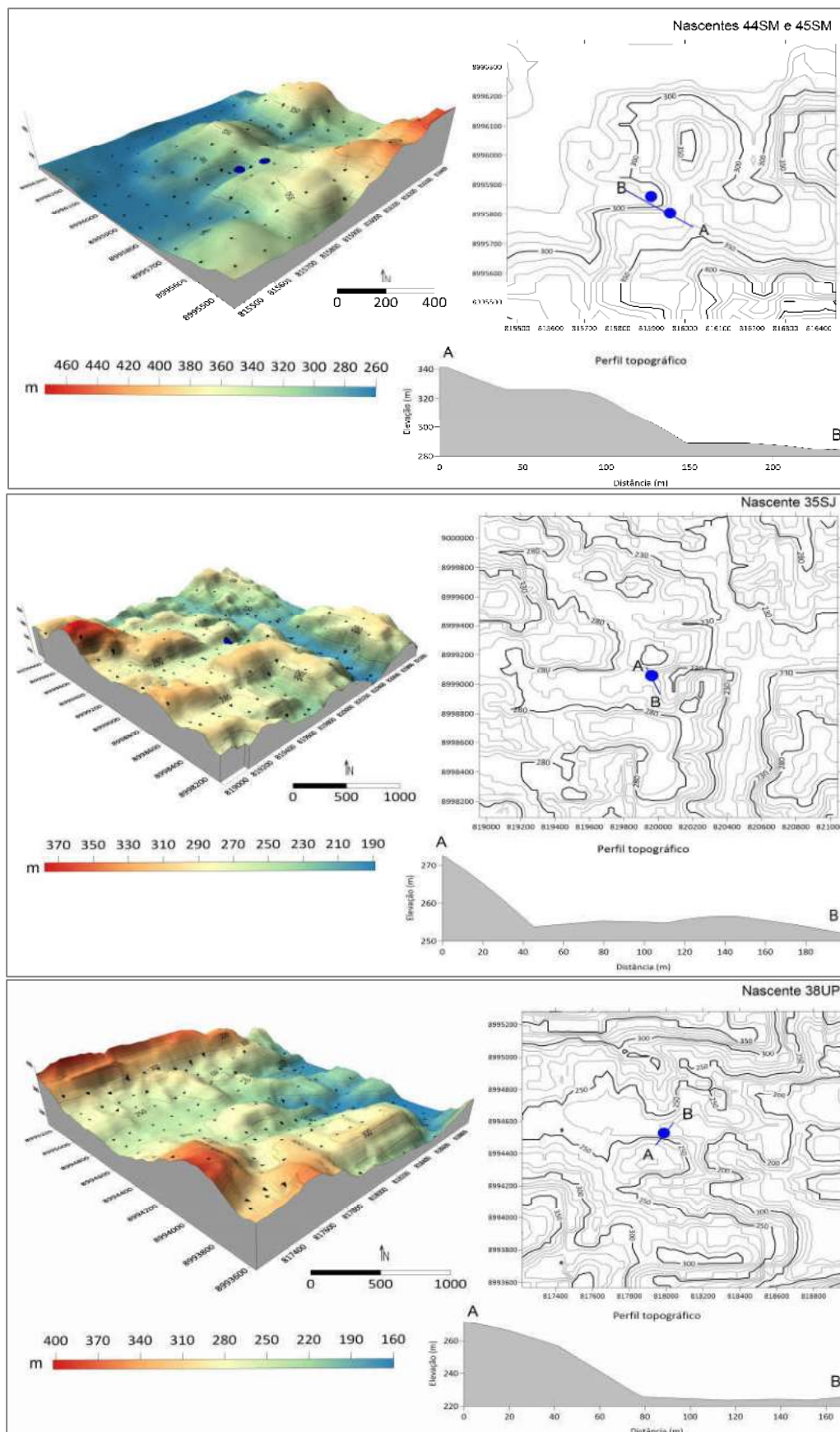


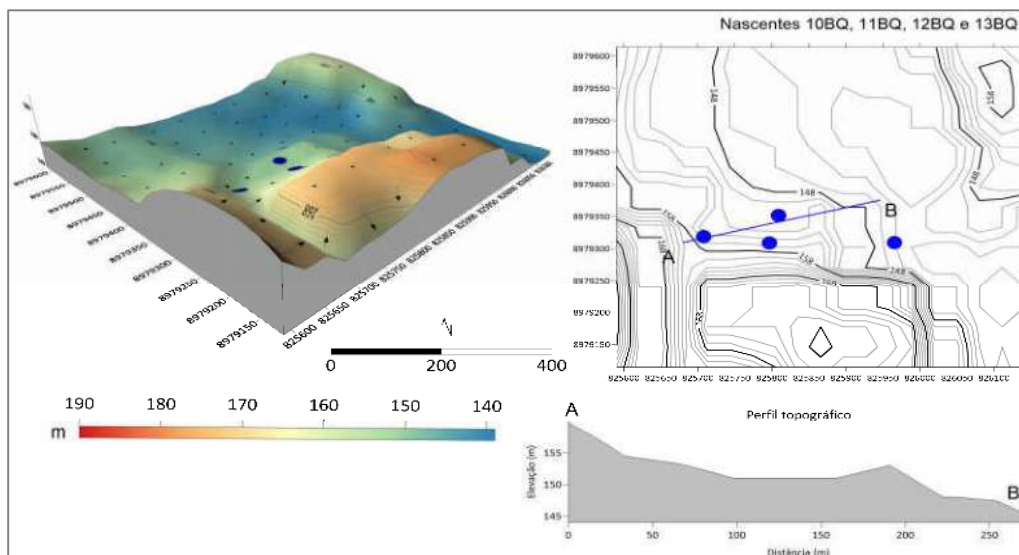
Canhoto



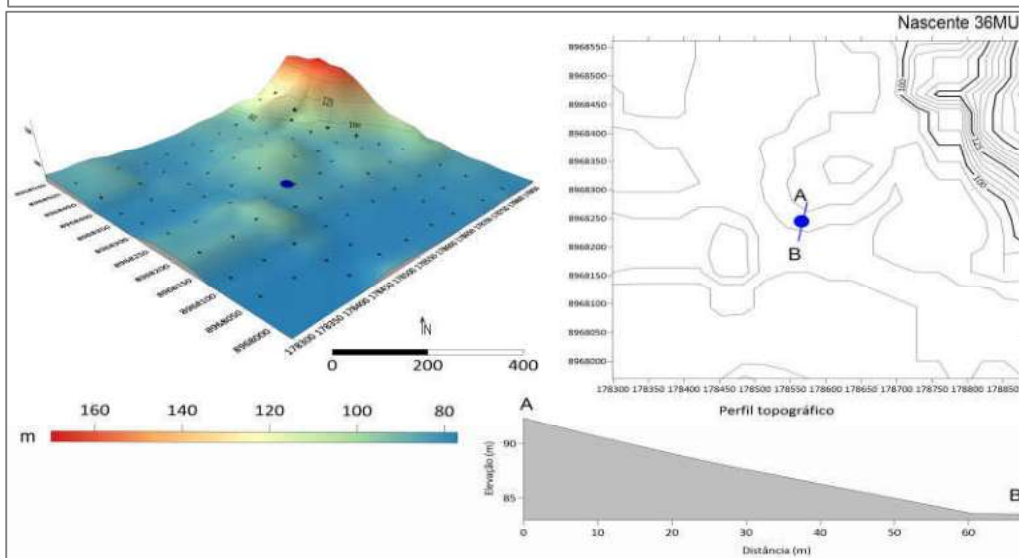
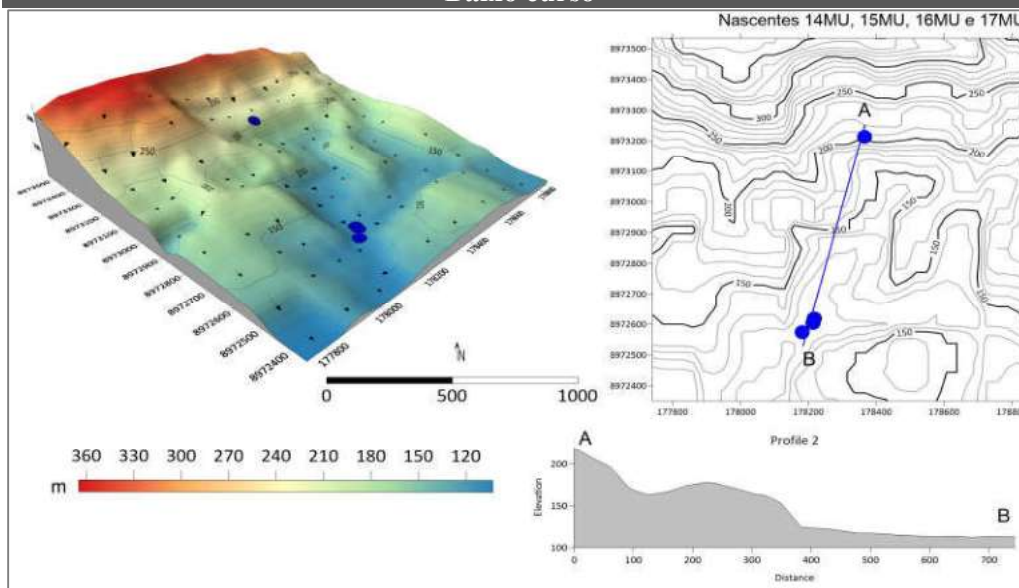
Médio curso

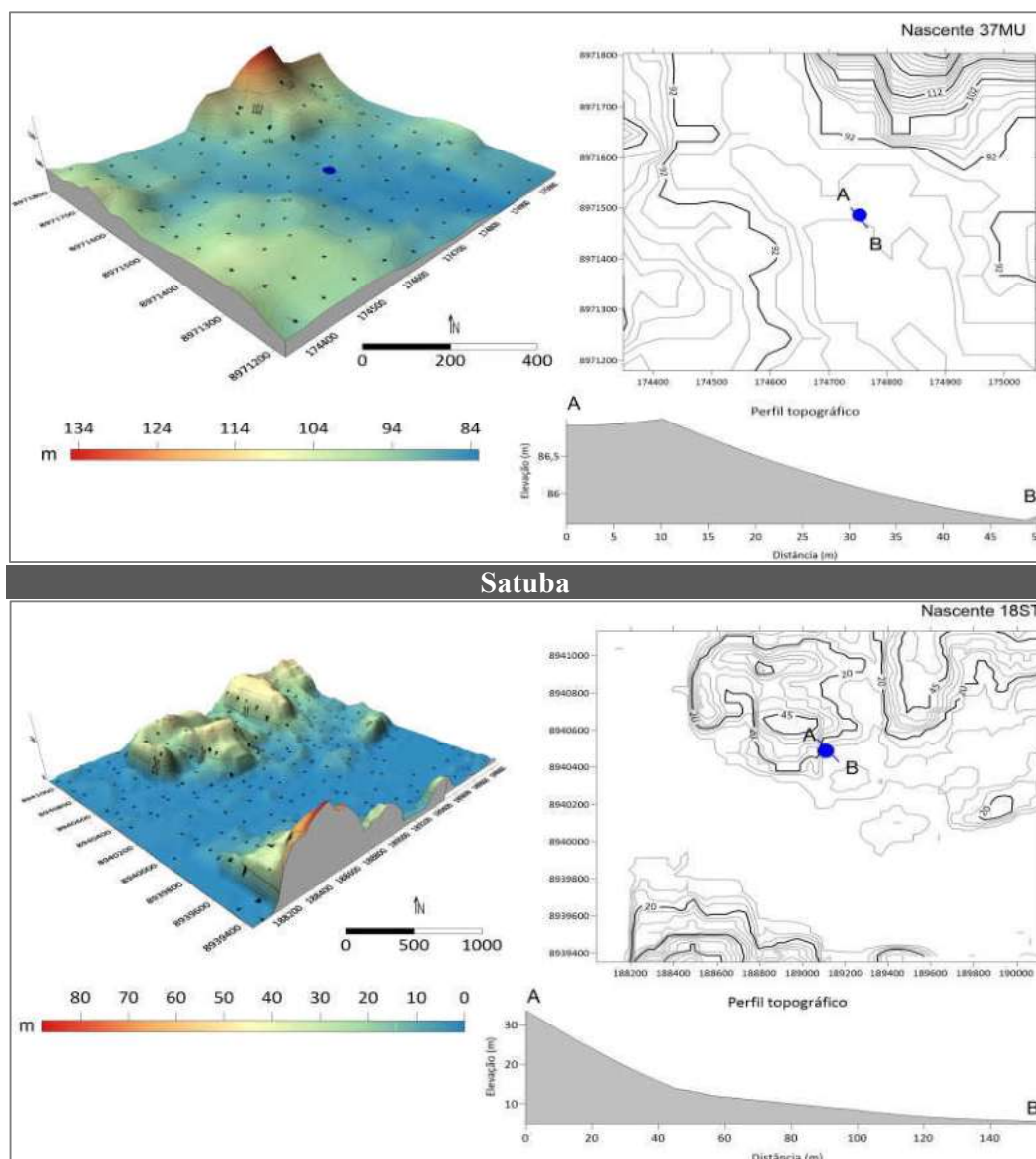






Baixo curso





Fonte: A autora (2024).

Com base nas características hidromorfológicas das nascentes, foram coletadas informações sobre as 49 nascentes mapeadas (Quadro 9). O objetivo não foi estabelecer uma tipologia classificatória das nascentes, em razão do grau de interferência local e limitações de acesso às nascentes no campo, algumas informações não puderam ser obtidas.

As observações locais possibilitam um aprofundamento mais acurado das especificidades estruturais, o que auxilia na caracterização e na aplicação futura de medidas classificatórias, além de contribuir para a compreensão dos processos associados às nascentes, sua origem na estrutura geomorfológica, seu comportamento no relevo e os efeitos das atividades humanas. A classificação das nascentes com base na geomorfologia é o menos

ambíguo na diferenciação (STEVENS et al., 2021), embora outros fatores combinados sejam essenciais para explicar sua complexidade (MOURA, 2021; VALENTE e GOMES, 2005). A geomorfologia regional é fundamental para a determinação dos sistemas de fluxo de águas subterrâneas que atuam na bacia hidrográfica (DAHL et al., 2007). Assim, não se pode dissociar os elementos de formação da paisagem do processo de formação e fluxo das águas subterrâneas e superficiais.

As nascentes foram descritas de acordo com os sistemas de captação da bacia do Mundaú. Foram identificados 11 Sistemas de captação, 27 sub-bacias de captação e diversas configurações no ambiente Hypocrenal (canais de 1ª ordem) e Eucrenal (áreas de transição das nascentes), destacam-se: urbano, pastagem, vegetação herbácea, mosaico de agricultura e fragmento arbóreo, solo exposto e fragmento arbóreo (Quadro 9). Em relação às particularidades da exfiltração das nascentes, foram identificados oito tipos de unidades geomórficas de nascentes (Fundo de vale, Sopé de encosta, Lajedo rochoso/Tálus, Lajedo rochoso Segmento de encosta, Ruptura de relevo, Patamar de encosta e Crista de encosta (Quadro 9), cinco tipos de morfologia (Duto, Olho, Afloramento em área do solo, Fratura rochosa e Intervenção) (Quadro 9), três tipos de aspecto de exfiltração (Múltipla, Difusa e Pontual), com mobilidade Fixa e Móvel, e sazonalidade (Perene, Intermitente e Sazonal) (Quadro 9).

Considerando as camadas dos lençóis freáticos e artesianos, existem nascentes alimentadas por ambos. As nascentes de lençóis freáticos estão localizadas em água mais rasas, depositando-se sobre as camadas impermeáveis, como as que ocorrem nos fundos de vale e na base de encostas, com manifestação em duto e olho. Já as nascentes provenientes de lençóis artesianos (aquífero), surgem quando o lençol freático está confinado entre duas camadas de rocha, sendo típicas da base de encostas ou de falhas geológicas, em regiões com fortes declives. Os lençóis responsáveis pelas primeiras nascentes estão em áreas de recarga próximas, enquanto as segundas podem ser abastecidas em áreas distantes do ponto de exfiltração (VALENTE e GOMES, 2005).

Quanto a este entendimento e as relações entre o fluxo de alimentação das nascentes estudadas nesta pesquisa, as características permitem afirmar que as nascentes (32GA, 33GA, 43GA, 31CO, 3SM, 5SM, 44SM e 37MU) de morfologia Duto, Olho d'água e Afloramento superficial (Quadro 9) estão associadas a lençóis freáticos, enquanto que as que exfiltram em morfologia de Fratura rochosa, sua origem provém de lençóis confinados entre duas camadas impermeáveis (Quadro 9).

Diferentes litologias e propriedades hidráulicas (hidroestratigrafia) tornam algumas configurações mais prováveis para nascentes (GREEN et al., 2014). Na bacia do Mundaú, os aquíferos são de origens fissural, ou seja, a água é armazenada entre rochas duras fraturadas. Dependendo das características hidrodinâmicas no subsolo, da intensidade e abertura de fraturas, o volume de água pode variar (APAC, 1998). No Alto curso do Mundaú, nos municípios de Garanhuns e parte de São João, a constituição rochosa quartzítica confere características específicas quanto à qualidade e ao grande volume de água, o que justifica sua exploração comercial (SILVA, 2012; APAC, 1998).

No Alto curso, especialmente nas áreas mapeadas em Correntes, observa-se uma paisagem geomorfológica ondulada e inclinada, que se intensifica no Médio curso, com altitudes e declividades de encosta mais acentuadas, atingindo altos graus inclinação no curso do vale do Mundaú, entre a divisa Estadual de Correntes, em Pernambuco, e Santana do Mundaú, além de parte de São José da Laje e União dos Palmares, em Alagoas. Já no Baixo curso e Satuba, o relevo se atenua, com a alternância de ambientes entre depressões periféricas e morros. No Inhaúmas e Canhoto, abrangendo os municípios de Palmeirina e Canhotinho, as nascentes estão localizadas em áreas relativamente planas e em vales.

Em relação à bacia do Mundaú, ao observar as unidades geomórficas, onde as nascentes ocorrem, nota-se que a maioria se encontra predominantemente em Fundo de vale, Base de encosta e Lajedo rochoso (Quadro 9). Em face da intervenção na paisagem, muitas morfologias de exfiltração perderam sua característica naturais, como algumas das nascentes mapeadas no Alto curso, município de Correntes, Inhaúmas, em Palmeirina e Médio curso, em Santana do Mundaú (Quadro 9). Contudo, o padrão de exfiltração das nascentes é mais associado ao fraturamento das rochas no Satuba, Médio, Baixo curso (Quadro 9), enquanto no Alto curso as variações são diversas, incluindo as formas em Duto e Olho (Quadro 9).

Quanto ao aspecto de exfiltração e mobilidade de algumas nascentes, não foi possível observá-los devido à dificuldade de acesso aos ambientes ou às modificações causadas pelas intervenções antrópicas. No entanto, o Aspecto de exfiltração Pontual e a Mobilidade Fixa são os mais predominantes (Quadro 9). Em relação à sazonalidade e à média de vazão, a maioria das nascentes apresentou um comportamento Perene. A vazão foi mensurada nas nascentes que sofreram alterações com canalizações, e as médias de vazão encontradas foram inferiores a 5,50 L/s (Quadro 9).

Muitas das configurações da paisagem interagem e se sobrepõem-se a cada nascente. Stevens et al. (2021) afirmam que a geomorfologia de origem ainda é a melhor maneira mais eficaz e menos ambígua de classificar as nascentes, pois suas características são facilmente

observáveis e quantificáveis, e a abordagem é específica para os locais de origem, com a geomorfologia permanecendo relativamente estável ao longo do tempo. Embora tais identificações se concentrem na geologia e geomorfologia, outros elementos precisam ser identificados. Amor et al. (2022) destaca que cada habitat de nascente possui suas particularidades, e um estudo específico é necessário para compreender as singularidades encontradas em cada uma, características que resultam das condições ecohidrológicas.

Quadro 9- Caracterização da estrutura hidromorfológica das nascentes.

NC	Sistema de Captação	Sub-bacia de captação	Ambiente Hypocrenal	Ambiente Eucrenal	Exfiltração de nascente					
					Unidade geomórfica	Morfologia da exfiltração	Aspecto de Exfiltração	Mobilidade	Sazonalidade	Média de vazão (L/s)
32GA	Riacho Vila Maria	32GA	Urbano; Vegetação herbácea; Pastagem		Ruptura de relevo	Duto	Múltiplo	Fixa	Perene	5,50
33GA	Riacho Pau Pombo	33GA	Urbano; Mosaico de agricultura e fragmento arbóreo		Fundo de vale	Olhos d'água diversos*	Múltiplo	Fixa	Perene	-
43GA			Urbano; Predominância de fragmento arbóreo e Agricultura	Sopé de encosta com intervenção/Talude	Afloramento superficial numa área do solo	Difusa	Móvel	Intermitente	-	
46GA				Fundo de Vale	-	-	-	Perene*	-	
47GA					-	-	-	Perene*	-	
48GA					-	Pontual*	-	Perene*	-	
19CO	Rio Correntes	19CO	Vegetação herbácea; Pastagem e Agricultura		Sopé de encosta	Intervenção	-	Fixa	Perene	0,03
20CO		20CO	Vegetação herbácea; Pastagem e Agricultura		Sopé de encosta	Intervenção	-			0,02
21CO		21CO	Pastagem, Agricultura e Fragmentos de vegetação		Sopé de encosta	Intervenção	-			0,01
22CO		23CO	Pastagem e Fragmentos de vegetação arbórea		Sopé de encosta	Intervenção	-			0,07
23CO			Pastagem e Fragmentos de vegetação arbórea		Lajedo rochoso/Tálus	Fratura rochosa	-			0,01
24CO		25CO	Pastagem; agricultura e Fragmentos de vegetação arbórea	Sopé de encosta	Intervenção	Múltiplo	0,08			
25CO				Fundo de vale	Intervenção	-	0,02			
26CO		26CO		Sopé de encosta	Intervenção	-	0,01			
31CO	Riacho Cordeiro	31CO	Pastagem e Agricultura		Sopé de encosta	Duto com intervenção	Pontual		1,00	

39CO	Rio Correntes	23CO	Pastagem e Fragmentos de vegetação arbórea	Sopé de encosta	Fratura rochosa	-			-	
40CO		25CO	Pastagem; agricultura e Fragmentos de vegetação arbórea	Segmento de encosta	Intervenção	-			-	
41CO				Fundo de vale	Intervenção	Pontual			-	
42CO				Ruptura de relevo	Intervenção	Difusa			-	
28PA	Rio Inhaúmas	28PA	Urbano e Pastagem	Sopé de encosta	Intervenção	-	Fixa	Perene	0,23	
29PA		29PA	Pastagem	Sopé de encosta	Intervenção	-		Perene	1,00	
30PA				Ruptura de relevo	Intervenção	-		Perene	-	
49CH	Riacho da Casinha	49CH	Pastagem	Ruptura de relevo	Intervenção	-	Fixa	Perene	-	
1SM	Riacho Duas Barras	1SM	Agricultura e Fragmento arbóreo	Sopé de encosta	Fratura rochosa	Pontual	Fixa	Perene	0,05	
2SM				Ruptura de relevo	Fratura rochosa	Pontual			0,02	
3SM				Sopé da encosta	Olho com intervenção	Pontual			0,36	
4SM				Sopé da encosta	Fratura rochosa	Pontual			0,07	
5SM		5SM		Sopé de encosta	Olho d'água	Pontual			0,20	
6SM				Patamar de encosta	Afloramento rochoso e área do solo	Difusa		Sazonal	0,03	
7SM				Fundo de vale	Intervenção	Pontual		Perene	-	
8SM				Patamar de encosta	Fratura rochosa	Pontual			-	
9SM				Sopé de encosta	-	-			-	
27SM				Sopé de encosta	Fratura rochosa	Pontual			1,47	
34SM	Riacho Caruru	34SM	Fragmento arbóreo e Agricultura	Sopé de encosta	Fratura rochosa	Pontual			-	
44SM	Riacho Duas Barras	44SM	Fragmento arbóreo	Sopé de encosta	Olho d'água	Pontual			-	
45SM				Sopé de encosta	Fratura rochosa	Pontual			-	

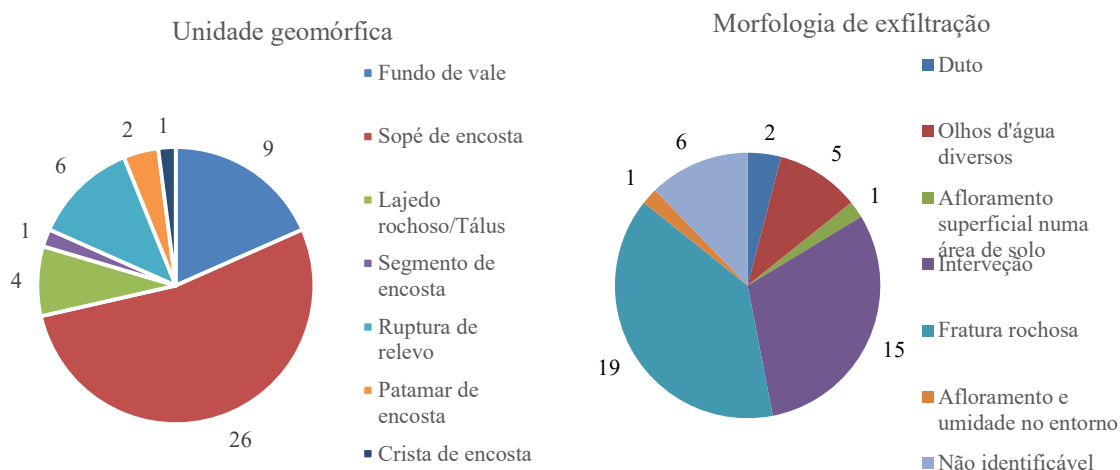
37SJ	Rio Inhaúmas	35SJ	Agricultura e Pastagem	Lajedo rochoso	Fratura rochosa	Pontual	Fixa	Perene	-
38UP	Riacho Timbó	38UP	Pastagem	Sopé de encosta	Fratura rochosa	Pontual	Fixa	Perene	-
10BQ	Riacho Sapucaia	10BQ	Solo exposto; Agricultura e Pastagem	Ruptura de relevo	Fratura rochosa	-	Fixa	Perene	0,17
11BQ				Sopé de encosta	Fratura rochosa	-			-
12BQ				Fundo de vale	Fratura rochosa	-			-
13BQ		13BQ		Crista de encosta	-	-			0,37
14MU	Afluente do Rio Mundaú	17MU	Misto de Agricultura e vegetação nativa	Fundo de vale	Fratura rochosa	Pontual	Fixa	Perene	0,13
15MU			Fragmento arbóreo	Sopé de encosta	Fratura rochosa	Múltipla			-
16MU				Sopé de encosta	Fratura rochosa	Pontual	Móvel	Intermitente	-
17MU				Lajedo rochoso	Fratura rochosa	Pontual	Fixa	Perene	0,17
36MU		36MU	Urbano; Pastagem	Lajedo rochoso	Fratura rochosa	Pontual			-
37MU		37MU		Sopé de encosta	Olho d'água	Múltiplo			-
18ST	Afluente do Rio Mundaú	18ST	Urbano e Pastagem	Sopé de encosta	-	Pontual	Fixa	Perene	-

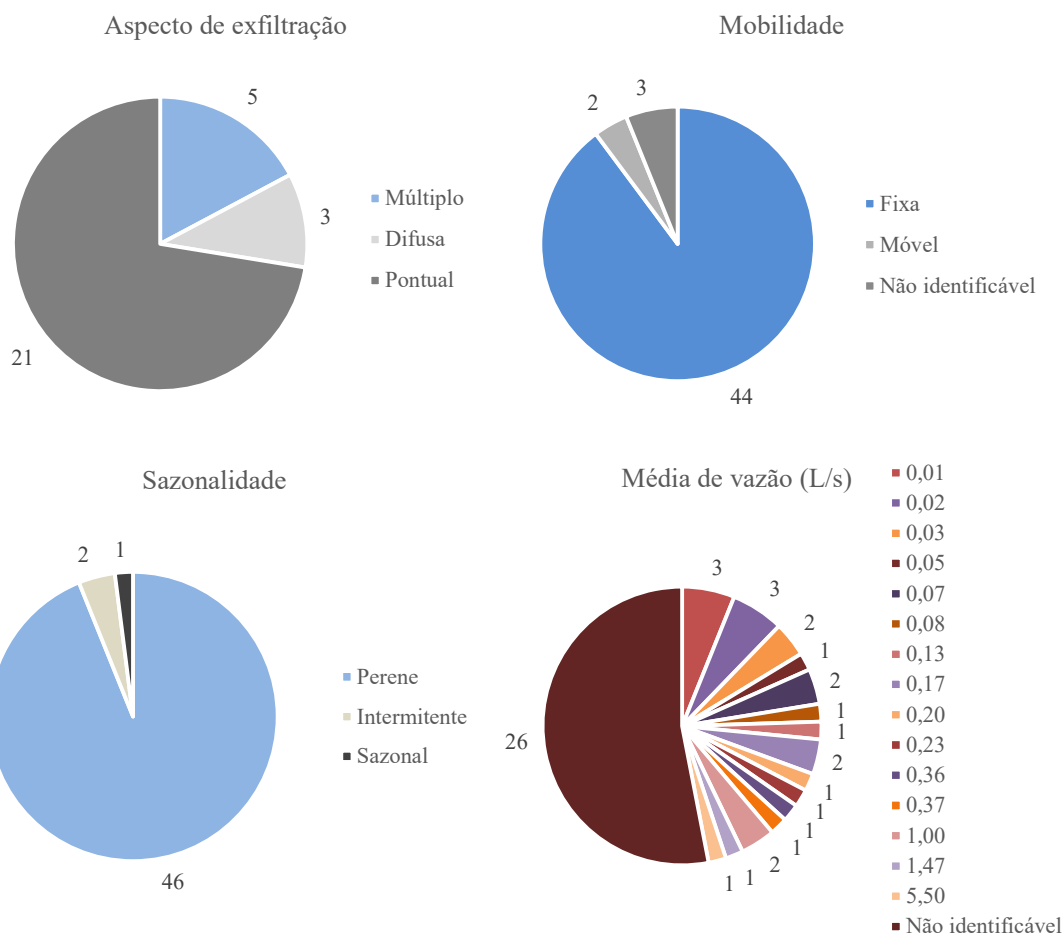
Fonte: Autora (2021-2023). *Relatos de campo de Iaponan Cardins de Sousa Almeida. “-” Espaços com traços indicam que não foi possível observar. Parte dos termos utilizados são baseados em Christofoletti (1980).

A Figura 46 sintetiza as características relacionadas à exfiltração das nascentes, abordando a Unidade geomórfica, a Morfologia de exfiltração, o Aspecto de exfiltração, a Mobilidade, a Sazonalidade e a Média de vazão (L/s) (Figura 46). Considerando as particularidades em microescala, a Unidade geomórfica apresentou predominância das nascentes no padrão Base de encosta e Fundo de vale (Figura 46). Na Morfologia de exfiltração, a maior das nascentes origina-se em Fratura rochosa, enquanto outra parte está em estado de Intervenção, o que impede uma análise classificatória precisa (Figura 46).

Em relação ao Aspecto de exfiltração visualizado, a maioria das nascentes apresentou exfiltração Pontual, enquanto a mobilidade e a sazonalidade mostraram predominância de nascentes Fixa e Perene, respectivamente (Figura 46). Quanto à média de vazão em 26 nascentes não puderam ser mensuradas pelas limitações em campanhas de campo e algumas nascentes não apresentavam captação, impossibilitando a realização, enquanto as demais nascentes estimadas, apresentaram vazões variando entre 0,01 a 5,50 L/s (Figura 46).

Figura 46- Representação dos valores somatórios das características de exfiltração das nascentes.





Fonte: A autora (2024).

5.5 Síntese das configurações de nascentes

Este tópico busca sintetizar as configurações das nascentes, destacando as particularidades observadas nas 49 nascentes.

5.5.1 Maiores magnitude de vazão entre as sub-bacias: 32GA e 33GA

As nascentes 32GA e 33GA (Figura 47A e D) apresentam magnitudes de vazão de 6ª ordem, com médias de 5,50 L/s, superiores às vazões observadas nas demais sub-bacias. Isso ressalta o impacto da configuração geológico-geomorfológica na vazão hidrológica da água. Uma característica predominante dessas nascentes é a estrutura morfológica de exfiltração, formada por Duto e Olho. Ademais, as exfiltrações ocorrem de maneira múltipla, ou seja, há dois Dutos e dois Olhos de exfiltração. Felipe (2013) aponta que as nascentes originadas nesse

contexto exibem o duto, com exfiltração pontual de água, e, em determinadas situações, vários dutos ligados a uma mesma nascente.

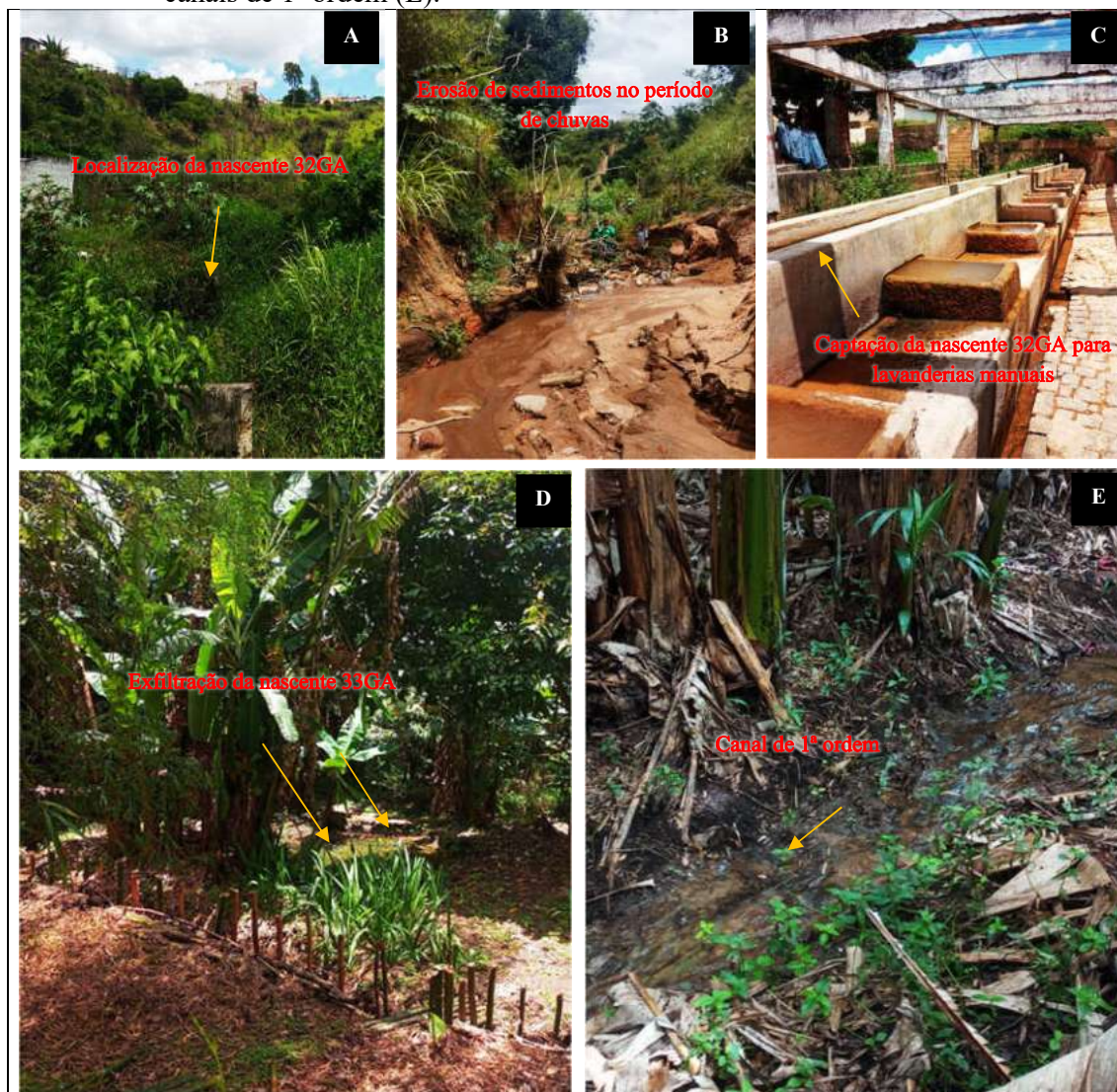
As exfiltrações em Duto e Olho, que também podem acontecer de maneira pontual, estão associadas às maiores vazões. Nessas condições, ligadas às maiores médias de vazões, nota-se uma intensa conexão com a energia dos fluxos, dado que os dutos são características exclusivamente erosivas (FELIPPE, 2009).

No entanto, a estrutura geológica local também controla e afeta esses fatores. A análise da litologia revela que os aquíferos dessa área são de origem fissural e constituídos por rochas quartzíticas. Isso gera uma característica específica: a concentração do fluxo subterrâneo, com um volume de água significativo, além da presença de várias nascentes em um único local.

Os aquíferos fissurais têm poros minúsculos e não interconectados, fazendo com que a água se mova em direção às discontinuidades físicas da rocha, onde se acumula e flui com mais intensidade (FELIPPE, 2009). A concentração de energia é tão grande que, no deflúvio após a nascente 33GA (Figura 47D), o fluxo de água é intenso (Figura 47E), criando vários canais de 1ª ordem. A dinâmica da nascente é fortemente influenciada pela atuação das encostas, especialmente durante a época das chuvas, quando o material erosivo afeta a estrutura da paisagem. Como as nascentes estão situadas na ruptura de relevo, os fluxos escoam para as regiões mais baixas, levando grandes volumes de sedimentos e, conseqüentemente, causando erosão excessiva (Figura 47B).

As mudanças nos ambientes de nascente têm sido registradas desde o século XIX. A partir da década de 1920, o uso das nascentes aumentou, com a implementação de um sistema de encanamento para o fornecimento público de água, começando com a água da nascente Pau Pombo (33GA) e posteriormente das nascentes Vila Maria (32GA) e Pau Amarelo (46GA). Vestígios desse período dessa época ainda são encontrados, como a lavanderia manual, que recebe água captada da nascente 32GA (Figura 47C).

Figura 47- Ambiente de afloramento da nascente 32GA (A), carreamento dos sedimentos na nascente 32GA, no período chuvoso (B)*, captação da água da nascente 32GA para a lavanderia manual (C), exfiltração da nascente 33GA (D) e deflúvio dos canais de 1ª ordem (E).



Fonte: Autora (2021-2023). *11B- Acervo de campo de Iaponan Cardins de Sousa Almeida.

5.5.2 Vazão volumosa em meio a uma paisagem de pastagem: 31CO

Praticamente todos os ambientes de exfiltração das nascentes sofreram modificações significativas devido a várias atividades relacionadas ao uso e cobertura da terra. Apesar de estarem ligados a um sistema aquífero subterrâneo, as condições superficiais desempenham um papel importante na dinâmica da nascente. Especificamente, o fluxo de água da nascente 31CO acontece em condições incomuns para uma área de preservação permanente. A modificação

dos ambientes naturais é uma realidade oculta. Muitas nascentes, como a 31CO (Figura 48A), perderam sua vegetação nativa devido à expansão da agricultura (Figura 48B).

A nascente 31CO apresenta um grande volume de água devido à morfologia favorável em duto. Como mencionado anteriormente, a exfiltração pontual está relacionada a um fluxo energético elevado. Ademais, a encosta plana que antecede a nascente possui uma declividade entre 9-20%. A entrada de água originada da precipitação pluvial pode variar superfície, como vegetação, uso do solo e compactação (KAMPF et al., 2013). Isso sugere uma variabilidade espacial geomorfológica no solo, que favorece uma maior disponibilidade de água em determinado ambiente. Diversas respostas podem ocorrer nesse contexto; conforme 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 48- 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: Autora (2021-2023).

5.5.3 Nascente em intenso processo erosivo: 1SM

A cavidade erosiva da declividade anterior à nascente (Figura 49A) apresenta uma alta propensão à erosão, o que demonstra sua fragilidade. Isso se deve à posição geomorfológica da nascente, situada em uma base de encosta, aos processos de encosta e às intervenções humanas, observa-se uma elevada susceptibilidade à erosão na cavidade erosiva da declividade anterior à nascente (Figura 49A). Os solos possuem uma textura de aparência arenosa-argilosa, sendo

transportada pela exfiltração de flúvio das águas da nascente e da encosta. Além disso, os processos erosivos são intensificados pela configuração do relevo em vale fluvial (Figura 49B). Gomes et al. (2016) a respeito do aumento da declividade, menciona que a intensa energia do transporte resulta em maiores erosões locais, enquanto que declividade mais suaves, menor será a energia de transporte de sedimento e maior será a deposição dos mesmos, refletindo diretamente na morfogênese local.

Parte das nascentes está situada em áreas de talvegue, que intensifica a erosão. Isso ocorre porque a erosão linear causa uma incisão vertical do terreno até que o nível freático entre em contato com a superfície. Desta forma, essas nascentes se formam em uma morfologia associada a mantos de intemperismo rasos e, em alguns casos, até a afloramentos rochosos (FELIPPE, 2013).

Figura 49- Formação de cavidade erosiva na nascente 1SM (A), fundo de vale e encostas de declividade acentuada no ambiente de nascente (B).



Fonte: Autora (2021-2023).

5.5.4 Nascentes com fragmentos de vegetação em topo de encosta: 5SM, 44SM e 45SM

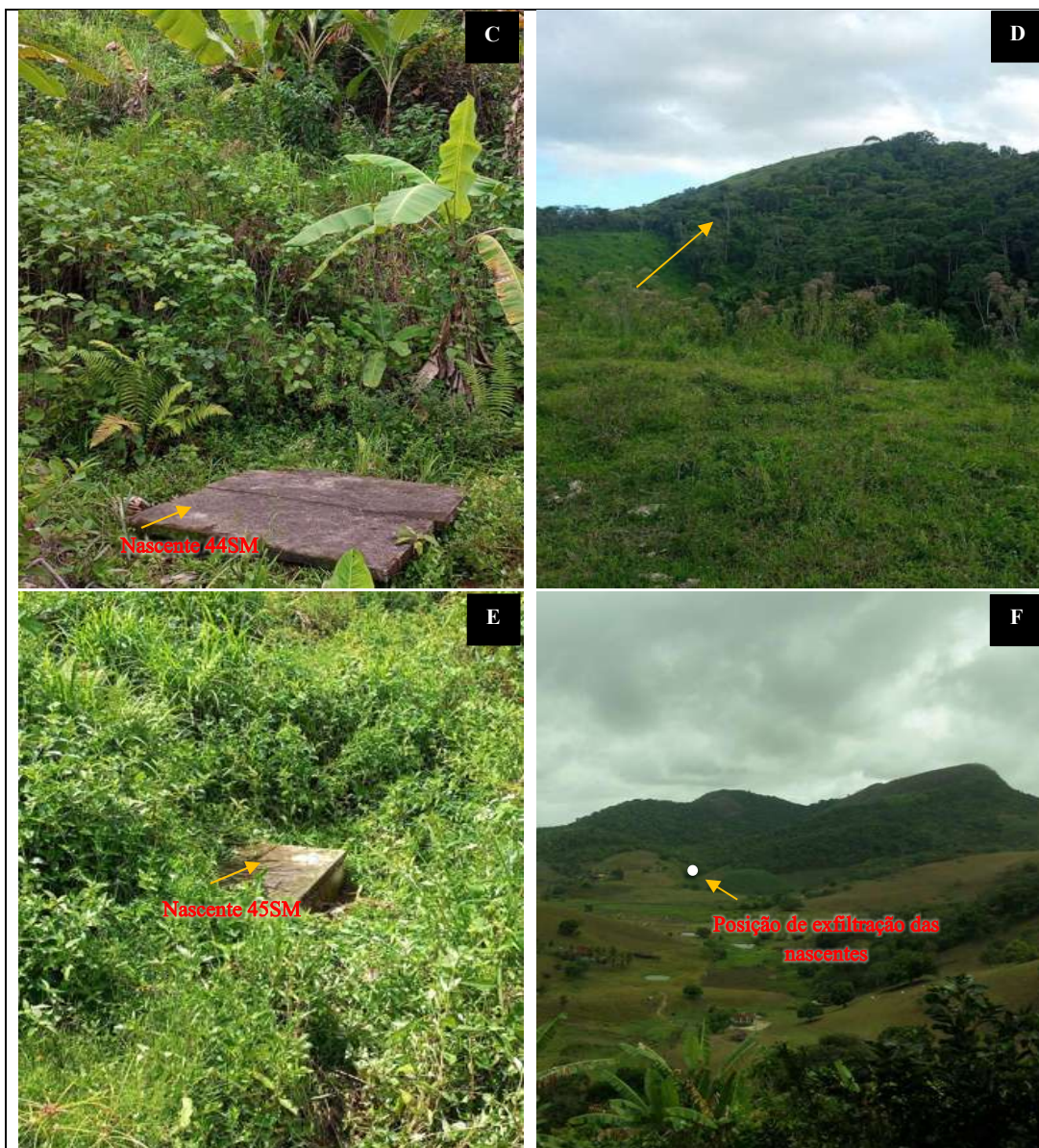
A vegetação ripária nativa é completamente ausente, com apenas alguns fragmentos preservados nos topos dos morros. Especificamente, essas nascentes (Figura 50A a 50F) estão

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 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 50- 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: Autora (2021-2023).

5.5.5 Nascente difusa de patamar de encosta com afloramento rochoso à montante: 6SM

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 51A) se distingue por sua ocorrência em um contexto único em relação às outras nascentes: um patamar de encosta com afloramento rochoso, lajedado e raízes de árvores (Figura 51B). 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.

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 onde 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.

Figura 51- Ambiente de exfiltração da nascente 6SM (A), talus em encosta, anterior a nascente 6SM (B) e presença de raízes em locais de umidade.



Fonte: Autora (2021-2023).

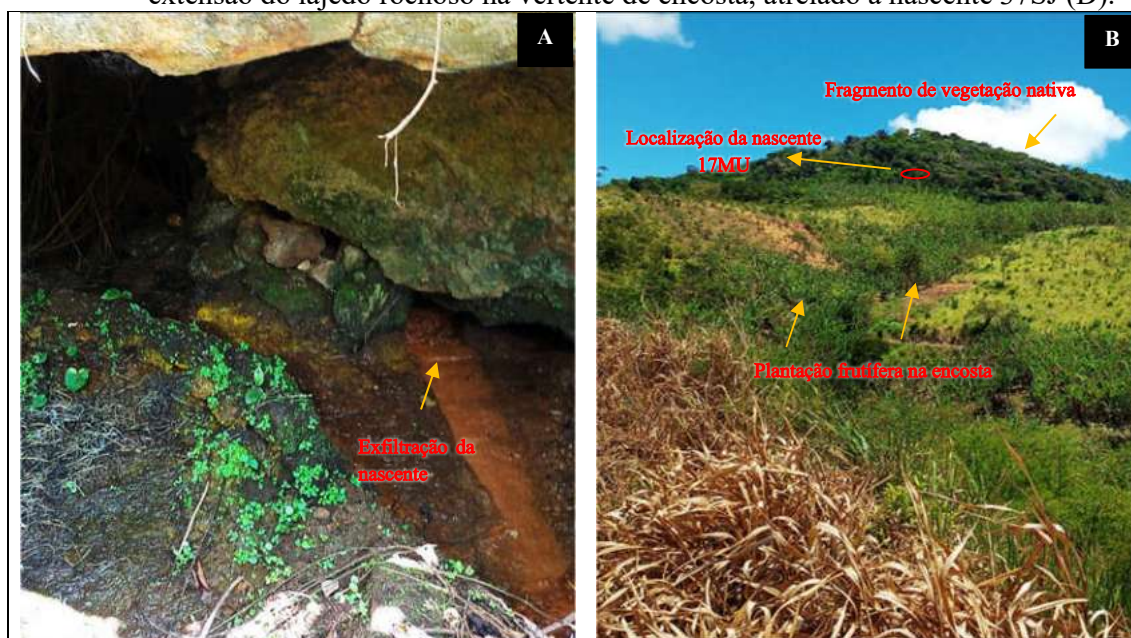
5.5.6 Nascentes perenes em Lajedo rochoso: 17MU e 35SJ

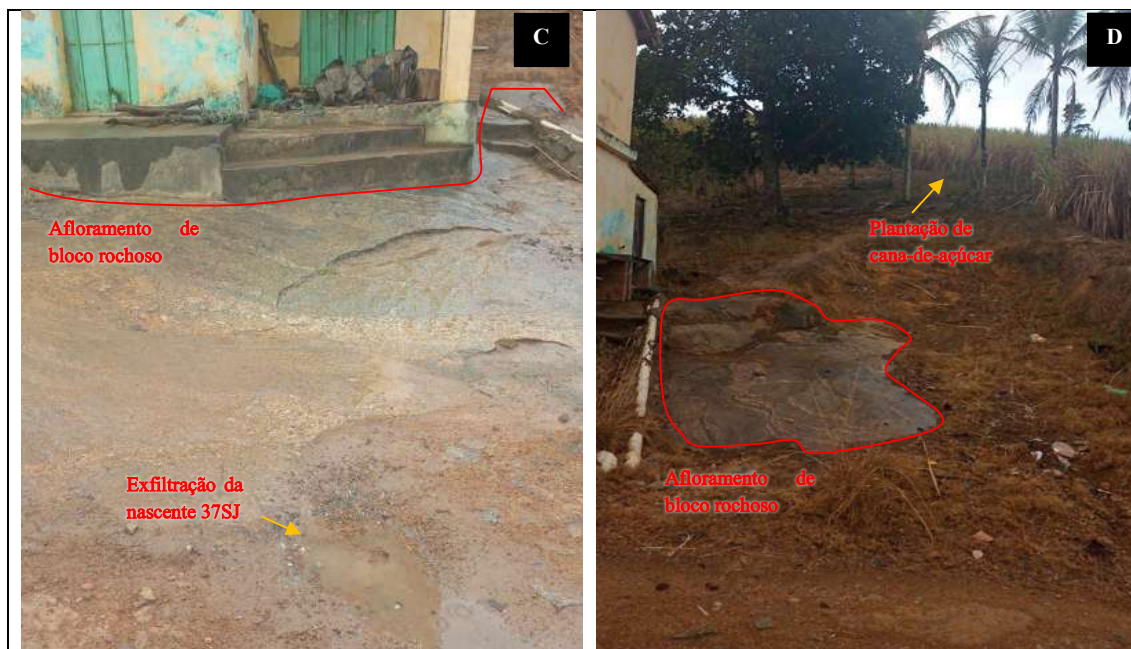
As nascentes 17MU e 37SJ, a exfiltração de água ocorre através das fraturas das rochas em um lajedo exposto (Figura 52A e 52C), em dois cenários distintos. A nascente 17MU, em particular, apresenta uma configuração de ruptura de declive (Figura 52B), destacando-se das demais nascentes. Seu ambiente de 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 52C e D), ela se encontra em um ambiente altamente modificado, com intensas intervenções humanas, como grandes plantações de cana-de-açúcar e ocupação urbanos. Esse cenário remonta aos períodos de expansão da cana-de-açúcar nas regiões interioranas do Nordeste Brasileiro.

Figura 52- 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 lajedo rochoso na vertente de encosta, atrelado a nascente 37SJ (D).





Fonte: Autora (2021-2023).

5.5.7 Nascentes com maiores indicativos de poluição: 10BQ, 13BQ e 18ST

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. O panorama observado nas nascentes 10BQ, 13BQ (Figura 53A a 53D) e 18ST (Figura 53E e 53F) reflete os impactos das atividades agrícolas e urbanas. Comum nas áreas rurais, a água das nascentes é usada no consumo diário, muitas vezes em locais próximos ao uso de agrotóxicos, à construção de residências e contaminação hídrica. Esses problemas afetam o equilíbrio das nascentes e a saúde pública.

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 ampla e complexa. A recuperação da singularidade das nascentes e a compensação dos impactos nunca serão plenamente alcançadas enquanto esses ambientes continuarem sendo afetados (AMOR et al., 2022).

Figura 53- 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 próximos a nascente (F).





Fonte: Autora (2021-2023).

5.6 Aplicação do Protocolo de Bioavaliação Rápida na avaliação dos ambientes de nascentes: medidas protetivas e conservacionistas dos recursos naturais

De acordo com os critérios observados (Quadro 6), foi utilizado o Protocolo de Bioavaliação Rápida (PBR) nas nascentes visitadas em campo entre outubro de 2021 a abril de 2022 (Figura 54 e Apêndices 7 a 11). O monitoramento com o Protocolo PBR tem permitido uma análise interdisciplinar das transformações contínuas nos ambientes aquáticos, possibilitando a avaliação da dinâmica da paisagem e a proposição de estratégias de conservação, medidas de recuperação e envolvimento comunitário. Isso viabiliza a elaboração de projetos e ações para tomada de decisões futuras (MACHADO et al., 2018). As nascentes são consideradas ambientes de transição entre o subterrâneo e superficial, além do aquático e o terrestre, o que torna essencial a realização de monitoramentos contínuos ao longo do tempo e em diferentes locais.

As classificações obtidas com o Protocolo PBR apresentam um valor máximo de 81, mínimo 39, média de 61. Com base nesses resultados, as nascentes foram classificadas nos seguintes estados: boa, para valores entre 81 a 68; alterada, para valores entre 67 a 53; e impactada, para valores entre 52 a 39. Das nascentes avaliadas, 27,03% apresentaram condição boa, 51,35% estavam na condição alterada e 21,62% estavam em condição impactada.

Considerando os estados de conservação das 37 nascentes avaliadas, observou-se muitas intervenções em todas as sub-bacias da bacia do Mundaú, com pelo menos uma nascente em condição alterada e impactada em cada sub-bacia (Figura 54). Isso se deve ao uso e cobertura da terra, à expansão urbana, à contaminação por adubos químicos e à retirada da vegetação florestal nativa.

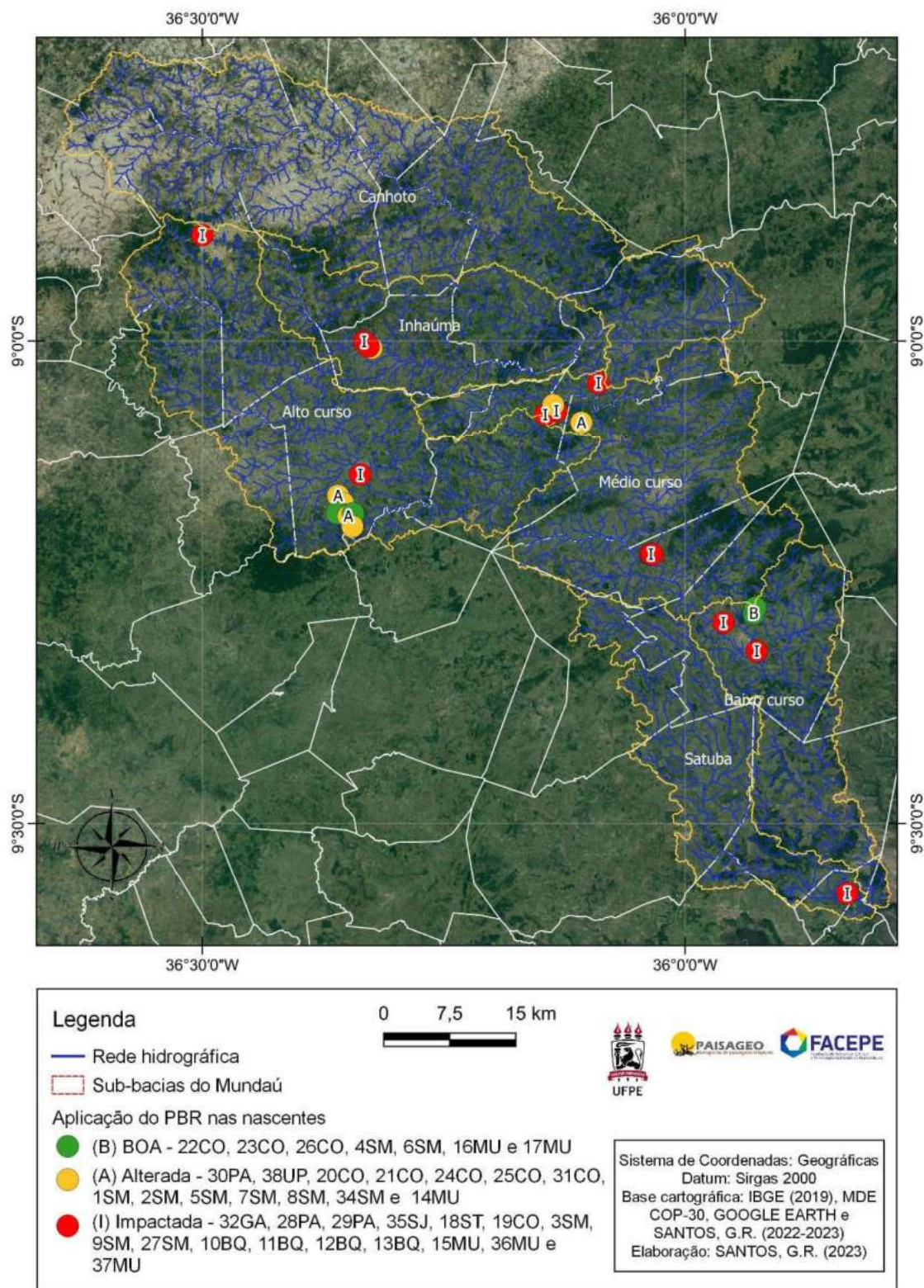
O Protocolo retrata a situação da nascente durante o período analisado, sendo fundamental que as avaliações subsequentes sejam realizadas, pois podem aparecer novas configurações da paisagem em decorrência ao uso e cobertura da terra. Este protocolo, por ser de fácil implementação, representa uma ferramenta valiosa tanto para população local quanto para os órgãos ambientais, já que não implica grandes custos.

Contudo, existem algumas restrições na aplicação do PBR. Os somatórios finais não indicam uma causa específica de impacto e mudança, mas reúnem um critério final com base em um conjunto de questionamentos sobre a transição entre o ambiente terrestre e aquático das nascentes. Apesar de suas vantagens, o protocolo também auxilia na identificação e monitoramento de padrões na configuração da paisagem, bem como na previsão de tendências futuras da qualidade ambiental dos corpos hídricos, ao compreender a realidade atual e compará-la com perspectivas futuras.

Assim, a análise integrada dos componentes físico, biótico e antrópico, conforme Moroz (2010) é uma ferramenta essencial para a elaboração de diagnósticos ambientais e avaliação de impactos, especialmente para objetivos relacionados à proteção e conservação.

A preservação das nascentes, em áreas rurais e urbanas, requer a participação de todos os agentes da sociedade. O poder público tem a responsabilidade de implementar medidas de demarcação, recuperação e preservação das nascentes, além de promover a conscientização da população local, instruindo-a sobre a importância de preservação da água das nascentes (FONSECA e GONTIJO, 2021).

Figura 54- Protocolo de Bioavaliação Rápida (PBR) para 37 nascentes, no período de outubro de 2021 a abril de 2022.



Fonte: A autora (2024).

Quanto ao número de Unidades de Conservação (UC) na bacia do Mundaú, observa-se que a porção da bacia disposta em Pernambuco, possui poucas áreas destinadas a proteção e conservação dos recursos naturais, em comparadas com a porção da bacia contida em Alagoas. No total, a bacia do Mundaú conta com 19 UC (Figura 55 e Quadro 10). Essas unidades de conservação, de acordo com os dispositivos legais, reforçam as medidas protetivas e conservacionistas dos recursos naturais da bacia, ajudando a reduzir as perdas de biodiversidade.

Os órgãos ambientais governamentais, como a Agência Estadual do Meio Ambiente de Pernambuco (CPRH), o Conselho Municipal de Defesa do Meio ambiente de Garanhuns (CODEMA), Instituto do Meio Ambiente de Alagoas (IMA) e Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH-AL) são os órgãos públicos que respondem pela conservação, proteção e manutenção da biodiversidade, em particular das bacia hidrográfica do Mundaú. De acordo com Mattos et al. (2021) articulações junto a estes órgãos e universidades públicas de ensino foram efetuadas junto a Agência Nacional de Águas (ANA) para criação do comitê de bacia hidrográfica, havendo descontinuidades das articulações locais com as alterações das gestões políticas. Até o presente momento em longo processo de deliberação. Dentre as medidas empregadas pelo comitê de bacias, reforçam a gestão e plano de recursos hídricos, que promovem a conservação e recuperação dos corpos d'águas, portanto, é um dispositivo legal importante a ser elaborado.

Além disso, algumas organizações sem fins lucrativos (Ongs) na região têm atuado no incentivo de temas ambientais de interesse público, particularmente, a Ong Geonordeste, em Garanhuns, e Amigos do Rio Correntes, em Correntes. Em outras partes do mundo, Ongs criaram um banco de dados online relacional para administrar e promover restauração e proteção de nascentes, como o Springs Stewardship Institute, no Arizona - EUA (SSI, 2024). Acesso pelos links: (<https://springstewardshipinstitute.org/>; <https://springsdata.org/>). A formação do banco de dados tem a finalidade de cadastrar dados de nascentes, bem como inventariar e avaliar a saúde ecológica e a funcionalidade da complexidade desses ambientes. Pesquisadores à nível global tem reconhecido o papel das nascentes e certificando o grau de endemismo, diversidade de espécies, além da vulnerabilidade, perturbação e mudanças antrópicas e naturais.

Em Pernambuco, destacam-se dois Parques municipais em Garanhuns: o Parque Ecológico Ruber Van Der Linden e o Parque Natural Municipal das Nascentes do Mundaú (Figura 55). Além disso, há a Reserva Biológica de Pedra Talhada, de administração federal, que abrange o sudoeste do município de Correntes e outros municípios (Figura 55).

Em Alagoas, a APA de Murici, de administrada pelo estado e contida na Estação Ecológica de Murici (ESEC), sob responsabilidade do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), e APA do Catolé e Fernão Velho, na porção nordeste de Satuba, são de destaque, com gestão federal. A região ainda conta com um total de 11 RPPNs estaduais: Guanabara (União dos Palmares e Santana do Mundaú), Anhumas I e III, Santa Quitéria, Manoel Gomes e Notório (União dos Palmares), Osvaldo Timóteo (São José da Laje), Boa Sorte, Santa Maria, Vila D'Água (Murici), e Mata do Cedro (Rio Largo) (Figura 55 e Quadro 10). Há também duas RPPNs federais: Santa Tereza (Atalaia), e São Pedro (Pilar) (Figura 55 e Quadro 10).

As UCs são instituídas pelo Sistema de Unidades de Conservação – SNUC, regulamentado pela Lei Federal 9.985/2000 (BRASIL, 2024), com a finalidade de garantir a conservação dos recursos ambientais. Na região da bacia do Mundaú, é crucial que mais incentivos sejam destinados à manutenção dos ecossistemas naturais, especialmente nas sub-bacias do Alto curso, Inhaúmas e Canhoto. Como destacam Amor et al. (2022) planos de gestão e restauração adaptados às características de cada nascente são essenciais para a preservação dos ambientes de nascentes.

	Der Linden – “Pau Pombo”				
3	Reserva Biológica de Pedra Talhada	Correntes, Lagoa do Ouro-PE, Quebrangulo, Chã Preta-AL	Decreto 98.524/1989	Proteção Integral	Federal
4	RPPN Guanabara	União dos Palmares e Santana do Mundaú-AL	Portaria IMA Nº 38/2017	Uso Sustentável	Estadual
5	RPPN Anhumas I	União dos Palmares-AL	Portaria IMA Nº 39/2017	Uso Sustentável	Estadual
6	RPPN Anhuma III		Decreto Estadual Nº 3.050/2006 e Portaria IMA Nº 37/2017	Uso Sustentável	Estadual
7	RPPN Santa Quitéria		-	-	-
8	RPPN Manoel Gomes		-	-	-
9	RPPN Natorio		-	-	-
10	Área de Proteção Ambiental de Murici	Murici, Colônia de Leopoldina, Ibateguara, Novo Lino, Joaquim Gomes, União dos Palmares, Branquinha, Messias e São José da Laje-AL	Lei Nº 5.907/1997	Uso Sustentável	Estadual
11	Estação Ecológica de Murici	Murici, União dos Palmares, São José da Laje, Ibateguara, Colônia de Leopoldina, Novo Lino, Joaquim Gomes, Messias, Branquinha e Flexeiras-AL	Lei Nº 5.907/1997	Proteção Integral	Federal
12	RPPN Vila D'Água	Murici-AL	Portaria Nº 017/2007	Uso Sustentável	Estadual
13	RPPN Santa Maria	Murici-AL	Portaria Nº 010/2009	Uso Sustentável	Estadual
14	RPPN Boa Sorte	Murici-AL	Portaria Nº 015/2007	Uso Sustentável	Estadual

15	RPPN Osvaldo Timóteo	São José da Laje-AL	Portaria Nº 018/2007	Uso Sustentável	Estadual
16	RPPN Santa Tereza	Atalaia-AL	Portaria IBAMA Nº 120/2001	Uso Sustentável	Federal
17	RPPN São Pedro	Pilar-AL	Portaria IBAMA Nº 1295/1995	Uso Sustentável	Federal
18	RPPN Mata do Cedro	Rio Largo-AL	Portaria IMA Nº 007/2014	Uso Sustentável	Federal
19	Área de Proteção Ambiental do Catolé e Fernão Velho	Satuba, Maceió, Santa Luzia do Norte e Coqueiro Seco -AL	Lei Nº 347/1992	Uso Sustentável	Federal

Elaboração: A autora (2024), com base na Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco – CPRH, Instituto de Meio Ambiente de Alagoas – IMA, Instituto Chico Mendes – ICMBio, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente – IBAMA e Google Earth.

5.6.1 Cenário e desafios no abastecimento em espaços rurais

O abastecimento de água potável e o saneamento básico nas áreas rurais apresentam sérias deficiências. Em muitas localidades observadas, as dificuldades são diversas, incluindo a falta de infraestrutura, o acesso difícil devido à topografia e aos altos custos de implementação. Nessas áreas, o abastecimento de água depende de nascentes, poços e rios próximos, sendo esses os principais recursos usados pelas populações de baixa renda para o consumo de água. No que diz respeito ao saneamento básico, a situação é crítica. Em muitas residências, não há tratamento de esgoto ou fossas sépticas, e o esgotamento é lançado diretamente nas nascentes e rios próximos.

A Organização das Nações Unidas – ONU, na resolução da assembleia geral 64/A/RES/64/292 de 2010, reconheceu que: “o acesso à água potável e ao saneamento básico é um direito humano essencial, fundamental e universal, indispensável à vida com dignidade”. No entanto, esse direito tem sido frequentemente negligenciado. Parte das populações rurais vivem sem tratamento adequado de água e esgoto, enfrentando desigualdades sociais e condições precárias de saúde.

Para amenizar as dificuldades no acesso à água de qualidade, a população local adota práticas como o cercamento das nascentes com alvenaria (Figura 56A) ou o uso de outras técnicas, como o solo-cimento. No entanto, essas práticas, além de não atenderem às exigências

das Áreas de Proteção Permanente (APP), podem contribuir para o secamento das nascentes e aumentar o risco de contaminação, dependendo da técnica utilizada.

Estima-se que, globalmente, 30,1% da água doce do planeta seja subterrânea, estando sob intensa pressão devido à contaminação antrópica, provocada por fatores como mudanças climáticas, urbanização, industrialização e práticas agrícolas (KIWANUKA et al., 2023; TWINOMUCUNGUZI et al., 2021). A preservação e conservação das nascentes, portanto, são fundamentais para garantia a qualidade e quantidade da água, especialmente em um cenário de intensas pressões ambientais.

Nos ambientes de nascentes, restam apenas pequenas herbáceas e arbustos que não são suficientes para promover a conservação das nascentes. Como resultado, a água das nascentes se torna vulnerável à eutrofização, com o crescimento excessivo de algas e cianobactérias e contaminação por dejetos (Figura 56B). O equilíbrio do sistema hidroambiental das nascentes é ainda mais comprometido pela contaminação, que resulta da aplicação de agrotóxicos, do desmatamento químico da vegetação e do descarte inadequado de resíduos sólidos (Figura 56C). Este cenário ambiental é ainda mais preocupante e exige uma abordagem ampla. É fundamental monitorar a qualidade das águas subterrâneas e superficiais, identificar os principais obstáculos à proteção ambiental das nascentes e implementar soluções integradas, incluindo o uso de tecnologias sociais e educação ambiental.

Figura 56- Intervenção realizada nas nascentes (A), eutrofização biológica da água (B), despejo de resíduos de lixo próximo a nascente 1SM (C).



Fonte: A autora (2024).

5.8 Monitoramento do comportamento hidrológico nos ambientes de nascentes

Como era esperado, a descarga de muitas nascentes varia ao longo do tempo, e a classe de vazão pode mudar dependendo do momento da medição (SPRINGER et al., 2008). Os gráficos ilustram variabilidade do comportamento hidrológico das nascentes monitoradas no

Alto e Médio curso, particularmente em Correntes e Santana do Mundaú (Figuras 57 e 58). As vazões mensais foram monitoradas ao longo de dois anos (janeiro de 2022 a dezembro de 2023) em oito nascentes no município de Correntes (Figura 57) e sete no município de Santana do Mundaú (Figura 57).

Analisando os resultados obtidos ao longo do período de monitoramento, em litros por segundo (L/s), observou-se valores significativos de vazão (Figura 57). As médias durante os dois anos avaliados, em Correntes, foram de 0,08 L/s (Tabela 7 e Apêndice 13).

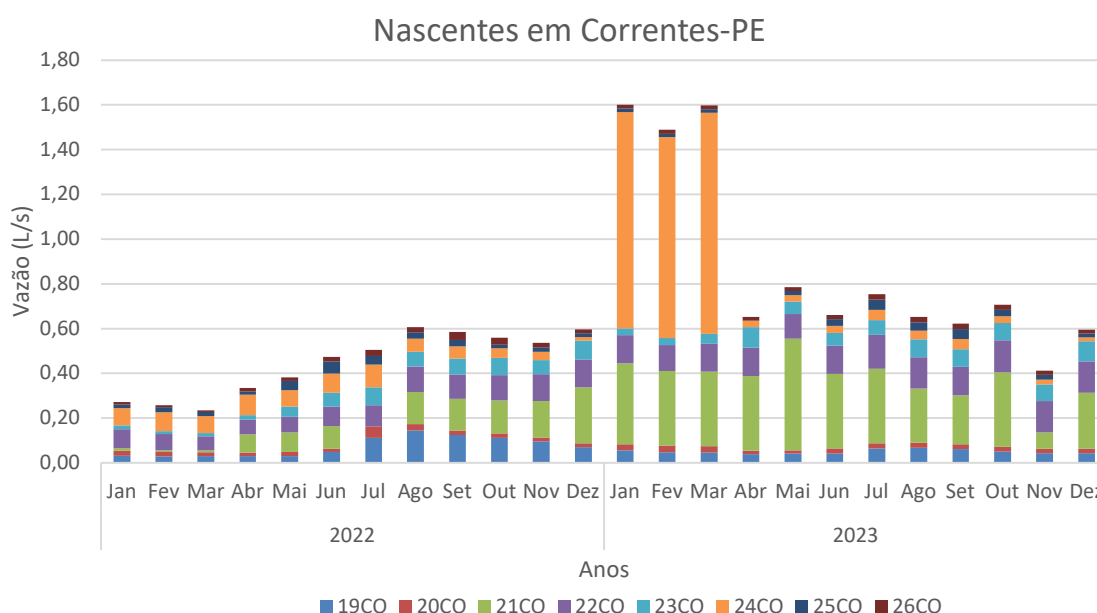
Em particular, as médias de vazões mais expressivas ao longo de 2023 ocorreram na nascente 24CO, em janeiro, fevereiro e março, com valores de 0,97, 0,90 e 0,99 L/s, respectivamente (Figura 57 e Apêndice 13). Valores estes bem significativos em comparação com a média da série de dados. De acordo com Springer et al. (2008) as intensas descargas periódicas podem ocorrer por diferenças de pressão, efeito conhecido como “sifão”, fenômeno amplamente conhecido da hidráulica, em que o enchimento de canais de solução de águas subterrâneas cria surtos periódicos de descarga das nascentes. Já as nascentes 21CO e 22CO, os valores médios também se destacaram durante o ano, variando entre 0,07 e 0,50 L/s para a 21CO e entre 0,11 e 0,15 L/s para a 22CO (Figura 57 e Apêndice 13). As médias de vazão em 2023, nas nascentes 21CO, 22CO e 24CO, apresentaram-se como as maiores, com 0,30 L/s para a 21CO, 0,13 L/s para a 22CO e 0,26 L/s para a 24CO (Apêndice 13).

Os padrões de fluxo de água nas nascentes são influenciados por uma série de características subterrâneas e superficiais, como a estrutura do subsolo, a topografia, as condições climáticas e os usos da terra (OLIVEIRA et al., 2020). Hidrologicamente, a região é rica em nascentes, contudo, a dinâmica das taxas de fluxos de água depende de muitos dos processos locais que ocorrem na superfície, dentre eles, a capacidade de infiltração no solo. Nos ambientes de nascente, a distribuição da vegetal arbórea é praticamente insuficiente e irregular para contribuir com a capacidade de infiltração nas encostas e o armazenamento do lençol freático.

De modo geral, a contribuição hidrológica para a superfície das nascentes monitoradas foi maior no ano de 2023, na ordem de 0,11 L/s, em detrimento a 2022, que foi de 0,06 L/s. Comparando-se com as médias de precipitação pluvial anual, nota-se médias de 117,75 mm/anual, em 2023 e 197,6 mm/anual, em 2022 (Figura 57). A hipótese é que chuvas mais bem distribuídas permitem uma maior absorção pela superfície solo, facilitando a recarga dos aquíferos e, conseqüentemente, impactando as nascentes. O ano de 2022 foi marcado por chuvas intensas na região. Esses eventos que ocorrem ocasionalmente são responsáveis pela enxurrada e baixa infiltração de água pelo solo.

Com relação as respostas da precipitação pluvial sobre o comportamento da vazão das nascentes em Correntes, não se constatou tendências de aumento de fluxo nos meses que houve aumento dos índices pluviométricos. Como todas as nascentes monitoradas apresentam sazonalidade perene, propõem-se que outros fatores de ordem subterrânea são preponderantes. Maya et al. (2024) encontrou fraca relação entre precipitação de monções e vazão das nascentes, por outro lado, observou valores de descargas significativa no período pós-monções, embora este padrão está diretamente relacionado ao uso e cobertura da terra.

Figura 57- Vazão em Litros por dia (L/s) das nascentes monitoradas em Correntes, de janeiro de 2022 a dezembro de 2023.



Fonte: A autora (2022-2023), com base em dados de campo.

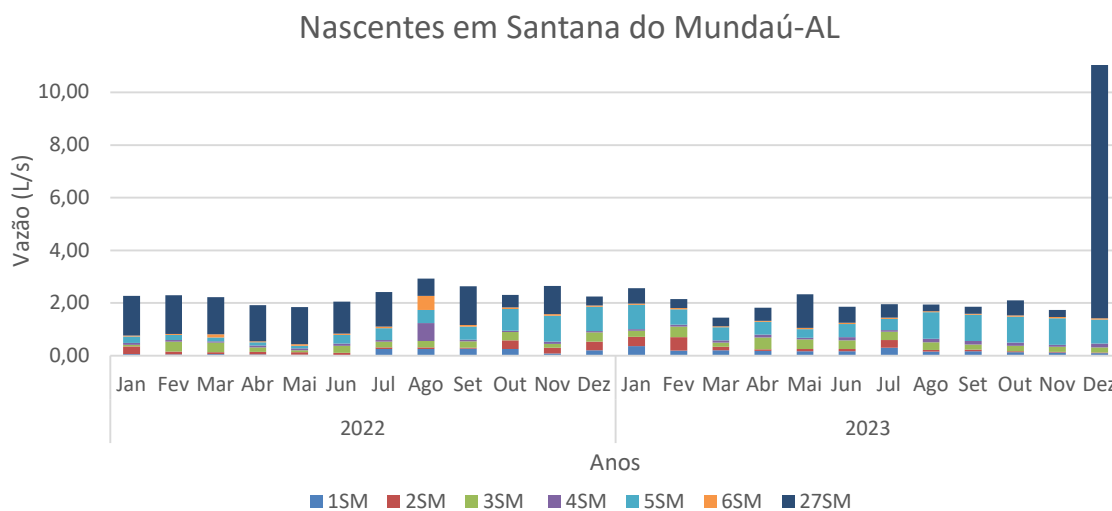
Ao longo do período de avaliação, os acumulados de vazão apresentaram grande variabilidade (Figura 58 e Tabela 7). As médias de vazão estimadas registraram valores próximos nos anos avaliados. Em 2023 foram de 0,40 L/s e 2022, foi de 0,33 L/s (Tabela 6 e Apêndice 13).

Os valores médios de vazão nos dois anos avaliação, foram superiores nas nascentes de Santana do Mundaú (0,36 L/s), em relação as nascentes monitoradas em Correntes (0,08 L/s) (Figura 58 e Apêndice 13). Dentre as sete nascentes monitoradas, a nascente 27SM deteve a maior média de vazão ao longo do ano, com 1,22 L/s, seguida da nascente 5SM, com 0,58 L/s e pela nascente 3SM, com 0,26 L/s (Figura 58 e Apêndice 13).

Nesta localidade, a vegetação demonstra ser um fator predominante no comportamento hidrológico da vazão. Os fragmentos de vegetação arbórea são preservados nos topos dos morros e no perfil de encosta, criando condições favoráveis para o processo de infiltração e armazenamento de água subterrânea. Apesar da relação entre vegetação com o processo hidrológico, Pesciotti et al. (2010) destacam a complexidade do sistema ambiental de nascente, citando outras relações interdependentes com a paisagem, como a permeabilidade e o tipo de solo, a presença de afloramentos rochosos, profundidade das raízes das plantas e a cobertura vegetal. Kampf e Mirus (2013) especificam a complexidade e perspectiva multiescalar dos mecanismos que envolvem os processos superficiais e subsuperficiais que dominam o comportamento hidrológico, dentre ele: padrões sazonais da precipitação, vegetação, dinâmica dos fluxos transitórios no relevo, estrutura subterrânea e o contexto geomorfológico.

Quanto as respostas da vazão das nascentes, os valores não apresentaram uma relação direta com a curva de precipitação pluvial, especialmente durante o período de intensas chuvas da região. Apesar da preservação da vegetação arbórea em alguns ambientes, as áreas cultivo ainda são predominantes, sendo este o principal fator que contribuem para descaracterização da estrutura e comportamento das nascentes.

Figura 58- Vazão em Litros por dia (L/s) das nascentes monitoradas em Santana do Mundaú, de janeiro de 2022 a dezembro de 2023.



Fonte: A autora (2022-2023), com base em dados de campo.

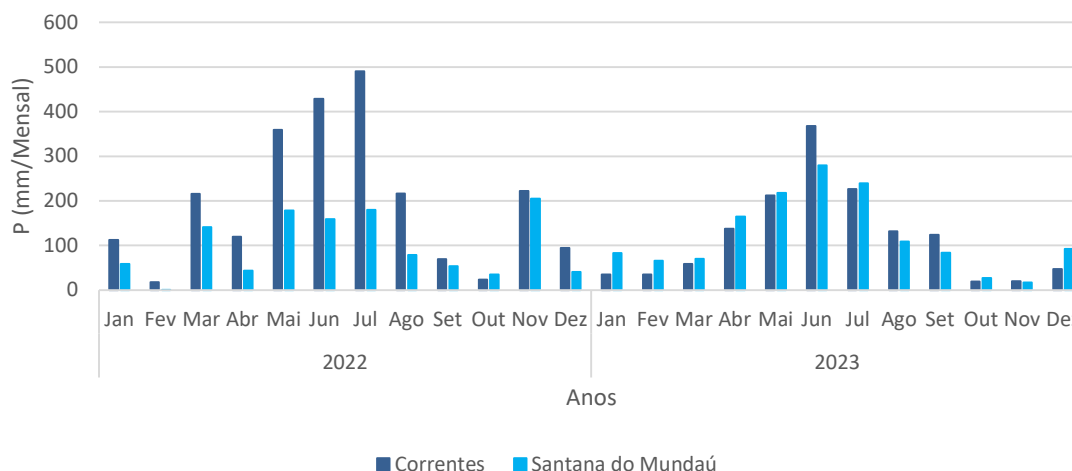
Os índices pluviométricos variaram entre 18,0 e 490,50 mm em Correntes e entre 0,20 e 279,80 mm em Santana do Mundaú durante os anos de 2022 e 2023 (Figura 59 e Apêndice 14). Em Correntes, as maiores intensidades de chuva, superiores a 200 mm/mês, ocorreram nos

meses de março, maio, junho julho, agosto e novembro de 2022 e maio, junho e julho de 2023 (Figura 59). Em Santana do Mundaú, os valores superiores a 100 mm/mês foram registrados nos mesmos meses mencionados anteriormente (Figura 59).

As respostas da precipitação e o escoamento da água para o solo estão diretamente relacionados às características e tipos de solo, sendo que alguns solos apresentam maior capacidade de retenção de água, o que resulta em uma drenagem mais eficiente (OLIVEIRA et al., 2020).

Na bacia do Mundaú, as variabilidades pluviométricas, tanto interanual quanto interdecenais, são significativas. Há grandes diferenças nos índices de precipitação entre a porção setentrional (PE) e meridional (AL), relacionadas as diferenças geográficas como vegetação e relevo (SILVA, 2020). Essas diferenças refletem diretamente da precipitação, principal fonte de recarga das águas subterrâneas (LUO et al., 2020). Altos índices pluviométricos em áreas de recarga de nascente, a depender das condições locais, geram maior potencial para o escoamento superficial (OLIVEIRA et al., 2020).

Figura 59- Índices pluviométricos do município de Correntes e Santana do Mundaú, de janeiro a junho de 2022.

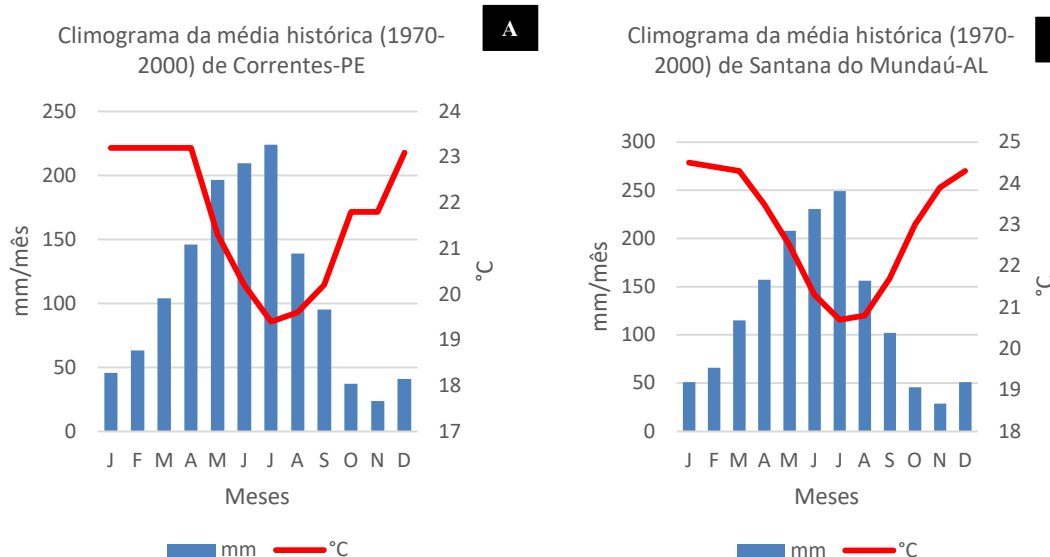


Elaboração: A autora (2024), com base nos dados ANA e IPA (2022-2023).

Os climogramas demonstram as médias históricas de precipitação pluvial (mm) e temperatura do ar (°C) no período de 1970 a 2000, para os municípios avaliados de Correntes e Santana do Mundaú (Figura 60). Os dois ambientes são geograficamente próximos, portanto, os valores de precipitação pluvial chegam a máximos entre 200 e 250 mm/mensal (Figura 60), enquanto as médias de temperatura oscilam entre 19,5 e 23 °C, em Correntes e 20,5 e 24,5 °C,

em Santana do Mundaú (Figura 60). Os períodos chuvosos, acima de 100 mm/mensal, em ambos municípios, ocorrem de março a agosto (Figura 60).

Figura 60- Climograma com médias históricas (1970-2000) de precipitação pluvial e temperatura °C, dos municípios de Correntes (A) e Santana do Mundaú (B).

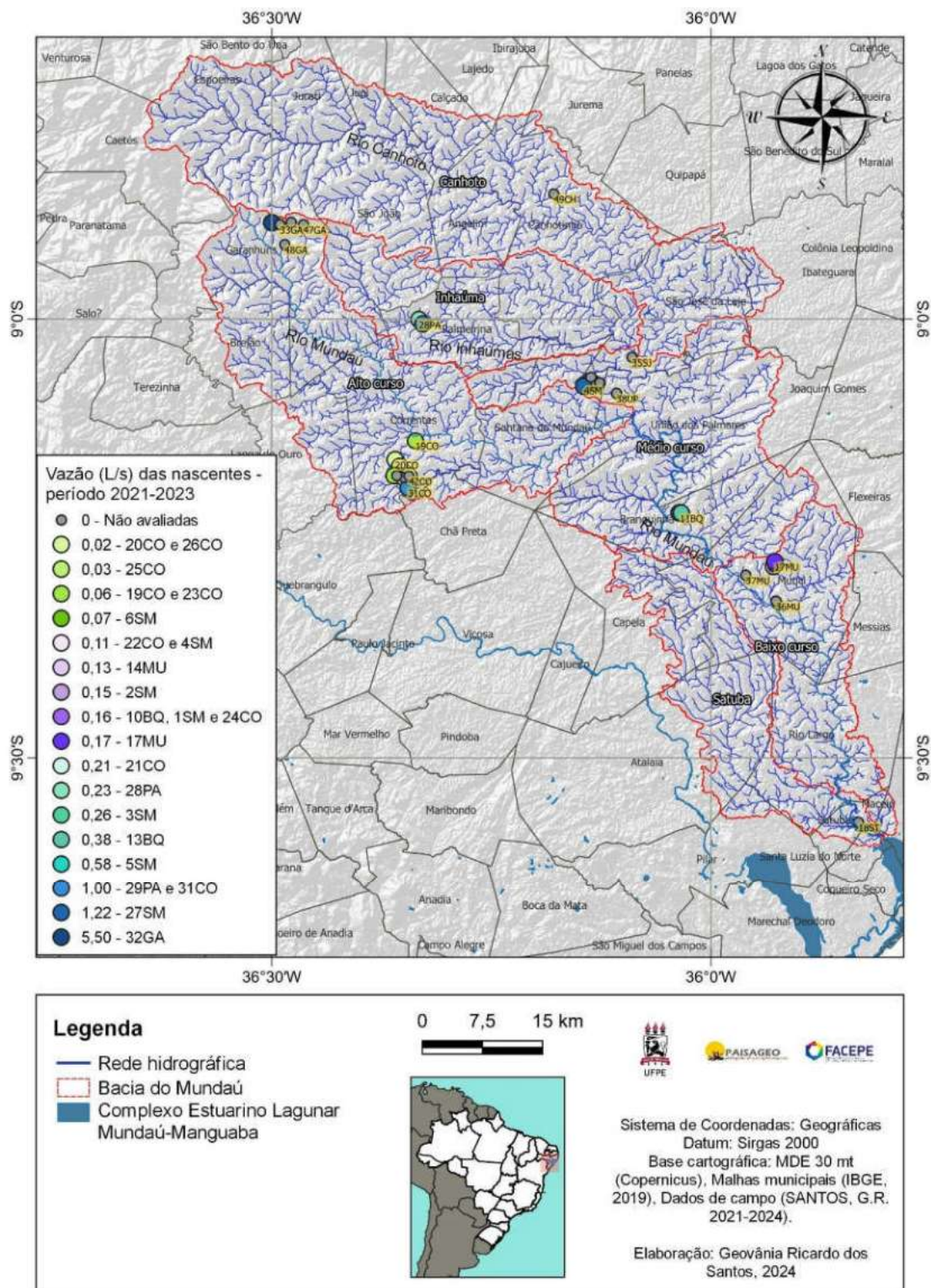


Fonte: A autora (2022-2023), com base em dados do World Clim.

Para fins de conhecimento, foram realizadas medições esporádicas em algumas nascentes, embora não tenha sido possível realizar um monitoramento contínuo a longo prazo (Figura 61). Exceto pelas nascentes avaliadas em Correntes e Santana do Mundaú, apresentadas na Figura 61, as demais tiveram apenas uma medição de vazão. Das 23 nascentes que apresentam os valores médios de vazão (Figura 61) os registros variaram de 0,02 a 5,50 L/s (Figura 61).

Das nascentes avaliadas, os maiores fluxos hidrológicos ocorreram nas localizadas nas sub-bacias do Alto curso (5,50 L/s – nascente 32GA e 1,00 L/s – nascente 31CO), Médio curso (1,00 L/s – nascente 27SM) e Inhaúmas (1,00 L/s – nascente 29PA) (Figura 61). Devido ao fluxo intenso de água nestas nascentes, as medições exigiram o uso de recipientes com capacidade mínima de 11L. Em relação as demais nascentes citadas anteriormente, as nascentes com menores registros de vazão ocorreram no Alto curso, município de Correntes e Médio curso, em Santana do Mundaú, valores na ordem de 0,02 a 0,07 L/s (Figura 61).

Figura 61- Média de vazão (L/s) ocasional em nascentes, do Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.



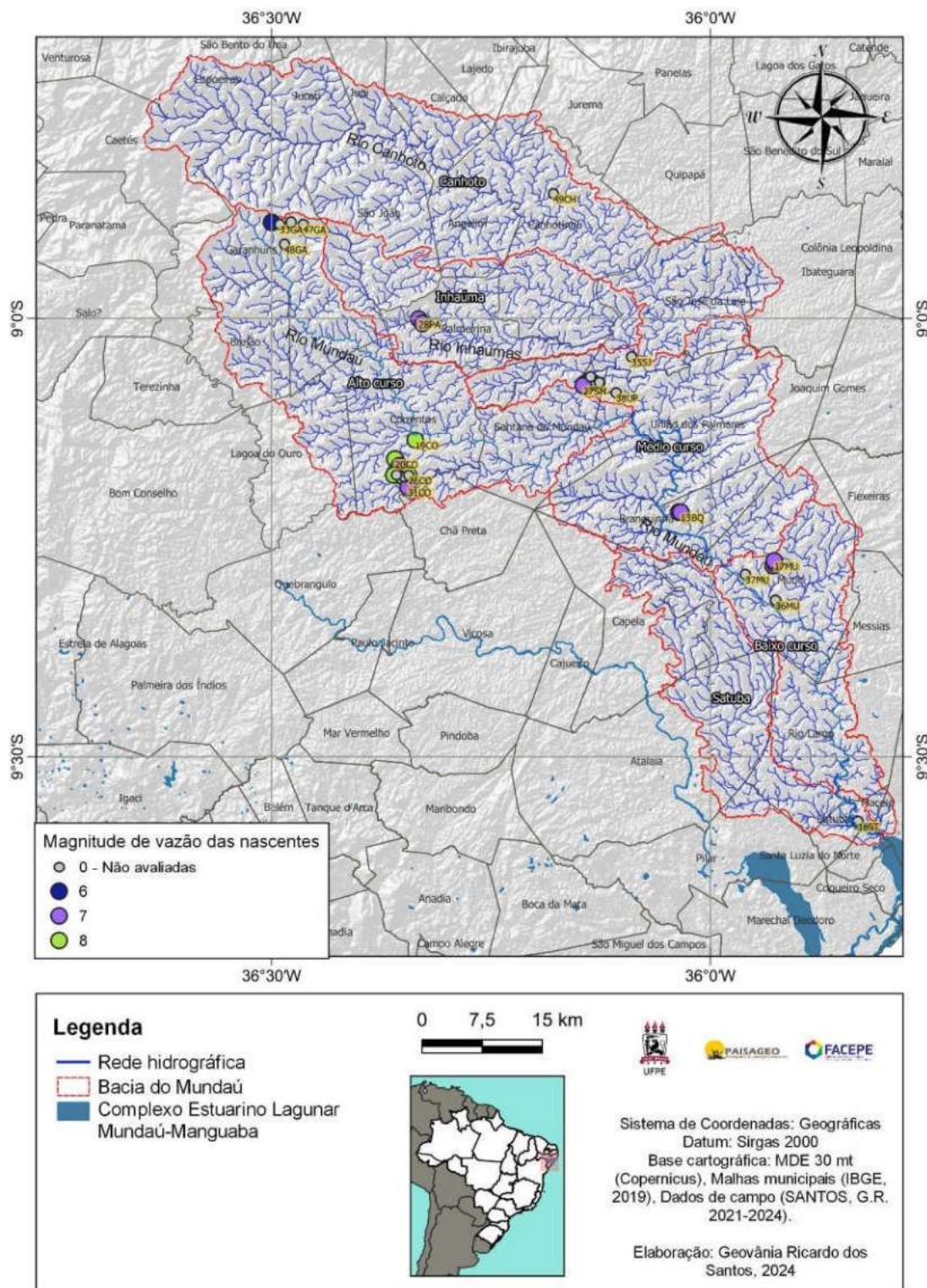
Fonte: A autora (2024). Legenda: Avaliações em Garanhuns (fevereiro de 2022), Branquinha e Murici (outubro de 2021), Palmeirina (janeiro de 2022), Correntes e Santana do Mundaú (Janeiro de 2022 a Dezembro de 2023).

A magnitude é a intensidade de descarga de água da nascente, função está relacionada ao aquífero, variando de nascentes de baixas descargas de água, com características de intermitência e sazonal e nascentes de aquíferos profundos com descargas altamente constante (STEVENS et al., 2021).

Ao enquadrar as médias de vazão com os valores referenciais de magnitude proposto por Meinzer (Tabela 4), a magnitude de vazão das nascentes analisadas varia entre as categorias 6, 7, 8 (Figura 62). A magnitude 6 está classificada em registros de vazão entre 4 e 380 L/s, a magnitude 7 entre valores de 0,6 a 4 L/s e a magnitude 8 corresponde a vazão menor que 0,6 L/s (Tabela 4).

Das nascentes estimadas no Alto curso, ocorrem magnitudes na ordem de 6, 7 e 8 (Figura 62), enquanto as nascentes localizadas nas sub-bacias do Inhaúmas, Médio e Baixo curso se enquadram na magnitude 7 (Figura 62). Independente da magnitude de vazão, todas as nascentes são importantes na contribuição da rede hidrográfica. Além do mais, mesmo as nascentes de pequeno fluxo de exfiltração, segundo relatos de moradores, mantêm um fluxo contínuo de água ao longo do ano.

Figura 62- Magnitude de vazão em L/s em nascentes, do Alto, Médio e Baixo curso, Inhaúmas, Canhoto e Satuba.



Fonte: A autora (2024). Legenda: 6 – 4 a 38 L/s; 7 – 0,6 a 4; 8 - <0,6.

5.8.1 Estatística descritiva do monitoramento hidrológico das nascentes para os períodos avaliativos

A partir da série de vazão das nascentes monitoradas, foram observados o comportamento dos dados por meio da estatística descritiva, para os anos de 2022 e 2023 e períodos de estiagem e chuvoso da região (Tabela 7). Observando-se os valores máximos e mínimos, as nascentes monitoradas em Santana do Mundaú detiveram as maiores máximas, entre 0,36 e 10,08 L/s (Tabela 7), ao passo que, os valores mínimos sucederam-se nas nascentes de Correntes, na ordem de 0,00003 a 0,06 L/s (Tabela 7). As maiores médias corresponderam as nascentes mapeadas em Santana do Mundaú 27SM, 5SM, 3SM e em Correntes, 21CO (Tabela 7). As maiores dispersões dos dados, representados pelo desvio padrão, ocorreram na nascente 27SM, 5SM e 24CO (Tabela 7).

Quanto as médias de vazão anuais em 2022, os maiores registros foram para as nascentes monitoradas em Santana do Mundaú (Tabela 7). À medida que, em 2023 as maiores médias ocorreram nas nascentes 27SM, 5SM, 21CO, 3SM e 24CO (Tabela 7).

As médias de cada período (estiagem e chuvoso) foram mais altas em Santana do Mundaú (Tabela 7). Em comparação entre os anos, as nascentes 21CO e 24CO, em Correntes, apresentaram tendência a maiores médias de vazão em 2023 (Tabela 7).

Tabela 7– Estatística descritiva para os valores de vazão (L/s) das nascentes monitoradas em 2022 e 2023, períodos de estiagem e chuvoso.

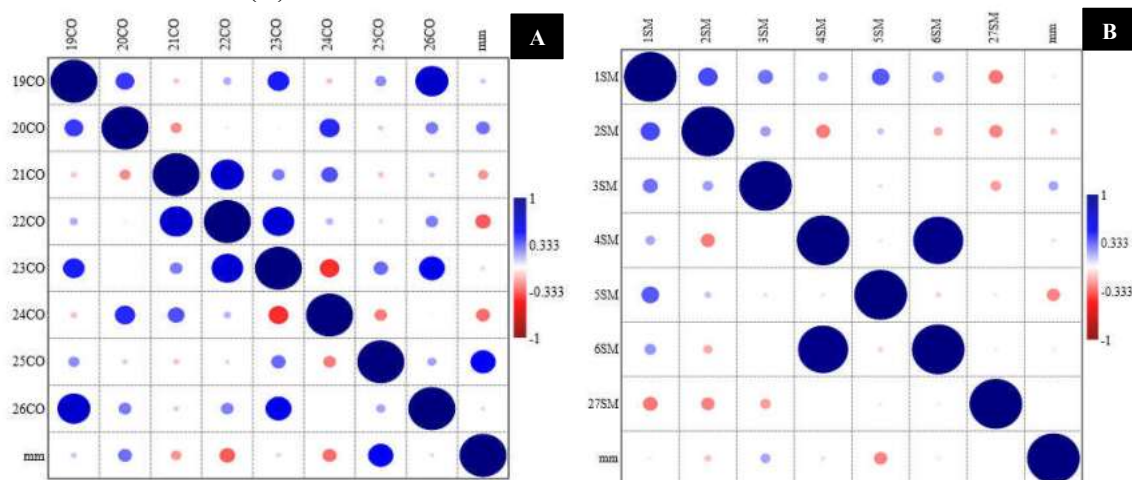
Sub-bacias	Nascentes	2022 + 2023						Médias - 2022			Médias - 2023		
		Número de medições	Máximo	Mínimo	Média	Mediana	Desvio Padrão	Anual	Estiagem*	Chuvoso**	Anual	Estiagem*	Chuvoso**
Alto curso	19CO	24	0,14	0,03	0,06	0,05	0,032	0,07	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05
	20CO	24	0,05	0,01	0,02	0,02	0,008	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	21CO	23	0,50	0,01	0,21	0,22	0,132	0,10	0,12	0,07	0,30	0,26	0,37
	22CO	24	0,15	0,06	0,11	0,12	0,025	0,09	0,11	0,08	0,13	0,13	0,13
	23CO	24	0,09	0,01	0,06	0,06	0,025	0,05	0,06	0,04	0,07	0,07	0,06
	24CO	24	0,99	0,02	0,16	0,05	0,299	0,07	0,05	0,09	0,26	0,29	0,22
	25CO	24	0,05	0,00003	0,03	0,02	0,012	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02
	26CO	24	0,04	0,01	0,02	0,02	0,006	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Médio curso	1SM	24	0,36	0,03	0,16	0,17	0,090	0,13	0,16	0,08	0,18	0,17	0,20
	2SM	24	0,50	0,03	0,15	0,08	0,129	0,15	0,20	0,08	0,13	0,16	0,13
	3SM	24	0,44	0,06	0,26	0,24	0,097	0,23	0,24	0,22	0,28	0,24	0,32
	4SM	24	0,67	0,05	0,11	0,07	0,121	0,12	0,15	0,07	0,10	0,11	0,09
	5SM	24	1,00	0,10	0,58	0,50	0,315	0,12	0,60	0,23	0,72	0,92	0,44
	6SM	24	0,54	0,03	0,07	0,05	0,100	0,12	0,12	0,07	0,05	0,05	0,04
	27SM	24	10,08	0,26	1,22	0,63	1,905	0,12	1,00	1,34	1,30	1,77	0,64

Fonte: A autora, por meio de coletas de campo (jan 2022 a dez de 2023). Legenda: médias da estiagem* (jan, fev, ago, set, out, nov e dez), médias do chuvoso** (mar, abr, maio, jun e jul), de acordo com as médias históricas.

5.8.2 Matriz de correlação entre a vazão das nascentes

A matriz de coeficiente de correlação revelou as relações entre a vazão (L/s) das nascentes avaliadas em Correntes (Figura 63A) e Santana do Mundaú (Figura 63B) e precipitação pluvial (mm) nos ambientes avaliados. Observou-se um maior número de correlações positivas (1) e negativas (-1) nas vazões das nascentes de Correntes (Figura 63A). As correlações positivas mais fortes ocorreram entre as nascentes 19CO e 26CO, 21CO e 22CO, 22CO e 23CO, 26CO e 19CO (Figura 53A) e 4SM e 6SM (Figura 63B). Os valores positivos indicam que, à medida que a precipitação pluvial aumenta, a vazão tende a crescer em ambas nascentes, enquanto que os valores negativos indicam que, quando a vazão de uma nascente aumenta, a da outra tende a diminuir.

Figura 63- Matriz de correlação da vazão (L/s) das nascentes em Correntes (A) e Santana do Mundaú (B).



Fonte: A autora (2024).

5.9 Qualidade hidroquímica da água em nascentes

5.9.1 Propriedades físico-química da água superficial de nascentes

Foram testadas em quatro amostras de água de nascentes (19CO, 20CO, 1SM e 2SM) os parâmetros físico-químicos. Duas análises em períodos distintos foram realizadas, chuvoso (junho de 2022) estiagem (dezembro de 2022), para entender a variabilidade temporal. Os resultados foram expressos em gráficos e comparados conforme a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA nº 357/2005, criado pela Lei Federal Brasileira nº 6.938/1981. Os parâmetros avaliados: pH, Temperatura, Condutividade elétrica, Sólidos totais dissolvidos, Nitrito, Nitrato, Amônia, Fósforo total, Fosfato, Feofitina A e Clorofila A estão fornecidos nas Figuras 2 a 6. As características químicas são influenciadas tanto por quantidades de precipitação, quanto por variedade geológica e antrópica da região (MAYA et al., 2024).

Quando comparado com as classes de uso do CONAMA nº357/05, a água das nascentes é categorizada, de modo amplo, na seção II para as águas doces. As nascentes presentes em zonas rurais são principalmente utilizadas no abastecimento doméstico, portanto, em termos de qualidade para consumo, é comparada com os valores referenciais da classe 1. Os valores dos parâmetros físico-químicos estimados, de acordo com a classe 1, indicam que após tratamento simplificado, a água está apta a ser consumida.

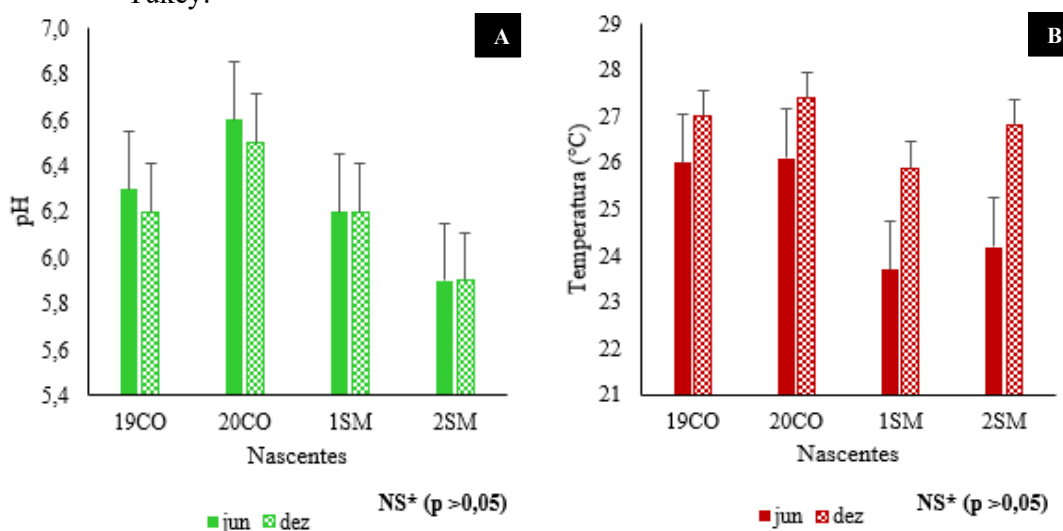
Com relação aos valores de pH avaliados nas nascentes 19CO, 20CO, 1SM e 2SM (Figura 64A), os valores indicam água levemente ácida a neutra, nas faixas entre 5,9 a 6,6. O que significa estar dentro de faixas aceitáveis para uma vida aquática equilibrada. Saturday et al. (2021) mencionam que a faixa de pH, abaixo de pH 6,5 influencia o crescimento lento de algumas espécies aquáticas, enquanto o valor de pH > 6,5 afeta a capacidade de alguns organismos de preservar seu equilíbrio de sal e pode causar uma interrupção na reprodução de plantas aquáticas.

O maior valor de pH ocorreu na nascente 20CO, com valores de 6,6 e 6,5 para os respectivos períodos chuvoso e estiagem (Figura 64A). Ao passo que, a nascente 2SM apontou os menores valores, com 5,9 nos dois períodos avaliados. Segundo a Resolução do CONAMA 357/2005 e padrões de potabilidade do Brasil, o pH considerado aceitável para águas doces de Classe 1 deve estar no intervalo entre 6,0 e 9,0. Brito et al. (2024) registraram valores ligeiramente ácidos de pH, na média de 5,5.

A temperatura de água medida variou entre 23,7 e 27,4 °C (Figura 64B). As temperaturas máximas foram registradas no período de estiagem, com valores de 27 °C (19CO), 27,4 °C (20CO), 25,9 °C (1SM) e 26,8 °C (2SM) (Figura 64B), à medida que, as temperaturas mínimas foi em junho de 2022, na faixa de 26 °C (19CO), 26,1 °C (20CO), 23,7 °C (1SM), 24,2 °C (2SM) (Figura 64B). Resultados estes que corroboram com a variabilidade climática da região.

Quando aplicado teste de Tukey, as médias indicaram que não houve diferença estatística ($p > 0,05$) entre as amostras, com exceção o nitrato (Figura 64C).

Figura 64- Valores de pH (A) e temperatura (B) nas nascentes avaliadas 19CO, 20CO, 1SM e 2SM. *NS indica que não houve diferença estatística pelo teste de Tukey.



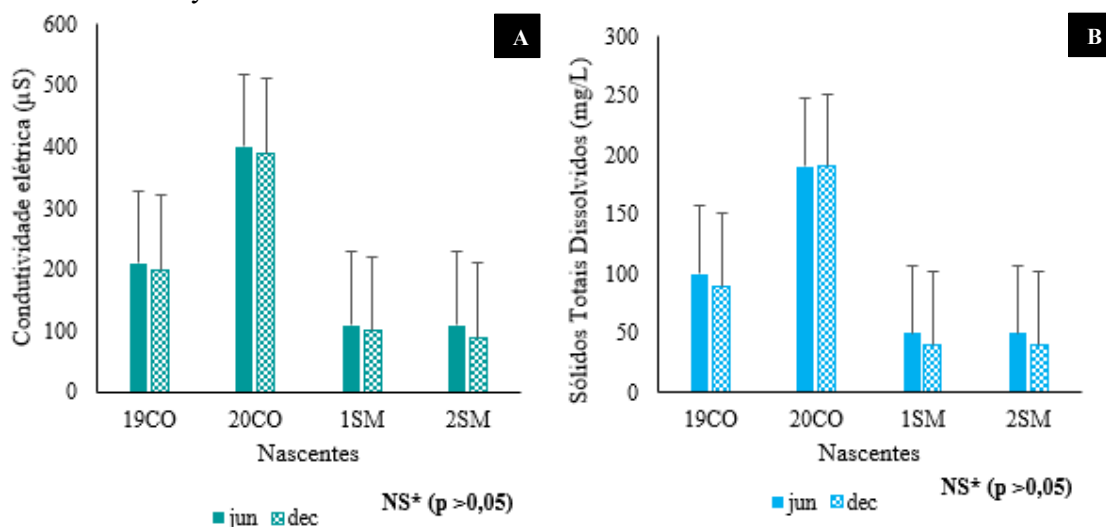
Fonte: A autora (2022), com base em coletas de campo.

Os valores de condutividade elétrica e sólido totais dissolvidos seguem tendência semelhante, já que a relação entre as duas propriedades é proporcional. Os valores refletem baixa mineralização pelas rochas. Neves et al. (2024) apontam que áreas associadas a litologia de rochas de composição silicáticas e aquíferos fraturados interferem na qualidade da água.

Os valores de condutividade elétrica variaram entre 90 e 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 65A). Quanto as observações por período avaliado os valores não apresentaram diferenças. Os registros foram na ordem de 210 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (19CO), 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (20CO), 110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1SM) e 110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (2SM), no período chuvoso e 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (19CO), 390 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (20CO), 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1SM) e 90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (2SM), no período de estiagem (Figura 65A). As barras de desvio padrão demonstram a homogeneidade dos valores. Nos parâmetros da Resolução CONAMA 357/2005, na Portaria nº 2.914/2011 e na Portaria nº 888/2021, não há valores padrões para esse parâmetro.

Como resultado, os sólidos totais dissolvidos nas amostras foram estimados entre 40 e 190 mg/L (Figura 65B). Os valores foram de 100 mg/L (19CO), 190 mg/L (20CO), 50 mg/L (1SM) e 50 mg/L (2SM), no período chuvoso e de 90 mg/L (19CO), 190 mg/L (20CO), 40 mg/L (1SM) e 40 mg/L (2SM), na estiagem (Figura 65B). O alto valor de TDS é o acúmulo de substâncias dissolvidas em líquidos, como sais, minerais, metais e matéria orgânica, de acordo com Fikadu (2022). Consequentemente, a depender dos processos de desnudação química da superfície e decomposição da matéria orgânica presente, será determinante nos valores obtidos nos diferentes componentes físico-químicos da água da nascente. Felipe (2013) pontua a relação entre a água que emerge nas nascentes com a atmosfera, solos e as rochas, portanto, as taxas são sensíveis as perdas geoquímicas dos compartimentos litológicos e morfológicos.

Figura 65- Valores de condutividade elétrica (A) e Sólidos totais dissolvidos (B), 19CO, 20CO, 1SM e 2SM. *NS indica que não houve diferença estatística pelo teste de Tukey.



Fonte: A autora (2022), com base em coletas de campo.

Os registros de feofitina a e clorofila a das nascentes pesquisadas foram detectados em quantidades nos conformes com a resolução CONAMA de classe 1. As máximas de feofitina foram de 3,96 e 1,31 µg/L no período de dezembro, nas nascentes 2SM e 1SM (Figura 66A), indicando que altos teores podem comprometer a qualidade ambiental da água. Concomitantemente os valores de clorofila a, também foram elevados para o mesmo período e nascentes, de 6,33 e 7,48 µg/L (Figura 66B). Fernandes et al. (2023) relatam que a presença de clorofila está associada a profundidade desses poços, já que é uma característica de águas superficiais, mas o alerta principal, se dá pelo indicativo de cianobactérias no meio, produtoras

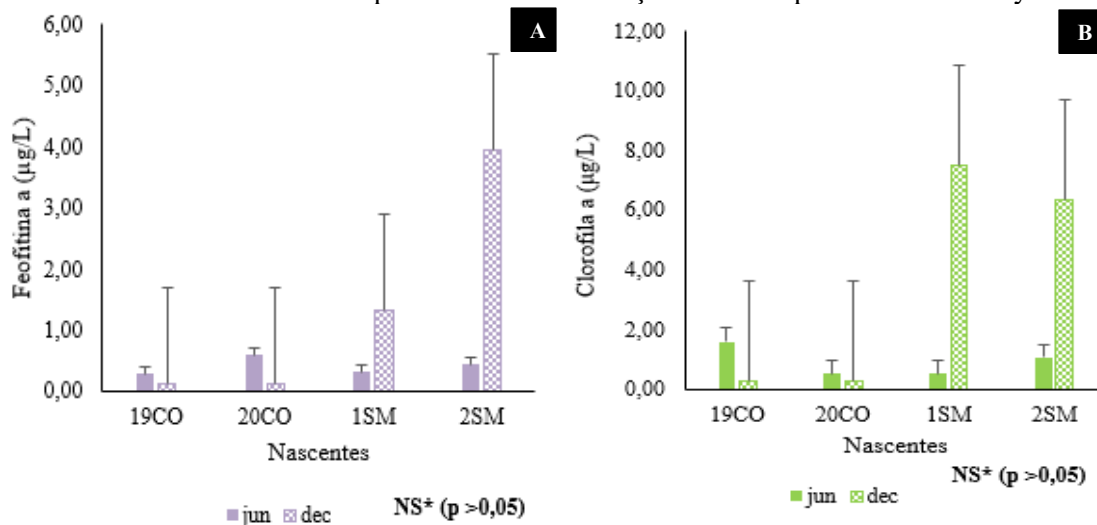
de toxinas que podem gerar sérios problemas de saúde caso haja consumo da água pelo ser humano. A CONAMA 357/2005 estabelece um valor de até 30 µg/L para águas doces de classe 2.

Quando comparado os dois períodos distintos de coleta das amostras de água, nota-se que nas nascentes 19CO e 20CO, os teores de Phe-a e Chl-a foram maiores no período que compreende estação chuvosa e menores da estação de estiagem (Figura 66A e 66B), no tempo que, nas amostras de água das nascentes 1SM e 2SM, as quantidades apresentaram-se reduzidas na estação chuvosa e elevadas na estiagem (Figura 66A e 66B). Isto pode ser justificado pelas diferenças encontradas no cercamento das nascentes, as nascentes em Correntes são fechadas com solo-cimento, enquanto que as de Santana são abertas. Também, as campanhas de campo podem ter influência, já que as coletas precederam após os fortes eventos de precipitação pluvial ocorridas na região, onde o fluxo de vazão encontrava-se baixo e o tempo climático demonstrava-se ensolarado, refletindo na dinâmica hidroquímica da água.

Parâmetros importantes de qualidade da água relacionados à descarga também podem estar sujeitos a limites ecológicos (CARTWRIGHT et al., 2020). A Portaria nº 578 do Ministério da Saúde, exige monitoramento mensal e que a densidade de células de cianobactérias presentes nas nascentes de até 10.000 céls. mL⁻¹. Valores elevados de cianobactéria, o monitoramento deverá ser realizado semanalmente, devido a possível presença de cianotoxinas, trazendo riscos a população local, não sendo viável a sua utilização no abastecimento público, recreação e irrigação, além do risco de bioacumulação em peixes e moluscos bivalves (BRASIL, 2004).

Outras observações também podem ser constatadas, a respeito da sazonalidade de vazão. De uma estação para outra, alterações físicas podem ocorrer; as temperaturas e diferentes respostas na movimentação da água, inibem ou possibilitam a ocorrência das algas. Gomes et al. (2020) apontam que condições mais quentes e secas promovem a produção de clorofila em ambientes de fluxos de água baixos, portanto, a movimentação da água pode ser um fator limitante para as algas, o que poderia justificar as diferenças observadas em estações chuvosa e seca.

Figura 66- Níveis de feofitina a (A) e clorofila a (B), nas nascentes 19CO, 20CO, 1SM e 2SM. *NS indica que não houve diferença estatística pelo teste de Tukey.



Fonte: A autora (2022), com base em coletas de campo.

Os parâmetros nitrito e nitrato revelam variabilidade nas épocas amostrais. Dois valores de nitrito foram obtidos por meio de equipamentos distintos: fotômetro e espectrofotômetro, diferindo-se assim os resultados pelo comprimento de onda. As determinações de ambos os valores se encontraram em conformidade com as estipulações da classe 1, CONAMA, $\leq 1,00$ mg/L.

Com o sensor óptico fotômetro os valores de nitrito ocorreram entre os valores de 0,001 a 0,008 mg/L, nas nascentes 19CO e 20CO e de 0 a 0,002 mg/L, nas nascentes 1SM e 2SM (Figura 67A) e com a utilização do sensor espectrofotômetro os valores foram de 0,70 e 0,496 mg/L, nas nascentes 19CO e 20CO e nas nascentes 1SM e 2SM foram de 0,019 a 0,318 mg/L (Figura 67B).

A presença de nitrogênio nos corpos hídricos advém do lançamento de efluentes ou produtos utilizados na agricultura; e pode estar na forma de nitrogênio orgânico (40%) e amônia (60%). A amonificação (processo de decomposição da matéria orgânica por organismos heterotróficos), é realizada no sedimento, no leito dos ambientes aquáticos.

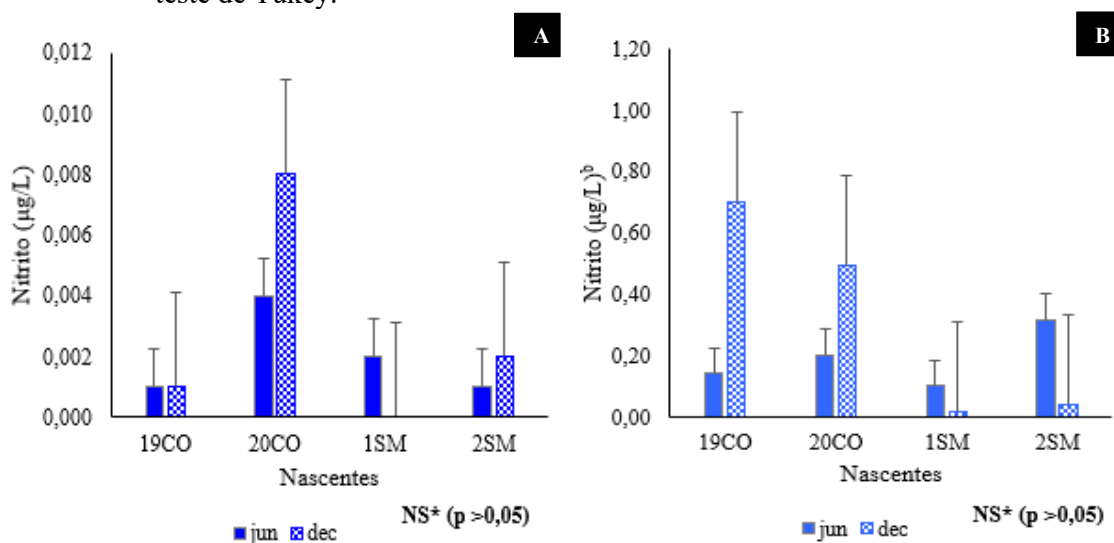
Já no ambiente aquático, este composto pode ser oriundo do processo de degradação biológica de matéria orgânica. Quando a amônia se apresenta em altas concentrações em águas naturais é um indicativo de contaminação por esgoto bruto, efluentes industriais ou afluxo de fertilizantes (SILVA et al., 2021).

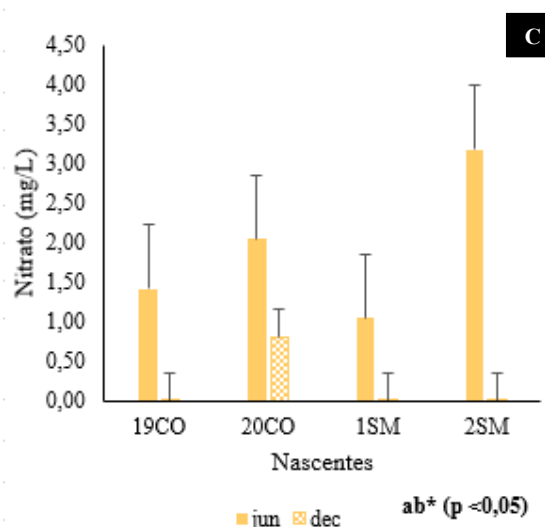
Quanto aos valores de nitrato também ocorreram dentro das normalidades estabelecidas pelas medidas consultivas da legislação brasileira, inferiores a ordem de $\leq 10,00$ mg/L. Nas

nascentes 19CO e 20CO, as mínimas e máximas foram de $< 0,0001$ a $2,04 \text{ mg/L}$ (Figura 67E) e nas nascentes de Santana do Mundaú, foram entre $< 0,0001$ e $3,18 \text{ mg/L}$ (Figura 67F). Avaliando-se as épocas chuvosa e de estiagem, as determinações de nitrato foram maiores em relação ao período de estiagem (Figura 67E e 67F). Kiwanuka et al. (2023) também encontraram diferenças entre os resultados durante a estação seca e chuvosa.

Os altos níveis de nitrito podem acarretar diversos distúrbios de saúde humana, geralmente, em ambientes naturais, as concentrações são baixas, mas aumentam quando há atividades antrópicas, como as atividades agrícolas, aplicação generalizada de fertilizantes e descarga de efluentes domésticos e de fossas sépticas (LIU et al. 2021). Em outras partes do mundo resultados de pesquisa evidenciam a problemática dos níveis de poluição, como Hmaidi et al. (2022) que verificam a deterioração da qualidade da água dos ecossistemas aquáticos no Marrocos em decorrência da agricultura e das descargas domésticas e industriais.

Figura 67- Parâmetros de nitrito avaliado com fotômetro (A), nitrito avaliado com espectrofotômetro (B), nitrato (C), nas nascentes 19CO, 20CO, 1SM e 2SM. *NS indica que não houve diferença estatística, ab indicou diferença estatística pelo teste de Tukey.





Fonte: A autora (2022), com base em coletas de campo. ^b Nitrito realizado pelo método MERCK 1.09713.

As concentrações de amônia revelaram limites permitidos pela resolução CONAMA, enquanto que os teores de fósforo total da pesquisa, estão fora dos valores enquadrado na classe 1: $\leq 0,020$ mg/L. Os valores de fosfato, embora não estipulados pela referida lei, os valores demonstram-se elevados, quando comparados aos limites da Organização Mundial da Saúde (OMS), que estabelecem valores $< 0,10$ mg/L. Os valores mínimos e máximos de amônia apresentaram-se entre 0,02 e 0,16 mg/L, nas nascentes 19CO e 20CO e 0,01 e 0,23 mg/L, nas nascentes 1SM e 2SM (Figura 68A).

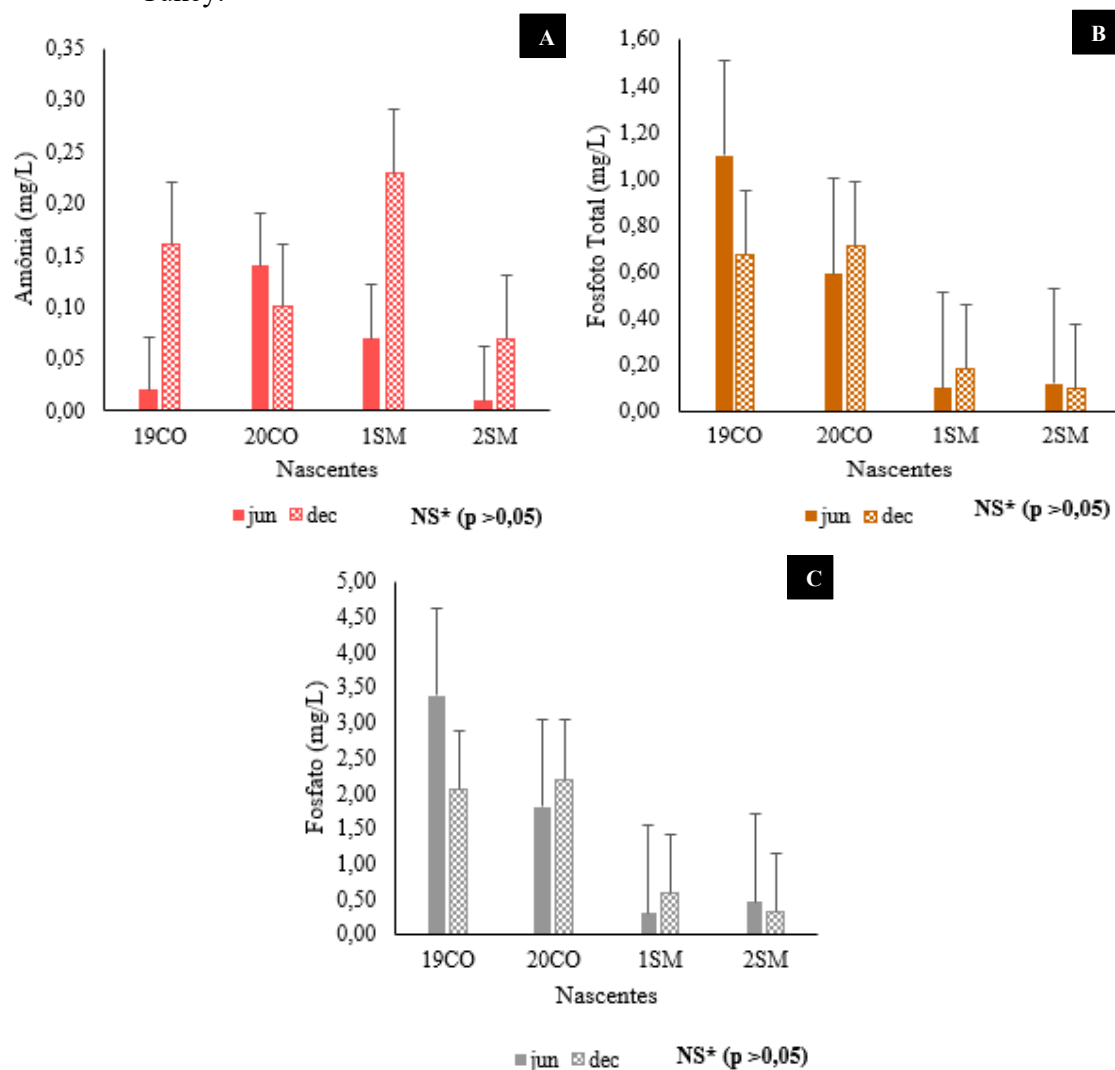
No que diz respeito ao fósforo total, os níveis variaram entre 0,59 e 1,10 mg/L, nas nascentes em Correntes e entre 0,10 e 0,18 mg/L, em Santana do Mundaú (Figura 68B). O excesso de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, causa florações massivas de algas que resultam em eutrofização e seus efeitos associados na vida aquática (SATURDAY et al., 2021).

A presença de fósforo na água pode estar relacionada tanto a processos naturais, como carreamento de solo, dissolução de rochas, decomposição de matéria orgânica como também a processos antropogênicos como uso de pesticidas, fertilizantes, detergentes além do lançamento de esgotos *in natura* lançados diretamente no corpo hídrico.

Os teores de fosfato foram entre 1,81 e 3,38 mg/L, nas nascentes 19CO e 20CO e 0,30 e 0,57 mg/L, nas nascentes 1SM e 2SM (Figura 68C).

Os processos naturais e artificiais de uso do solo afetam a qualidade da água de diferentes maneiras em diferentes escalas de bacia, portanto, estudar as características limnológicas da água é uma iniciativa importante para compreender os impactos advindos do uso da terra (MA et al., 2024).

Figura 68- Determinações de amônia (A), fosforo total (B) e fosfato (C) nas nascentes 19CO, 20CO, 1SM e 2SM. *NS indica que não houve diferença estatística pelo teste de Tukey.



Fonte: A autora (2022), com base em coletas de campo.

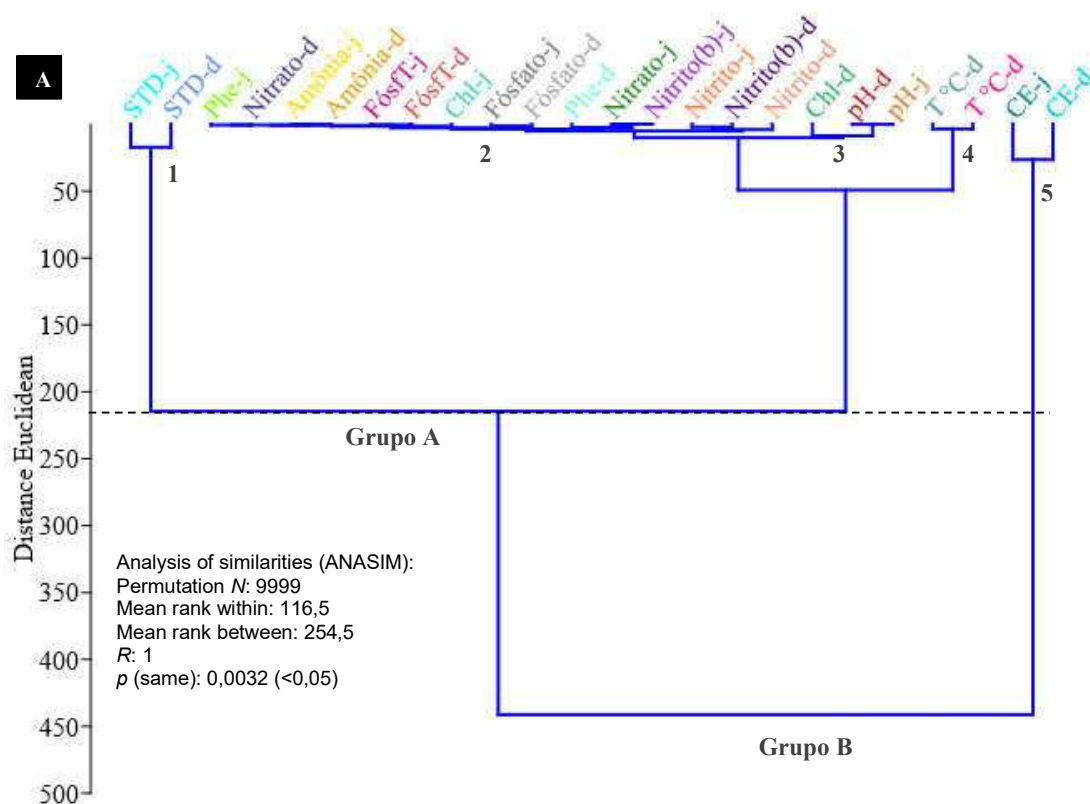
5.9.2 Similaridade entre as variáveis e nascentes

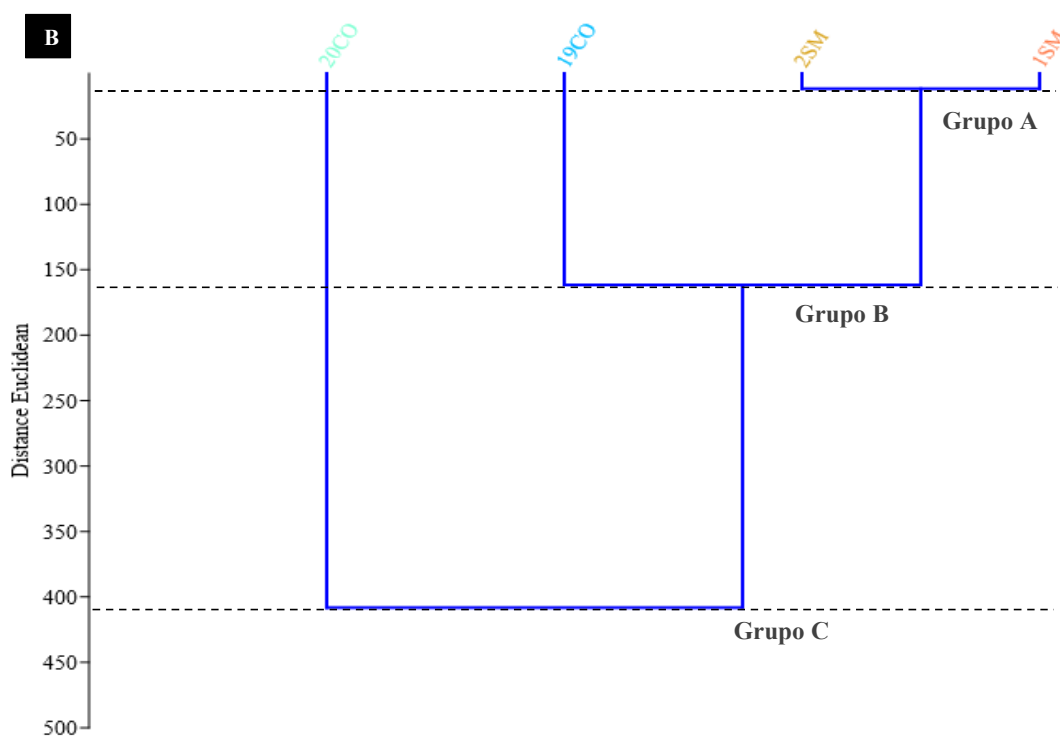
A similaridade entre os parâmetros físico-químicos nos períodos chuvoso e de estiagem (Figura 69A) revelaram a característica de proximidade de relações entre cada parâmetro e nascente comparada (69A e 69B). Na comparação entre os parâmetros, 5 sub-grupos foram admitidos: 1) Sólidos totais dissolvidos (TDS-j e TDS-d); 2) Feofitina (Pheo-j), Nitrato-d, Amônia-j, Amônia-d, Fósforo-j, Fósforo-d, Clorofila (Chlo-j), Fosfato-j, Fosfato-d, Feofitina (Pheo-j), Nitrato-j, Nitrito-j, Nitrito^(b)-d e Nitrito-d; 3) Clorofila-d (Chl-d), pH-d e pH-j; 4) Temperaturas (T °C-j e T °C-d) e 5) Condutividade elétrica (CE-j e CE-d) (Figura 69A). O

valor de p na análise de similaridade foi $<0,05$ indicando que existe diferença estatística significativa para esta análise. Destes 5 subgrupos formados, ocorrem dois grupos distintos, o grupo A, composto do subgrupo 1, 2, 3 e 4 e o B, apenas do 5 (Figura 69A).

Na compreensão dos agrupamentos entre as nascentes (Figura 69B) observa-se uma variação contínua entre as amostras das nascentes, ou seja, não há composição de mudanças bruscas nas amostras, com exceção, as amostras das nascentes 1SM e 2SM (Grupo A) formaram um único grupo (Figura 59B). As demais amostras não demonstram integração (Figura 69B). Esta análise é uma ferramenta importante, capaz de entender a integrações e relações entre os dados de pesquisa (Springer et al. 2008).

Figura 69- Dendograma de similaridade entre os parâmetros físico-químicos no período chuvoso e estiagem (A) e entre as amostras de água das nascentes (B). A letra j refere-se ao mês junho, d indica o mês de dezembro.





Fonte: A autora (2022).

5.9.3 Propriedades microbiológicas das amostras de água

Como as nascentes integram Áreas de Preservação Permanente pela lei 12.651/2012 (BRASIL, 2021a), em consonância com a CONAMA, as nascentes se enquadram na especificidade de águas doces de classe especial, aquelas que tem uso mais exigente. Ainda segundo a resolução, destinados a preservação das comunidades aquáticas e abastecimento humano após desinfecção. Quando observados as especificações dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos, na classe de uso especial, percebe-se uma limitação, uma vez que não há determinações de padrão de qualidade da água, dando margem a precarização das nascentes.

As amostras avaliadas indicaram positivo para coliformes totais, nos dois períodos avaliados, junho de 2022 (período chuvoso) e dezembro de 2022 (período de estiagem) (Tabela 8). A presença de coliformes totais é indicativo da eutrofização pelas algas presentes na água das nascentes. Águas próprias para o consumo humano, como as águas minerais de qualidade excelente, devem apresentar parâmetros que se enquadram em categorias próprias para a ingestão, em concentrações de sais minerais e/ou das características da fonte, a depender do contexto hidrogeológico da região, segundo o Código das Águas Minerais (BRASIL, 2023).

Quanto aos coliformes termotolerantes os resultados indicaram crescimento patógeno em 5 tubos de ensaio $> 8,0$ NMP/100mL, nas amostras das nascentes 1SM e 2SM, em dezembro de 2022 (Tabela 8), apontando contaminação microbiológica. *Escherichia Coli* é uma espécie de bactéria presente no grupo dos coliformes termotolerantes que habitam o intestino grosso de animais de sangue quente, portanto, a detecção de bactérias do grupo termotolerantes aponta a existência de patógenos, organismos causadores de doenças, ou seja, bactérias, protozoários e vírus (KIWANUKA et al., 2023).

Outros documentos regulamentares, como a Portaria nº 888/2021, estabelecem e reforçam a importância do controle e vigilância da qualidade da água para o consumo humano e o padrão de potabilidade, determinando que haja ausência de coliformes totais e coliformes termotolerantes (BRASIL, 2021b), realidade frequentemente inaplicável.

Estas nascentes estão sujeitas a um maior fator de risco à contaminação fecal constante. O comprometimento da qualidade microbiológica se dá pela proximidade com residências, falta de instalação de saneamento, seja de instalação de fossas sépticas ou descarte de águas de uso *in natura*, resíduos orgânicos nas proximidades da nascente e pastoreio de animais. As condições melindrosas das nascentes se devem a falta de preservação desses ambientes, sobretudo interferência humana, na retirada da vegetação natural, disseminação da agricultura, descaracterização das nascentes e contaminação por resíduos sólidos e agrotóxicos. O panorama é ainda mais preocupante no tocante da saúde da população local, uma vez que, as águas das nascentes com indicativo de contaminação são utilizadas para consumo, sem nenhum meio de tratamento.

É importante reforçar que a avaliação da qualidade das águas deve ser realizada de forma integrada, considerando um conjunto de informações de caráter físico, químico e biológico (BRASIL, 2006), além do contexto social, cenário este indispensável a compreensão da dinâmica da paisagem.

Tabela 8- Coliformes totais e Coliformes termotolerantes para as águas superficiais em quatro nascentes, em Correntes e Santana do Mundaú.

Parâmetros	Junho 22 (Período chuvoso)				Dezembro 22 (Período de estiagem)			
	19CO	20CO	1SM	2SM	19CO	20CO	1SM	2SM
Coliformes totais (NMP/100mL)	Positivo							
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	0 ($<0,1$)	0 ($<0,1$)	0 ($<0,1$)	0 ($<0,1$)	0 ($<0,1$)	0 ($<0,1$)	5 ($>8,0$)	5 ($>8,0$)

Fonte: A autora (2022), com base em coletas de campo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As nascentes são sistemas hidroambientais, devido a sua complexidade e das suas relações multiescalares. Há uma diversidade de sistemas-nascentes configurados pelos fatores da paisagem. Considerando a relevância investigativa dos sistemas hidroambientais de nascentes, várias conexões ambientais e sociais podem ser compreendidas, fortalecendo a proteção, conservação e gestão dos recursos hídricos;

O estudo registrou 49 afloramentos naturais de nascentes, distribuídos nas sub-bacias da bacia do Mundaú. Foram computadas 19 nascentes no Alto curso, 3 no Inhaúmas, 1 no Canhoto, 19 no Médio curso, 6 no Baixo curso e 1 no Satuba;

A dinâmica das nascentes está associada as particularidades dos componentes naturais e antrópicos. A investigação das características das nascentes com os elementos da bacia do Mundaú, dentre eles: Arcabouço geológico, Litologia, Geomorfologia, Relevo, Declividade, Solos, Textura dos solos, Vegetação primária e Uso e Cobertura da Terra, permitiu entender a variedade de paisagens a que cada nascente está inter-relacionada diante dos elementos ambientais regionais, portanto, cada nascente necessita de intervenções de recuperação distinta;

A comparação hierárquica dos fatores pelo método AHP possibilitou a atribuição de pesos de importância numa matriz de comparação aos pares. As zonas de recarga foram classificadas em Ruim, Razoável, Moderado e Excelente. As Zonas Moderadas obtiveram maior predominância nas seis sub-bacias do Mundaú. Como resultado, a classe Excelente foi observada nas sub-bacias do Alto, Canhoto e Médio curso. Além disso, houve uma maior incidência de áreas de capacidade Razoável e Ruim no Baixo curso e Satuba;

A partir do mapeamento da zona de recarga de água subterrânea identificou-se que 17 nascentes (55,17%) ocorrem em zonas Excelente, 27 nascentes (34,69%) constam em zona Moderada, 4 nascentes (8,16%) estão em zona Razoável e 1 nascente (2,04%) em zona Ruim;

As nascentes em zona Excelente ocorrem com maior frequência no Médio e Baixo curso, à proporção que, as nascentes em zona Moderada e Razoáveis, detêm maior ocorrência no Alto curso e Inhaúmas e na classe Ruim, ocorre no Satuba;

Os valores de vazão estabilizada de poços (m^3/h) indicam que os maiores rendimentos de recarga subterrânea foram observados nas nascentes mapeadas no Médio curso;

A intensidade de perfurações de poços de água pode ser evidenciada nas sub-bacias do Alto curso, Inhaúmas e Canhoto. Neste sentido, chama-se a atenção para as problemáticas de escassez hídrica enfrentadas em zonas rurais, sobretudo regiões do eixo Semiárido, fato que,

provavelmente, explica haver muitos poços de captação de água. O esgotamento dos aquíferos é uma problemática que merece atenção;

Foram identificados 11 Sistemas de captação, 27 sub-bacias de captação e na configuração do ambiente Hypocrenal (canais de 1ª ordem) e Eucrenal (áreas de transição das nascentes), destacam-se: urbano, pastagem, vegetação herbácea, mosaico de agricultura e fragmento arbóreo, solos expostos e fragmento arbóreo;

Os processos antrópicos são marcantes na desestruturação dos sistemas naturais das nascentes, e essas alterações remontam aos primeiros registros históricos de formação das cidades. Os principais fatores que afetam a qualidade ambiental incluem: alterações na morfologia das nascentes, que podem levar ao esgotamento do fluxo, captações de água inadequadas que obstruem o fluxo da água, desmatamento químico da vegetação e uso de agrotóxicos, resultando na contaminação dos aquíferos, descarte de lixo nas proximidades das nascentes, contaminação das águas da nascente por águas residuais, degradação da vegetação nativa, intensificação da agricultura, fator este capaz de proteger e conservar os ambientes de nascentes, presença de animais pisoteando as áreas ao redor das nascentes, erosão dos solos, supressão pela ocupação urbana;

A intervenção na paisagem fez com que muitas morfologias de exfiltração perdessem sua característica natural. No que diz respeito às características da exfiltração das nascentes, foram identificados oito tipos de unidades geomórficas de nascentes (Fundo de vale, Sopé de encosta, Lajedo rochoso/Talus, Lajedo rochoso Segmento de encosta, Ruptura de relevo, Patamar de encosta e Crista de encosta, cinco tipos de morfologia (Duto, Olho, Afloramento em área do solo, Fratura rochosa e Intervenção), três tipos de aspecto de exfiltração (Múltipla, Difusa e Pontual), com mobilidade Fixa e Móvel, e sazonalidade (Perene, Intermitente e Sazonal);

Considerando as particularidades em microescala, as configurações predominantes de exfiltrações de nascente foram: na Unidade geomórfica, Base de encosta e Fundo de vale; na Morfologia de exfiltração, Fratura rochosa; no Aspecto de exfiltração, Pontual; na Mobilidade, Fixa; e na Sazonalidade, Perene;

O protocolo de Bioavaliação Rápida apontou que aproximadamente 80% dos ambientes das nascentes analisadas apresentam condições de alteração e impacto devido ao uso e cobertura da terra, exigindo práticas de recuperação e de manejo. Das nascentes analisadas, 27,03% estão em condição boa, 51,35% em condição alterada e 21,62% em condição impactada;

O Protocolo de Bioavaliação Rápida é uma ferramenta valiosa de manejo, tanto para população local quanto para os órgãos ambientais, pois não requer altos investimentos. Auxilia na identificação e monitoramento de padrões na configuração da paisagem, bem como na previsão da qualidade ambiental dos corpos hídricos;

As nascentes são os principais meios de acesso à água para consumo das comunidades rurais. O abastecimento de água na condição de boa qualidade nestes espaços é um desafio. Diversas dificuldades são encontradas, desde a falta de infraestrutura e conscientização ambiental, locais topograficamente inacessíveis, a custos onerosos de implantação de sistemas;

O comportamento hidrológico das nascentes monitoradas, conforme esperado, exibiu variações na vazão ao longo dos anos avaliados. Durante o período de avaliação, o monitoramento hidrológico revelou que as nascentes de Santana do Mundaú, apresentam médias de vazão significativas, na ordem de 0,36 L/s. Em contraste, as nascentes de Correntes, detiveram média de 0,08 L/s;

O comportamento hidrológico das nascentes não apresentou respostas diretas com a curva de precipitação pluvial, especialmente durante o período de chuvas intensas da região. Outros elementos, tanto subterrâneos quanto superficiais, são importantes. Isso indica que um conjunto de fatores está convergindo, sobretudo, a predisposição relacionada à geomorfologia, geologia e vegetação;

Dentre as sete nascentes monitoradas em Santana do Mundaú, a nascente 27SM deteve a maior média de vazão ao longo do período avaliativo, com 1,22 L/s, seguida da nascente 5SM, com 0,58 L/s e pela nascente 3SM, com 0,26 L/s, enquanto que, das oito nascentes avaliadas em Correntes, maiores valores médios ocorreram na nascente 21CO (0,21 L/s), 24CO (0,16 L/s) e 22CO (0,11 L/s);

Comparando-se as médias de vazão obtidas nas sub-bacias do Mundaú, os maiores fluxos ocorreram no Alto curso do Mundaú, com magnitudes na ordem de 6, segundo classificações de intensidade dos fluxos de descarga de água;

Os parâmetros físico-químicos avaliados nas quatro nascentes (pH, temperatura, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, feofitina a, clorofila a, nitrito, nitrato e amônia) estão dentro dos limites de comparação com a classe 1, estabelecida pelo órgão consultivo;

Os teores de fósforo total e fosfato estão acima dos valores permitidos para consumo, em ambos os períodos, chuvoso e de estiagem;

A presença de coliformes termotolerantes nas amostras indicam bactérias potencialmente patogênicas pela má qualidade higiênica encontrada nas nascentes, como

descarte de resíduos sólidos orgânicos e não orgânicos, dejetos humanos e de animais, bem como águas de uso doméstico;

A qualidade da água das nascentes, não se pode ser assegurada em condições naturais, diante a intervenção antrópica, as características físico-química e microbiológicas da água são parâmetros sensíveis e podem revelar contaminações, portanto, devem ser monitorados periodicamente;

As nascentes são os principais meios de acesso a água pelas comunidades rurais, que por sua vez, são os principais responsáveis pela preservação das nascentes. Privar a comunidade do acesso à água é violar um direito humano de ordem primordial, em contraposição, a preservação dos sistemas de nascentes é fundamental na garantia da manutenção dos serviços ecossistêmicos.

7 RECOMENDAÇÕES

É fundamental que as nascentes sejam reconhecidas pela sua importância na bacia hidrográfica, é preciso dialogar com os órgãos públicos, o conceito de nascente e sobretudo quais práticas devem ser empregadas para garantia da conservação, preservação e manejo;

A presença dos órgãos ambientais no monitoramento das nascentes precisa ser mais efetiva, especialmente nos municípios. A atuação do estado e dos municípios pode ser feita de forma estruturada, através da: 1) criação e implementação de um projeto e plano de manejo voltado nas nascentes, com a participação de diversas equipes; 2) um sistema online de registro de nascentes, que deve incluir identificação, mapeamento e catalogação; 3) campanha de conscientização ambiental direcionada à população local, visando promover boas práticas e cuidados com o sistema nascente;

As Unidades de Conservação são espaços protegidos por lei que efetivam a proteção e conservação da biodiversidade e dos recursos ambientais. A criação de UC devem ser mais incentivadas, sobretudo no Alto curso, Inhaúmas e Canhoto, devido à relevância da vegetação nativa na transição entre Caatinga e Floresta Subcaducifólia;

Ações de reposição da vegetação nas áreas de preservação permanente dos sistemas-nascentes devem ser empregadas. É preciso realizar levantamento e estudo do componente florístico e fitossociológico da vegetação nativa da região;

Devem ser implantados projetos de conscientização ambiental e geoturismo como instrumentos para proteção e conservação dos sistemas de nascentes.

REFERÊNCIAS

- ABAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Poços para captação de água**. Disponível em: <<https://www.abas.org/pocos-para-captacao-de-agua/>>. Acesso em 06 nov. 2021.
- AB’SABER, A. N. **Os Domínios de natureza no Brasil**: potencialidades paisagísticas. 4. ed. São Paulo: Ateliê editorial, 2007, 144 p.
- ADHIKARI, S.; KELKAR, V.; KUMAR, R.; HALDEN, R. U. Methods and challenges in the detection of microplastics and nanoplastics: a mini-review. **Polymer Internacional**, New York, v. 71, n. 5, p. 543-551, may, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/pi.6348>
- AHSAN, W. A. et al. Surface water quality assessment of Skardu springs using Water Quality Index. **Environmental Science and Pollution Research**, Switzerland, v. 28, n. 1, p. 20537-20548, apr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11818-5>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, dec. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AMOR, A. H.; ZDON, A.; FRAGA, N. S.; COHEN, B.; MEJIA, M. P.; MAXWELL, R.; PARKER, S. 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, L. F.; CARVALHO-OLIVEIRA, R.; RIBEIRO JÚNIOR, G.; GALVÃO, L. dos S.; ANDO, R. A.; MAUAD, T. 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>
- AMEEN, H. A. Spring water quality assessment using water quality index in villages of Barwari Bala, Duhok, Kurdistan Region, Iraq. **Applied Water Science**, Switzerland, v. 9, n. 176, p. 2-12, nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1080-z>
- ANDRADE, L. N. de; LEITE, M. G. P.; BACELLAR, L. de A. P. Influência geológica em assinaturas químicas das águas e solos do Parque Estadual do Itacolomi, Minas Gerais. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 62, n. 2, p. 147-154, jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672009000200005>
- ANDRADE, M. C. de. **Os rios-do-açúcar do Nordeste oriental**: os rios Coruripe, Jiquiá e São Miguel. Recife: Instituto Joaquim Nabuco de Pesquisas Sociais, 1959. 96 p.

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

AZAMBUJA, R. N.; CORRÊA, A. C. de B. 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>

BARBOSA, A. de S.; AMARAL, L. G. H. do; SANTOS, G. B. dos. Avaliação da infiltração de água nos solos da Bacia do Rio de Ondas, Barreiras-BA. **Revista de Geografia**, Juiz de Fora, v. especial, n. 1, p. 42-50, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.34019/2236-837X.2022.v1.37031>

BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. W. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23 ed. Washington D. C.: American Public Health Association, 2017. 1545 p.

BARRETO, L. V.; FRAGA, M. de S.; BARROS, F. M.; ROCHA, F. A.; AMORIM, J. da S.; CARVALHO, S. R. de; BONOMO, P.; SILVA, D. P. da. Estado trófico em uma seção do rio Catolé Grande sob diferentes níveis de vazão. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 9, n. 2, p. 250-260, abr/jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1231>

BARBOUR, M. T.; GERRITSEN, J.; SNYDER, B. D.; STRIBLING, J. 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>

BAPTISTA, J. G. **Geografia física do Piauí**. 2 ed. Teresina: Comepi, 1981. 366 p.

BERTHAND, G. 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>

BERTHAND, G. BERTHAND, G. Paysagge et géographie physique globale: esquisse méthodologique. **Revue géographique des Pyrénées et sud-ouest**. v. 39, fasc. 3, 1968. P. 249-272.

BEZERRA, F. H. R.; NASCIMENTO, A. F. do; FERREIRA, J. M.; NOGUEIRA, F. C.; FUCK, R. A.; NEVES, B. B. B.; SOUSA, M. O. L. Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America – Integration of seismological and paleoseismological data. **Tectonophysics**, France, v. 510, n. 3-4, p. 269-290, mar/abr. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.08.005>

BRASIL. **Decreto n. 7.841, de 8 de agosto de 1945.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, Ano CXLIX, n. 102, 28 maio 2012. Seção 1, p.1. Disponível em <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/1937-1946/Del7841.htm>. Acesso em dezembro de 2023.

BRASIL. **Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, Ano CXLIX, n. 102, 28 maio 2012. Seção 1, p.1. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em 20 de Outubro de 2021 (a).

BRASIL. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021.** Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: Acesso em: Dezembro, 2021 (b).

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano.** 1. ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 212 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 518, de 25 de março de 2004-** estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, n. 59, p. 266-270, 2004.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de Junho de 2000.** Instituição do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm. Acesso em Outubro de 2024.

BRESCIANI, E.; GODERNIAUX, P.; BATELAAN, O. Hydrogeological controls of water table-land surface interactions. **Geophysical research letters**, Malden, v. 43, n. 18, p. 9653-9661, sep. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016GL070618>

BRITO, L. M. de; SANTOS, E. C. L. dos; SILVA, A. L. dos S.; LÓPEZ, A. M. Q.; SILVA, A. C. C. da; MELO, J. G. de. Qualidade físico-química e microbiológica da água de nascentes da Bacia Hidrográfica do Rio Coruripe, Alagoas-Brasil. **Interfaces Científicas - Saúde e Ambiente**, Aracaju, v. 9, n. 3, p. 54-65, mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.17564/2316-3798.2024v9n3>

BRINSON, M.; RHEINHARDT, R.; FERRELL, R.; DUNCAN, B.; HOBBS, L.; MCNAUGHT, D.; PHELAN, J.; RADER, D. A rapid watershed assessment approach for assessing the condition of small, coastal watersheds: protocol and case study. **Ocean & Coastal Management**, Shenzhen, v. 71, n. 1, p. 238-255, jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.08.006>

BRYAN, K. Classification of Spring. **The journal of Geology**. Nebraska, v. 27, n. 7, p. 522-561, oct/nov. 1919.

CANGREJO, V. I.; RONDÓN, J. C. D. Respuesta de la clorofila y el metabolismo de un Arroyo Andino al aumento de temperatura en un experimento *ex situ* Experiment. **Acta Biológica Colombiana**, Bogotá, v. 22, n. 2, p. 191-198, may/ago. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v22n2.60741>

CAVALCANTI, H. F. **Avaliação ambiental de nascentes do Rio Mundaú, Garanhuns – PE**. 2013, 97 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Departamento de Geografia – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2013.

CALHEIROS, R. O.; TABAI, F. C. V.; BOSQUILIA, S. V.; CALAMARI, M. **Preservação e recuperação das nascentes**. 1. ed. São Paulo: Secretaria Estadual do Meio Ambiente, 2009.

CALLISTO, M.; FERREIRA, W. R.; MORENO P.; GOULART M.; 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>

CAMPOS, J. C.; NUCCI, J. C.; OLIVEIRA, C. de. Protocolo de avaliação rápida de rios como referencial prático para uma educação ecossistêmica e transdisciplinar. **Ra'ega**, Curitiba, v. 50, n. 1, p. 207-230, jan/abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v50i0.67289>

CANTONATI, M.; STEVENS, L. E.; SEGADELLI, S.; SPRINGER, A. E.; GOLDSCHIEDER, N.; CELICO, F.; FILIPPINI, M.; OGATA, K.; GARGINI, A. 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, J. M.; DWIRE, K. A.; FREED, Z.; HAMMER, S. J.; MCLAUGHLIN, B.; MISZTAL, L. W.; SCHENK, E. R.; SPENCE, J. R.; SPRINGER, A. E.; STEVENS, L. 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, J. M.; JOHNSON, H. 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>

CELESTINO, E. F.; CELESTINO, L. F.; SILVA, J. F. M. da; KASHIWAQUI, E. A. L.; MAKRAKIS, M. C.; MAKRAKIS, S. Environmental assessment in neotropical watersheds: a multi-factorial approach. **Sustainability**, Switzerland, v. 11, n. 2, p. 2-17, jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020490>

CETESB- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Determinação de Clorofila a e Feofitina a: método espectrofotométrico**. 1. ed. São Paulo: CETESB, 2014, p. 14.

CENTENO, J. A. S.; KISHI, R. T. **Os recursos hídricos do Estado de Alagoas**. 1 ed. Maceió: Núcleo Estadual de Meteorologia e recursos hídricos, 1994. p. 40.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Diário Oficial da União, nº 53, 18 de março de 2005, p. 58-63. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747> . Acesso em: 2023.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 303, de 20 de março de 2002. **Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de áreas de preservação permanente**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2002.

COLIN, E. C. **Pesquisa operacional**: 170 aplicações em estratégias, finanças, logística, produção, marketing e vendas. 2 ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2011. 528 p.

CORRÊA, A. C. B.; TAVARES, B. A. C.; MONTEIRO, K. A.; CAVALCANTI, L. C. S.; LIRA, D. R. 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>

CORSINI, A.; CERVI, F.; RONCHETTI, F. Weight of evidence and artificial neural networks for potencial groundwater spring mapping: na application to the Mt. Modino area (Northern Apennines, Italy). **Geomorphology**, Selbustrand, v. 111, n. 1-2. p. 79-87, oct. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.03.01>

COTEC – CONSULTORIA TÉCNICA LTDA. **Plano diretor de recursos hídricos da Bacia do Rio Mundaú**. Disponível em: [https://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/docs/planos_diretores/PDRH_PE-BaciadoRioMundau\(Cx1.13_1.43_1.44\)/PDRH_BaciaRioMundau-TomoIII-ModelodeGerenciamentoIntegrado\(fevereiro%201999\).pdf](https://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/docs/planos_diretores/PDRH_PE-BaciadoRioMundau(Cx1.13_1.43_1.44)/PDRH_BaciaRioMundau-TomoIII-ModelodeGerenciamentoIntegrado(fevereiro%201999).pdf). Acesso em: junho de 2022.

CHAUDHARY, B. S.; KUMAR, S. Identification of Groundwater Potential Zones using Remote Sensing and GIS of K-J Watershed, India. **Journal Geological Society of India**, Bengaluru, v. 91, n. 6, p.717-721, jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12594-018-0929-3>

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 101 p.

CLUBB, F. J. Objective extration of channel heads from high-resolution topographic data. **Water resources research**. Washington, v. 50, n. 5, p. 4283–4304, apr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013WR015167>

CBHSF – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. **Dois rios**. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/noticias/destaques-capa/dois-rios/>. Acesso em: Agosto de 2022.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto de fontes de abastecimento por água subterrânea**: diagnóstico do município de Murici, Estado de Alagoas. 1. ed. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 10 p. (a)

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto de fontes de abastecimento por água subterrânea**: diagnóstico do município de Satuba, Estado de Alagoas. 1. ed. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 10 p. (b)

DAGHARA, A.; AL-KHATIB, I. A.; AL-JABARI, M. Quality of Drinking Water from Springs in Palestine: West Bank as a Case Study. **Journal of Environmental and Public Health**, London, v. 2 n. 6, p. 1-7, jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/8631732>

DAHL, M.; NILSSON, B.; LANGHOFF, J. H.; REFSGAARD, J. C. Review of classification systems and new multi-scale typology of groundwater surface water interaction. **Journal of Hydrology**, cidade, v. 344, n. 1-2, p. 1-16, sep. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.027>

DAVIS, S. N.; DE WIEST, R. J. M. **Hydrogeology**. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc. 1966. 463 p.

DERDOUR, A.; BOUANANI, A.; KAID, N.; MUKDASAI, K.; ALGELANY, A. M.; AHMAD, H.; MENNI, Y.; AMEUR, H. Groundwater potentiality assessment of ain sefra region in upper wadi namous basin, Algeria using integrated geospatial approaches. **Sustainability**, Switzerland, v. 14, n. 8, p. 2-20, apr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14084450>

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. 356 p.

FALÇÃO, E. C. **Análise de riscos à degradação ambiental utilizando avaliação multicritério espacial, no município de Boa Vista-PB**. 2013. 125 f. Tese (Doutorado em engenharia Agrícola) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

FERNANDES, L. V. O.; GURGEL, C. G. da S.; SILVA, E. S. da; VIDAL, R. M. B.; MAGALHÃES, G. V. V.; MALVEIRA, J. de Q.; SOUSA, P. L. R. de. Determinação de clorofila a em águas subterrâneas como potencial contaminação por cianobactérias. **Ciência Ambiental**, Fortaleza, v. 33, n. 1, p. 1-4, ago. 2023. Disponível em: <https://revistas.uece.br/index.php/cienciaanimal/article/view/11267>

FERNANDES, A.; DOLABELA, B.; SENNA, N.; MARQUES, R.; AMARAL, P. H. M. de; CALLISTO, M. Avaliação ecológica rápida de qualidade de água do Ri Caraça como um ecossistema em condições de referência. **Revista Espinhaço**, Diamantina, v. 11, n. 1, p. 1-16. jan/dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6564171>

FERREIRA, E. P.; FERREIRA, J. T. P.; PANTALEÃO, F. de S.; FERREIRA, Y. P. Desafios para a gestão da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú – Diagnóstico ambiental de trechos da Bacia localizada no Estado de Alagoas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 14, p. 1123-1212, mês. 2012. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3941>

FELIPPE, M. F.; 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, M. F.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Conflitos conceituais sobre nascentes de cursos d'água e propostas de especialistas. **Geografias**, Belo horizonte, v. 9, n. 1, p. 71-81, jan/jun. 2013. DOI: <https://doi.org/10.35699/2237-549X..13354>

FELIPPE, M. F.; LAVARINI, C.; PEIFER, D.; DOLABELA, D.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. Espacialização e caracterização das nascentes em Unidades de Conservação de Belo Horizonte-MG. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20., 2017, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017. p. 1-18.

FELIPPE, M. F.; JÚNIOR MAGALHÃES, A. P.; PESCIOTTI, H.; SILVA, L. C. L. da Nascentes antropogênicas: processos tecnogênicos e hidrogeomorfológicos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Curitiba, v. 14, n. 4, p. 279-286, out/dez, 2013. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v14i4.210>

FELIPPE, M. F. **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, M. F. **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.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4. ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 2001. p. 615.

FONSECA, A. R.; GONTIJO, R. A. N. Impactos ambientais macroscópicos e qualidade microbiológica das águas em nascentes da área urbana de Santo Antônio do Monte – MG. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, Curitiba, v. 10, n. 20, p. 1-15, jan/jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.22292/mas.v10i20.966>

FOTOUHI, F.; KREŠIĆ, N. Springwater treatment. In: KREŠIĆ, N., STEVANOVIĆ, Z., 2009. **Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, and Sustainability**. 1. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010. p. 270-304.

FIKADU, G. Determination of selected physicochemical water quality parameters of the upper stream of Amerti watershed of Western Ethiopia. **Environmental Challenges**, Miami, v. 8, n. 3, p. 1-9, ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100558>

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 1. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 648 p. 2009.

GOMES, P.; VALENTE, T.; GERALDO, D.; RIBEIRO, C. Photosynthetic pigments in acid mine drainage: seasonal patterns and associations with stressful abiotic characteristics. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 239, n. 1, p. 1-9, jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124774>

GOMES, D. D. M.; LIMA, D. R. M. de; VERÍSSIMO, C. U. V.; DUARTE, C. R. 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>

GOMES, D. D. M. **Geoprocessamento aplicado à análise e zoneamento dos sistemas ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú**. 2015. 240 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, 2015.

GREEN, J. A.; BARRY, J. D.; ALEXANDER JÚNIOR, E. C. **Springshead assessment methods for paleozoic bedrock springs of Southeastern Minnesota**. Minnesota: University of Minnesota, 2014. 49 p.

GHIMIRE, M.; CHAPAGAIN, P. S.; SHRESTHA, S. Mapping of groundwater spring potential zone using geospatial techniques in the Central Nepal Himalayas: A case example of Melamchi–Larke area. **Journal Earth Systems Scienc**, Mumbai, v. 128, n. 26, feb-dec, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12040-018-1048-7>

HMAIDI, A. E., TALHAOU, A., MANSSOURI, I., JADDI, H., BEM-DAOUD, M., KASSE, Z., OUALI, A. E., ESSAHLAOUI, A. Assessment of the physicochemical water quality of the Moulouya River, Morocco, using the SEQ-Eau index. **Environ Monit Assess**, Switexerland, v. 194, n. 37, p. 1-17, dec. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09636-4>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola e pecuária municipal de Santana do Mundaú 2022**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/santana-do-mundau/pesquisa/18/16459>. Acesso em 13 de Novembro de 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Histórico e fotos de Garanhuns**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/garanhuns/historico>. Acesso em 25 de Dezembro de 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de vegetação**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 271 p

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de pedologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316 p

JACOMINE, P. K.; CAVALCANTI, A. C.; PESSÔA, S. C. P.; SILVEIRA, C. O. da. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Alagoas**. 1. ed. Recife: EMBRAPA, 1975, 532 p.

JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; PESSÔA, S. C. P.; SILVEIRA, C. O. da. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. 1. ed. Recife: EMBRAPA, 1973, 352 p.

JAYASENA, N. S.; MALLAWAARACHCHI, H.; SILVA, L. de. Environmental sustainability of facilities management: analytical hierarchy process (AHP) based model for evaluation. **Environmental sustainability of FM**, Bingley, v. 10, n. 2, p. 261-276, jan/mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/BEPAM-12-2018-0157>

JULIAN, J. P. Channel Heads. In: ELIAS, S. A.; MARSHALL, S.; LAJTHA, K. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. Amsterdam: Elsevier, 2018. p. 1-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05956-X>

JULIAN, J. P.; ELMORE, A. J.; GUINN, S. M. Channel head locations in forested watersheds across the mid-Atlantic United States: a physiographic analysis. **Geomorphology**, Selbustrand, v. 24, n. 24, p. 194-203, jan/dec. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.029>

KAMPF, S; MIRUS, B. 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, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. 1.ed. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. 379 p.

KUMARI, A.; SINGH, A. Delineation of groundwater potencial zone using analytical hierarchy process. **Journal geological Society of India**, Bengaluru, v. 97, n. 8, p. 935-942, aug. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01522-1>

KHADKA, K.; RIJAL, M. L. Hydrogeochemical assessment of spring water resources around Melamchi, Central Nepal. **Water Practice & Technology**, Londres, v. 15, n. 3, p. 748-758, jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.066>

KLEIN, C; KLEIN, V. A. Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. Santa Maria, v. 19, n. 1, 21-29, jan/abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236117014990>

KREŠIĆ, N. Types and classifications of springs. In: KREŠIĆ, N.; STEVANOVIĆ, Z. **Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management and Sustainability**. 1. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010. p. 31-85.

KREŠIĆ, N.; STEVANOVIĆ, Z. **Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management, and sustainability**. 1. ed. Orford: Elsevier, 2010. 567 p.

KIWANUKA, M.; MUTANDA, H. E.; NIYOMUKIZA, J. B.; NAKASAGGA, E. Assessment of suitability of drinking water from the springs in urban slums of kampala. **Environmental challenges**, Miami, v. 13, n. 4, p. 1-7, dez. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100667>

LIMA, I. F. **Maceió, a cidade restinga: contribuição ao estudo geomorfológico do litoral**. 5 ed. Maceió: Imprensa oficial Graciliano ramos, 2010. 255 p.

LIU, F.; ZHEN, P.; WANG, S. Groundwater quality assessment and health risks from nitrate contamination in the Heilongdong Spring Basin, a typical headwater basin of the North China Plain. **Environmental Science and Pollution Research**. Switzerland, v. 29, n. 1, p. 17655–17670, oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17065-6>

LINS, R. C. MARTINEZ, J. M.; MARQUES, D. da M.; CIRILO, J. A.; MEDEIROS, P. R. P.; FRAGOSO JÚNIOR, C. R. A Multivariate analysis framework to detect key environmental factors affecting spatiotemporal variability of chlorophyll-a in a tropical productive estuarine-lagoon system. **Remote Sensing**, Switzerland, v. 10, n. 6, p. 2-17, nov/dec. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10060853>

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B. **Water resources engineering**. 3 ed. USA: McGraw-Hill, Inc. 1979. p. 744.

LUO, Q.; YANG, Y.; QIAN, J.; WANG, X.; CHANG, X.; MA, L.; LI, F.; WU, J. Spring Protection and sustainable management of groundwater resources in a spring field. **Journal of Hydrology**, Connecticut, v. 582, n. 3, p. 1-10, mar, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124498>

LUIZ, J. da S. **Caracterização das nascentes e ecossistemas dependentes das águas subterrâneas: estudo de caso no município de Analândia-SP**. 2019. 140 f. Dissertação

(Mestrado em Ciências Ambientais, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de São Carlos, 2019.

MA, B.; SUN, K.; WANG, X.; LIU, J.; ZHANG, G.; WANG, P.; DING, W.; HUANG, J.; ZHANG, Y.; ZHOU, Z. Landscape pattern optimization of small watershed based on water purification (Danjiangkou reservoir area, China). **Environmental and sustainability indicators**, Coimbra, v. 22, n. 6, p. 1-9, jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100366>

MAIA, C. de O.; LÁZARO, G. L. V.; DIAS, L. O. B.; BATISTA, P. H.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; FELIPPE, M. F.; COSTA, F. C. da. A qualidade da água de nascentes e cursos fluviais de baixa ordem como indicador de desafios de gestão de parques urbanos em Belo Horizonte/MG. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 31, n. 64, jan/mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2021v31n64p92>

MACHADO, L. C.; SELVA, V. S. F.; SANTOS, S. M. Proposta metodológica interdisciplinar como ferramenta para o potencial de conservação de nascentes. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v. 3, n. 1, p. 008-023, set/dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.24221/jeap.3.1.2018.1660.008-023>

MACDONALD, A. M.; DOCHARTAIGH, B. É. Ó.; BONSOR, H. C.; DAVIES, J. **Developing quantitative aquifer maps for Africa**. Nottingham, British Geological Survey, 2010. p. 35.

MÁDL- SZÖNYI, J.; TÓTH, A., 2015. Basin-scale conceptual groundwater flow model for an unconfined and confined thick carbonate region. **Hydrogeology Journal**, Switzerland, v. 23, n. 7, p. 1359–1380, nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1274-x>

MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. et al. Relações entre perdas geoquímicas e configuração geomorfológica de bacias fluviais de baixa ordem na borda oeste do Espinhaço Meridional (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 303-319, abr/jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i2.1306>

MANTOVANELLI, B. C.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D.; CARLESSO, R. Qualidade física de solos do Brasil e aplicabilidade de métodos para estimativas de retenção de água no solo: a revisão. **Revista EDUTEC**, Rondônia, v. 3, n. 1, p. 87-100, jan/jun. 2022. Disponível em: <https://revistaedutec.ifro.edu.br/index.php/revistaedutec/article/view/99>

MARTINS, W. L.; BISPO, M. O. Análise ambiental de veredas através do mapa de uso e ocupação da terra e protocolo de avaliação rápida. **Revista GeoAmazônia**, Belém, v. 9, n. 17, p. 44-67, jan/jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.70261/er.v23i1.66531>

MARANGON, F. H. S. **Hidrogeomorfologia de bacia de zero-ordem e ocorrência de nascentes**. 2017. 105 f. Tese (Doutorado em Geografia), Programa Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, 2017.

MARCUZZO, F. F. N.; ROMERO, V.; CARDOSO, M. R. D. Detalhamento hidromorfológico da Bacia do Mundaú. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19, 2011, Maceió. **Anais...** Maceió, 2011. p. 1-19.

MARSTON, R. 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>

MATTOS, M. R. F.; MELO, L. de M.; SOARES, A. B.; GUEIROS, N. de O.; LEAL, W. F. de A.; CARVALHO, C. C. N. de. Mobilização para criação do comitê das bacias dos Rios Mundaú e Paraíba do Meio: relato de experiência. In: PACHECO, C. S. G. R. **Ambiente e sociedade: concepções, fundamentos, diálogos e práticas para conservação da natureza**. 1. ed. Guarujá: Científica digital, 2021. 373 p.

MAYA, K.; VIVEK, V. R.; SREELESH, R.; UTPAL, M.; SREELASH, K. Hydrogeochemical signatures of springs water in geologically diverse terrains: a case study of Southern Western Ghats, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, Switzerland, v. 196, n. 62, p.196-662, jun. 2024. DOI: <https://doi-org.ez16.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10661-024-12775-Z>

MELO, J. H. S. de; MONTEIRO, K. de A. 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>

MENEZES, B. G. de. **Fatores que governam as assembleias de macroinvertebrados bentônicos em nascentes tropicais de áreas protegidas**. 2017. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Programa Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017.

MEINZER, O. E. **Outline of ground-water hydrology, with definitions**. 6. ed. Washington: U.S. Government Printing Office, 1965. 77 p.

MIQUELONI, D. P. **Perda de solo em área de nascente caracterizada por análise multivariada e modelos de geoestatística**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Estadual Paulista, 2011.

MOURA, M. N. de; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; FELIPPE, M. F. As nascentes antropogênicas como expressões da materialidade do Antropoceno e do Tecnógeno. **Cadernos do Leste**, Belo Horizonte, v. 21, n. 21, jan/dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.29327/248949.21.21-7>

MOURA, M. N. de. **Qualidade ambiental de nascentes: proposta metodológica**. 2020. 231 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Juiz de Fora, 2020.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Where do channels begin? **Nature**, London, v. 336, n. 6196, p. 232–234, nov. 1988.

MOROZ, I. C. A contribuição dos estudos de geomorfologia fluvial e recursos hídricos para planos de manejo de unidades de conservação. In: VIII SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 8., 2010. Recife. **Anais...** Recife, 2010, p. 1-18.

NEVES, M. A.; OLIVEIRA, M. S. M. de; BREDER, F. de P.; CARNEIRO, M. T. W. D. Parâmetros de qualidade da água subterrânea em rochas cristalinas no Sul do Estado do Espírito Santo, Sudeste do Brasil. **Derbyana**, São Paulo, v. 45, n. 1, p. 1-14, jan/dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.14295/derb.v45.812>

NASCIMENTO, A. M. A. do; SANTOS, A. dos; ALVES, G. do N.; MEDEIROS, P. R. P. Limnologia aplicada à análise de água em duas nascentes do Povoado Baixa da Areia, Alagoas. **Revista Brasileira de Geografia**, Recife, v. 12, n. 2, p. 574-591, jun/dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.2.p574-591>

OH, H. J.; KIM, Y. S.; CHOI, J. K.; PARK, E.; LEE, S. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. **Journal of Hydrology**, Connecticut, v. 399, n. 3-4, p. 158-172, mar. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.027>

OLIVEIRA JÚNIOR, E. S.; LIMA, T. E. de; POQUIVIQUI, A. da S.; TAVARES, C. da C.; MACHADO, C. S. D.; CARVALHO, C. dos S.; CARVALHO, L. R. de; MIRANDA, P. R.; SOUZA, C. A. de. Aplicação de protocolos de avaliação rápida como ferramenta robusta na qualificação ambiental em dois córregos urbanos que desaguam no rio Paraguai. **Ra'ega**, Curitiba, v. 8, n. 2, p. 199-220, dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v48i0.69215>

OLIVEIRA, A. S de; SILVA, A. M. da; MELLO, C. R. de. Dinâmica da água em áreas de recarga de nascentes em dois ambientes na região Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Eng. Sanit Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 59-67, jan/fev. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020148177>

OLIVEIRA, A. S. de; SILVA, A. M. da; MELLO, C. R. de. Dinâmica da água em áreas de recarga de nascentes em dois ambientes na Região Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 59-67, jan/fev. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020148177>

OLIVEIRA, C. R. de. **Qualidade da água e conservação de nascentes em assentamento rural na mata pernambucana**. 2014. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

PAZ, Y. M.; SILVA, J. F. da; HOLANDA, R. M. de; GALVÍNCIO, J. D. Avaliação espacial da produção de sedimentos e estratégias para redução dos processos erosivos em Bacia Hidrográfica no Nordeste do Brasil. **Derbyana**, São Paulo, v. 43, n. 1, p. 1-30, jan/dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.14295/derb.v43.753>

PANDE, C. B.; MOHARIR, K. N.; PANNEERSELVAM, B.; SINGH, S. K.; ELBELTAGI, A.; PHAM, Q. B.; VARADE, A. M.; RAJESH, J. Delineation of groundwater potencial zones for sustainable development and planning using analytical hierarchy process (AHP), and MIF tecniques. **Applied Water Science**, Switzerland, v. 11, n. 12, p. 1-20, dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01522-1>

PEREIRA, E. T. L.; SILVA, T. A. da; PINTO, A. da S.; PEREIRA, L. D. Impacto ambientais registrados em nascentes no município de Jaraguá, Goiás no ano de 2019. **Científic@Multidisciplinary Journal**, Goianésia, v. 7, n. 2, p. 1-8, jul/dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.37951/2358-260X.2020v7i2.4551>

PEREIRA, V. H. C.; CESTARO, L. A. A unidade geoambiental tabuleiro costeiro e o planejamento municipal: o caso de Senador Georgino Avelino/RN. **Revista Geonorte**, Amazonas, v. 3, n.4, p. 390-401, set/dez. 2012.

PESCIOTTI, H. A.; COELI, L.; LAVARINI, C.; FELIPPE, M. F.; MAGALHAES JÚNIOR, A. Estudo morfológico e ambiental de nascentes em parques urbanos de Belo Horizonte-MG. In: VIII Simpósio Nacional De Geomorfologia, 8., 2010, Recife. **Anais...** Recife, 2010. p. 1-14.

PIERONI, J. P.; BRANCO, K. G. R.; DIAS, G. R. do VALLE; FERREIRA, G. C. Avaliação do estado de conservação de nascentes em microbacias hidrográficas. **Revista de Geociências**, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 185 - 193, jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i1.12477>

PIRATOBA, A. R. A. et al. Caracterização de parâmetros de qualidade da água na área portuária de Barcarena, PA, Brasil. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 12, n. 3, p. 435- 456, may/jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1910>

PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V.; SCHNEIDERS, D.; OLIVEIRA, D. A.; ALBANO, R. M. R. Concentrações e cargas de nitrato e fosfato na Bacia do Ribeirão Concórdia, Lontras, SC. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 86-93, jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100012>

POURTAGHI, Z. S.; POURGHASEMI, H. R. GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran. **Hydrogeology journal**, Switzerland, v. 22, n. 3, p. 643-662, may. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1089-6>

PLACZKOWSKA, E.; CEBULSKI, J.; BRYNDZA, M.; MOSTOWIK, K.; MURAWSKA, M.; RZONCA, B.; SIWEK, J. Morphometric analysis of the channel heads based on different LIDAR resolutions. **Geomorphology**, Selbustrand, v. 375, n. 4, p. 1-10, fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107546>

PLACZKOWSKA, E.; GÓMIK, M.; MOCIOR, E.; PEEK, B.; POTONIEC, P.; RZONCA, B.; SIWEK, J. Spatial distribution of channel heads in the Polish flysch carpathians. **Catena**, Grugliasco, v. 127, n. 4, p. 240-249, apr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.033>

POZDNYAKOVA, I. A. GALITSKAYA, I. A.; MIRONOV, O. K.; KOSTIKOVA, I. A.; DOROZHKO, A. L.; BATRAK, G. I.; MATVEEVA, L. A.; FESEL, K. I. Identification of hydrogeological Windows based on large-scale mapping of the geological and hydrogeological conditions in Moscow. **Water resources**, Switzerland, v. 43, n. 7, p. 1012-1022, dec. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0097807816070101>

QUEIROZ, M. L. **Nascentes, veredas e áreas úmidas, revisão conceitual e metodologia de caracterização e determinação**: estudo de caso na Estação Ecológica de Águas Emendadas – Distrito Federal. 2015. 161 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, 2015.

RAHMATI, O.; NAGHIBI, S. A.; SHAHABI, H.; BUI, D. T.; PRADHAN, B.; AZAREH, A.; RAFIEI-SARDOOI, E.; SAMANI, A. N.; MELESSE, A. M. Groundwater sprig potential modelling: comprising the capability and robustness of three diferente modeling approaches. **Journal of Hydrology**, Connecticut, v. 565, p. 248-261, out. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.027>

REISS, M.; CHIFFLARD, P. Hydromorphology and Biodiversity in Headwaters - An Eco-Faunistic Substrate Preference Assessment in Forest Springs of the German Subdued Mountains. In: BLANCO, J. A.; LO, Y. H.; ROY, S. (ed.) **Biodiversity in Ecosystems: Linking Structure and Function**. London: Intech Open, 2015. p. 205-240.

REISS, M. 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>

RIBEIRO, D. D. M. de; ROCHA, W. de J. S. da F.; GARCIA, A. J. V. Modelagem da potencialidade hídrica das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri, Sergipe, Brasil, com base em Sistema de Informações Geográficas e técnicas de Sensoriamento Remoto. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 6, n. 2, p. 206-231, mai/ago. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.195>

RODRIGUEZ, J. M. M.; SILVA, E. V. da; CAVALCANTI, A. de P. B. **Geoeecologia das paisagens**: uma visão Geossistêmica da análise ambiental. 6. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2022. 329 p.

RODRIGUES, L. F. T.; ROCHA, C.; H. B.; ALVES, R. da G. A qualidade ambiental de nascentes dentro e fora de unidades de conservação do Sudeste do Brasil. **Oecologia Australis**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 154-163, abr/jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.4257/oeco.2020.2401.12>

RODRIGUES, A. S. de L.; CASTRO, P. de T. A. Protocolo de avaliação rápida: instrumentos complementares no monitoramento dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 161-170, jan/jun. 2008. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v13n1.p161-170>

RODRIGUES NETO, N. N. **Evolução tectono-metamórfica da cobertura deformada (quartzito Garanhuns) e de seu embasamento durante a orogênese brasileira de uma área A SE da folha Venturosa**. 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

ROSSO PINTO, M. J. **Avaliação de condições ambientais de nascentes de cursos de água: ferramenta de subsídio à gestão de recursos hídricos e ao planejamento de bacias hidrográficas**. 2019. 233 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de São Carlos, 2019.

SATURDAY, A., LYIMO, T. J., MACHIWA, J., PAMBA, S. Spatio-temporal variations in physicochemical water quality parameters of Lake Bunyonyi, Southwestern Uganda. **Applied Sciences**, Switzerland, v. 3, n. 684, p. 1-14. jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04672-8>

SATTY, T. A. Scaling method for priorities in hierarchical structure. **Journal of Mathematical Psychology**, Oldenburg, v. 15, n. 3, p. 234-281, may, 1977. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)

SANTOS, D. R. C. da S. SANTOS, V. C. dos. Impactos ambientais macroscópicos e qualidade da água em nascentes localizadas na Vila Bananeira, Arapiraca-AL. **Diversitas Journal**, Maceió, v. 6, n. 1, p. 481-498, jan/mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v6i1-1181>

SANTOS, G. D.; SANTOS, J. L. O.; LEITE, O. D. Variação espaço-temporal da qualidade da água nos canais de irrigação do Projeto Formoso em Bom Jesus da Lapa – Bahia. **RA'EGA**, Curitiba, v. 16, n. 3, p. 1-11, jan/dez. 2019.

SANTOS, A. L. da S.; PEREIRA, E. C. G.; ANDRADE, L. de H. C. A expansão da cana-de-açúcar no espaço alagoano e suas consequências sobre o meio ambiente e a identidade cultural. **Revista de geografia agrária**, Belo Horizonte, v. 2, n. 4, p. 19-37, ago. 2007. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCT2411824>

SALLA, M. R.; NOGUEIRA, A. de S.; PEREIRA, C. E. Influência do coeficiente de difusão na qualidade da água em trecho de vazão reduzida. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 16, n. 2, p. 68-79, mai/ago. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236130830325>

SILVA, M. H. M. e; SILVA, F. L.; MORAIS, M. A.; MORAIS, M. A. V.; PAULA, C. da S. Dinâmica geoambiental e qualidade da água na bacia do baixo Paranaíta, 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>

SILVA, J. V. M. da; NASCIMENTO, R. L.; FÉ, M. M. de M. Aspectos geológicos e hidrogeomorfológicos das nascentes d'água do município de Crato, região metropolitana do Cariri, Ceará. In: XIII SINAGEO: geomorfologia : complexidade e interescalaridade da paisagem, 13., 2022, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: Comum Design, 2022. p. 3583-3596.

SILVA, F. L.; FUSHITA, Â. T.; CUNHA-SANTINO, M. B.; JÚNIOR, I. B.; JÚNIOR, J. C. T. V. Gestão de recursos hídricos e manejo de bacias hidrográficas no Brasil: elementos básicos, histórico e estratégias. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 14, n. 3, p.1626-1653. jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1626-1653>

SILVA, S. de A. **Análise das interações entre variabilidade climática e cobertura da terra no regime hidrológico da Bacia Hidrográfica Interestadual do Rio Mundaú.** 2020. 152 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

SILVA, A. R. da. **Avaliação do processo de eutrofização das águas superficiais, do cenário nacional ao local: estudo de caso nas bacias hidrográficas costeiras dos rios Ratoões, Itacorubi e Tavares (Ilha de Santa Catarina, Brasil).** 2019. 309 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

SILVA, A. R. da. **Avaliação da qualidade ambiental e do processo de eutrofização na bacia hidrográfica do Papaquara, Ilha de Santa Catarina, SC.** 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SILVA, A. S. da. **Territorialidade em torno das águas: discursividade e práticas de apropriação e uso dos mananciais em Garanhuns/PE.** 2012. 240 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

SILVEIRA, G. A. da. **Influência de fatores espaciais e ambientais na estrutura da comunidade de invertebrados em nascentes tropicais.** 2016. 42 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.

SOARES, A. B. **Análise da problemática socioambiental de nascentes urbanas no município de Garanhuns-PE.** 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

SOUZA, M. M.; GASTALDINI, M. C. C. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. **Engenharia Sanitária e Ambiente**, São Paulo, v. 19, n.3, p. jul/ago. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019000001097>

SOCHAVA, V. B. **Por uma teoria de classificação de geossistema de vida terrestre**. 1. ed. São Paulo: USP, 1978. p. 2-14.

STEVENS, L. E.; ALY, A. A.; ARPIN, S. M.; APOSTOLOVA, I.; ASHLEY, G. M.; BARBA, P. Q.; BARQUÍN, J.; BEAUGER, A.; BENAABIDATE, LAHCEN; BHAT, S. U.; BOUCHAOU, L.; CANTONATI, M.; CARROLL, T. M.; DEATH, R.; DWIRE, K. A.; FELIPPE, M. F.; FENSHAM, R. J.; FRYAR, A. E.; GARSABALL, R. P. I; GJONI, V.; GLAZIER, D. S.; GOLDSCHIEDER, N.; GURRIERI, J. T.; GUÐMUNDSDÓTTIR, R.; GUZMAN, A. R.; HÁJEK, M.; HASSEL, K.; HEARTSILL-SCALLEY, T.; HERCE, J. S. I; HINTERLANG, D.; HOLWAY, J. H.; ILMONEN, J.; JENNESS, J.; KAPFER, J.; KARAOUZAS, I.; KNIGHT, R. L.; KREILING, A. K.; LAMELI, C. H.; LEDBETTER, J. D.; LEVINE, N.; LYONS, M. D.; MACE, R. E.; MENTZAFIOU, A.; MARLE, P.; MOOSDORF, N.; NORTON, M. K.; PENTECOST, A.; PÉREZ, G. G.; PERLA, B.; SABER, A. A.; SADA, D.; SEGADELLI, S.; SKAALSVEEN, K.; SPRINGER, A. E.; SWANSON, S. K.; SCHWARTZ, B. F.; SPROUSE, P.; TEKERE, M.; TOBIN, B. W.; TSHIBALO, E. A.; VOLDOIRE, O. **The Ecological Integrity of Spring Ecosystems: a Global Review**. In: DELLASALA, D. A.; GOLDSTEIN, M. 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>

STEVENS, L. E.; SCHENK, E. R.; SPRINGER, A. E. Springs ecosystem classification. **Ecological Applications**, Washington, v. 31, n. 1, p. 1-28, ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/eap.2218>

SPRINGER, A. E.; STEVENS, L. E.; ANDERSON, D.; PARNELL, R. A.; KREAMER, D.; FLORA, S. A. A comprehensive springs classification system: integrating geomorphic, hydrogeochemical, and ecological criteria. In: STEVENS, L. E.; MERETSKY, V. J. (ed.) **Aridland Springs in North America: Ecology and Conservation**. Tucson: University of Arizona Press, 2008. p. 49-75.

SSI - Springs Stewardship Institute. **Nascentes do mundo**. Disponível em: <https://springstewardshipinstitute.org/>. Acesso em: Dezembro de 2024.

TAKAHASHI, K.; MURAYAMA, Y. Effects of topographic and edaphic conditions on alpine plant species distribution along a slope gradient on Mount Norikura, central Japan. **Ecol. Research**, Kyoto, v. 29, n. 5, 823-833, set. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11284-014-1168-8>

TODD, D. K.; MAYS, L. W. **Groundwater hydrology**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2005 p. 652.

TÓTH, Á. KOVÁCS, S.; KOVÁCS, J.; MÁDL-SZÓNYI, J. 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>

TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. da. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 2009. 943 p.

TRICARD, J. **Ecodinâmica**. 1 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. 91 p.

TRICARD, J. 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.

TROEGER, U.; CHAMBEL, A. Topical Collection: Progress in fractured-rock hydrogeology. **Hydrogeology journal**, Switzerland, v. 29, n. 8, p. 2557-2560, dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02414-z>

THIRUMALAIVASAN, D; KARMEGAM, M. **Aquifer Vulnerability Assessment Using Analytic Hierarchy Process and Gis For Upper Palar Watershed**. 22nd Asian Conference on Remote Sensing. Singapore. Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP), 2001. Disponível em: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/267THIRU.PDF>. Acesso em: Janeiro de 2021.

TWINOMUCUNGUZI, F. B.; NYENJE, P. M.; KULABAKO, R. N.; SEMIYAGA, S.; FOPPEN, J. W.; KANSIIME, F. Reducing groundwater contamination from on-site sanitation in peri-urban sub-saharan Africa: reviewing transition management attributes towards implementation of water safety plans. **Sustainability**, Switzarland, v. 12, n. 10, p. 1-21, abril. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12104210>

VALENTE, O. F.; GOMES, M. A. **Conservação de nascentes: hidrologia e manejo de bacias hidrográficas de cabeceiras**. 1. ed. Viçosa: Aprenda Fácil. 2005. 210 p.

WOHL, E. The challenges of channel heads. **Earth-Science**, Colorado, v. 185, n. 10, p. 649-664, oct. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.07.008>

WOHL, E. The significance of small streams. **Frontiers of Eath Science**, Rome, v. 15, n. 2, p. 447-456, jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11707-017-0647-y>

WU, J.; EY, L.; WU, C.; CHANG, Q.; XIN, Z.; ZHANG, C.; ZHOU, H. 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>

WHITE, W. Springwater geochemistry. In: Krešić, N., Stevanović, Z., **Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management and Sustainability**. 1. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010. p. 231-268.

YANG, G.; HUANG, L.; SHI, Y. 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>

ZHANG, T.; WANG, P.; HE, J.; LIU, D.; WANG, M.; WANG, M; ZIA, S. Hydrochemical characteristics, water quality, and Evolution of groundwater in Northeast China. **Water**, Switzerland, v. 15, n. 14, p. 2669, jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15142669>

ZADEH, M. K.; SEPASKHAH, A. R. Effect of tree roots on water infiltration rate into the soil. **Iran Agricultural Research**, Iran, v. 35, n. 1, p.13-20, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.22099/IAR.2016.3436>

APÊNDICES

Apêndice 1- Caracterização do sistema de nascente em relação aos fatores ambientais da bacia do Mundaú.

Nascentes mapeadas	Unidade Geológica	Litologia	Unidades geomorfológicas	Unidade de relevo	Declividade	Tipos de solo	Textura dos solos	Vegetação primária	UCT
1SM	Borborema	MGGGD	Encostas orientais	Ondulado e forte ondulado	9-20%	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Média/Argilosa e argilosa	Floresta Estacional Semidecidual	Pastagem
2SM					21-45%				
3SM					4-8%				
4SM					4-8%				
5SM					21-45%				
6SM					9-20%				
7SM					21-45%				
8SM					9-20%				
9SM					4-8%				
10BQ		OMMM M	Tabuleiros costeiros		21-45%				
11BQ					9-20%				
12BQ					4-8%				
13BQ					9-20%				
14MU		OOMMO	Encostas orientais		4-8%				
15MU									
16MU					9-20%				
17MU					21-45%				
18ST	Costeira e margem continental	SAAC	Planícies e terraços fluviais	Forte ondulado e ondulado	21-45%		Média/Argilosa	Formação pioneira	Pastagem
19CO	Borborema	OMMM M	Pediplano central	Ondulado e forte ondulado	4-8%		Média/Argilosa e argilosa	Floresta Estacional Semidecidual	
20CO			Encostas orientais		21-45%				
21CO		21-45%							
22CO		4-8%							
23CO		4-8%							
24CO		21-45%							
25CO		21-45%							
26CO		21-45%							

27SM		MGGGD		Ondulado e forte ondulado	21-45%					
28PA		G		Ondulado e forte ondulado	4-8%					
29PA					9-20%					
30PA		GX		Forte ondulado e ondulado	4-8%	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	Média/Argilosa			
31CO		MQG		Ondulado e forte ondulado	9-20%	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Média/Argilosa e argilosa			
32GA		GfM	Pediplano central	Plano e suave ondulado	0-3%	Latossolo Amarelo Distrofico	Média/Argilosa	Contato (Ecótono e Enclave)	Formação florestal	
33GA				Área urbana	9-20%	Área urbana	Área urbana		Mosaico de agricultura e pastagem	
34SM		MGGGD	Encostas orientais	Ondulado e forte ondulado	21-45%	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Média/Argilosa e argilosa	Floresta Estacional Semidecidual	Formação florestal	
35SJ		OOMMO		Ondulado	9-20%	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	Média/Argilosa		Pastagem	
36MU				Suave ondulado e ondulado	9-20%	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico		Floresta Ombrófila Aberta	Mosaico de agricultura e pastagem	
37MU					0-3%					
38UP		MGGGD		Ondulado e forte ondulado	21-45%		Média/Argilosa e argilosa	Floresta Estacional Semidecidual	Pastagem	
39CO		MQG			4-8%					

40CO				Ondulado e forte ondulado	9-20%				
41CO					4-8%				
42CO					21-45%				
43GA		GX	Pediplano central	Área urbana	9-20%	Área urbana	Área urbana	Contato (Ecótono e Enclave)	Mosaico de agricultura e pastagem
44SM		MGGGD	Encostas orientais	Ondulado e forte ondulado	21-45%	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Média/Argilosa e argilosa	Floresta Estacional Semidecidual	Formação florestal
45SM								Pastagem	
46GA		QfM	Pediplano central	Suave ondulado e ondulado				Contato (Ecótono e Enclave)	Formação savânica
47GA				Ondulado e forte ondulado					Mosaico de agricultura e pastagem
48GA									Formação savânica
49CH		GX	Encostas Orientais	Ondulado e forte ondulado	4-8%			Floresta Estacional Semidecidual	Pastagem

Legenda: MGGGD - Monzonito, Granodiorito, Granito, Gabro, Diorito; OMMMM - Ortognaisse, Metatonalito, Metamonzodiorito, Metagranodiorito, Metagranito; OOMMO - Ortognaisse granítico, Ortognaisse granodiorítico, Metadiorito, Migmatito, Ortognaisse tonalítico; SAAC - Silte, Argila, Areia, Cascalho; MQG - Monzonito, Quartzo sienito, Granito; G - Gnaisse granodiorítico; GX - Gnaisse, Xisto; QfM – Quartizito feldspático, Metacóceo.

Fonte: Litologia (cprm) e dados de observação de campo da autora (2019 a 2024).

Apêndice 2- Valores obtidos na validação do Processo Analítico Hierárquico – AHP, para os fatores combinados.

FATORES	Geologia (Lito)	Solo (tipo,textura)	Declividade	UCT	Chuva	Densidade de lineamento	Densidade de drenagem
Geologia (Lito)	1	1	3	3	4	3	2
Solo (tipo, textura)	1,00	1	2	3	1	5	2
Declividade	0,33	0,50	1	2	1	1	3
UCT	0,33	0,33	0,50	1	3	1	2
Chuva	0,25	1,00	1,00	0,33	1	2	1
Densidade de lineamento	0,33	0,20	1,00	1,00	0,50	1	2
Densidade de drenagem	0,50	0,50	0,33	0,50	1,00	0,50	1
Soma	3,75	4,53	8,83	10,83	11,50	13,50	13,00

Apêndice 3- Normalização dos valores obtidos no AHP.

FATORES	Geologia (Lito)	Solo (tipo,textura)	Declividade	UCT	Chuva	Densidade de lineamento	Densidade de drenagem
Geologia (Lito)	0,27	0,22	0,34	0,28	0,35	0,22	0,15
Solo (tipo, textura)	0,27	0,22	0,23	0,28	0,09	0,37	0,15
Declividade	0,09	0,11	0,11	0,18	0,09	0,07	0,23
UCT	0,09	0,07	0,06	0,09	0,26	0,07	0,15
Chuva	0,07	0,22	0,11	0,03	0,09	0,15	0,08
Densidade de lineamento	0,09	0,04	0,11	0,09	0,04	0,07	0,15
Densidade de drenagem	0,13	0,11	0,04	0,05	0,09	0,04	0,08
Soma	0,27	0,22	0,34	0,28	0,35	0,22	0,15

Apêndice 4- Valor de performace dos valores obtidos, a partir da combinação dos fatores.

	Soma	Performance Score (PS)	PS %
	1,83	0,261	26,1099
	1,60	0,229	22,8824
	0,89	0,127	12,6972
	0,80	0,114	11,4303
	0,74	0,106	10,61799181
	0,61	0,087	8,713146632
	0,53	0,075	7,549054027
Soma	7,00	1	100,00

Apêndice 5- Valores de Consistência.

FATORES	Geologia (Lito)	Solo (tipo,textura)	Declividade	UCT	Chuva	Densidade de lineamento	Densidade de drenagem
Geologia (Lito)	0,26	0,23	0,38	0,34	0,42	0,26	0,15
Solo (tipo, textura)	0,26	0,23	0,25	0,34	0,11	0,44	0,15
Declividade	0,09	0,11	0,13	0,23	0,11	0,09	0,23
UCT	0,09	0,08	0,06	0,11	0,32	0,09	0,15
Chuva	0,07	0,23	0,13	0,04	0,11	0,17	0,08
Densidade de lineamento	0,09	0,05	0,13	0,11	0,05	0,09	0,15
Densidade de drenagem	0,13	0,11	0,04	0,06	0,11	0,04	0,08
Soma	0,26	0,23	0,38	0,34	0,42	0,26	0,15

Apêndice 6- Soma, performace score, lambda máxima, índice de consistência e razão de consistência para os fatores combinados.

soma	soma/performance score	Lambda max 7,719602312	CI 0,119934	CR 0,088839792
2,05	7,854648935		ICA 1,35	
1,78	7,777140229			
0,98	7,693065172			
0,90	7,854129059			
0,82	7,676641166			
0,67	7,635305887			
0,57	7,546285735			

Apêndice 7- Aplicação do Protocolo de Bioavaliação Rápida nas nascentes mapeadas no Alto curso do Mundaú – Garanhuns e Correntes.

Parâmetros	GA	Pontos amostrais								
		CO								
	32	19	20	21	22	23	24	25	26	31
1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
4	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6
5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0
9	6	6	6	6	6	6	6	6	6	3
10	0	0	0	3	3	0	0	0	3	0
11	6	0	3	3	3	3	3	3	3	0
12	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6
13	3	6	6	6	6	6	3	6	6	0
14	3	3	3	3	3	6	3	3	3	6
15	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6
16	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3
17	0	3	6	6	6	6	6	6	6	6
18	0	3	3	3	3	3	3	3	3	0
Pontuação	48	57	66	69	72	72	63	66	72	54
Avaliação	I	I	A	A	B	B	A	A	B	A

Legenda: Boa (valores entre 84 e 67); Alterada (66 a 44) e Impactada (39 a 0).

Apêndice 8- Aplicação do Protocolo de Avaliação Rápida nas nascentes mapeadas no Inhaúmas – Palmeirina.

Parâmetros	Pontos amostrais		
	PA		
	28	29	30
1	6	6	6
2	0	6	6
3	6	6	6
4	6	3	3
5	0	0	3
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	6	6	6
10	0	0	0
11	3	6	6
12	6	0	3
13	6	6	6
14	0	3	6
15	6	6	3
16	3	0	3
17	6	6	6
18	0	0	0
Pontuação	54	54	63
Avaliação	I	I	A

Legenda: Boa (valores entre 84 e 67); Alterada (66 a 44) e Impactada (39 a 0).

Apêndice 9- Aplicação do Protocolo de Avaliação Rápida nas nascentes mapeadas no Médio curso do Mundaú - Santana do Mundaú.

Parâmetros	Pontos amostrais										
	SM										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	27	34
1	6	3	0	6	3	6	6	0	0	0	0
2	6	6	3	6	3	6	6	3	3	3	3
3	6	6	6	6	6	6	3	6	6	6	6
4	3	6	6	6	6	6	3	6	6	6	6
5	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	3	0	0	0	0	0	0	3	0	6	0
8	3	6	3	3	3	6	0	6	3	3	3
9	6	6	0	6	0	6	6	0	0	6	6
10	3	3	3	3	3	3	0	3	0	3	3
11	3	3	3	3	3	6	3	6	3	3	6
12	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
13	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	6
14	3	3	3	3	3	3	3	6	3	0	3
15	3	3	6	6	6	6	3	6	6	6	6
16	3	3	3	3	3	3	6	3	3	3	6
17	6	6	6	6	6	6	6	3	3	6	6
18	3	3	3	3	3	0	3	3	3	0	0
Pontuação	66	69	57	72	63	75	63	66	51	57	69
Avaliação	A	A	I	B	A	B	A	A	I	I	A

Legenda: Boa (valores entre 84 e 67); Alterada (66 a 44) e Impactada (39 a 0).

Apêndice 10- Aplicação do Protocolo de Avaliação Rápida nas nascentes mapeadas em Médio curso do Mundaú – São José da Laje, União dos Palmares e Branquinha.

Parâmetros	Pontos amostrais					
	SJ	UP	BQ			
	35	38	10	11	12	13
1	3	3	3	3	0	0
2	6	3	6	6	3	3
3	6	6	6	6	6	6
4	6	3	3	3	3	3
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	3	6	3	0	0	6
8	0	3	0	0	0	0
9	6	6	6	6	6	0
10	0	0	0	0	0	0
11	3	6	3	3	3	3
12	3	6	3	6	6	6
13	6	6	6	6	3	3
14	3	6	3	3	6	6
15	6	6	6	6	6	6
16	0	3	3	3	3	3
17	6	3	6	6	6	6
18	0	0	0	0	0	0
Pontuação	57	66	57	57	51	51
Avaliação	I	A	I	I	I	I

Legenda: Boa (valores entre 84 e 67); Alterada (66 a 44) e Impactada (39 a 0).

Apêndice 11- Aplicação do Protocolo de Avaliação Rápida nas nascentes mapeadas em Baixo curso do Mundaú e Satuba– Murici e Satuba.

Parâmetros	Pontos amostrais						ST 18
	MU						
	14	15	16	17	36	37	
1	6	0	6	6	6	3	
2	6	3	6	6	6	6	0
3	6	6	6	6	6	6	3
4	3	6	6	6	3	3	0
5	0	3	0	3	0	0	3
6	0	0	0	3	0	0	0
7	0	3	6	3	0	0	0
8	3	0	3	3	0	0	0
9	6	3	6	6	6	6	0
10	0	0	0	6	0	0	6
11	3	3	3	3	3	6	0
12	6	6	6	6	0	3	6
13	6	3	6	3	6	6	0
14	6	6	6	3	3	3	6
15	6	6	6	6	6	6	6
16	3	3	3	3	0	0	3
17	6	6	6	6	6	6	0
18	0	0	3	3	0	3	6
Pontuação	66	57	78	81	51	57	0
Avaliação	A	I	B	B	I	I	39

Legenda: Boa (valores entre 84 e 67); Alterada (66 a 44) e Impactada (39 a 0).

Apêndice 12- Distribuição da área (km²) e percentagem (%), da recarga de águas subterrânea na bacia e nas sub-bacias.

Recarga de águas subterrânea	Conceitos	Área (km ²)	%
Bacia do Mundaú	Excelente	824,81	20,31
	Moderado	2.817,38	69,36
	Razoável	385,71	9,50
	Ruim	34,12	0,84
Alto curso	Excelente	125,63	14,37
	Moderado	704,37	80,57
	Razoável	44,24	5,06
Inhaúmas	Excelente	34,95	7,74
	Moderado	375,31	83,14
	Razoável	41,17	9,12
Canhoto	Excelente	370,45	31,54
	Moderado	731,67	62,29
	Razoável	72,58	6,18
Médio curso	Excelente	236,70	32,55
	Moderado	488,91	67,23
	Razoável	1,66	0,23
Baixo curso	Excelente	35,06	8,56
	Moderado	260,95	63,70
	Razoável	100,07	24,43
	Ruim	13,56	3,31
Satuba	Excelente	35,06	8,56
	Moderado	260,95	63,70
	Razoável	100,07	24,43
	Ruim	13,56	3,31

Fonte: A autora (2024).

Apêndice 13- Valores médios de vazão em L/s, das nascentes monitoradas em Correntes e Santana do Mundaú.

Nascentes	2022												2023											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
19CO	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,11	0,14	0,13	0,11	0,10	0,07	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04
20CO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
21CO	0,01	0,01	0,01	0,08	0,09	0,10	-	0,14	0,14	0,15	0,16	0,25	0,36	0,33	0,33	0,33	0,50	0,33	0,33	0,24	0,22	0,33	0,07	0,25
22CO	0,08	0,07	0,06	0,07	0,07	0,09	0,09	0,11	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,12	0,13	0,13	0,11	0,13	0,15	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14
23CO	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,06	0,08	0,07	0,07	0,08	0,06	0,08	0,03	0,03	0,04	0,09	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09
24CO	0,08	0,08	0,08	0,09	0,07	0,09	0,10	0,06	0,05	0,04	0,04	0,02	0,97	0,90	0,99	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	0,05	0,03	0,02	0,02
25CO	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,00	0,02	0,03	0,05	0,04	0,05	0,03	0,02	0,02
26CO	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
1SM	0,06	0,05	0,06	0,04	0,04	0,03	0,25	0,25	0,26	0,25	0,07	0,21	0,36	0,19	0,20	0,18	0,17	0,17	0,29	0,15	0,17	0,13	0,11	0,09
2SM	0,29	0,12	0,07	0,10	0,08	0,08	0,06	0,06	0,04	0,33	0,22	0,33	0,36	0,50	0,13	0,06	0,09	0,08	0,31	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03
3SM	0,06	0,36	0,36	0,16	0,09	0,28	0,22	0,25	0,24	0,31	0,15	0,33	0,23	0,42	0,16	0,44	0,36	0,33	0,32	0,29	0,20	0,20	0,18	0,19
4SM	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,67	0,06	0,05	0,08	0,06	0,06	0,06	0,08	0,12	0,06	0,11	0,06	0,14	0,13	0,11	0,09	0,14
5SM	0,25	0,20	0,14	0,12	0,10	0,33	0,45	0,50	0,50	0,83	1,00	0,92	0,92	0,58	0,50	0,47	0,33	0,50	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92
6SM	0,04	0,03	0,12	0,04	0,05	0,05	0,07	0,54	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
27SM	1,51	1,47	1,41	1,38	1,41	1,22	1,30	0,65	1,47	0,48	1,07	0,34	0,58	0,35	0,32	0,50	1,27	0,62	0,51	0,26	0,26	0,58	0,27	10,08

Fonte: A autora (2024). Legenda: Traço ao invés de valores, indica que não houve coleta.

Apêndice 14- Valores de precipitação pluvial (mm/mês) em Correntes e Santana do Mundaú.

Ano	Meses	Precipitação pluvial	
		mm-CO	mm-SM
2022	Jan	112,0	58,2
	Fev	18,0	0,20
	Mar	216,0	141,2
	Abr	120,0	43,2
	Mai	359,0	178,6
	Jun	428,7	158,8
	Jul	490,5	179,4
	Ago	217,0	78,2
	Set	70,0	53,8
	Out	23,0	34,8
	Nov	222,0	205,2
	Dez	95,0	41,0
2023	Jan	35,0	83,0
	Fev	34,5	66,0
	Mar	58,0	70,4
	Abr	138,0	164,8
	Mai	212,0	218,4
	Jun	368,0	279,8
	Jul	226,0	239,6
	Ago	132,0	108,8
	Set	124,0	84,0
	Out	19,0	27,2
	Nov	20,0	17,2
	Dez	46,5	92,8

Fonte: IPA (2024) e SEMARH-AL (2024).

ANEXOS

Anexo 1- Relatório de análise dos parâmetros feofitina A, clorofila A e nitrato, em junho de 2022.



RELATÓRIO DE ANÁLISE

Pag.: 1 / 1

Certificado Nº	005343/2022	Data Emissão	29/06/2022
Solicitante	GEOVÂNIA RICARDO DOS SANTOS	CPF/CNPJ	- - -
Procedência	ÁGUA DO RIO MUNDAÚ		
Amostras recebidas em	13/06/2022	Data Análise	13/06/2022 - 15/06/2022

Reg Nº	Identificação das Amostras	Coletadas em
6890	NASCENTE CÓD.: 19CO - HORA: 9:29 - AMOSTRA 01 - CORRENTES - PE	13/06/2022
6891	NASCENTE CÓD.: 20CO - HORA: 10:04 - AMOSTRA 02 - CORRENTES - PE	13/06/2022
6892	NASCENTE CÓD.: 1SM - HORA: 07:20 - AMOSTRA 03 - SANTANA DO MUNDAÚ - AL	13/06/2022
6893	NASCENTE CÓD.: 2SM - HORA: 07:00 - AMOSTRA 04 - SANTANA DO MUNDAÚ - AL	13/06/2022

RESULTADOS							
DETERMINAÇÕES	6890	6891	6892	6893	LQ	ESPECIFICAÇÕES	METODOLOGIAS
FEOFITINA A (µg/L)	0,27	0,59	0,21	0,43	-	- -	SMEWW 10200H
COLORÍMETRO A (µg/L)	1,60	0,53	0,53	1,07	-	VMP - 30	SMEWW 10200H
NITRATO, EM N (mg NO ₃ -N/L)	1,414	2,039	1,039	3,182	0,185	VMP - 10	MERCK 1.09713
Informações de Amostragem							
Amostragem e manuseio até o laboratório realizada pelo cliente. Todos os dados de identificação são fornecidos e de responsabilidade do cliente							
RESOLUÇÃO CONAMA Nº 357 DE 17/03/2005 - ÁGUA SUPERFICIAL							

NOTAS:

O(s) resultado(s) deste ensaio tem significância restrita e se aplicam somente a(s) amostra(s) analisada(s)
 POP - Procedimento Operacional Padrão - Central Analítica
 SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
 LQ - Limite de Quantificação
 VMP - Valor Máximo Permitido

Este Relatório de Análises só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração

JENER BATISTA DE OLIVEIRA
 Técnico Químico
 Reg. Nº 17.406.296
 CRQ 1ª Região

CENTRO ANALÍTICO LTDA- Epp.CRQ 17.5586.00569- RESPONSÁVEL TÉCNICO - JENER BATISTA DE OLIVEIRA CRQ 17400286

RUA SÁ E ALBUQUERQUE, 184 - MACEIÓ/AL | (82)3326-6020|

CENTRALANALITICA@CENTRALANALITICA.COM.BR | WWW.CENTRALANALITICA.COM.BR

Anexo 2- Relatório de análise dos parâmetros feofitina A, clorofila A e nitrato, em dezembro de 2022.



RELATÓRIO DE ANÁLISE

R-103 REV 01

Pag.: 1 / 1

Certificado N°	008326/2022	Data Emissão	14/02/2023
Solicitante	GEOVÂNIA RICARDO DOS SANTOS	CPF/CNPJ	- - -
Procedência			
Amostras recebidas em	19/12/2022	Data Análise	19/12/2022 - 21/12/2022
Reg N°	Identificação das Amostras	Coletadas em	
10124	NASCENTE CÔD.: 19CO - HORA: 12:49 - CORRENTES - PE	18/12/2022	
10125	NASCENTE CÔD.: 20CO - HORA: 13:22 - CORRENTES - PE	18/12/2022	
10126	NASCENTE CÔD.: 1SM - HORA: 10:24 - SANTANA DO MUNDAÚ - AL	18/12/2022	
10127	NASCENTE CÔD.: 2SM - HORA: 10:40 - SANTANA DO MUNDAÚ - AL	18/12/2022	

RESULTADOS						
DETERMINAÇÕES	10124	10125	10126	10127	LQ	METODOLOGIAS
FEOFITINA A (µg/L)	0,11	0,11	1,31	3,96	-	SMEWW 10200H
CLOROFILA A (µg/L)	0,27	0,27	7,48	6,33	-	SMEWW 10200H
NITRATO, EM N (mg NO ₃ -N/L)	0,696	4,958	< 0,185	0,382	0,185	MERCK 1.09713
Informações de Amostragem						
Amostragem e manuseio até o laboratório realizada pelo cliente. Todos os dados de identificação são fornecidos e de responsabilidade do cliente						
RESOLUÇÃO CONAMA N° 357 DE 17/03/2005 - ÁGUA SUPERFICIAL						

NOTAS:

O(s) resultado(s) deste ensaio tem significância restrita e se aplicam somente a(s) amostra(s) analisada(s)

POP - Procedimento Operacional Padrão - Central Analítica | SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd

LQ - Limite de Quantificação | VMP - Valor Máximo Permitido

Este Relatório de Análises só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração

XXX FIM DE RELATORIO XXX



Sistema para validação do laudo

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
<https://sgqsistemas.com.br/laudoaguas/>, informando o código :

JENER BATISTA DE OLIVEIRA
 Técnico Químico
 Reg. Nº 17.400.296
 CBO 134 Rejido

CENTRO ANALÍTICO LTDA- Epp.CRG 17.5586.00569- RESPONSÁVEL TÉCNICO - JENER BATISTA DE OLIVEIRA CRQ 17400286

RUA SÁ E ALBUQUERQUE, 184 - MACEIÓAL | (82)3326-6020|

CENTRALANALITICA@CENTRALANALITICA.COM.BR | WWW.CENTRALANALITICA.COM.BR