



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Avaliação do desempenho hidráulico de um sistema de abastecimento de água real no Sul de Minas Gerais com integração dos plugins QGISRed e processing R provider

Matheus David Guimarães Barbedo¹, Fernando das Graças Braga da Silva², Mateus Cortez Marcondes³, Alex Takeo Yasumura Lima Silva⁴, Sara Maria Marques⁵, Lorena Lemos Dias Lara⁶, José Antônio Tosta dos Reis⁷

¹Doutorando em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá – matheusbarbedo@unifei.edu.br. ²Professor Titular do Instituto de Recursos Naturais na Universidade Federal de Itajubá, Campus UNIFEI Itajubá, Bloco 8. Av. BPS 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá-MG – 37500-903. fernandobraga@unifei.edu.br. ³Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá - mateuscortezm@hotmail.com. ⁴Doutor em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá – alex.takeo@uol.com.br. ⁵Doutoranda em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá – saramarques.eng.civil@gmail.com. ⁶Mestranda em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá – lorenaldlara@unifei.edu.br. ⁷Professor Associado do departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Av. Fernando Ferrari, 514, Bairro Goiabeiras, Vitória-ES – jose.reis@ufes.br

Artigo recebido em 14/02/2024 e aceito em 13/08/2024

RESUMO

A gestão eficiente de sistemas de distribuição de água é crucial para assegurar a continuidade do fornecimento e a sustentabilidade desse recurso essencial. Este estudo apresenta uma abordagem inovadora e pioneira ao integrar ferramentas avançadas como QGISRed e processing R provider na análise hidráulica de uma rede real no Sul de Minas Gerais à luz da NBR 12218. Foram realizadas visitas *in loco* no período de maio a setembro de 2022 para coleta de dados nos pontos relevantes do sistema realizando registros fotográficos e observação direta. O fornecimento de água é realizado exclusivamente pela Prefeitura Municipal, que não possui projeto da rede existente, o que ocasionou um grande esforço para modelagem do sistema de abastecimento pelo plugin QGISRed. Problemas críticos foram identificados, tais como diâmetros inadequados, pressões insuficientes e sobrepressões na rede de distribuição. Essas questões podem resultar em falta de água em diversos pontos de consumo e vazamentos na rede, agravados pelo envelhecimento natural das tubulações, associado ao excesso de pressão. A implementação de medidas corretivas, como a revisão do dimensionamento da rede, o ajuste das pressões e a modernização da infraestrutura, torna-se essencial para garantir não apenas a conformidade normativa a NBR 12218, mas também a eficiência operacional e a sustentabilidade do abastecimento. Este trabalho contribui não apenas para a gestão eficiente do sistema em estudo, mas também serve como um guia para outras regiões enfrentando desafios similares na gestão sustentável de recursos hídricos.

Palavras-chave: Redes de água, Software QGIS, Plugin QGISRed, Plugin processes R provider, Recursos hídricos

Evaluation of hydraulic performance of a real water supply system in the South of Minas Gerais with the integration of the QGISRed and processing R provider plugins

ABSTRACT

Efficient management of water distribution systems is crucial to ensure continuity of supply and sustainability of this essential resource. This study presents an innovative and pioneering approach by integrating advanced tools such as QGISRed and processing R provider in the hydraulic analysis of a real network in the south of Minas Gerais in the light of NBR 12218. On-site visits were carried out from May to September 2022 to collect data at the relevant points in the system, making photographic records and direct observation. The water supply is carried out exclusively by the City Hall, which does not have a project for the existing network, which led to a major effort to model the supply system using the QGISRed plugin. Critical problems were identified, such as inadequate diameters, insufficient pressures, and overpressures in the distribution network. These issues can result in a lack of water at various points of consumption and leaks in the network, aggravated by the natural ageing of the pipes, associated with excess pressure. Implementing corrective measures, such as reviewing network sizing, adjusting pressures, and modernizing infrastructure, is essential to ensure not only compliance with NBR 12218, but also operational efficiency and supply sustainability. This work

Barbedo, M. D. G., Silva, F. G. B., Marcondes, M. C., Silva, A. T. Y. L., Marques, S. M., Lara, L. L. D., Reis, J. A. T.

contributes not only to the efficient management of the system under study, but also serves as a guide for other regions facing similar challenges in the sustainable management of water resources.

Palavras-chave: Water networks, QGIS software, QGISRed Plugin, Plugin R processes provider, Water resources

Introdução

A gestão eficiente dos sistemas de abastecimento de água é uma preocupação crítica, intensificada por eventos climáticos extremos e pela crescente demanda por água e energia (Bandara et al., 2023). A busca pela eficiência no "nexus água-energia" torna-se vital para enfrentar os desafios emergentes da segurança hídrica e energética (Rai, 2023). A produção de energia elétrica, quer seja por meio de hidrelétricas, termelétricas ou fontes renováveis, exige volumes significativos de água para resfriamento e geração (Jafarinejad et al., 2023; Lohrmann et al., 2023; Ceglia et al., 2023; Sesma-Martin et al., 2022; Simões et al., 2021; Nouri et al., 2019).

Ao mesmo tempo, o tratamento, distribuição e transporte de água até o consumidor final consomem energia elétrica para processos de purificação, pressurização e bombeamento (Tsutiya, 2001).

A gestão eficaz dos recursos hídricos tornou-se prioridade, não só para assegurar o acesso contínuo à água potável, mas também para preservar os ecossistemas aquáticos e minimizar impactos ambientais negativos. (Han et al. 2024; Mishra et al. 2021). Neste sentido, diversos trabalhos atuais abordam a gestão dos recursos hídricos, como Rocha e Ribeiro (2023) que analisaram o cenário do sistema de abastecimento de água da Comunidade São Francisco de Irituia, no estado do Pará, para averiguar a eficiência da infraestrutura do abastecimento público.

Freitas et al. (2022) estudaram uma rede real no sul de Minas Gerais por meio de sistemas de informações geográficas e simulações computacionais, comparando o cenário base (atual da rede) com cenários de otimização.

Ferreira et al. (2014) estudaram a situação do serviço de abastecimento de água nas comunidades remanescentes de quilombos, situadas no município de Santana do Mundaú-AL.

Do ponto de vista econômico, as perdas nos sistemas de abastecimento resultam em desperdício de recursos, refletindo-se em custos com produtos químicos, funcionamento de bombas, mão de obra e equipamentos. Esses custos são transferidos aos usuários, sendo a redução das perdas fundamental para otimizar os sistemas existentes e direcionar recursos para melhorias necessárias.

Diante desse cenário desafiador de aumento de demanda, as empresas de abastecimento procuram estratégias inovadoras e sustentáveis para combater as perdas (Cosgrove e Loucks, 2015).

A adoção de tecnologias avançadas, como sistemas de telemetria, sensores inteligentes e análise de dados em tempo real, possibilita a detecção de vazamentos, identificação de áreas de desperdício e monitoramento do fluxo de água em toda a rede de distribuição. (Velayudhan et al. 2022.; Palermo et al. 2022.; Alves Coelho et al. 2020) Segundo estudos (Rusli et al., 2017; Meijer et al., 2021, apud LaBrecque, 2015), diariamente, são desperdiçados 46 bilhões de litros de água tratada em todo o mundo, totalizando cerca de 16,79 trilhões de litros anualmente.

De acordo com o relatório de perdas da Go Associados (2023) no Brasil, as perdas no sistema de abastecimento atingiram índices preocupantes em 2021, com 40,90% de perdas no faturamento total e 40,3% de perdas na distribuição. Ainda de acordo com os autores, o relatório indica que as perdas de água nesse período alcançaram 7,3 bilhões de m³, representando uma receita potencial de aproximadamente 14 bilhões de Reais, caso esse volume fosse faturado.

Um dos fatores críticos associados a essas perdas é o uso de pressões excessivas nas redes de distribuição. Creaco e Pezzinga, (2014) relatam que a utilização inadequada de pressões elevadas contribui significativamente para vazamentos e rupturas nas tubulações e esse problema é exacerbado pelo envelhecimento natural das infraestruturas e pela falta de um planejamento estratégico na expansão das redes.

Pressões excessivas não só intensificam as perdas de água, mas também acarretam custos operacionais adicionais para reparos e manutenção.

Além disso, o uso prolongado dessas pressões elevadas pode resultar em aumento significativo nos custos energéticos, comprometendo a eficiência energética do sistema. (Vilanova e Balestieri, 2014)

Com o intuito de mitigar os impactos negativos das pressões excessivas, a norma NBR 12.218-2017 estabelece diretrizes específicas para limitar a pressão nas tubulações distribuidoras,

definindo a pressão dinâmica mínima das redes como 10 m.c.a (100kPa), que é a pressão referida à velocidade de escoamento do fluido capaz de atender ao abastecimento nas condições de dia e hora de maior consumo e de menor quantidade de água disponível nos reservatórios.

Para a pressão estática máxima, que representa a pressão do fluido em repouso no sistema, fica estabelecido 50 m.c.a (500kPa), para garantir que os componentes do sistema, como tubulações e válvulas, operem com eficiência e permitam a manutenção do controle das perdas físicas. Contudo, a implementação efetiva dessas diretrizes nas práticas de operação das redes de distribuição enfrenta desafios persistentes, como falta de fiscalização adequada, recursos financeiros limitados e resistência a mudanças operacionais

De acordo com IIAMA UPV (2023), o QGISRed representa um complemento gratuito para o software de código aberto QGIS, elaborado pelo IIAMA (Instituto de Investigação em Engenharia de Água e Meio Ambiente) da Universidade Politécnica de Valência. Esse plugin aproveita uma variedade de recursos disponíveis na plataforma para simplificar a criação de modelos hidráulicos a partir dos dados corporativos das empresas de abastecimento de água, mantendo-os atualizados.

O QGISRed proporciona a capacidade de desenvolver modelos simplificados em uma interface semelhante à do EPANET, contudo, vai além ao incluir recursos que possibilitam a criação de modelos de redes de distribuição de água extremamente realistas. Essa abordagem incorpora elementos que não são suportados pelo EPANET, como serviços de conexão, válvulas de corte, sensores de medição, Áreas Distritais Medidoras, água não faturada e a diferenciação entre vazamentos latentes e específicos, entre outros (IIAMA UPV, 2023)

É possível associar novos elementos a pontos de clientes, leituras automatizadas de medidores, dados SCADA, operações de manutenção, vazamentos etc. (IIAMA UPV, 2022)

Todas as funcionalidades do QGIS, seja para edição, visualização ou geoprocessamento de dados, podem ser integradas de forma sinérgica com as ferramentas complementares desenvolvidas no QGISRed, o que amplia significativamente suas capacidades (IIAMA UPV, 2022).

Assim sendo, a ferramenta QGISRed já foi aplicada em diversos estudos, podendo citar os mais atuais:

Milićević et al. (2024) Estudaram os desafios na gestão de perdas de água em sistemas de abastecimento de água, e mencionam o QGISRed como um plugin promissor para o controle de perdas de água.

Nunes et al. (2023) desenvolveram a aplicação de um modelo simplificado de avaliação de risco através do plugin QGISRed que permitiu evidenciar a tubulações mais suscetíveis a falhas e suas respectivas consequências como custos qualitativos (índice de qualidade da água) e financeiros em um estudo de caso real.

Nibi et al (2022) Elaboraram um modelo baseado em SIG no plugin QGISRed para caracterizar as variações de oferta e demanda de uma comunidade urbana e como resultado apresentaram a modelagem e digitalização de uma rede de distribuição de água do mundo real em Kochi, na Índia.

MRŠA (2022) Realizou a análise do estado atual de fluxos e pressões dentro da rede de abastecimento de água da cidade de Glavan na Croácia através do Plugin QGISRed. Foi analisada a situação de abastecimento de água para o novo assentamento e para as necessidades de combate a incêndios. Os resultados obtidos foram satisfatórios, no qual, foi demonstrado que a rede pode adicionalmente abastecer um assentamento grande, bem como garantir a extinção de incêndios de grande escala.

Pietrobon (2022) Realizou a análise e otimização da gestão de um complexo sistema de água potável com o plugin QgisRed.

Moraes (2022) com o auxílio do QGISRed avaliou os impactos no abastecimento de água em virtude da desocupação de residências ocasionada pela instabilidade do terreno no abastecimento em 3 bairros de Maceió - AL.

Santana (2022) Realizou a modelagem hidráulica pelo plugin QGISRed e efetuou um estudo aprofundado no SAA e ao seu funcionamento na vila Montemor-o-velho na cidade de Coimbra – Portugal, para obter resultados que possibilitem a identificação de soluções possíveis.

Fontes (2022) Estudou, e modelou pelo QGISRed uma zona de medição e controle (ZMC) com problemas de fugas e perdas, com vistas a

avaliar a dimensão do problema e propor soluções para reduzir os respectivos valores.

Giudicianni et al (2020) utilizaram o plugin QGISRed para modelar a instalação de microturbinas e bombas como turbinas, em vez de/junto com válvulas de redução de pressão, para demonstrar os métodos de recuperação de energia que permitirão a partição da rede de água em áreas de medição de distrito.

Castañeda Castaño (2020) Desenvolveu uma metodologia no QGISRed que permite aos aquedutos rurais melhorarem a operação e gerenciamento de sistemas de distribuição e facilitar a interação do operador com os seus componentes, através da implementação de modelos computacional e geoespacial.

Deste modo, ao combinar as capacidades estatísticas do processing R provider com as ferramentas de geoprocessamento e manipulação de dados do QGISRed, essa abordagem inovadora permite uma análise detalhada das pressões ao longo da rede de distribuição. Integrando dados em tempo real e informações geoespaciais, o QGISRed oferece uma visão holística das condições operacionais, identificando áreas onde as pressões estão fora dos limites recomendados pela norma.

Deste modo, o presente estudo visa primariamente analisar o desempenho hidráulico de um sistema de abastecimento de água localizado na área urbana de um município no sul de Minas Gerais. Propõe, ainda, intervenções e ajustes em conformidade com as diretrizes da NBR 12.218-2017, visando aprimorar a eficiência operacional da rede.

A escolha específica desse sistema para análise decorre da topografia acidentada da área urbana do município, impondo desafios complexos nos cálculos hidráulicos.

Este estudo, é parte integrante do Projeto do Grupo (NUMMARH) Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), e incorpora os resultados obtidos nas pesquisas realizadas até o momento.

Material e métodos

O desenvolvimento do trabalho foi dividido em etapas apresentadas no fluxograma ilustrado na Figura 1.

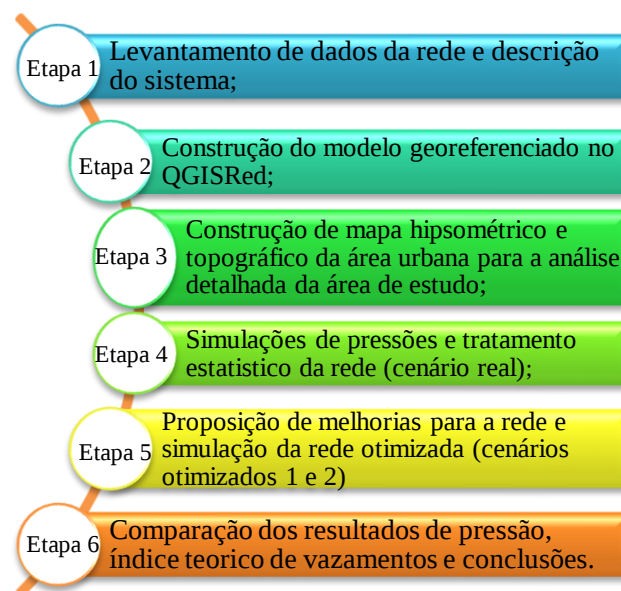


Figura 1. Etapas da metodologia

Etapa 1: Levantamento de dados da rede e caracterização do sistema

As principais fontes de informações relativas ao município foram obtidas a partir dos trabalhos de Marcondes (2019) e Marcondes (2023). O município possui uma área de 409,2 Km², está inserido na Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, à 1200 metros do nível do mar, possuindo uma altitude mínima de 859 m e máxima de 2055. (IBGE, 2022)

Foram realizadas visitas de campo no período de maio a setembro de 2022 para obtenção de informações relevantes do sistema realizando registros fotográficos e observação direta para a melhor descrição do sistema e caracterização das condições das captações, aduções, tratamento, reservatórios e rede de distribuição.

O setor de rede de distribuição em estudo se encontra em uma cidade localizada no sul de Minas Gerais, com 7.952 habitantes, em 2022, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022).

O primeiro ponto de captação analisado consiste em um corpo d'água, está inserido na bacia do Rio Grande, aproximadamente à 3,3 km da estação de tratamento. O segundo ponto de captação entrou em funcionamento no ano de 2018, no córrego Boa Vista. Este está localizado às margens da rodovia estadual MG-360 como mostrado na Figura 2.

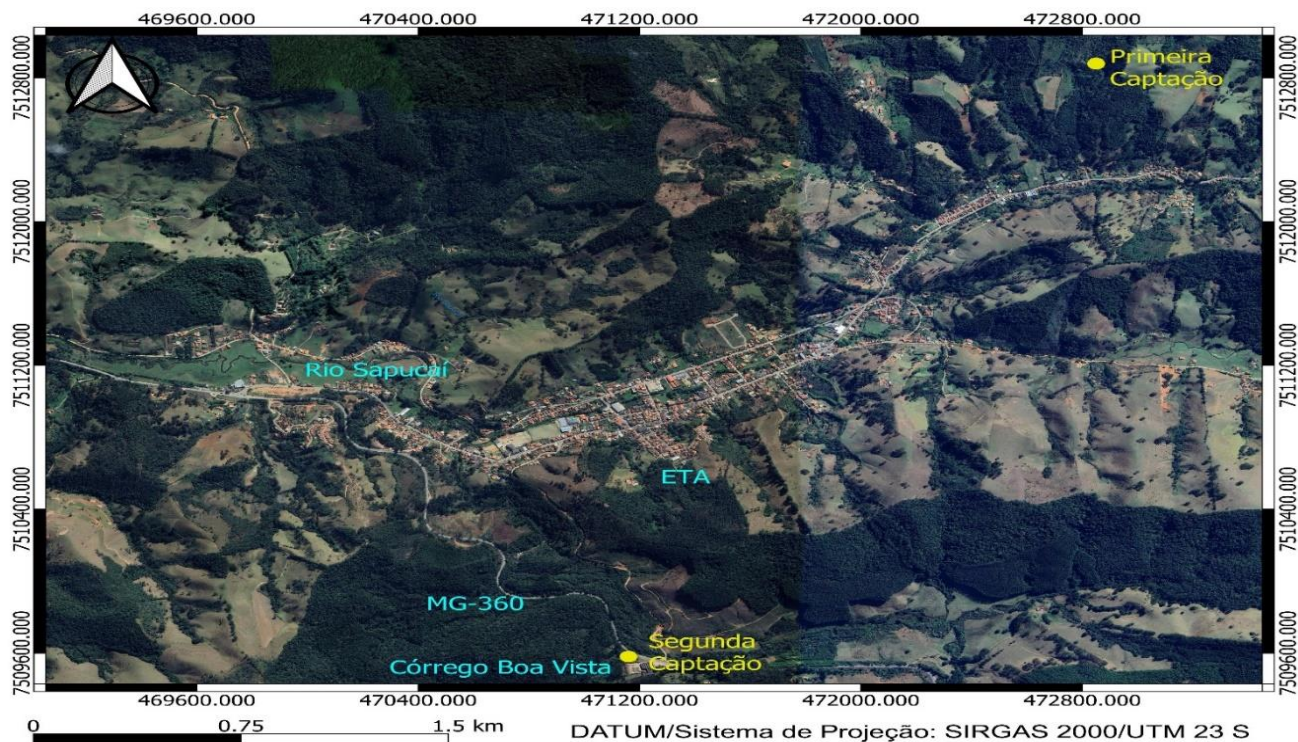


Figura 2. Localização da rede de estudo

Situa-se na Bacia do Rio Grande contendo área de drenagem de 15,2 Km² e vazão $Q_{7,10}$ de 104,88 litros por segundo com base no relatório técnico de captação em corpo de água disponível no Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM, 2018).

Os dados gerais da rede são: comprimento total de 17, 989 km, 135 trechos e 116 nós e 4 reservatórios. O ano de início de operação da rede é 2000, com horizonte de projeto de 50 anos (até 2050). Marcondes (2019)

Constam no sistema 4 reservatórios responsáveis pelo abastecimento, sendo 1 de nível fixo e os outros de nível variável. O reservatório de nível fixo tem capacidade para armazenar 720 m³ de água tratada, sendo o de maior volume. Os outros 3 tem capacidade cada de armazenar 47 m³ cada. Marcondes (2019) e Marcondes (2023)

Dessa forma, o estudo teve início com o recebimento dos arquivos contendo dados simulados e calibrados no Epanet referentes ao trabalho de Marcondes (2022) para uso posterior nas simulações. Apesar da extensão territorial do município e a grande quantidade de bairros localizados na zona rural, o sistema de abastecimento a ser estudado está localizado na área urbana como é verificado na Figura 2.

Etapa 2: Construção do modelo georreferenciado no QGISRed

A construção do modelo georreferenciado no QGISRed desempenhou um papel estratégico nesta pesquisa, proporcionando as bases para análises detalhadas do sistema de abastecimento de água estudado. Seguindo a orientação do IIAMA UPV (2023), optou-se pela versão gratuita do QGISRed, alinhando-se à proposta de pesquisa e otimizando os recursos disponíveis. Assim como o Epanet, o QGISRed utiliza métodos reconhecidos, como Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning, para o cálculo de perda de carga. Neste estudo, a escolha foi o método Hazen-Williams, alinhando-se às características específicas do sistema e aos objetivos da pesquisa (Martinez-Alzamora et al., 2022).

Durante a construção do modelo, detalhes cruciais da rede foram incorporados manualmente, garantindo uma representação precisa. Informações como altitude dos nós, diâmetro dos tubos, rugosidade, consumo base e comprimento dos tubos foram inseridas na tabela de atributos, estabelecendo uma base sólida para simulações subsequentes.

Resultados e discussões

Etapa 3: Construção do mapa hipsométrico e topográfico da área, área de estudo

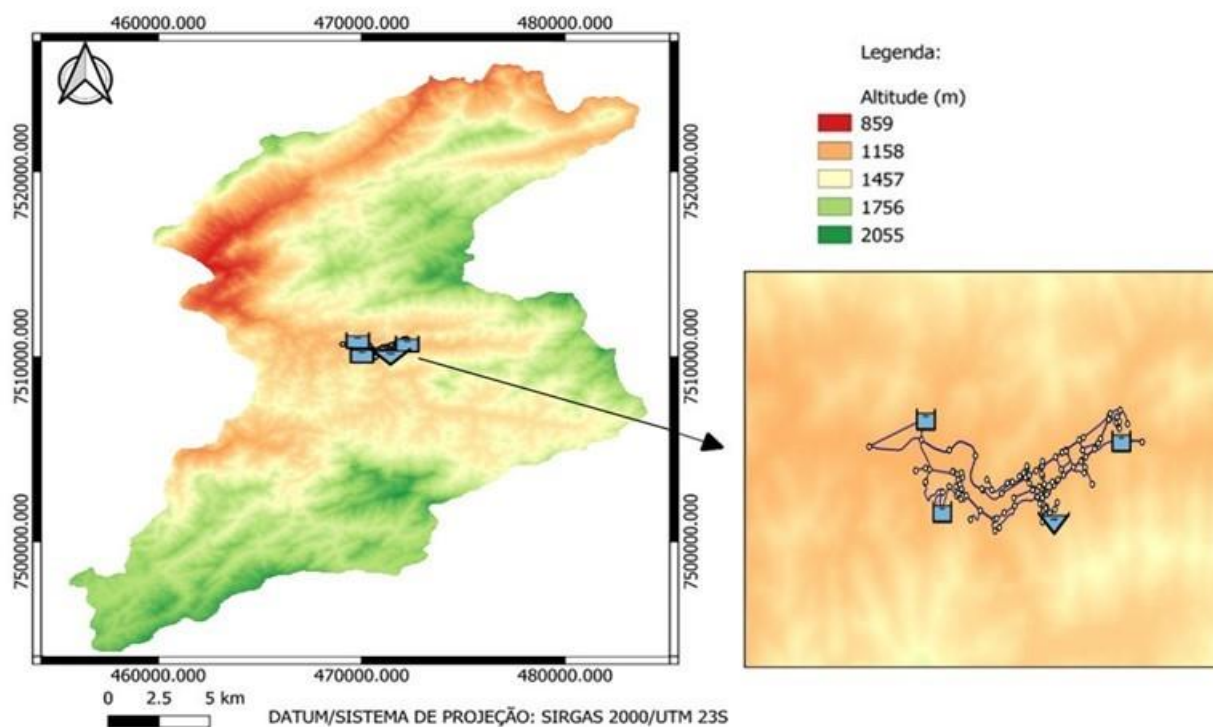


Figura 3. Mapa hipsométrico do município com ampliação da rede de estudo.

A otimização da precisão do cálculo hidráulico foi alcançada por meio de plugins experimentais, conforme proposto no estudo de Martins (2022) e no tutorial Geo Epanet, e na hospedagem da pasta Geo_Epanet-elaboração-de-um-modelo-hidráulico no GitHub de Martins (2023) no qual destaca-se o papel crucial do plugin Closest Point, identificando o ponto mais próximo entre duas camadas e contribuindo para a exatidão nas análises, especialmente em áreas com topografia acidentada.

Ainda de acordo com o autor, o plugin Line Around Points também foi essencial, criando linhas ao redor de pontos específicos na rede, fundamental para aprimorar a precisão do cálculo hidráulico em áreas com topografia irregular. Além disso, a consideração do mapa hipsométrico foi fundamental para identificar as zonas de maior altitude no município conforme a Figura 4, indicando a necessidade de pressões mais altas para garantir o abastecimento eficaz nos pontos elevados da rede.

Essa integração de dados e ferramentas no QGISRed contribuiu significativamente para uma abordagem abrangente na gestão do sistema de

abastecimento de água, considerando tanto as características físicas quanto as demandas hidráulicas específicas do local de estudo.

O município em estudo, localizado nas proximidades da Serra da Mantiqueira, destaca-se por uma significativa variação altimétrica, variando de 859 m a 2055 m em uma área de 409,2 km². A topografia pronunciada, evidenciada pelo mapa topográfico da Figura 4, exerce influência direta nas pressões da rede de água, especialmente em regiões com elevações consideráveis. A peculiaridade da topografia acidentada impõe desafios específicos à gestão do sistema de abastecimento de água. (Esenarro et al., 2023, Mabrok et al, 2022).

Durante emergências, como vazamentos ou interrupções no abastecimento, a topografia pode influenciar na velocidade de resposta e na eficácia do reparo do problema. (Fan et al, 2022). De acordo com Tiepolo et al, (2022) o mapeamento detalhado da topografia permite identificar áreas suscetíveis a inundações por vazamentos de água, facilitando o planejamento de medidas de mitigação e a mobilização de recursos de emergência.

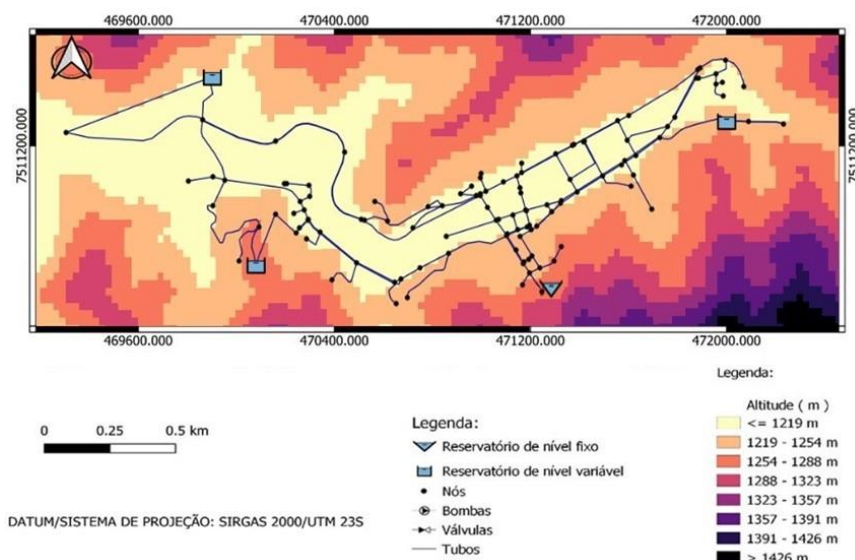


Figura 4. Mapa topográfico da área urbana

A topografia também influencia os desafios enfrentados durante a manutenção e reparo da rede. Em áreas montanhosas ou com terrenos acidentados, o acesso a determinadas partes da rede pode ser difícil. No entanto, o conhecimento detalhado da topografia permite planejar estratégias de manutenção eficazes, garantindo que problemas sejam resolvidos de forma rápida e eficiente. Na visão de Bonilla et al. (2023) a construção do mapa topográfico torna-se fundamental para uma análise detalhada da modelagem hidráulica e do sistema de abastecimento.

Ainda de acordo com o autor, em áreas acidentadas, o mapa revela a variação altimétrica, possibilitando a identificação estratégica de locais para estações de bombeamento e a otimização do traçado da rede de distribuição.

De acordo com Argaw et al. (2023) a consideração da variação altimétrica no mapa facilita a tomada de decisões informadas. Ao levar em conta a topografia, as estações de bombeamento são instaladas estrategicamente, visando a eficiência energética para vencer as alturas de elevação necessárias.

A otimização da rede resulta na minimização de perdas de carga, reduzindo custos operacionais e assegurando uma distribuição eficaz de água (Reis et al, 2023, Tian et al, 2023, Vieira et al. 2020). O estudo de caso na Serra da Mantiqueira destaca a capacidade de superação diante de desafios topográficos.

A integração do conhecimento sobre a topografia associada a análise hidráulica demonstra uma abordagem resiliente e eficiente no controle operacional de redes (Shekofteh et al., 2023; Assad et al., 2022; Liu e Song, 2020; Shuang et al., 2019; Agathokleous et al, 2017; Herrera et al., 2016).

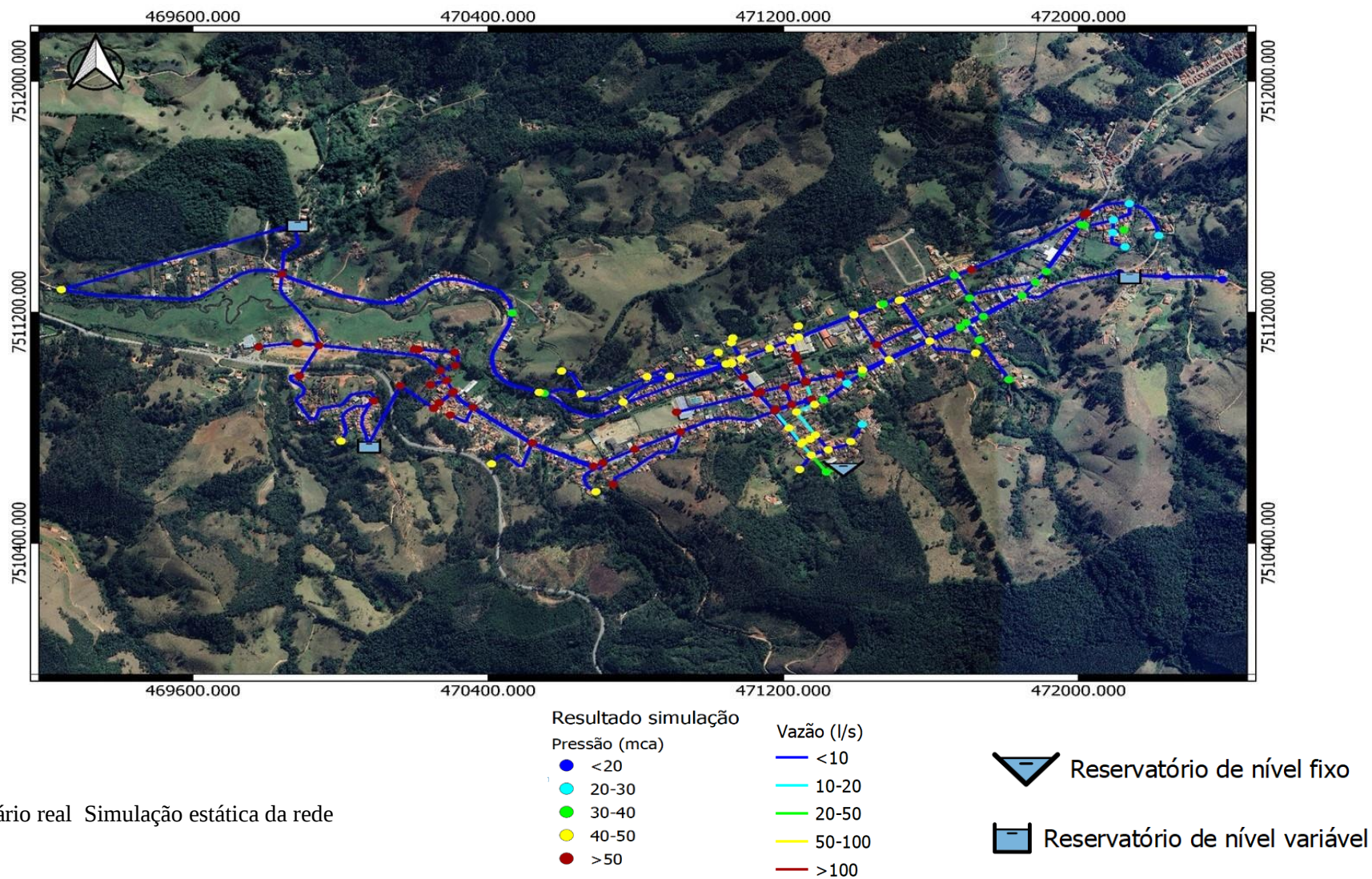
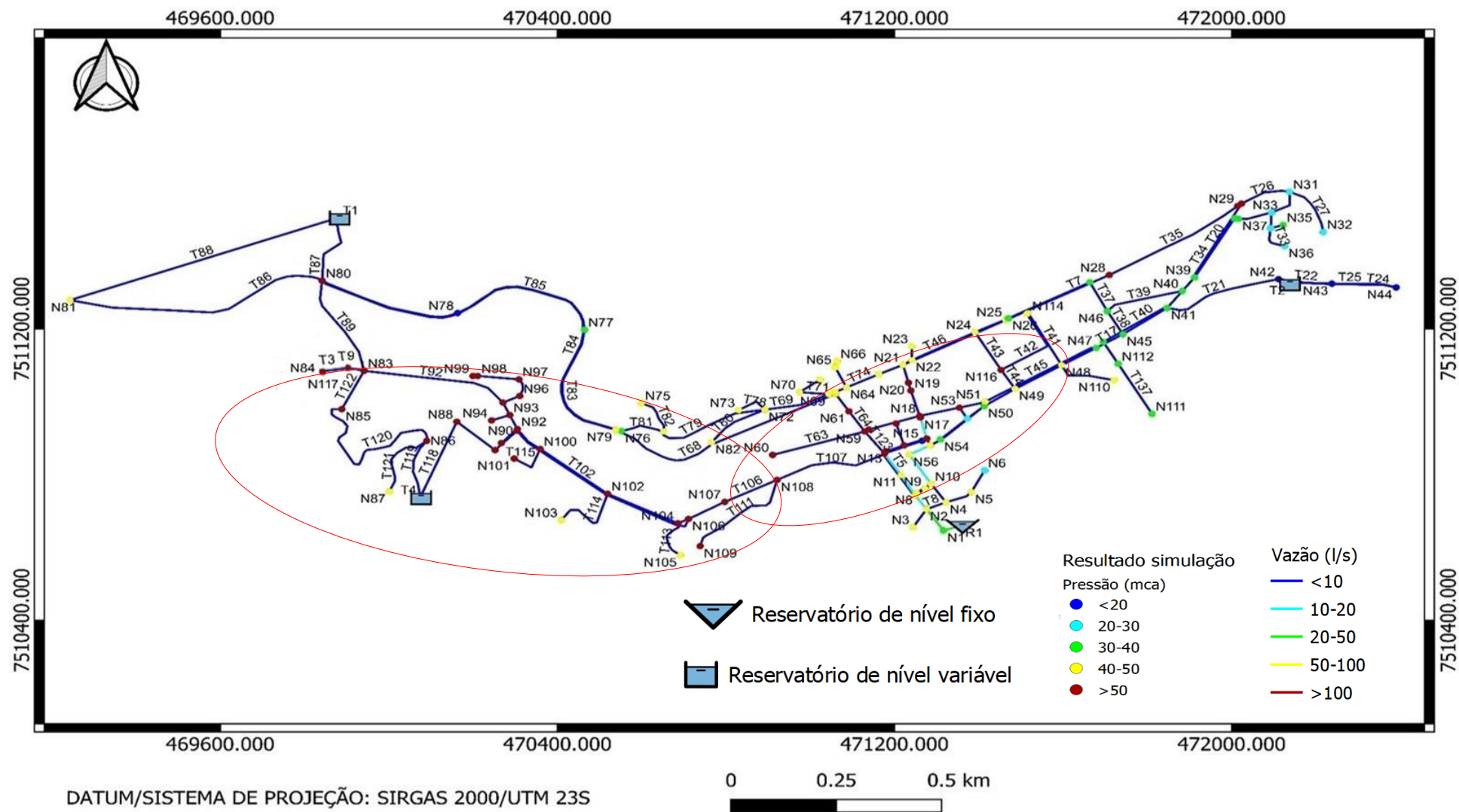


Figura 5. Cenário real Simulação estática da rede



Os resultados da simulação hidráulica realizada com o QGISRed revelam insights inovadores sobre o desempenho da rede de abastecimento de água através da Figura 5. A geração desses resultados exigiu a inserção de dados fundamentais, incluindo informações sobre diâmetro, rugosidade e consumo base, no modelo.

A camada de Pressão, derivada da simulação hidráulica, fornece uma visão abrangente da distribuição de pressões ao longo da rede de água.

Essa representação visual é crucial para compreender as variações de pressão em diferentes seções da rede, apresentando informações valiosas para otimizar o desempenho hidráulico.

A camada vazão apresenta os padrões de fluxo de água resultantes da simulação hidráulica, permitindo a identificação de possíveis áreas problemáticas e contribuindo para uma abordagem proativa na gestão do sistema.

As Figuras 5 e 6 evidenciam claramente um problema de sobrepressão nas áreas circundadas na Figura 6, que são consideradas como a zona baixa da rede. Uma característica distintiva que emerge dessas análises é a localização estratégica dos reservatórios na zona alta da rede. Essa disposição cria uma carga hidráulica significativa, impondo pressões adicionais nas tubulações e gerando desafios operacionais. Isso destaca a capacidade do QGISRed em identificar e visualizar de forma precisa desafios operacionais na rede de água. Ademais, a identificação precoce de áreas propensas a sobrepressão oferece oportunidades para implementação proativa de medidas corretivas.

A análise das pressões registradas nos 115 nós é apresentada de forma por meio de um histograma de classes, contextualizando as ocorrências conforme ilustrado na Figura 7.

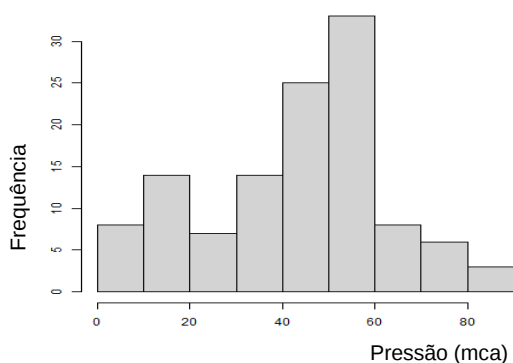


Figura 7. Histograma das pressões dos 115 nós no cenário Real

Essa abordagem proporciona uma visualização abrangente e detalhada das pressões no contexto espacial, enriquecendo a compreensão do sistema de abastecimento de água. A simulação conduzida no QGISRed não apenas permite uma análise estática, mas também oferece a capacidade de explorar os aspectos hidráulicos do sistema.

Contudo, neste estudo, direcionamos nosso foco exclusivamente para a análise de pressão estática, comparando-a com os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 12.218-2017, que define a pressão estática máxima aceitável em 500 kPa (50 mca). A análise revela que aproximadamente 50 nós na rede exibem pressões superiores a 50 mca, localizados principalmente na zona baixa da rede, representando 43,48% do total de nós com pressão elevada. Este insight enfatiza a importância crítica de avaliar e ajustar as condições de pressão para garantir a conformidade com os padrões normativos, garantindo a integridade e eficiência do sistema de abastecimento de água. Uma percepção valiosa, evidenciada na Figura 8, consiste na contagem de ocorrências para cada valor de pressão no conjunto de dados.

O gráfico incorpora linhas representativas da média e mediana dos valores de pressão. Essa abordagem contribui significativamente para uma compreensão mais abrangente e refinada do comportamento hidráulico do sistema em estudo. Isso permite não apenas corrigir pressões pontuais elevadas, mas também antecipar e mitigar potenciais variações na pressão ao longo do tempo. Essa abordagem dinâmica, aliada à análise estática, oferece uma visão mais holística das condições hidráulicas da rede de abastecimento de água, possibilitando tomadas de decisão mais informadas e estratégicas.

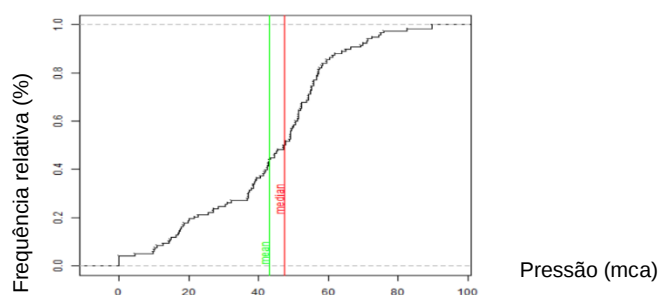


Figura 8. Gráfico de frequência das pressões no cenário Real

Etapa 5: Proposição de melhorias para a rede e simulação do cenário otimizado 1

instalada no trecho 87 com DN de 50 mm e teve seu parâmetro de controle fixado em 35 m.c.a.

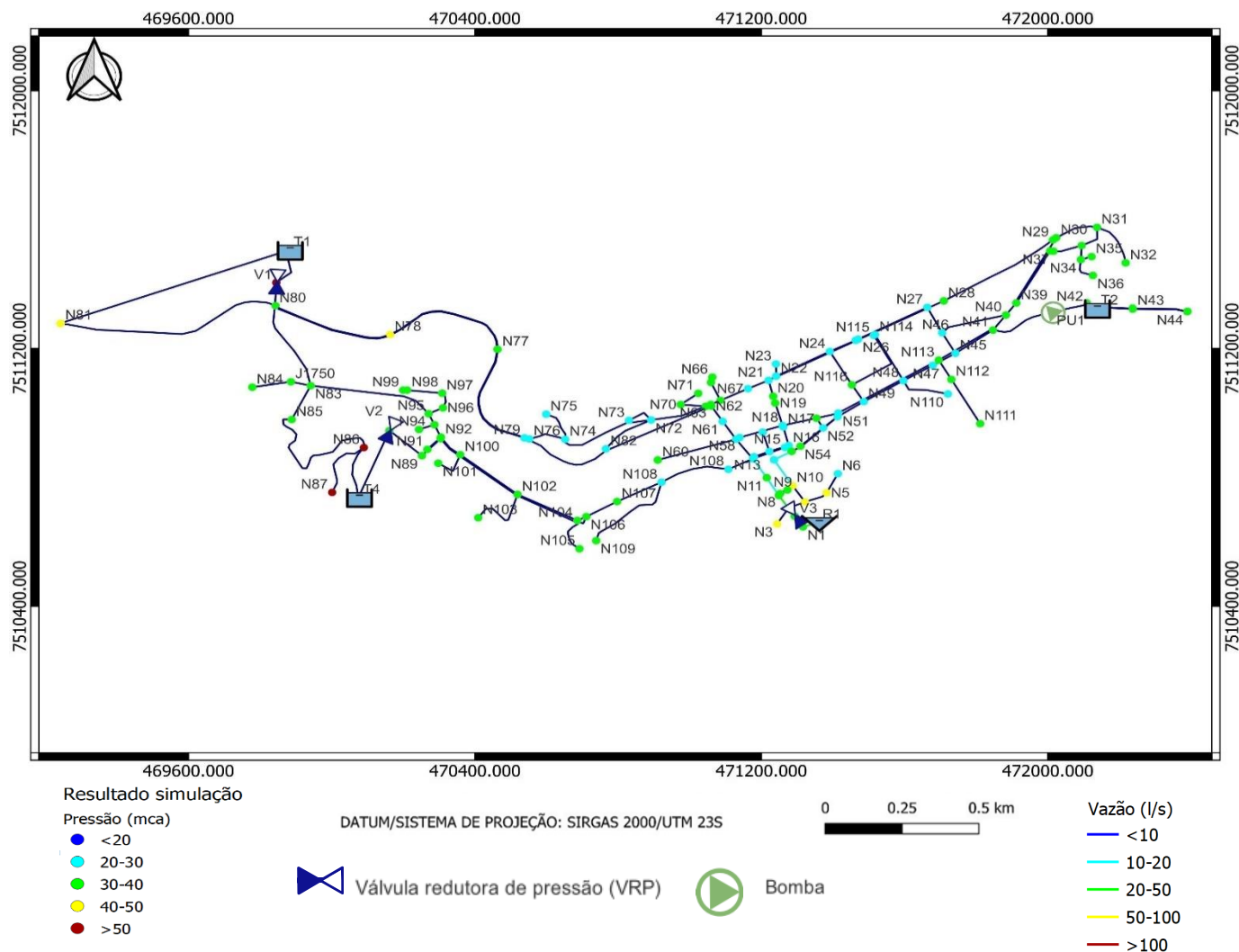


Figura 9. Simulação cenário otimizado 1

Para Gupta et al. (2018) as válvulas redutoras de pressão têm como objetivo principal reduzir a pressão em determinados pontos da rede. Isso é crucial para evitar vazamentos, danos à infraestrutura e garantir um fluxo adequado de água em todo o sistema. As válvulas redutoras de pressão trabalham em conjunto com a bomba centrífuga para uniformizar a pressão ao longo da rede (Sales e Souza et al 2023, Garcia et al., 2021)

Em áreas onde a pressão da água é naturalmente baixa, especialmente em regiões montanhosas ou distantes das fontes de água, as bombas podem ser instaladas para aumentar a pressão e garantir que a água alcance todos os pontos da rede de distribuição. No cenário otimizado 1 foram instaladas 3 válvulas redutoras de pressão e 1 bomba centrífuga. A válvula 1 foi

Já a válvula 2 foi posicionada no trecho 118 com DN de 50 mm e teve seu parâmetro de controle fixado em 35 mca. A válvula 3 foi instalada no trecho 107 com DN de 50 mm e teve seu parâmetro de controle fixado em 45 mca.

Outro componente crucial para a melhoria do sistema foi a inserção da bomba centrífuga TH-16, com uma potência de 3 cavalos (cv), operando a 3500 rotações por minuto (rpm) e alimentada por corrente trifásica, no trecho 21.

A escolha da localização das válvulas redutoras de pressão e da bomba centrífuga foi determinada por meio de documentação técnica e verificação in loco junto aos funcionários da prefeitura responsáveis pela operação da rede de água, levando em consideração as características hidráulicas da rede e os objetivos de uniformização da pressão foi possível otimizar o desempenho hidráulico.

A análise das pressões no cenário otimizado mostra significativa redução nos valores de pressão, confirmada através do histograma das faixas de pressão da Figura 10. Na grande maioria, se concentraram em 2 faixas específicas, sendo elas de 20 até 25 mca, de 30 até 35 mca.

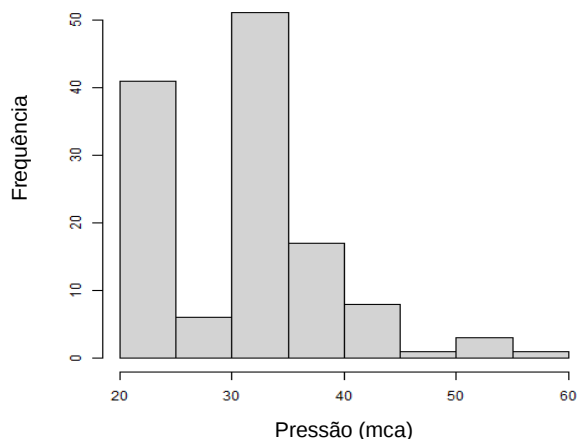


Figura 10. Histograma das pressões dos 115 nós no cenário otimizado 1

Etapa 5: Proposição de melhorias para a rede e simulação do cenário otimizado 2

O Gráfico de frequência das pressões do cenário otimizado 1, ilustrado na Figura 11, retrata a pressão média da rede otimizada com o valor de pressão média de 25,2 m.c.a e a mediana próximo de 20 mca.

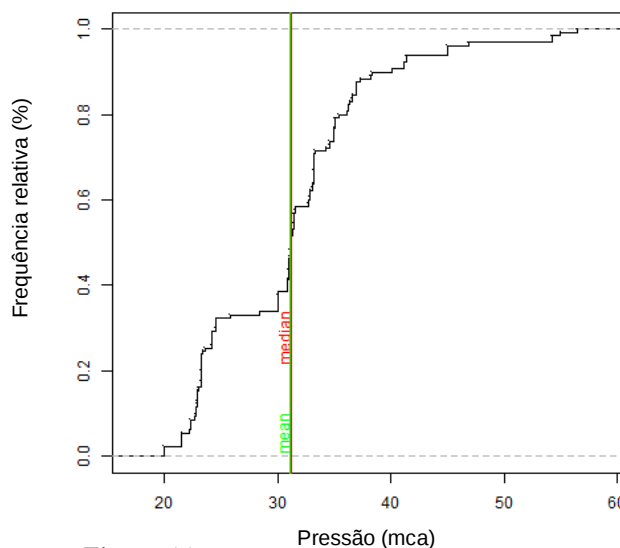


Figura 11. Gráfico de frequência das pressões no cenário otimizado 1

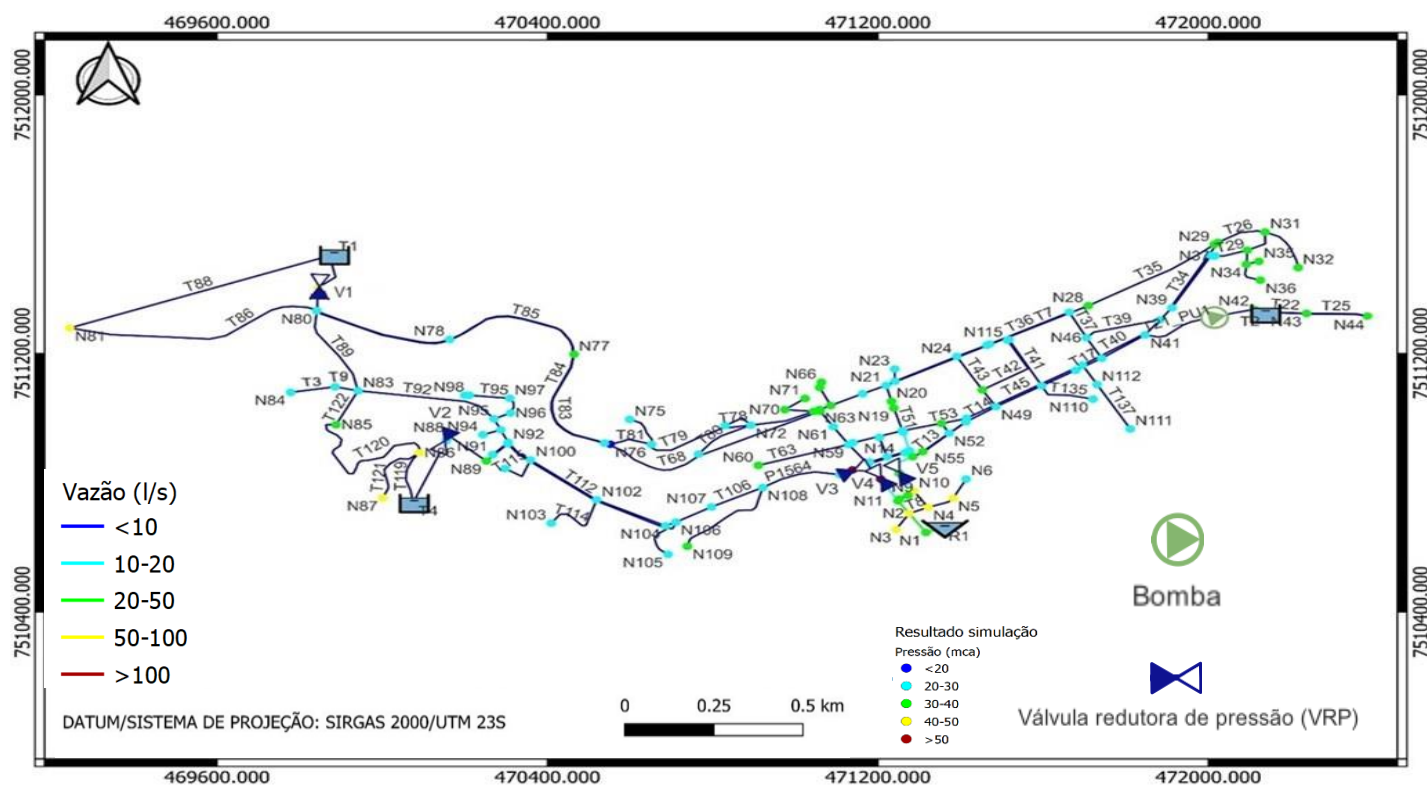


Figura 12. Simulação cenário otimizado 2

O gráfico de frequência de pressões do cenário otimizado 2, ilustrado na Figura 14, com sua pressão média de 25,2 m.c.a., contrasta notavelmente com o Cenário Real, que registrava 44,3 m.c.a.

A cidade enfrenta desafios significativos na gestão de sua rede de abastecimento de água, com discrepâncias notáveis na distribuição de pressão. A sobrepressão na zona baixa pode levar a vazamentos e danos à infraestrutura, enquanto a pressão insuficiente na zona alta compromete a eficiência do sistema.

A instalação de 5 válvulas redutoras de pressão e uma bomba busca corrigir essas irregularidades e promover uma distribuição equilibrada ao longo da rede. A válvula 1 foi posicionada no trecho 87 com DN de 50 mm e teve seu parâmetro de controle fixado em 26 m.c.a. Da mesma maneira a válvula 2 foi posicionada no trecho 118 com DN de 50 mm, com parâmetro de controle fixado em 40 mca. Já as válvulas 3, 4 e 5 instaladas nos trechos 107, 5 e 8 de DN 50 mm, 100 mm e 100 mm, com parâmetro de controle fixado em 40 mca. Essa estratégia permitiu uma gestão precisa e adaptativa da pressão em diferentes segmentos da rede.

Da mesma maneira que o cenário otimizado 1, foi a inserção da bomba centrífuga TH-16, no trecho 21. Essa adição estratégica das válvulas VRP's e Bomba proporcionou uma redução da carga hidráulica na zona baixa e um impulso energético ao sistema na zona alta, contribuindo para superar resistências e garantir a adequada circulação do fluido em toda a rede. Em conjunto, essas modificações resultaram em uma distribuição de pressão mais uniforme e dentro dos limites da NBR 12 218 ao longo da rede.

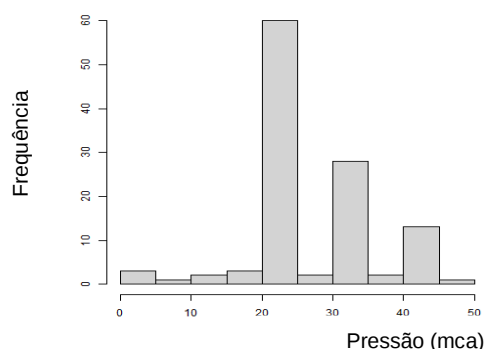


Figura 13. Histograma das pressões dos 115 nós no cenário otimizado 2

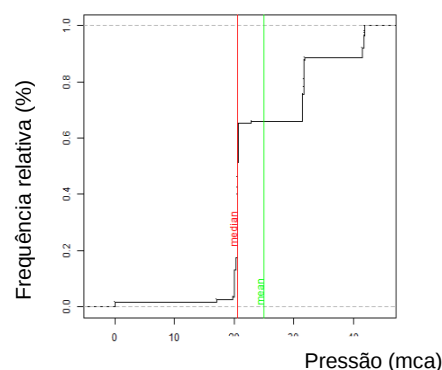


Figura 14. Gráfico de frequência das pressões no cenário otimizado 2

A análise das pressões no cenário otimizado 2 mostram através das Figuras 13 e 14 significativa redução nos valores de pressão. Na grande maioria, se concentraram em 3 faixas específicas, sendo elas de 20 até 25 mca, de 30 até 35 mca e de 40 até 45 mca.

Etapas 6: Comparação dos resultados de pressão, índice teórico de vazamentos e conclusão

A partir de adaptações de Tucciarelli et al. (1999) e Silva (2003) considerou-se a equação de perdas por pressões em uma rede de água, conforme Equação 1.

Equação 1

$$\sum_{i=1}^{nodes} = P_{mean}^{0,5} * 7,27 \quad (1)$$

Em que:

- $\sum$ é a soma das perdas
- $nodes$ é o número de nós na rede
- i é o índice do nó
- P_{mean} é a pressão média no nó i

Como resultado da aplicação da Equação de Tucciarelli (1999) e Silva (2003), na tabela a seguir, podemos perceber um índice de vazamentos de 48,39 % no cenário real da rede de abastecimento. Já no cenário ótimo 2 observamos o índice de vazamentos no valor de 36,49%, contabilizando uma redução de 11,9 % no índice de perda de água tratada por vazamentos, como é ilustrado na tabela 1.

Tabela 1. Pressão média e índice teórico de Perdas nos cenários Real e Otimizado

	Pressão média (mca)	Índice de vazamentos (%)
Cenário Real	44,3	48,39
Cenário ótimo 1	31,8	40,99
Cenário ótimo 2	25,2	36,49

Conclusões

O estudo abrangente realizado no sistema de distribuição de água em uma rede de abastecimento situada em uma região montanhosa e de relevo irregular ressaltam a importância de análises criteriosas para assegurar a eficiência operacional. Etapas desde a concepção do projeto até o controle de pressões na rede são fundamentais para o aprimoramento sustentável do sistema.

A utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG) através do plugin QGISRed, e da estatística pelo plugin Processing R provider, possibilitou análises comparativas de cenários com uma riqueza de detalhes espaciais, proporcionando insights valiosos sobre o comportamento das variáveis operacionais da rede.

Os resultados da simulação e comparação de cenários evidenciaram possibilidades significativas para aprimorar a distribuição de água. Os ajustes precisos nas pressões dos nós, alinhados com os parâmetros estabelecidos pela NBR nº 12.218/2017, resultaram em redução substancial na pressão média na rede, bem como nos índices de vazamentos

Por fim, este estudo exalta o potencial transformador do SIG na comparação e visualização de cenários, oferecendo uma abordagem integrada para a gestão sustentável dos recursos hídricos e para a contínua eficiência operacional do sistema de abastecimento.

Agradecimentos

À Redecope Finep – MCT (0983/10), pelo projeto de desenvolvimento de tecnologias e procedimentos eficientes para gestão hidroelétrica em sistemas de abastecimento de água. Os autores também agradecem à Fapemig, pelo Programa Pesquisador Mineiro PPM-00755-16 e PPM-0633-11. O Primeiro autor, Matheus Barbedo, agradece a CAPES pela bolsa de doutorado nº 88887.695230/2022-00. Agradecemos também ao Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos (NUMMARH) da UNIFEI.

Referências

- Agathokleous, A., Christodoulou, C., Christodoulou, S.E., 2017. Topological robustness, and vulnerability assessment of water distribution networks. *Water Resources Management*, v. 31, n. 12, p. 4007-4021, Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1721-7>
- Alves Coelho, J., Glória, A., Sebastião, P., Precise water leak detection using machine learning and real-time sensor data. *IoT*, v. 1, n. 2, p. 474-493, 2020.
- Argaw, N., Foster, R., Ellis, A., 2003. Renewable energy for water pumping applications in rural villages. New Mexico State, National Renewable Energy Laboratory, University Lass Cruces, New Mexico.
- Assad, A., Bouferguene, A., 2022. Resilience assessment of water distribution networks—Bibliometric analysis and systematic review. *Journal of Hydrology*, v. 607, p. 127522. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127522>.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017 NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro.
- Bandara, S., Rajeev, P., Gad, E., 2023. A review on condition assessment technologies for power distribution network infrastructure. *Structure and Infrastructure Engineering*, p. 1-18. <https://doi.org.br/10.1080/15732479/15732479.2023.2177680>
- Bonilla, C., Brentan, B., Montalvo, I., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., 2023. Digitalization of Water Distribution Systems in Small Cities, a Tool for Verification and Hydraulic Analysis:

A Case Study of Pamplona, Colombia. *Water*, v. 15, n. 21, p. 3824. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w1521382>. Acesso: 02 jun 2023

- Ceglia, F., Marrasso, E., Roseli, C., Sasso, M., 2023. Energy and environmental assessment of a biomass-based renewable energy community including photovoltaic and hydroelectric systems. *Energy*, v. 282, p. 128348. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128348>
- Cosgrove, W. J., Loucks, D. P., 2015. Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*, v. 51, n. 6, p. 4823-4839. Disponível: <https://doi.org/10.1002/2014WR016869>. Acesso: 02 jun 2023
- Creaco, E., Pezzinga, G., 2014. Embedding linear programming in multi objective genetic algorithms for reducing the size of the search space with application to leakage minimization in water distribution networks. *Environmental Modelling and Software*, Utah, v. 69, p. 308–318. <https://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.10.013>
- Esenarro, D., Vilchez, J., Adrianzen, M., Raimundo, V., Gómez, A., Cobeñas, P., 2023. Management techniques of ancestral hydraulic systems, Nasca, Peru; Marrakech, Morocco; and Tabriz, Iran in different civilizations with arid climates. *Water*, [online] 15, n. 19, p. 3407, <https://doi.org/10.3390/w15193407>
- Fan, X., Zhang, X., Yu, X., 2022. A graph convolution network-deep reinforcement learning model for resilient water distribution network repair decisions. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 37, n. 12, p. 1547-1565,
- Freitas, C. L., Silva, F. G. B., Silva, A. T. Y. L., Barbedo, M. D. G., 2022. Análise de sistema de distribuição de água real no sul de Minas Gerais com o uso de sistema de informação geográfica. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. [online] 27. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200380>. Acesso: 02 mai. 2023
- Ferreira, E., P., Ferreira, J. T. P., Pantalão, F. F., Ferreira, Y. P., Albuquerque, K. N., Ferreira, T. C., 2014 Abastecimento De Água Para Consumo Humano Em Comunidades Quilombolas No Município De Santana Do Mundaú – AL. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [online] 7.
- García, I. F., Novara, D., mc Nabola, A., 2019. A model for selecting the most cost-effective pressure control device for more sustainable water supply networks. *Water*, [online] 11, n. 6, p. 1297.
- Go Associados. ESTUDO DE PERDAS DE ÁGUA DO INSTITUTO TRATA BRASIL DE 2023 (SNIS) 2021: DESAFIOS PARA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E AVANÇO DA EFICIÊNCIA DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL, São Paulo, 2023. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Estudo-de-Perdas-de-Agua_2023.pdf. Acesso em: 28 ago. 2023.
- Gupta, A., Kulat, K., D., A., 2018. Selective literature review on leak management techniques for water distribution system. *Water resources management*, v. 32, p. 3247-3269. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1985-6>
- Han, X., Boota, M. W., Soomro, S. H., Ali, S., Soomro, S. G. H., Soomro, N. E. H., Soomro, M. H. A. A., Soomro, A. R., Baatol, S., Bai, Y., Shi, X., Guo, J., Li, Y., Hu, C., Tayyab, M. Water strategies and management: current paths to sustainable water use. *Applied Water Science*, v. 14, n. 7, p. 154, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02214-2>
- Herrera, M., Abraham, E., Stoianov, I., 2016. A graph-theoretic framework for assessing the resilience of sectorised water distribution networks. *Water Resources Management*, v. 30, p. 1685-1699. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1245-6>
- IIAMA-UPV., 2022. Managing advanced hydraulic models with QGISRed plugin from EPANET to digital twins. *Universidade Politécnica de Valencia*. Disponível em: <https://wdsa-ccwi2022.upv.es/managing-advanced-hydraulic-models-with-qgisred-plugin-from-epanet-to-digital-twins/>. Acesso em: 18 out. 2023.
- IIAMA-UPV - Universidade Politécnica de Valência., 2023. QGISRED: Quantitative Geographic Information Systems for Resource and Environmental Decision-Making. Disponível em: <https://qgisred.upv.es/en/diffusion/publications>. Acesso em: 20 Set 2023.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística., 2022. Sinopse Censo 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidade-s-e-estados/mg/delfim-moreira.html>
- Jafarinejad, S., Hernandez, R., R., Bigham, S., Beckingham, B., S., 2023. The Intertwined Renewable Energy–Water–Environment

(REWE) Nexus Challenges and Opportunities: A Case Study of California. Sustainability, v. 15, n. 13, p. 10672. <https://doi.org/10.3390/su151310672>

Labrecque, S., 2015. Water loss: seven things you need to know about an invisible global problem. Disponível em: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/mar/02/water-loss-eight-things-you-need-to-know-about-an-invisible-globalproblem>. Acesso em 20 jun. 2023

Liu, W., Song, Z. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. Reliability Engineering & System Safety, v. 193, p. 106617, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106617>

Lohrmann, A., Farfan., J., Lohrmann, C., Kölbel, J., F., Petterson, F., 2023. Troubled waters: Estimating the role of the power sector in future water scarcity crises. Energy, p. 128820. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128820>

Mabrok, M., Saad, A., Ahmed, T., Alsayab, H., 2022. Modeling and simulations of Water Network Distribution to Assess Water Quality: Kuwait as a case study. Alexandria Engineering Journal, v. 61, n. 12, p. 11859-11877. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.05.038>

Marcondes, M., C., 2019. Avaliação do Sistema de Abastecimento de água no Município de Delfim Moreira - MG. Monografia. (Graduação em Engenharia Civil) Itajubá. Centro Universitário de Itajubá – FEPI, 53p.

Marcondes, M., C., 2023. Estudos de calibração de rede de distribuição de água real com uso de redes neurais artificiais com vistas ao controle de perdas de água. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Itajubá, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.

Martínez-Alzamora, F., Lerma, N., Bartolin, H., Vegas-Niño, O., 2019 Upgrade of the GISRed application for the free analysis of WDN under GIS environment. In Proceedings of the 17th International Computing & Control for the Water Industry Conference, CCWI, Exeter, UK, 1–4 September, pp. 1–3

Martins, A., S., 2022. Tutorial GEO EPANET. Elaborando um modelo hidráulico utilizando a ferramenta QGIS e os complementos QgisRed, Closest Point e Line Around Points. Disponível em: [https://github.com/AndersonMartins83/Geo_Epanet-elaboracao-de-um-modelo-](https://github.com/AndersonMartins83/Geo_Epanet-elaboracao-de-um-modelo-hidraulico/blob/main/Tutorial%20GEO%20EPANET%20final.pdf)

[hidraulico/blob/main/Tutorial%20GEO%20EPANET%20final.pdf](https://github.com/AndersonMartins83/Geo_Epanet-elaboracao-de-um-modelo-hidraulico/blob/main/Tutorial%20GEO%20EPANET%20final.pdf). Acesso em: 03 dez 2022

Martins, A., S., 2023. Geo_Epanet-elaboracao-de-um-modelo-hidraulico. (GitHub). Disponível em: https://github.com/AndersonMartins83/Geo_Epanet-elaboracao-de-um-modelo-hidraulico Acesso em: 03 dez 2022.

Meijer, L., J., J., Emmerick, T., V., Der-Ent, R., V., Schmidt, C., Lebreton, L., E., 2021. More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. Science Advances, v. 7, n. 18, p. eaaz5803. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803>

Mishra, B., K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S., Gautama, A., 2021. Water security in a changing environment: Concept, challenges, and solutions. Water, [online] 13, n. 4, p. 490, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13040490>

MILIĆEVIĆ, D.; MILIĆEVIĆ, M.; TRAJKOVIĆ, R. Challenges in water loss management in water supply systems. In: 3. Naučna konferencija sa međunarodnim učešćem "Gubici vode u sistemu javnog vodosnabdevanja. 2024. p. 37-50. <https://doi.org/10.5937/GV24002M>

Moraes, A., F., 2022. Análise dos impactos gerados no sistema de abastecimento de água, devido à evacuação de moradores, em área afetada pela subsidência do solo na cidade de Maceió/AL. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) Maceió, Universidade Federal de Alagoas, 91p. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/2020/2030/1/evacuacao%20de%20moradores%20em%20area%20afetada%20pela%20subsidencia%20do%20solo%20na%20cidade%20de%20Maceio%20AL.pdf>. Acesso em: 01 abr 2023. <https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/2020/2030/1/evacuacao%20de%20moradores%20em%20area%20afetada%20pela%20subsidencia%20do%20solo%20na%20cidade%20de%20Maceio%20AL.pdf>

Mrša, Laura., 2023. Numerical analysis of flow in the water supply system network. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) Rijeka. University of Rijeka, Faculty of Engineering, Disponível em: [ject/riteh%3A3205/datastream/PDF/view](https://repositorio.ijer.hr/bitstream/handle/123456789/10549/1/An%20alis%20dos%20impactos%20gerados%20no%20sistema%20de%20abastecimento%20de%20agua.pdf). Acesso em 11 Abr 2023

Nibi, K., V., Kumar, M., N., Devidas, A., R., Ramesh, M., V., Thadathil, S., P., 2022. GIS based Urban Water Distribution Network Analysis: A Case Study in Kochi, India. In:

- 2022 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS). IEEE. p. 956-963. <https://doi.org/10.1109/ICCCIS56430.2022.10037629>
- Nouri, N., Baladi, F., Nasiri, A., 2019. Seifoddini, H., Otieno, W. Water withdrawal and consumption reduction for electrical energy generation systems. *Applied Energy*, v. 248, p. 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.023>
- Nunes, R., Arraut, E., Pimentel, M., 2023. Risk Assessment Model for the Renewal of Water Distribution Networks: A Practical Approach. *Water*, v. 15, n. 8, p. 1509. <https://doi.org/10.3390/w15081509>
- Palermo, S., A., Maiolo, M., Brusco, A., C., Turco, M., Pirouz, B., Greco, E., Spezzano, G., Piro, P., 2022. Smart Technologies for Water Resource Management: An Overview. *Sensors*, v. 22, n. 16, p. 6225, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22166225>
- Pietrobon, G., 2018. Analisi e ottimizzazione della gestione di un sistema idropotabile complesso, 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade de Padua, Itália. Disponível em: <https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/37227>. Acesso em 25 Mar 2023
- Prefeitura Municipal de Delfim Moreira – MG., 2023. História da cidade. Disponível em: <https://www.delfimmoreira.mg.gov.br/>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- Rai, P., K., 2023. Role of Water-Energy-Food Nexus in Environmental Management and Climate Action. *Energy Nexus*, p. 100230, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100230>
- Reis, A., L., Lopes, A., R., M., Andrade-Campos., Henggeler, C., 2023. A review of operational control strategies in water supply systems for energy and cost efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 175, p. 113140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113140>
- Rocha, T., S., Ribeiro, H., M., C., 2023. Caracterização do sistema de abastecimento de água da comunidade São Francisco de Irituia, Irituia - PA. *Revista Brasileira De Geografia Física*, [online] 16. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2410-2419>
- Rusli, E., F., Aziz, I., A., Jaafar, J., Haron, N., Qaiyum, S., Ali, N.F., 2017. Pipeline leakage alert system with water displacement detection. In 2017: IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSe). IEEE. p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICWiSe.2017.8267154>
- Souza, D., E., S., Mesquita, A., L., A., Blanco, C., J., C., 2023. Pressure Regulation in a Water Distribution Network Using Pumps as Turbines at Variable Speed for Energy Recovery. *Water Resources Management*, v. 37, n. 3, p. 1183-1206.
- Sesma-Martín, D., Puente-Ajovín, M., 2022. The Environmental Kuznets Curve at the thermoelectricity-water nexus: Empirical evidence from Spain. *Water Resources and Economics*, v. 39, p. 100202. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2022.100202>
- Shekofteh, M., R., Yousefi-Khoshqalb, E., Piratla, K., R., 2023. An efficient approach for partitioning water distribution networks using multi-objective optimization and graph theory. *Water Resources Management*, v. 37, n. 13, p. 5007-5022. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03592-z>
- SIAM - Sistema Integrado de Informação Ambiental, 2023. Relatório Técnico Captação em corpo de água. Delfim Moreira-MG. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/siam/outorga/2018/105452018/8659242018.pdf>. Acesso em 10 set 2023.
- Simões, M., G., Farret, F., A., Khajeh, H., Shahparasti, M., Laaksonen, H., 2021. Future renewable energy communities based flexible power systems. *Applied Sciences*, v. 12, n. 1, p. 121. <https://doi.org/10.3390/app12010121>
- Silva, F., G., B., 2003. Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-23112016-163209/pt-br.php>. Acesso em: 20 mar. 2017.
- Shuang, Q., Liu, H., J., Porse, E., 2019. Review of the quantitative resilience methods in water distribution networks. *Water*, v. 11, n. 6, p. 1189. <https://doi.org/10.3390/w11061189>
- Tian, Y., Gao, J., Chen, J., Xie, J., Que, Q., Munthali, R., M., Zhang, T., T., 2023. Optimization of Pressure Management in Water Distribution Systems Based on Pressure-Reducing Valve Control: Evaluation and Case Study. *Sustainability*, v. 15, n. 14, p. 11086. <https://doi.org/10.3390/su151411086>
- Tiepolo, M., Rosso, M., Massazza, Belcore, E., Issa, S., Braccio, S., 2019. Flood assessment for risk-informed planning along the Sirba river, Niger. *Sustainability*, [online] 11, n. 15, p. 4003. <https://doi.org/10.3390/su11154003>
- Tsutiya, M., T., 2001. Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. São Paulo: ABES. 185 p

- Tucciarelli, T., Criminisi, A., Termini, D., 1999. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, p. 277–285. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:3\(277\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:3(277))
- Velayudhan, N., K., Pradeep, P., Rao, S., N., Devidas, A., R., Ramesh, M., V., 2022. IoT-enabled water distribution systems-a comparative technological review. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3208142>.
- Vieira, B., S., Mayerle, S., F., Campos, L., M., S., Coelho, L., C., 2020. Optimizing drinking water distribution system operations. *European Journal of Operational Research*, v. 280, n. 3, p. 1035-1050. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.060>
- Vilanova, M., R., N., Balestieri, J., A., P., 2014. Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 30, p. 701-714. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.024>