

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

ECOS DO SUBFLUXO: percolação, vegetação de topo e equilíbrio ecológico

Ibirité, MG

2025



Flávia Moreira Gomes

ECOS DO SUBFLUXO: percolação, vegetação de topo e equilíbrio ecológico

Relatório apresentado à 9ª FEMIC - Feira
Mineira de Iniciação Científica.

Ibirité, MG
2025



RESUMO

A implementação de um projeto para identificação da percolação de água subterrânea é de extrema importância para compreender a dinâmica hídrica em ecossistemas sensíveis, como os vales de morros, onde a relação entre a vegetação de topo e o fluxo de água no solo influencia diretamente a disponibilidade hídrica e a preservação da biodiversidade local. Utilizando sensores que monitoram umidade do solo, condutividade elétrica, fluxo de água e pressão de poros, é possível detectar não apenas a presença, mas também o movimento e a quantidade de água percolando pelas camadas subsuperficiais. A integração com sistemas de automação, como Arduino, permite o monitoramento em tempo real, coleta de dados contínua e análise precisa do comportamento hídrico em diferentes condições ambientais. Esse tipo de projeto é essencial para estratégias de conservação, pois possibilita compreender como a vegetação de topo de morro contribui para a recarga de aquíferos e a manutenção de micro-habitats, apoiando decisões de manejo sustentável e preservação da biodiversidade do vale. Além disso, os dados obtidos podem subsidiar ações preventivas contra erosão, desertificação e degradação do solo, promovendo práticas de restauração ambiental. Assim, o projeto não apenas gera conhecimento científico, mas também oferece ferramentas práticas para gestão hídrica e conservação ecológica, fortalecendo a resiliência do ecossistema e garantindo a sustentabilidade da paisagem..

Palavras-chave: Fluxo subterrâneo, Conservação ecológica, Sustentabilidade hídrica, Vegetação de topo de morro



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 JUSTIFICATIVA	10
3 OBJETIVO GERAL	11
3.1 Objetivo geral	11
3.2 Objetivos específicos	12
4 METODOLOGIA	12
5 RESULTADOS ESPERADOS	16
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	17
REFERÊNCIAS	11



1 INTRODUÇÃO

A presença de aquíferos subterrâneos exerce um papel essencial para a manutenção da biodiversidade em ecossistemas de montanha e de vale, ao atuar como reservatórios persistentes que sustentam nascentes, solos úmidos e cursos d'água, mesmo em períodos de estiagem. Em regiões como a Serra do Rola-Moça, estes sistemas subterrâneos alimentam tanto rios perenes quanto intermitentes, que por sua vez suportam fauna e flora adaptadas a condições contínuas ou sazonais de disponibilidade hídrica. Em diversas pesquisas, a água subterrânea é reconhecida como um “ecossistema keystone” invisível, dado seu impacto direto e indireto sobre a biodiversidade de superfície (Vilanova, 2025; Griebler & Avramov, 2015). A conservação desses reservatórios é, portanto, um elemento estratégico para preservar não apenas a fauna aquática ou terrestre, mas os processos ecológicos que garantem interações entre habitats de topo, encosta e vale.

Esses aquíferos influenciam ainda o equilíbrio e a resiliência dos ecossistemas terrestres adjacentes, ao liberar água de forma gradual, contribuindo para manter a umidade do solo, sustentar vegetação em encostas e garantir micro-habitats críticos para espécies sensíveis à variação hídrica (Oliveira et al., 2015; Abbott et al., 2019). Em particular no contexto de montanha, onde a topografia e a cobertura vegetal favorecem a infiltração e o armazenamento de água subterrânea, a presença desses reservatórios fortalece a conectividade ecológica entre o topo, os vales e as nascentes. A interrupção desse funcionamento, seja por extração, desmatamento ou urbanização, acarreta em impactos que se estendem de comunidades microbianas da zona hiporéica até grandes mamíferos e aves dependentes de água corrente.

Adicionalmente, esses sistemas subterrâneos desempenham um papel regulador em relação a eventos extremos, como secas ou variações abruptas no regime de chuvas. Quando bem preservados, permitem que cursos de água mantenham um fluxo mínimo mesmo em épocas secas, reduzindo a vulnerabilidade de ecossistemas e espécies associadas (Caylor et al., 2024; Griebler & Avramov, 2015). Isso evidencia que os aquíferos não são apenas recursos para



consumo humano, mas componentes estruturais da integridade ecológica de paisagens com morros, montanhas e vales.

Na Serra do Rola-Moça, a caracterização hidrogeológica revela formação de aquíferos estruturados em fraturas e poros de rochas antigas, com alta capacidade de armazenamento e transmissão de água. Tais condições são típicas de regiões denominadas “caixa d’água”, onde o relevo, a rocha matriz, a cobertura vegetal e a recarga hídrica se combinam para gerar retenção e liberação gradual de água ao longo do tempo. A heterogeneidade geológica, envolvendo formações como a Moeda e a Cauê, favorece aquíferos profundos que alimentam nascentes e contribuem para sistemas hídricos permanentes ou semi-permanentes (Vilanova, 2025; Griebler & Avramov, 2015). Essa estrutura ressalta o valor da região como reservatório natural para abastecimento e manutenção ecológica.

Estudos indicam que os volumes armazenados podem ser extremamente relevantes, considerando os dados locais de captação e as estimativas de recarga. A combinação entre a profundidade do reservatório, a geometria fracturada da rocha e a recarga lenta, porém contínua, faz da Serra do Rola-Moça um exemplo emblemático de paisagem de montanha com função hídrica estratégica. Essa estrutura justifica sua denominação popular de “caixa d’água do Brasil”, pois integra abastecimento urbano, manutenção ecológica e recarga sustentada em escala de bacia hidrográfica (Moura et al., 2024; Segadelli, 2021).

Contudo, a recarga desses aquíferos está intimamente ligada à cobertura vegetal, à topografia e ao tipo de solo presentes nos topos de morro, encostas e vales. O desmatamento dessas regiões reduz drasticamente a infiltração da água da chuva, aumenta o escoamento superficial e compromete o processo de recarga (Oliveira et al., 2015; Rufino et al., 2025). Em consequência, a disponibilidade de água armazenada diminui, o que impacta diretamente a vazão das nascentes e cursos de água que deles dependem, alterando os regimes hídricos naturais e colocando em risco a biodiversidade que deles depende.



Além disso, a retirada ou degradação da vegetação de topo diminui a estabilidade do solo, aumenta a erosão, altera o microclima local e afeta a dinâmica de infiltração e percolação da água, reduzindo a recarga hídrica e comprometendo a integridade dos reservatórios subterrâneos (Gomes et al., 2021; Griebler & Avramov, 2015). Tais alterações provocam uma cascata de efeitos ecológicos, pois a menor recarga significa que menos água está disponível para as nascentes, menos água sustenta rios intermitentes ou perenes, e menos conectividade hídrica é mantida entre montanha e vale.

A falta de recarga adequada acarreta consequências severas para a biodiversidade. A redução de vazão ou o seccionamento temporário de cursos de água afetam a reprodução de espécies aquáticas, o ciclo de vida de macroinvertebrados e peixes, bem como alteram as condições para plantas ripárias e vegetação de encosta que dependem da umidade do solo sustentada pelas águas subterrâneas (Moura et al., 2024; Caylor et al., 2024). Em ecossistemas de montanha, onde os valores de diversidade podem ser particularmente elevados, tais perdas são duplamente críticas porque combinam especialização ecológica com fragilidade ambiental.

Além disso, a menor disponibilidade de água pode alterar a dinâmica de nutrientes, reduzir a fertilidade do solo, provocar estresse hídrico em comunidades vegetais e favorecer a invasão de espécies oportunistas que toleram secas, diminuindo a riqueza funcional e reduzindo a resiliência da paisagem frente às mudanças (Griebler & Avramov, 2015; Moura et al., 2024). Portanto, a preservação da recarga hídrica e dos aquíferos subterrâneos é um componente estratégico para a manutenção da biodiversidade e da funcionalidade ecológica dos ecossistemas de montanha e vale.

Os serviços ecossistêmicos associados aos aquíferos e sistemas de água subterrânea são variados e cruciais para o equilíbrio ambiental e a sociedade. Entre eles estão o abastecimento de água potável, a regulação do ciclo hidrológico, a mitigação de secas e enchentes, o suporte à vegetação ripária e à biota aquática, e o sequestro de carbono. Em revisões recentes, foram identificados serviços específicos prestados por ecossistemas dependentes de água subterrânea os *Groundwater-Dependent Ecosystems*- GDEs, que vão desde a regulação



hídrica à manutenção da biodiversidade e da qualidade da água (Griebler & Avramov, 2015; Dí az et al., 2018). Reconhecer e valorizar esses serviços permite integrar a conservação dos aquíferos à gestão ambiental e à formulação de políticas públicas.

A interligação entre os sistemas de água subterrânea, as nascentes e os cursos de água perenes ou intermitentes é outro aspecto crucial. Aquíferos de montanha liberam água gradualmente, alimentando rios mesmo em períodos de estiagem, favorecendo a manutenção de habitats aquáticos e terrestres que dependem desse fluxo contínuo. A interrupção dessa liberação por meio de extração excessiva, bloqueio de recarga ou urbanização pode transformar rios originalmente perenes em intermitentes, com significativo impacto ecológico (Caylor et al., 2024; Moura et al., 2024). Esse processo afeta não apenas a biodiversidade, mas a fertilidade dos vales, as zonas úmidas e a integridade das paisagens fluviais adjacentes.

Os impactos humanos de uma exploração desenfreada dos aquíferos e a crise climática ampliam ainda mais os desafios. A escassez de água ocasionada pela sobre-exploração e pela redução da recarga compromete o abastecimento humano, agrícola e industrial, gerando vulnerabilidades socio-econômicas significativas (Rufino et al., 2025; Caylor et al., 2024). Em contexto de aquecimento global, a diminuição da recarga e a degradação dos reservatórios subterrâneos agravam os efeitos da seca, elevam os riscos de colapso hídrico e ameaçam a segurança hídrica de comunidades inteiras.

Além disso, quando aquíferos perdem capacidade ou qualidade, o impacto se estende à saúde humana, à agricultura, à indústria e à conservação ambiental. Os ecossistemas deixam de exercer plenamente sua função reguladora, na moderação de cheias, na retenção de carbono e na manutenção do micro-clima local, o que contribui para o agravamento da crise climática (Griebler & Avramov, 2015; Caylor et al., 2024). Assim, garantir a integridade dos aquíferos subterrâneos, promover a recarga hídrica e conservar a vegetação de topo e encosta se configuram como estratégias centrais para a sustentabilidade ambiental e para a resiliência de paisagens de montanha e vale.



A aplicação de tecnologias de sensoriamento e automação em sistemas naturais como aquíferos subterrâneos representa uma virada metodológica essencial para a pesquisa hidrológica e a gestão ambiental. O emprego de sensores ultrassônicos, microfones geofonados, redes de comunicação sem fio e plataformas de IoT permite a coleta contínua de dados em alta frequência, ao contrário das medições pontuais tradicionais que dependem de visitas de campo, poços manuais e amostragens esporádicas. Conforme observado por Aderemi (2021), a adoção de IoT e redes de sensores remotos aprimora decisivamente a gestão de recursos subterrâneos, conferindo maior eficiência na detecção de mudanças no nível ou na recarga dos aquíferos. Esse salto tecnológico é diretamente vinculado à pergunta norteadora do projeto, porque somente através da automação e da sensorização contínua será possível atingir a sensibilidade temporal necessária para a detecção precoce esperada nas hipóteses.

Além da frequência de dados, a automação e a integração de sistemas permitem a análise em tempo real e redução de erros humanos ou logísticos, favorecendo uma resposta de gestão mais proativa. Estudos demonstram que sensores ultrassônicos adaptados podem medir variações de nível de água com acurácia elevada e a custos muito menores que sistemas tradicionais (S Kang et al., 2021). Essa capacidade é crucial para a conservação dos aquíferos subterrâneos, sobretudo em contextos de declínio de recarga ou exploração excessiva. No âmbito do seu projeto, a hipótese de que a aplicação de sensores não invasivos permite detectar precocemente a diminuição dos volumes subterrâneos ganha respaldo técnico: a automação e os sensores oferecem um caminho viável para quantificar e monitorar de modo contínuo o armazenamento hídrico e assim gerar indicadores rápidos para ação ambiental.

Finalmente, a adoção dessas tecnologias para monitoramento e gestão está diretamente ligada à conservação de serviços ecossistêmicos e à sustentabilidade da paisagem de montanha e vale que o projeto aborda. Ao vincular sensorização à tomada de decisão, alertas automáticos de recarga crítica ou de declínio de nível, cria-se uma ponte entre a ciência dos aquíferos e a prática de conservação hídrica e ecológica. Conforme Davis et al. (2023) apontam, o avanço de “autonomous sensing” para ambientes subterrâneos pode permitir mapear processos de



recarga, armazenamento e descarga em tempo quase real, transformando o monitoramento em instrumento de gestão. Em seu estudo, essa abordagem tecnológica será um elemento estratégico para subsidiar ações de manejo, restauração de vegetação de topo e regulação de captações, ligando diretamente à hipótese de que o uso integrado de sensores fortalece políticas de conservação. Assim, a tecnologia não é mero acessório, mas componente central para responder à pergunta de pesquisa: em que medida sensores não invasivos baseados em ultrassom e monitoramento acústico contínuo podem quantificar variações de armazenamento e detectar precocemente a redução da recarga dos aquíferos subterrâneos da Serra do Rola-Moça, subsidiando ações de conservação e manejo hídrico para a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos de montanhas e vales?; e materializar os objetivos do projeto.

2 JUSTIFICATIVA

Os aquíferos subterrâneos representam uma das principais fontes de água doce utilizável no planeta e constituem sistemas hidrológicos essenciais para o abastecimento público, manutenção de ecossistemas e equilíbrio hidrológico de bacias. No entanto, em regiões urbanizadas, a crescente demanda por água, combinada ao aumento da impermeabilização do solo e à deficiência no planejamento territorial, tem intensificado processos de redução de recarga e rebaixamento dos níveis piezométricos. Essa situação coloca em risco a disponibilidade futura de água subterrânea e consequentemente os serviços ecossistêmicos associados.

Apesar da relevância desses sistemas, o monitoramento quantitativo dos aquíferos ainda se baseia majoritariamente em métodos tradicionais, como perfuração de poços e medições diretas com equipamentos inseridos na água. Tais técnicas, além de possuírem alto custo e demandarem mão de obra especializada, apresentam caráter pontual e invasivo, não permitindo acompanhamento contínuo da dinâmica subterrânea. Com isso, eventos críticos como diminuição acelerada do volume armazenado ou alteração na estrutura física do aquífero podem passar despercebidos até que os efeitos se tornem irreversíveis.



Nesse contexto, tecnologias emergentes de monitoramento não invasivo, como o uso de sensores ultrassônicos e dispositivos de escuta geofísica, tornaram-se alternativas viáveis e inovadoras. Esses sensores possibilitam a obtenção de dados indiretos sobre profundidade, variação volumétrica e possíveis anomalias estruturais nos aquíferos, sem necessidade de perfurações adicionais. Com integração a plataformas digitais e comunicação remota, esses sistemas permitem coleta automatizada e análise contínua dos indicadores hidrológicos, favorecendo a prevenção de impactos ambientais e uma gestão mais eficiente.

As hipóteses desta pesquisa sustentam que a aplicação de sensores não invasivos, aliada a tecnologia IoT, pode reduzir custos operacionais frente aos métodos tradicionais de monitoramento; identificar precocemente a diminuição dos volumes subterrâneos, reduzindo riscos de crise hídrica; fortalecer políticas de conservação ao ampliar o acesso a dados confiáveis e em tempo real.

Assim, este estudo se justifica por contribuir diretamente para a segurança hídrica urbana e também para a manutenção dos ecossistemas terrestres dependentes da água subterrânea. Ao propor um sistema inovador, sustentável e tecnicamente embasado, o projeto oferece suporte para tomada de decisão preventiva, alinhando conservação ambiental, ciência aplicada e avanço tecnológico em favor da proteção dos aquíferos subterrâneos.

3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estabelecem metas claras para o monitoramento não invasivo dos aquíferos subterrâneos, orientando as ações de sensoriamento, automação e análise de dados, e permitindo avaliar resultados que subsidiem a conservação, gestão hídrica e preservação da biodiversidade na Serra do Rola-Moça.

3.1 Objetivo geral

Desenvolver e validar um sistema de monitoramento não invasivo, utilizando ultrassom e sensores acústicos, para detectar precocemente variações no armazenamento e recarga dos



aquíferos subterrâneos da Serra do Rola-Moça, contribuindo para a conservação da biodiversidade e para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

3.2 Objetivos específicos

- Implementar e avaliar um sistema de monitoramento não invasivo de aquíferos subterrâneos, utilizando sensores ultrassônicos e acústicos para detectar perda de recarga, redução de volume e desempenho em comparação com métodos convencionais.
- Interpretar resultados com foco em conservação, apontando riscos para rios perenes, biodiversidade e segurança hídrica urbana.
- Propor recomendações de manejo, como áreas prioritárias de restauração de vegetação e limites de exploração hídrica.

4 METODOLOGIA

A pesquisa será conduzida em três etapas principais: seleção e caracterização da área de estudo, desenvolvimento da solução tecnológica, e validação dos dados gerados pelos sensores em comparação com métodos hidrológicos tradicionais. Inicialmente, serão mapeadas áreas de recarga e setores próximos a nascentes urbanas, ambientes mais suscetíveis ao rebaixamento do nível freático devido à impermeabilização do solo e redução da infiltração. Para isso, serão utilizados dados pré-existentes de levantamento hidrogeológico municipal, topografia e registros de poços outorgados, permitindo uma definição espacial estratégica dos pontos de monitoramento.

Em seguida, será desenvolvida uma rede experimental de sensoriamento composta por sensores ultrassônicos e sensores acústicos não invasivos. O sensor ultrassônico selecionado (modelo HC-SR04, de baixo custo e com precisão de até 3 mm para distâncias entre 2 e 400 cm) será utilizado para monitorar o nível da água em poços de monitoramento ou caixas de inspeção associadas aos aquíferos rasos. Paralelamente, serão instalados microfones piezoelétricos acústicos de superfície, *contact microphones*, capazes de captar variações



vibracionais de ondas acústicas transmitidas pelo meio rochoso ou saturado, possibilitando inferências sobre vazios, fluxo subterrâneo e oscilações volumétricas do aquífero. Ambos os sensores serão integrados a microcontroladores da família Arduino Uno, com módulos de transmissão de dados via rede sem fio LoRa e/ou Wi-Fi, garantindo envio contínuo e remoto das informações para uma plataforma digital.

A instalação dos sensores será realizada com mínima intervenção no solo, fixando-os em estruturas existentes, como tampões de poços de monitoramento, para evitar escavações e respeitar o caráter não invasivo do método. Para registro ambiental complementar, serão coletados dados meteorológicos (precipitação), hidrológicos (vazão e nível de nascentes) e parâmetros físico-químicos pontuais da água, que servirão como referência para validação cruzada. Os dados ultrassônicos serão processados por algoritmos que convertem tempo de propagação do pulso sonoro em nível da água, enquanto os dados acústicos serão analisados quanto a padrões espectrais correlacionados ao dinamismo hídrico subterrâneo.

A etapa final consistirá na análise comparativa entre os dados obtidos pelos sensores e as medidas tradicionais, com foco na detecção precoce de redução do volume armazenado nos aquíferos. Técnicas estatísticas e de séries temporais serão aplicadas para verificar tendências e sensibilidade temporal do sistema proposto, avaliando sua capacidade de identificar fenômenos que métodos convencionais só detectariam em estágios mais avançados. O desempenho da solução será analisado considerando precisão, confiabilidade, custo e aplicabilidade para expansão em escala urbana, contribuindo para o aprimoramento da gestão das águas subterrâneas.

O custo estimado do protótipo é reduzido, reforçando sua viabilidade: sensores ultrassônicos (R\$ 15,00 a R\$ 30,00 cada), sensores acústicos piezoelétricos (R\$ 10,00 a R\$ 25,00 cada), microcontroladores Arduino (R\$ 60,00 a R\$ 100,00), módulos de comunicação LoRa ou Wi-Fi (R\$ 30,00 a R\$ 80,00), mais cabos e estruturas de fixação simples. Assim, o sistema proposto apresenta potencial de uso escalável em monitoramento contínuo e preventivo de aquíferos subterrâneos urbanos com baixo custo operacional e manutenção simplificada.



TABELA 1- TABELA DE INDICADORES AMBIENTAIS

Indicador	Tipo	Descrição	Unidade / Método	Frequência	Limiar / Interpretação (sugestão)
Nível ultrassônico (tempo de voo)	Sensor (ultrassom)	Estimativa indireta do nível/posição da superfície hídrica em poço/caixa	ms → convertido em m (HC-SR04 ou similar)	contínuo / 5–15 min	Queda > 10% vs. baseline por 7 dias → alerta; queda abrupta > 20% em 48h → alerta crítico
Assinatura acústica — amplitude RMS	Sensor (geofone)	Energia do sinal associado a fluxo em fraturas/conduitos	dB RMS / análise espectral	contínuo / 5–15 min	Redução sustentada > 15% vs. baseline → possível redução de fluxo
Assinatura acústica — banda frequencial	Sensor (geofone)	Mudança em frequências (resonâncias) associadas a vazios/fluxo	Hz / espectrograma	contínuo / 5–15 min	Aparição de novas bandas ou deslocamento de pico → investigar alteração estrutural
Nível piezométrico	Hidrológico (referência)	Nível estático em poços observacionais (medição direta)	m (piezômetro)	diário/semana	Queda contínua acima do desvio sazonal (p.ex. >2σ) → alerta
Vazão da nascente	Hidrológico	Vazão que sai da nascente ligada ao aquífero	L/s (hadrômetros)	diário/semana	Redução > 20% na estação seca vs. média histórica → investigação
Precipitação acumulada	Ambiental	Entrada potencial que influencia recarga	mm (pluviômetro)	hora/diária	Precipitação abaixo do normal por 30 dias reduz recarga; correlação com resposta do nível
Umidade do solo (superfície)	Sensor	Indica infiltração disponível para recarga	% (sensor capacitivo)	diária	Queda sustentada → menor infiltração; correlar com recarga observada
Temperatura do solo/água	Ambiental/Sensor	Afeta velocidade sonora/atenuação e processos hidrológicos	°C	contínuo/horária	Variações extremas podem alterar leituras — usar em correção de sinal
Condutividade elétrica (salinidade)	Qualidade da água	Indicador de concentração iônica / contaminação	µS/cm (sonda)	semanal/mensal	Aumento súbito → contaminação superficial ou intrusão
Turbidez	Qualidade da água	Partículas em suspensão — assoreamento/erosão	NTU (turbidímetro)	semanal/mensal	Aumento >50% vs. baseline → erosão / aporte superficial
Oxigênio dissolvido (OD)	Qualidade da água	Saúde de ecossistemas aquáticos	mg/L	semanal/mensal	Queda abaixo de limites de suporte biológico (dependente da espécie local) → impacto ecológico



Nitrato/Phosphato	Qualidade da água	Indicador de poluição difusa (fertilizantes/esgoto)	mg/L (análise laboratorial)	mensal/bimestral	Valores acima dos padrões de potabilidade/ambientais → contaminação
Cobertura vegetal (NDVI)	Uso do solo / paisagem	Índice de vegetação para avaliar recarga potencial	NDVI (imagens sat.) / % cobertura	mensal/trimestral	Redução significativa → menor infiltração e risco de perda de recarga
Índice de biodiversidade aquática	Ecológico	Riqueza / abundância de macroinvertebrados ou espécies-chave	# espécies / índice (IBR, BMWP adaptado)	semestral/ano	Declínios correlacionados com redução de vazão/qualidade → impacto ecológico
Taxa de variação do armazenamento	Integrado	Estimativa de variação volumétrica do aquífero (modelo + sensores)	m ³ /dia ou %/mês	derivado (diário/semanal)	Queda média >5%/mês ou tendência declinante → plano de contenção

Tabela de indicadores ambientais pensada para avaliar o comportamento dos aquíferos e os impactos nos ecossistemas e na gestão, ligada diretamente ao seu sistema de sensores ultrassônicos e acústicos. Cada indicador traz: tipo, descrição, unidade/método (arquivos do autor)

Fluxograma da Metodologia

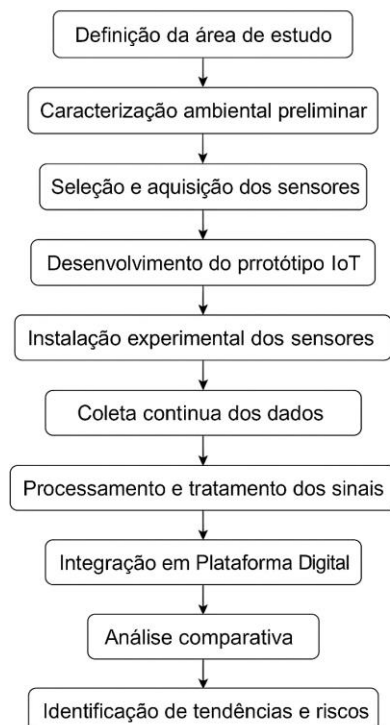


Figura 1 - Fluxograma da Metodologia



5 RESULTADOS ESPERADOS

A implementação do protótipo de sensores ultrassônicos e acústicos para monitoramento de aquíferos subterrâneos urbanos visa fornecer dados precisos e em tempo real sobre a qualidade e disponibilidade da água subterrânea em diferentes contextos ambientais. Espera-se que os resultados obtenham evidências científicas robustas sobre os impactos da urbanização na recarga e qualidade dos aquíferos, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos hídricos urbanos.

O protótipo permitirá a identificação precisa de zonas de recarga e áreas de armazenamento de água subterrânea em ambientes urbanos e periurbanos. A combinação de sensores ultrassônicos e acústicos possibilitará a detecção de variações no nível do lençol freático e na composição da água, indicando potenciais zonas de recarga ou áreas suscetíveis à contaminação. Estudos anteriores demonstram que a urbanização intensifica o processo de impermeabilização do solo, reduzindo a capacidade de infiltração e comprometendo a recarga dos aquíferos (Prates, 2012).

A análise dos dados obtidos pelos sensores permitirá a avaliação da qualidade da água subterrânea em diferentes áreas. Espera-se que áreas com vegetação nativa, como a Serra do Rola-Moça, apresentem água de boa qualidade, com baixos níveis de turbidez e condutividade elétrica. Em contraste, áreas urbanas desmatadas podem apresentar sinais de contaminação, como aumento da turbidez e da condutividade elétrica, devido à presença de resíduos urbanos e escoamento superficial. A monitorização contínua permitirá a detecção precoce de alterações na qualidade da água, facilitando a implementação de medidas corretivas.

A comparação entre áreas preservadas e urbanizadas permitirá identificar zonas críticas onde a urbanização compromete a recarga dos aquíferos. A análise espacial dos dados ajudará a delinear áreas com maior potencial de recarga, subsidiando políticas públicas de preservação e recuperação ambiental. A integração dos dados com sistemas de informação geográfica



(SIG) possibilitará a criação de mapas temáticos que evidenciem as zonas de recarga e as áreas suscetíveis à contaminação.

A eficácia do protótipo será validada por meio da comparação dos dados obtidos com informações de monitoramento tradicionais, como poços de monitoramento e análises laboratoriais. Espera-se que o protótipo apresente alta precisão e confiabilidade, demonstrando seu potencial como ferramenta de monitoramento contínuo e de baixo custo. A validação do protótipo contribuirá para a sua adoção em larga escala em programas de monitoramento de aquíferos urbanos.

Os resultados esperados fornecerão subsídios científicos para a formulação de políticas públicas voltadas à gestão sustentável dos recursos hídricos urbanos. A identificação de áreas de recarga e zonas críticas permitirá a implementação de estratégias de conservação e recuperação ambiental, visando garantir a disponibilidade e qualidade da água subterrânea para as gerações futuras. A pesquisa contribuirá para o avanço do conhecimento sobre a dinâmica dos aquíferos urbanos e para a promoção da segurança hídrica nas cidades.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Espera-se que o desenvolvimento e a implementação do sistema tecnológico proposto, baseado em sensores ultrassônicos e acústicos integrados à análise de indicadores ambientais, possibilite a identificação precisa de corpos d'água urbanos soterrados ou degradados, muitas vezes desconhecidos pela população local. A utilização desse protótipo deve permitir a coleta de dados em tempo real e o monitoramento contínuo das condições hídricas, fornecendo informações essenciais para a gestão sustentável dos recursos hídricos urbanos e para a mitigação de problemas ambientais, como poluição, enchentes e degradação do solo (Mayer et al., 2020; Gomes; Silva, 2019).

Espera-se, ainda, que a aplicação do sistema contribua para a conscientização ambiental da comunidade, ao disponibilizar informações claras sobre a qualidade da água e os impactos da ocupação urbana desordenada. A combinação entre tecnologia e indicadores ambientais



quantitativos e qualitativos deve permitir intervenções mais rápidas e eficazes, fortalecendo políticas públicas e estratégias de planejamento urbano voltadas à preservação dos ecossistemas aquáticos e terrestres (Oliveira; Pereira, 2021; Lima et al., 2022).

Além disso, o projeto pretende servir como base para futuras pesquisas e aprimoramentos tecnológicos no monitoramento ambiental urbano, demonstrando a viabilidade de soluções inovadoras e sustentáveis frente aos desafios do crescimento urbano. Espera-se que os resultados promovam a proteção dos recursos hídricos, reduzam riscos à saúde pública e incentivem a educação ambiental, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e às práticas de gestão ambiental eficiente (ONU, 2015; Machado; Santos, 2020).



REFERÊNCIAS

- ADEREMI, B. A review of groundwater management models with Internet of Things (IoT) contributions. *Sustainability*, v. 14, n. 1, 148, 2021.
- CAYLOR, K. et al. Groundwater is key to protecting global ecosystems. *The Current*, 2024. Disponível em: <https://news.ucsb.edu/2024/021552/groundwater-key-protecting-global-ecosystems>. Acesso em: 23 out. 2025.
- DAVIS, G. B.; RAYNER, J. L.; DONN, M. J. Advancing “autonomous” sensing and prediction of the subsurface environment: a review and exploration of the challenges for soil and groundwater contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023.
- DÍAZ, S.; et al. Assessing the ecosystem services of groundwater-dependent ecosystems. *Frontiers in Water*, v. 5, p. 1115416, 2023. DOI: 10.3389/frwa.2023.1115416.
- GOMES, L. C. et al. Disentangling the historic and future impacts of land use changes and climate variability on the hydrology of a mountain region in Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 598, 2021.
- GOMES, L.; SILVA, R. Monitoramento ambiental urbano: desafios e soluções tecnológicas. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 24, n. 3, p. 112-127, 2019.
- GRIEBLER, C.; AVRAMOV, M. Groundwater ecosystem services: a review. *Freshwater Science*, v. 34, n. 1, p. 123-147, 2015.
- KANG, S.; et al. Energy-Efficient Ultrasonic Water Level Detection System with Dual-Target Monitoring. *Sensors*, 2021.
- LIMA, F.; COSTA, A.; PEREIRA, D. Indicadores de qualidade da água em ambientes urbanos: avaliação e aplicação. *Ciência & Tecnologia Ambiental*, v. 15, n. 2, p. 45-59, 2022.
- MACHADO, P.; SANTOS, M. Tecnologias de monitoramento ambiental e gestão sustentável de recursos hídricos. *Revista de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 8, n. 1, p. 77-91, 2020.
- MAYER, H.; KLEIN, T.; HOFFMANN, J. Urban water systems: monitoring and management. *Environmental Monitoring Journal*, v. 32, n. 4, p. 215-230, 2020.
- MOURA, M. S. de et al. A study in the Upper Rio das Velhas basin, Brazil: assessing aquifer recharge, land-use and erosion resistance. *Science of the Total Environment*, 2024.
- OLIVEIRA, J.; PEREIRA, R. Avaliação de corpos d’água urbanos: métodos, indicadores e aplicação prática. *Revista de Gestão Ambiental*, v. 18, n. 1, p. 88-104, 2021.



OLIVEIRA, P. T. S. et al. Groundwater recharge decrease with increased vegetation: a case study in Brazilian Cerrado. *Hydrological Processes*, 29(16): 3600-3613, 2015.

ONU – Organização das Nações Unidas. *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Agenda 2030*. Nova York: ONU, 2015.

PRATES, M. M. O crescimento urbano e suas implicações na recarga de aquíferos subterrâneos. *Águas Subterrâneas*, 2012. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27756>. Acesso em: 20 out. 2025.

RUFINO, P. R. et al. Modeling the nexus of climate change and deforestation on groundwater recharge in Brazilian Amazon. *Water*, v. 17, n. 5, 2025.

VILANOVA, M. R. N. The need for ecohydrological research in Brazilian mountains. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2025.