

DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA LAGOA CÁRSTICA DE SANTO ANTÔNIO E DE SUA BACIA: SUBSÍDIOS PARA UMA GESTÃO SUSTENTÁVEL

Maria Giovana Parizzi¹; Rodrigo Sérgio de Paula¹; Julian Cardoso Eleutério², Vagner Braga Nunes Coelho³, André Felipe Rocha da Silva⁴, José Renato Pereira de Jesus⁵, Cleidinara Maria de Almeida⁶

Resumo – A Lagoa de Santo Antônio, localizada em Pedro Leopoldo (MG), é uma lagoa cárstica inserida na APA Carste de Lagoa Santa, em área de significativa vulnerabilidade ambiental e urbana. Nas últimas décadas, transformações acentuadas no uso do solo e a impermeabilização da bacia de contribuição direta alteraram drasticamente sua dinâmica hidrológica, provocando inundações recorrentes, assoreamento, contaminação por esgoto e perda de funções ecológicas. Este diagnóstico ambiental teve como objetivo caracterizar as condições hidrogeológicas, morfoestruturais, ecológicas e antrópicas da bacia da lagoa, subsidiando medidas de gestão sustentável. A metodologia envolveu análises multitemporais (1964–2023), campanhas de qualidade da água, batimetria, aerolevanteamento com drone, análise hidrológica e levantamento florístico e faunístico. Os resultados indicam que a lagoa passou a apresentar comportamento perene nas últimas décadas, com elevação dos níveis d'água mesmo em períodos secos, possivelmente devido à influência do aquífero Palmeira–Jaguara e à alteração do regime de drenagem natural. Propõe-se a delimitação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) diferenciadas conforme o grau de urbanização e recomenda-se o redesenho dos sistemas de drenagem e esgoto, além da implantação de parque linear e soluções baseadas na natureza na bacia de contribuição direta da lagoa. O estudo fornece base técnica para planejamento urbano ambiental e pode orientar políticas públicas em áreas cársticas vulneráveis.

Abstract – The Santo Antônio Lagoon, located in Pedro Leopoldo (MG), is a karstic lake within the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (APA), an environmentally sensitive and increasingly urbanized region. Over the past decades, intense land-use changes and surface sealing in the lagoon's direct catchment have disrupted its hydrological regime, leading to recurrent floods, sedimentation, water contamination, and loss of key ecological functions. This environmental assessment aimed to characterize the hydrogeological, morphostructural, ecological, and anthropic conditions of the basin, providing technical support for sustainable watershed management. The methodology included multitemporal image analysis (1964–2023), water quality surveys, bathymetry, UAV mapping, hydrological analysis, and biodiversity inventories. Results indicate that the lagoon has shown a perennial behavior in recent decades, with persistent high water levels even during dry seasons, likely influenced by the Palmeira–Jaguara aquifer system and modifications in drainage dynamics. The study proposes differentiated Permanent Preservation Areas (APPs) based on urbanization levels, redesign of drainage and sanitation systems, and creation of linear parks using nature-based solutions in the lake watershed. These findings offer a replicable technical basis for decision-making and urban planning in vulnerable karst environments.

Palavras-Chave – Diagnóstica Ambiental, Lagoa cárstica, Batimetria, Qualidade da água, Inundação.

¹Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Geologia e Programa de Pós- Graduação em Geologia – IGC/UFMG

² Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – EE/UFMG

³ Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Cartografia – IGC-UFMG

⁴ Universidade Federal de Minas Gerais –Discente do Programa de Pós-graduação em Eng. Hidráulica e Recursos Hídricos – UFMG

⁵ Universidade Federal de Minas Gerais –Departamento de Cartografia – IGC/UFMG

⁶ Universidade Federal de Minas Gerais – Discente do Curso de Engenharia Ambiental – EE/UFMG

trata-se de um calcário de granulometria fina a grossa, sendo cinza-escuro a preto quando fresco e cinza médio a claro quanto mais alterado (UHLEIN *et al.*, 2018).

Situada em área urbanizada e sob intensa pressão antrópica, a lagoa se insere em um contexto ambiental complexo, marcado pela expansão urbana desordenada, descaracterização das feições naturais e comprometimento de suas funções ecológicas e hidrológicas. Além disso há presença de três minerações de calcário em sua bacia de contribuição direta.

A ocupação crescente do entorno da lagoa tem promovido a impermeabilização da bacia de contribuição direta, alterando significativamente o regime de escoamento superficial. Muitos empreendimentos imobiliários aprovados recentemente direcionam, sem soluções sustentáveis intermediárias, todo o volume de águas pluviais captado em seus loteamentos diretamente para a lagoa. O espelho d'água da Lagoa de Santo Antônio apresenta um comportamento anômalo, com elevações acentuadas em períodos chuvosos, mesmo em eventos não extremos, e manutenção de altos níveis em períodos secos. As inundações periódicas têm se tornado cada vez mais recorrentes, afetando diretamente moradores da orla da lagoa e intensificando os processos de degradação ambiental (Parisi *et al.*, 2024).

Com o intuito de compreender os fatores que contribuem para a instabilidade hidrológica e subsidiar medidas de gestão e mitigação de impactos, foi finalizado, em 2024, o Diagnóstico Ambiental da Bacia da Lagoa de Santo Antônio (Parisi *et al.*, 2024). O estudo teve como principais objetivos avaliar e caracterizar a bacia em relação aos seus aspectos físicos, ao uso e ocupação do solo, aos impactos ambientais existentes, bem como estabelecer diretrizes para o uso racional do espaço e o manejo sustentável das águas.

2. METODOLOGIA

O diagnóstico foi conduzido por equipe interdisciplinar da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), que realizou análises integradas voltadas à compreensão da dinâmica ambiental local e à proposição de estratégias de gestão e recuperação da bacia. A metodologia combinou sensoriamento remoto, levantamentos de campo, análise de dados históricos e análise hidrológica da bacia de contribuição da lagoa.

Para a caracterização morfológica da lagoa e de sua bacia, foi utilizado levantamento aerofotogramétrico com drone (VANT), gerando ortofoto de alta resolução, base para análises de geoprocessamento, delimitação da bacia e geração de curvas de nível com equidistância de 1 metro. A partir dessas imagens, elaboraram-se o Modelo Digital de Elevação (MDE), as superfícies de curvatura e a análise morfométrica da bacia. A batimetria foi realizada em 2023 com ecobatímetro instalado em um barco a motor, permitindo estimar profundidade e variações volumétricas da lagoa.

A análise hidrológica e hidrogeológica incluiu o cálculo do balanço hídrico (Thorntwaite, 1948), análise de precipitação, registros de cheia e vazante e cotas topográficas. O mapeamento da morfologia cárstica foi feito com apoio do Google Earth® e da ortofoto produzida nesta pesquisa, permitindo identificar dolinas e uvalas e excluir depressões não cársticas. Também foram analisadas características do aquífero regional, como potenciométrica e dados hidroquímicos, com parâmetros comparados à Resolução CONAMA 357/2005.

Para a análise temporal da superfície da lagoa (1984–2023) foram usadas imagens Landsat (TM e OLI), processadas no Google Earth Engine com uso de índice espectral. Os dados foram tratados estatisticamente e integrados em ambiente SIG (QGIS® com GRASS 7.8.3), sistema UTM/WGS-84, zona 23S. Isso possibilitou a identificação de áreas de assoreamento, risco de inundação e trajetórias preferenciais de enxurradas.

Quatro campanhas de monitoramento da qualidade da água avaliaram parâmetros como fósforo total e *Escherichia coli*. As amostras de *E. coli* foram analisadas pelo laboratório do ICB/UFMG (método Colilert Idexx Quanti-Tray 2000); e demais parâmetros foram analisados no Laboratório de Geomorfologia do IGC/UFMG, conforme o *Standard Methods* (APHA, 2017). Temperatura e pH foram medidas in loco com sonda multiparâmetros Hanna HI8424.

Os usos e ocupação do solo foram definidos por interpretação visual de imagens e verificação em campo, com ênfase em áreas urbanizadas e fontes de poluição difusa e pontual.

3. RESULTADOS

A análise delimitou a bacia de contribuição direta, com 4,45 km² de extensão (Figura 2) para população estimada em 15 mil habitantes (IBGE, 2010), e a bacia hidrogeológica ampliada (Figura 3), com 14,47 km², incluindo áreas de recarga do sistema cárstico subterrâneo.



Figura 2. Delimitação da bacia de contribuição direta da Lagoa Santo Antônio. (Elaborado pelos autores com uso da ortofoto gerada por aerolevanteamento).

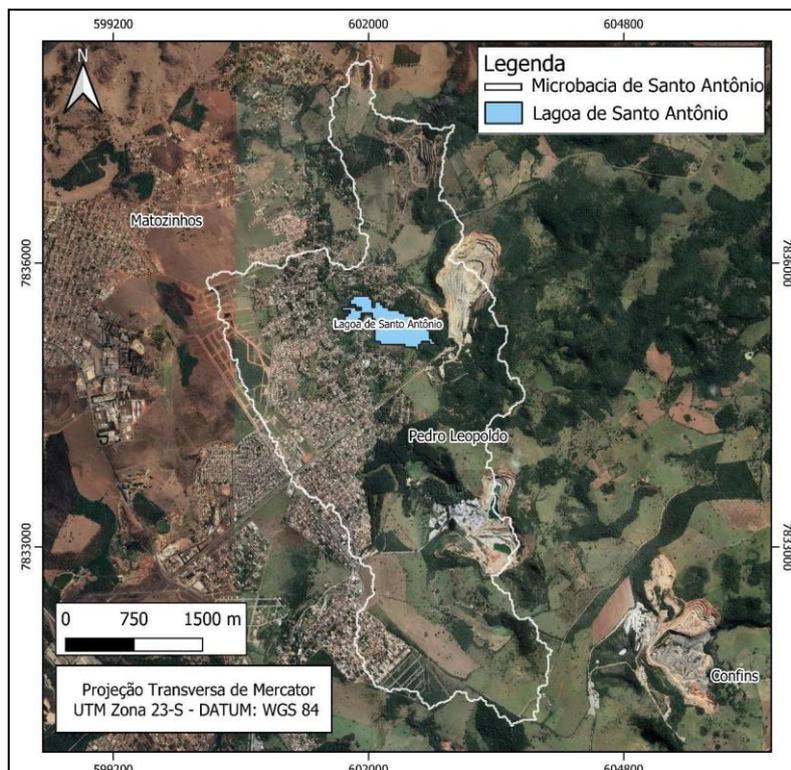


Figura 3. Localização da Lagoa de Santo Antônio e delimitação de sua bacia hidrogeológica. Elaborado pelos autores usando a fonte: Google Earth, 2022.

A batimetria (Figura 4) da lagoa revelou que em 2023 sua profundidade máxima era de 12 metros na porção próxima ao paredão de calcário localizado em sua margem sudeste. As fotografias aéreas de 1964 e 1965 mostram que a lagoa apresentava comportamento intermitente, alternando entre períodos secos e parcialmente alagados. No entanto, a perenidade observada nos últimos 39 anos indica uma alteração significativa em seu regime hidrológico, possivelmente relacionada à recarga do aquífero cárstico que sustenta a base da lagoa, evidenciada pela manutenção de seu nível mesmo em períodos de forte evapotranspiração. De acordo com Cvijić (1893) e Čalić (2011), formações depressivas com contornos fechados, circulares ou elípticos são classificadas como dolinas, enquanto aquelas que se ampliam e se conectam, formando unidades maiores compostas pela junção de uma ou mais dolinas, são denominadas uvalas. Com base na descrição de Cvijić (1893) e Čalić (2011) a morfologia da lagoa indica sua classificação em uvala, feição típica da coalescência de dolinas.

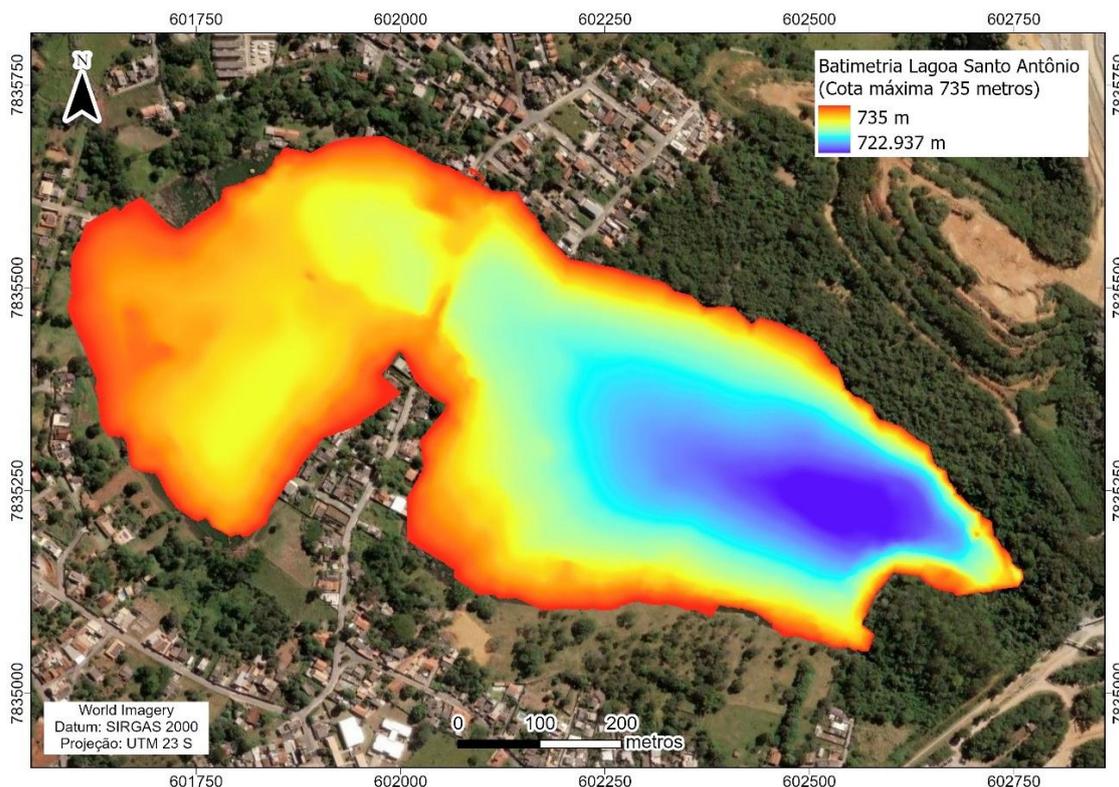


Figura 4. Batimetria da Lagoa Santo Antônio, realizada em 02/05/2023. (Elaborado por NEOGEO).

Outro aspecto central do diagnóstico envolveu o funcionamento dos sumidouros naturais localizados no paredão sudeste da lagoa. Registro técnico (Holcim, 2016) relata que, após um acordo com a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM) em 2001, a mineradora Holcim assumiu a responsabilidade pelo projeto e construção de um dique filtrante para conter sedimentos e preservar a funcionalidade dos sumidouros existentes no paredão. Pelo grau de fraturamento observado na área presume-se que seja possível a existência de mais de um sumidouro nas proximidades do paredão de calcário. Um deles possivelmente foi obstruído por blocos rochosos, observados em campo, depositados por antigas mineradoras ao longo da margem sudeste da lagoa.

Novas investigações deverão ser conduzidas para mapear a presença de condutos e confirmar sua função como sumidouros da lagoa, tão logo o nível da água baixe o suficiente para permitir o acesso à base do paredão de calcário localizado a leste da lagoa. Uma obstrução desses sumidouros compromete o escoamento natural, favorecendo o represamento das águas.

O processo de urbanização da bacia, iniciado antes da década de 1940, intensificou-se nas últimas décadas de forma desordenada e sem o devido planejamento. Isso pode ser evidenciado a partir da análise histórica das imagens de satélite. O crescimento horizontal da cidade foi marcado por deficiências na infraestrutura de coleta e tratamento de esgoto, bem como pela disposição inadequada de resíduos sólidos. As análises da qualidade da água da lagoa,

realizadas ao longo de quatro campanhas de monitoramento, evidenciaram contaminação por esgotos domésticos, especialmente nas proximidades das estações elevatórias e nas bordas mais urbanizadas. A presença de fósforo total em concentrações superiores aos limites estabelecidos para corpos hídricos de classe 2, aliada ao aumento de *Escherichia coli* em determinados pontos, indica a ocorrência de poluição difusa durante as estações mais chuvosas e poluição pontual decorrente de eventuais vazamentos da rede de esgoto frequentemente submersa durante os períodos de cheia da lagoa (Lopes et al., 2025).

A análise das dinâmicas de cheia e vazante da Lagoa de Santo Antônio, com base em dados históricos de 1984 a 2023, identificou padrões recorrentes e volumes críticos associados a diferentes cotas topográficas. Em 2023, a lagoa atingiu sua maior extensão desde o início da série histórica, servindo como referência para áreas de risco e planejamento urbano. Observaram-se variações volumétricas significativas mesmo sem aumento proporcional da precipitação, reforçando a hipótese de alterações na drenagem e na dinâmica subterrânea. As áreas mais afetadas por inundações coincidem com as porções mais rasas e urbanizadas da lagoa (735 a 738 m). O diagnóstico também apontou problemas de erosão, enxurradas e assoreamento, que comprometem a capacidade de retenção hídrica e a integridade do sistema. Mapas gerados por meio de análise hidrológica indicaram setores vulneráveis à expansão urbana desordenada (Figura 5), essenciais para orientar intervenções sustentáveis.

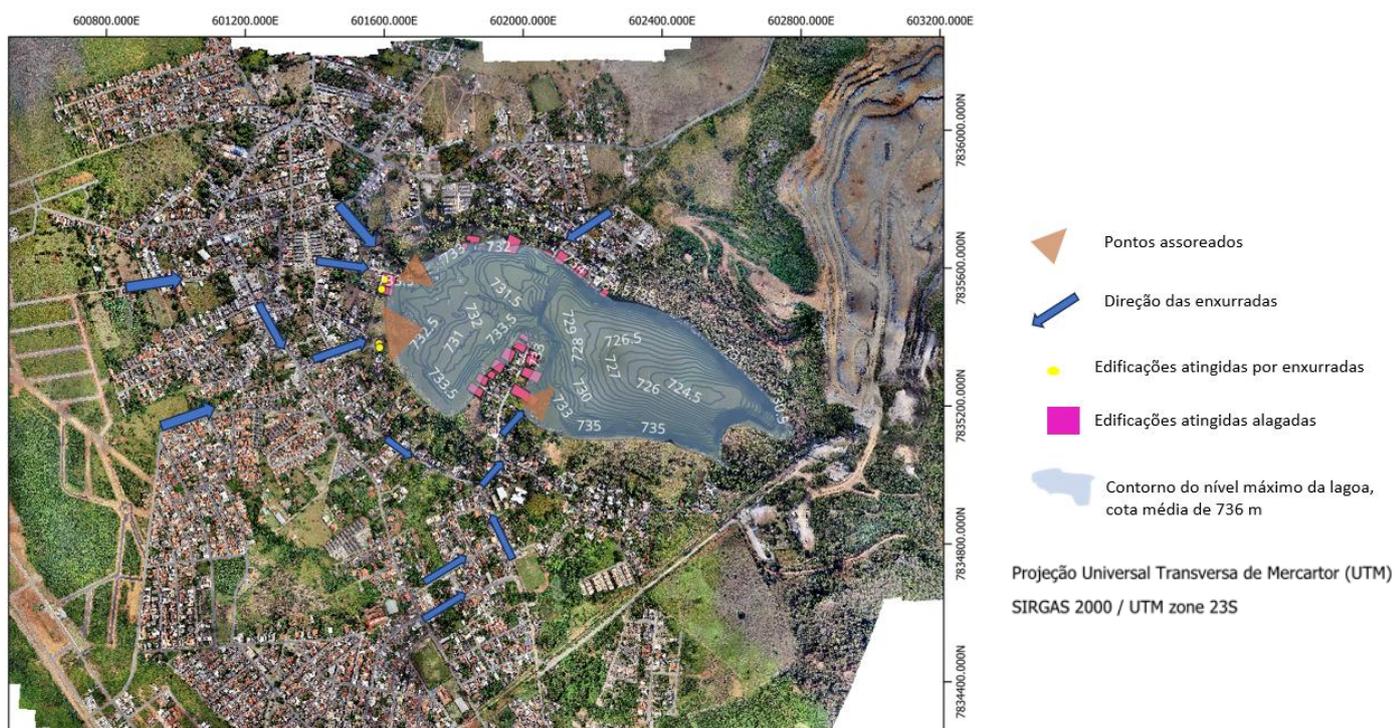


Figura 5. Direção das enxurradas e zonas de assoreamento. (Elaborado pelos autores sobre a ortofoto gerada por aerolevantamento).

O levantamento de dados hidrogeológicos e hidrológicos da Lagoa de Santo Antônio abrange o período de 1964 até o presente. Atualmente, a lagoa é classificada como perene e está situada em uma depressão cárstica. A perenidade foi constatada nos últimos 39 anos (1985 a 2023), durante os quais foram analisadas as variações no perímetro e na área da lagoa ao longo dos períodos seco e chuvoso de cada ano hidrológico. A elevação do nível da água em alguns períodos secos sugere alimentação pelo lençol freático, uma vez que, apesar da elevada taxa de evapotranspiração regional, o espelho d'água permaneceu elevado em diversos momentos (ver Figura 6). Esse comportamento indica uma possível conexão com o sistema aquífero local. Macedo e Alvarez (2021) demonstraram que a Lagoa do Sumidouro, também situada na APA Carste de Lagoa Santa, apresenta forte relação entre pluviometria e volume, evidenciando sua dependência do aquífero cárstico. A Lagoa de Santo Antônio mostra comportamento similar, com

perenidade mesmo em períodos secos, sugerindo recarga freática ativa e dinâmica compatível com outros sistemas cársticos da região.

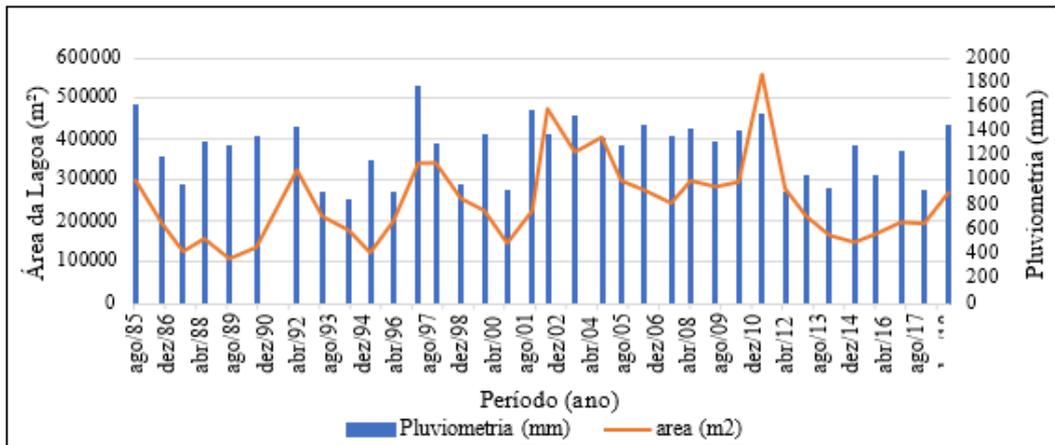


Figura 6. Variação da área relacionada com a pluviosidade ao longo dos anos. (Elaborado pelos autores).

A fotografia aérea de 1964 mostra a lagoa completamente seca, sem registros de atividades de mineração e com uma urbanização incipiente em seu entorno, caracterizada por poucas edificações. Outra fotografia aérea de 1965 retrata um cenário semelhante, exceto pelo fato de a lagoa estar parcialmente cheia. A oscilação entre períodos de seca e cheia da lagoa em um intervalo de apenas um ano indica um padrão de intermitência em um ambiente ainda consideravelmente preservado (Figura 7).

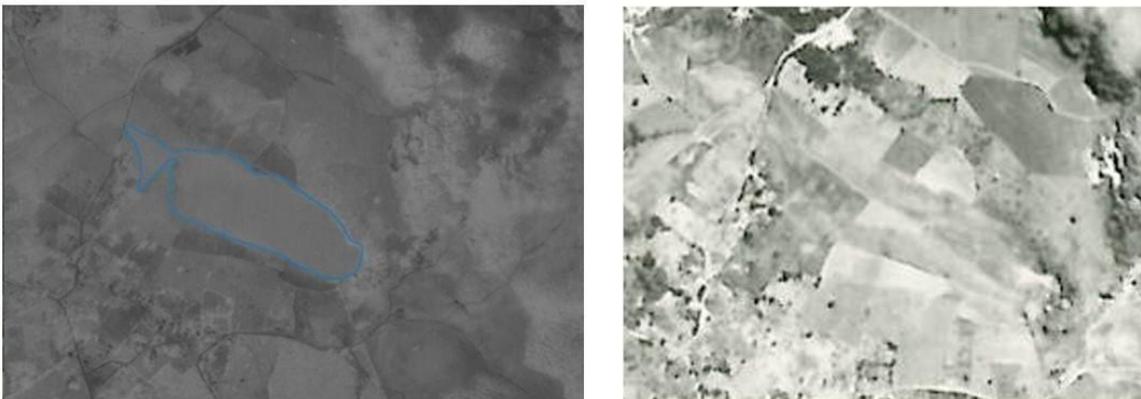


Figura 7. Fotografias aéreas da Lagoa de Santo Antônio: à esquerda, em 1965, parcialmente cheia; à direita, em 1964, completamente seca. (Fotografias cedidas pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB).

A última cheia da lagoa de 2022 até 2024 afetou 27 casas diretamente por inundação e o rápido escoamento superficial durante chuvas intensas afeta diretamente 4 casas edificadas na orla da lagoa (Figura 8 e Figura 9).



Figura 8. Fotografia de rua e casas alagadas pela cheia de 2023 da Lagoa de Santo Antônio. Nota-se poste e muro com marca da oscilação do nível de água.

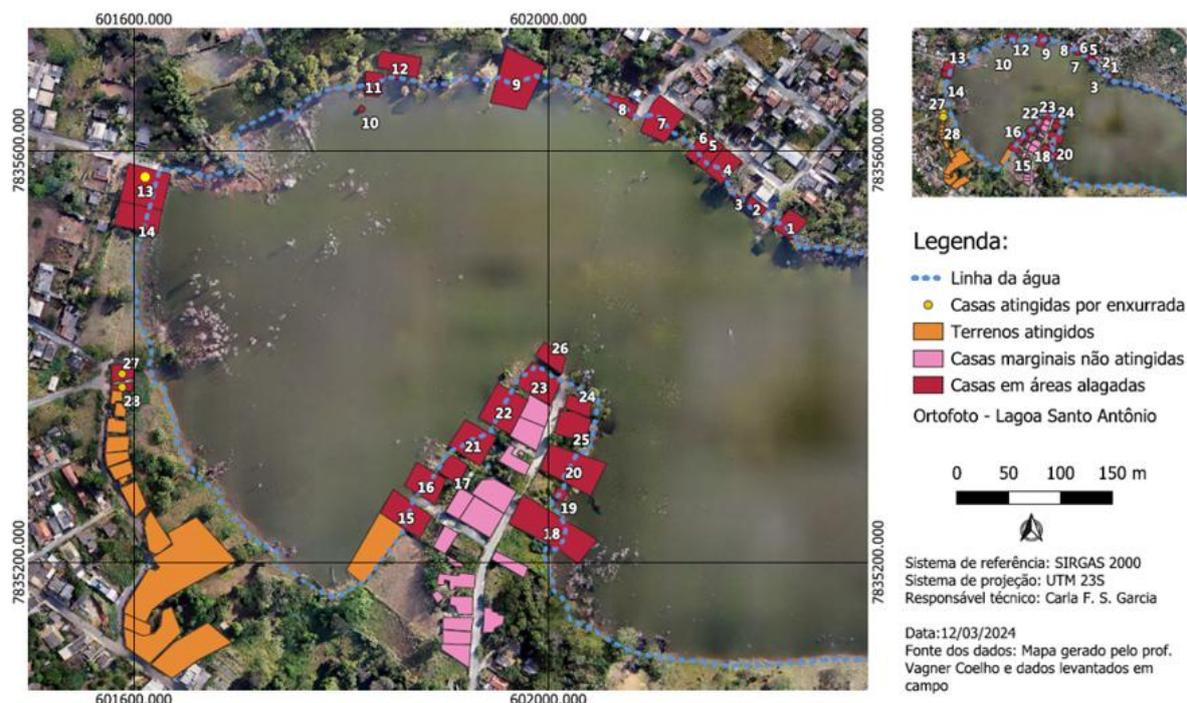


Figura 9. Mapa de localização das casas e terrenos impactados pela inundação na orla da lagoa de Santo Antônio (ano de 2023). Elaborado pelos autores sobre ortofoto gerada por aerolevanteamento.

Apesar dos danos ambientais relatados, a Lagoa de Santo Antônio e seu entorno ainda preservam elementos significativos do patrimônio natural local. O paredão calcário abriga espeleotemas (Figura 10) e feições típicas do relevo cárstico, assim como dolinas adjacentes, que apresentam formas bem desenvolvidas e relevância geomorfológica, conforme descrito por Köhler (1989).



Figura 10. Espeleotema encontrado em cavidade do paredão de calcário localizado na margem leste da Lagoa de Santo Antônio.

Conforme a Lei 12.651/2012 e suas alterações pela Lei 14.285/2021, as faixas marginais de Área de Preservação Permanente (APP) podem variar conforme a zona urbana ou rural e as diretrizes locais. Com base no diagnóstico da bacia da Lagoa de Santo Antônio, recomenda-se classificá-la como parcialmente urbana (lado oeste) e parcialmente rural (lados central e leste), conforme o Plano Diretor de Pedro Leopoldo (2016). Considerando sua área de 42 hectares, propõe-se APP de 30 metros na margem urbana e 50 metros na margem rural, a partir do nível máximo da cheia de 2023. A proposta de APP (Figura 11) deve ser avaliada pelos conselhos ambientais competentes, sem implicar em desapropriações, mas com maior controle sobre novas ocupações. Recomenda-se também a implantação de parque linear na faixa protegida e regulamentação do manejo de drenagens e esgoto a montante da lagoa.

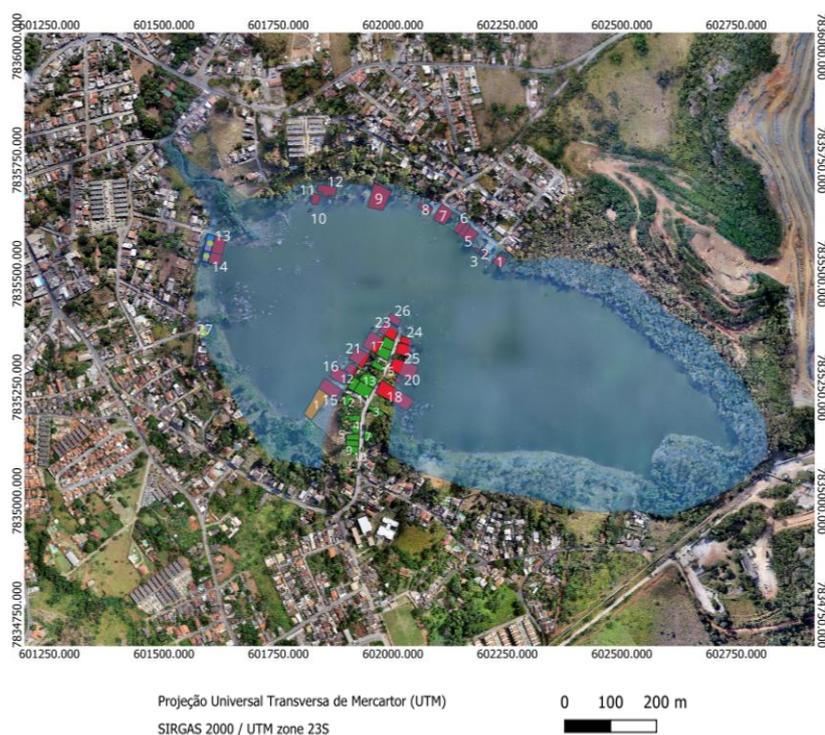


Figura 11. Sugestão de área (azul transparente) para abranger a Área de Preservação Permanente da Lagoa Santo Antônio. Em vermelho: casas atingidas pela inundação de 2023; rosa, casa não atingidas pela inundação de 2023; laranja: casa parcialmente atingidas pela inundação de 2023. (Imagem: ortofoto gerada pelo aerolevante de drone durante para a pesquisa).

Também é recomendado que a atual interceptação de esgoto da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) deve ser transferida para área não inundável, medida necessária para a proteção ambiental e a saúde pública local. No entanto, essa mudança deve ser acompanhada de soluções de tratamento para as residências que ficarão fora do alcance do novo sistema.

4. CONCLUSÕES

A Lagoa de Santo Antônio representa um sistema hídrico cárstico sensível, cujas funções ecológicas e hidrológicas vêm sendo significativamente alteradas por transformações no uso e ocupação do solo. O diagnóstico permitiu identificar mudanças no comportamento da lagoa, incluindo sua perenização nas últimas décadas e variações no nível d'água mesmo em períodos de baixa precipitação, sugerindo influência direta do aquífero local e da dinâmica de recarga subterrânea. Esse padrão é compatível com outros sistemas lacustres da APA Carste de Lagoa Santa, indicando a presença de recarga freática ativa sustentando a perenidade. O diagnóstico também permitiu a identificação de diversos problemas associados à ocupação urbana da bacia de contribuição direta à lagoa, trazendo pressões ao sistema natural e riscos à população e ao meio ambiente.

Com base nesse diagnóstico, foi possível também se recomendar: a delimitação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) com faixas variáveis, sendo 30 metros para a margem urbanizada e 50 metros para os trechos rurais, a partir do nível máximo da cheia de 2023, respeitando o Plano Diretor Municipal; a realocação da interceptação de esgoto da COPASA para áreas não inundáveis, aliada à implantação de soluções de tratamento localizadas, é medida prioritária para mitigar os impactos da poluição hídrica. As diretrizes futuras devem contemplar drenagem urbana sustentável com controle de vazões a montante, manejo integrado da bacia hidrográfica, manutenção de áreas de recarga e uso de soluções baseadas na natureza. Este diagnóstico oferece assim subsídios técnicos robustos para orientar ações de mitigação, planejamento urbano e conservação de ecossistemas cársticos ameaçados.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação Christiano Ottoni pelo suporte, à parceria da Associação Movimento Lagoa Viva, o apoio da Prefeitura de Pedro Leopoldo, à empresa NEOGEO pela equipe técnica e equipamentos para a batimetria, à comunidade do bairro Lagoa de Santo Antônio, ao Grupo Multissetorial, à COPASA, ao ICMBio, às empresas CSN e Mineração Fazenda dos Borges, ao Sr. Luís (barqueiro), estagiários e colegas da UFMG, cuja dedicação e entusiasmo foram essenciais para a realização deste estudo. Agradecimentos à PRPq/UFMG, à FAPEMIG e ao CNPq por incentivos à pesquisa de forma mais ampla.

REFERÊNCIAS

- APHA – American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Washington, DC: APHA, AWWA, WEF, 2017.
- DARDENNE, M.A. (1978) “*Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central*” in Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, Anais, 2, p. 597-610.
- ČALIĆ, J. (2011) “*Karstic uvalas: Morphology, distribution, genesis, significance, and classification*” in *Geomorphology*, v. 134, n. 3–4, p. 114–126. DOI: [10.1016/j.geomorph.2011.06.007](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.007)
- CVIJIĆ, J. *Das Karstphänomen: Versuch einer morphologischen Monographie*. Geographische Abhandlungen, 1893.
- DE PAULA, R. S.; VELÁSQUEZ, L. N. M. (2019) “*Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais*” in *Revista Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 2, p. 119–133. DOI: [10.14295/ras.v33i2.29252](https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29252).
- HOLCIM BRASIL S.A. *Histórico da evolução da Lagoa Santo Antônio localizada junto à mineração de calcário Holcim. Pedro Leopoldo – MG*. Pedro Leopoldo: Holcim, maio 2006. 15 p. [Relatório técnico interno].
- IBAMA; CPRM (1998) *APA Carste de Lagoa Santa: meio físico – Volume I*. Org. VIANA, H. S.; KOHLER, H. C.; TAVARES, V. P. Belo Horizonte: IBAMA / CPRM, 1998. 301 p.
- KOHLER, H. C. (1989) “*Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa*”, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- GOOGLE (2022). Programa Google Earth Pro. Imagem das imediações da APA Carste Lagoa Santa – MG. Acesso em: 12 jan. 2022.
- LOPES, F.W. A. *et al.* (2025) “*Qualidade de água da Lagoa Cárstica de Santo Antônio – Pedro Leopoldo (MG)*”. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 18., 2025, Belo Horizonte. Anais [...]. (no prelo).
- MACEDO, C. A. R. & ALVAREZ, G. C (2021) “*O desaparecimento da lagoa do sumidouro: Análise do comportamento hidrogeológico da lagoa ao longo dos últimos 40 anos*”, Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- PARISI, M. G. *et al.* Diagnóstico ambiental da Lagoa de Santo Antônio – Pedro Leopoldo/MG. Pedro Leopoldo: [s.n.], mar. 2024. Relatório de pesquisa. 208 p. Com colaboração técnica da empresa NEOGEO.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE PEDRO LEOPOLDO. *Lei Complementar nº 3.444, de 16 de setembro de 2016*. Institui o Plano Diretor do Município de Pedro Leopoldo e dá outras providências. Pedro Leopoldo, MG: Prefeitura Municipal, 2016. Disponível em: <https://www.pedroleopoldo.mg.gov.br>. Acesso em: 8 jun. 2025.
- SOARES, C. P. B.; ALVES, R. R.; SCHMIDT, I. B. *Inventário florestal*. Viçosa: Editora UFV, 2010.
- THORNTHWAITE, C. W. (1948) “*An approach toward a rational classification of climate*” in *Geographical Review*, v. 38, n. 1, p. 55–94.
- UHLEIN, A.; CAXITO, F. A.; SANGLARD, J. C. D.; UHLEIN, G. J.; SUCKAU, G. L. (2018). “*Estratigrafia e tectônica das faixas neoproterozoicas da porção norte do Cráton do São Francisco*” in *Geonomos*, v. 19, n. 12 p. 8-31.