



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL



ALEXIA FERREIRA MORAES

**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.**

Maceió

2022

ALEXIA FERREIRA MORAES

**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.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira
Passos das Neves

Maceió

2022

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecário: Cláudio César Temóteo Galvino – CRB4/1459

M828a Moraes, Alexia Ferreira.
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 / Alexia Ferreira Moraes. – 2022.
88 f.: il.

Orientador: Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves.
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 76-79.
Apêndice: f. 80-88.

1. Sistema de abastecimento de água. 2. Modelagem hidráulica. 3. Emergências.
I. Neves, Marllus Gustavo Ferreira Passos das. II. Título.

CDU: 628.1



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 08 horas do dia 11 de fevereiro de 2022, em uma sala virtual do Microsoft Teams, reuniu-se a banca examinadora para avaliação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) da aluna Alexia Ferreira Moraes, sob o título “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”, composta pelos seguintes participantes:

Orientador: Prof(a) Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves (A1),

Prof(a) Eduardo Lucena Cavalcanti de Amorim (A2),

Prof(a) Daisy Lira Oliveira Cavalcanti (A3).

A apresentação oral do aluno foi realizada em 30 minutos, findos os quais foi iniciado o debate, perfazendo um tempo total de defesa de 2h hora (s). A aluna obteve média final 10,0 (dez inteiros).

Abaixo, assinatura do orientador, seguida dos membros da banca, de acordo com a ordem listada acima, todos seguidos da respectiva nota, a assinatura do aluno e a assinatura do Coordenador do TCC.

Documento assinado digitalmente
 Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves
Data: 13/02/2022 22:51:22-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof (A₁) _____, nota final 10,0

Documento assinado digitalmente
 Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim
Data: 11/02/2022 10:46:58-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof (A₂) _____, nota final 10,0

Documento assinado digitalmente
 Daisy Lira Oliveira Cavalcanti
Data: 11/02/2022 11:04:51-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof (A₃) _____, nota final 10,0

Documento assinado digitalmente
 ALEXIA FERREIRA MORAES
Data: 14/02/2022 11:58:17-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Aluno: _____

Coordenador do TCC: _____

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar esse Trabalho de Conclusão de Curso, bem como toda a minha jornada acadêmica:

À minha mãe, que não mediu esforços em me proporcionar uma educação de qualidade, sentindo as minhas dores, vivendo a minha rotina e me dando todo o suporte além do necessário.

Às minhas irmãs, Raquel e Joanna, pelo amor, preocupação, incentivo e alegria com cada pequena conquista minha.

Ao meu pai, que sempre reconheceu meu potencial e acreditava muito que eu chegaria longe.

Ao Alberto Matheus, meu namorado, pelos ouvidos, pelos conselhos, pela paciência em todas as fases desse processo, por me incentivar todos os dias e pelo carinho de sempre.

À minha amiga, Aline Pontes, minha dupla da graduação e da vida, pela parceria, pela força e pelo apoio, especialmente durante o curso, e pela amizade que sempre foi muito presente e cheia de amor.

Aos meus amigos, Matthias, Hítilla e Isabela, com os quais compartilhei meus dias de graduação, entregas de trabalho, provas, aflições, alívios, choros e risos, e que foram um suporte essencial nessa reta final.

À minha supervisora e amiga, Angelica Duarte, pelo suporte, compreensão, incentivo durante todo o processo, especialmente nas etapas finais, e pelo auxílio técnico que foi imprescindível para a conclusão deste trabalho.

Ao Marcelo Ferro, meu líder de estágio, que me apresentou o mundo do saneamento e compartilhou todo o conhecimento possível, auxiliando tecnicamente este trabalho.

Ao Centro Acadêmico de Engenharia Civil, o qual pude fazer parte e atuar como presidente, pela experiência de lutar pelos direitos dos estudantes, de promover um ambiente mais leve durante a graduação e por todos os momentos divertidos que vivenciamos juntos.

Ao PET Ciência e Tecnologia, por me apresentar ao ensino, à pesquisa e à extensão, por me apresentar a novas realidades, por despertar habilidades e por ter sido um lugar de refúgio durante muitos momentos da graduação.

Ao professor Marllus Gustavo, meu orientador, que confiou na proposta do trabalho e me auxiliou durante o processo.

A todos os meus professores, que compartilharam conhecimento, experiências e deixaram um pouquinho de si para me transformar em uma profissional capacitada, competente e humana.

Ao CTEC e à UFAL, pelo ensino público, gratuito e de qualidade, por terem sido minha segunda casa durante os anos de graduação, pelos investimentos realizados em meus estudos, e por me ensinar muito mais do que a engenharia.

Por fim, à Deus, que me permitiu vivenciar tudo isso.

RESUMO

Devido à sua configuração e extensão, os sistemas de abastecimento de água (SAA) estão suscetíveis a sofrer problemas técnicos importantes e também ser afetados por condições ambientais imprevisíveis, como os desastres. Tendo em vista a situação de emergência pública vivenciada na cidade de Maceió, este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da desocupação de residências em virtude da instabilidade do terreno em bairros de Maceió, no sistema de abastecimento de água da região afetada, visando à proposição de estratégias para reduzir as implicações geradas. A área em estudo e seu sistema de abastecimento foram caracterizados, o cadastro da rede e inserção dos parâmetros foram realizados através do software QGIS e o modelo foi exportado para o software EPANET para a execução da simulação hidráulica e calibração de dois cenários, anterior ao evento ocorrido e atual. Por fim, foi identificada a estratégia que poderia ser benéfica ao SAA e realizada uma nova simulação para verificação da pressão. Com a desocupação das moradias nos bairros da região afetada, houve uma redução de 41,30% no número de ligações ativas de água, 44,45% no consumo de água e 31,72% de faturamento, representando um prejuízo de mais de 500 mil reais por mês. Através da simulação hidráulica, observou-se que 55,46% da rede apresentou um acréscimo de pressão entre 0 e 5 mca, e 15,14% um acréscimo maior que 10 mca, no horário de maior consumo, podendo ocasionar vazamentos nas tubulações. Os valores de perda de carga diminuíram devido a diminuição do atrito do líquido com as paredes dos condutos, causado pela variação de consumo ao longo do dia. A estratégia utilizada para o SAA foi o capeamento de toda a rede de distribuição, mantendo somente as adutoras principais que fornecem água para outras áreas. A simulação deste cenário mostrou que as pressões obtidas são suficientes para abastecimento, com variação entre 0 e 1 mca em 87,34% dos nós em relação ao cenário atual. Assim, a estratégia proposta para minimizar os impactos gerados no SAA, mostrou-se eficaz.

Palavras chave: Sistema de abastecimento de água. Modelagem hidráulica. Emergências.

ABSTRACT

Due to their configuration and extension, water supply systems (WSS) are susceptible to suffer important technical problems and also be affected by unpredictable environmental conditions, such as disasters. In view of the public emergency situation experienced in the city of Maceió, this paper aims to evaluate the impact of residential eviction due to terrain instability in neighborhoods of Maceió, in the water supply system of the affected region, aiming at the proposition of strategies to reduce the implications generated. The study area and its supply system were characterized, the network registration and insertion of parameters were performed through the QGIS software and the model was exported to the EPANET software for the execution of the hydraulic simulation and calibration of two scenarios, prior to the event and current. Finally, the strategy that could be beneficial to the WSS was identified and a new simulation was performed to verify the pressure. With the eviction of the houses in the neighborhoods of the affected region, there was a reduction of 41.30% in the number of active water connections, 44.45% in water consumption and 31.72% in billing, representing a loss of more than 500 thousand Reais per month. Through the hydraulic simulation, it was observed that 55.46% of the network presented an increase in pressure between 0 and 5 mca, and 15.14% an increase greater than 10 mca, at the time of highest consumption, which could cause leaks in the pipes. The pressure drop values decreased due to the reduction in friction of the liquid with the walls of the conduits, caused by the variation in consumption throughout the day. The strategy used for the OSS was to cap the entire distribution network, keeping only the main water mains that supply water to other areas. The simulation of this scenario showed that the pressures obtained are sufficient for supply, with a variation between 0 and 1 mca in 87.34% of the nodes in relation to the current scenario. Thus, the proposed strategy to minimize the impacts generated in the WSS proved to be effective.

Key words: Water supply system. Hydraulic modeling. Emergencies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concepção de um Sistema de Abastecimento de Água	17
Figura 2 - Pontos frequentes de vazamento em ramais	21
Figura 3 - Pontos frequentes de vazamento em redes de distribuição.....	21
Figura 4 - Classificação de emergência segundo impacto de perigos ambientais em sistemas de abastecimento de água	24
Figura 5 - Componentes de um sistema de distribuição de água.....	25
Figura 6 - Fundos do Hospital Miguel Couto inundado pela lagoa	29
Figura 7 - Mapa interferométrico da região	30
Figura 8 - Esquema ilustrativo do processo de subsidência e danos causados na superfície do terreno	30
Figura 9 - Evolução da subsidência entre os anos 2016 a 2018 (à esquerda) e 2018 a 2019 (à direita)	31
Figura 10 - Mapa de desocupação dos locais afetados	32
Figura 11 - Área de estudo.....	34
Figura 12 - Padrão de consumo DMC Samambaia.....	38
Figura 13 - Padrão de consumo DMC Gruta de Lourdes	38
Figura 14 - Mapa de ocorrência de vazamentos no entorno da região afetada	40
Figura 15 - Rede de distribuição de água da área em estudo.....	42
Figura 16 - Mapa dos pontos fora da área de estudo.....	43
Figura 17 - Modelo hidráulico do sistema no EPANET	44
Figura 18 - Esquema do Sistema Pratygy até o Reservatório R4.....	48
Figura 19 - Mapa de localização dos DMCs do Sistema R4	49
Figura 20 - Mapa de localização dos registros	50
Figura 21 - Esquema da ETA Cardoso até o Reservatório R8.....	51
Figura 22 - Esquema da ETA Cardoso até o Reservatório R3A	52
Figura 23 - Gráfico de ligações ativas de água da área afetada em janeiro de 2018 e junho de 2021.	54
Figura 24 - Gráfico do volume de água consumido na área afetada (m ³ /mês) em janeiro de 2018 e junho de 2021.	56

Figura 25 – Gráfico de faturamento do volume de água consumido na área afetada, em janeiro de 2018 e junho de 2021.	57
Figura 26 - Gráfico de comparação dos valores médios de pressão	59
Figura 27 – Valores de pressão dinâmica (mca) às 3h no cenário antigo (à esquerda) e atual (à direita).	60
Figura 28 - Região com valores de pressão acima de 40 mca, às 3h, no cenário antigo	61
Figura 29 - Região com valores acima de 40 mca, às 3h, no cenário atual	61
Figura 30 – Valores de pressão dinâmica (mca), às 10h, no cenário antigo (à esquerda) e no cenário atual (à direita).....	62
Figura 31 - Mapa de localização das redes com variação de pressão acima de 10 mca	66
Figura 32 - Perda de carga no cenário antigo às 10h	67
Figura 33 - Perda de carga no cenário atual às 10h	68
Figura 34 - Valores de pressão nas adutoras do reservatório R4 às 10h	70
Figura 35 - Valores de pressão nas adutoras do reservatório R3A às 10h	71
Figura 36 - Valores de pressão na adutora do poço P-FA03 às 10h.....	72
Figura 37 - Valores de pressão dinâmica (mca), às 10h, no cenário com a estratégia (à esquerda) e no cenário atual (à direita)	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fórmulas para o cálculo da perda de carga	26
Tabela 2 - Valor do coeficiente C sugerido para a fórmula de Hazen-Williams.....	36
Tabela 3 - Dados de calibração.....	45
Tabela 4 - Características da rede da região afetada	53
Tabela 5 - Porcentagem de ligações ativas na área afetada em janeiro de 2018 e junho de 2021	55
Tabela 6 - Porcentagem de redução do volume de água consumido em janeiro de 2018 e junho de 2021	56
Tabela 7 - Porcentagem de redução do faturamento na área afetada em janeiro de 2018 e junho de 2021	57
Tabela 8 - Resultados da calibração	58
Tabela 9 - Acréscimo de pressão nos nós da rede de distribuição	63
Tabela 10 - Locais com variação de pressão acima de 10 mca.....	63
Tabela 11 - Variação de pressão entre o cenário com a estratégia e o cenário atual	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo do abastecimento dos bairros afetados	53
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	Alagoas
CASAL	Companhia de Saneamento de Alagoas
CPRM	Serviço Geológico Brasileiro
DN	Diâmetro Nominal
DMC	Distrito de Medição e Controle
ETA	Estação de Tratamento de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
mca	Metros de Coluna D'água
NBR	Norma Brasileira
OMS	Organização Mundial da Saúde
OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde
PS	Persistent Scatterers
QGIS	Quantum GIS
RNF	Reservatório de Nível Fixo
RNV	Reservatório de Nível Variável
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
VRP	Válvula Redutora de Pressão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Caracterização do problema	14
1.2	Objetivo geral	15
1.3	Objetivos específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Sistemas de Abastecimento de Água	16
2.2	Principais problemas em redes de distribuição de água	19
2.3	Vulnerabilidade em sistemas de abastecimento de água	22
2.4	Modelo de simulação hidráulica utilizando o <i>software</i> EPANET	24
2.5	Modelagem de sistemas de distribuição de água em SIG	27
2.6	Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros afetados de Maceió	29
3	METODOLOGIA	32
3.1	Caracterização do sistema de abastecimento de água em estudo	32
3.2	Simulação hidráulica e avaliação dos impactos	35
3.2.1	Levantamento dos dados para a construção do modelo	36
3.2.2	Construção do modelo	41
3.2.3	Cenários de simulação e calibração do modelo	44
3.2.4	Avaliação dos impactos	46
3.3	Proposição de estratégias para minimização dos impactos	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Sistema de abastecimento de água da área em estudo	47
4.2	Simulação hidráulica e avaliação dos impactos	58
4.3	Estratégias para minimização dos impactos	68
5	CONCLUSÕES	74

REFERÊNCIAS

76

APÊNDICES

80

1 INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do problema

Em 2018, a cidade de Maceió experienciou uma situação de emergência pública, que teve início no bairro do Pinheiro. Segundo a CPRM (2019), historicamente, o bairro do Pinheiro, localizado no município de Maceió (AL), vinha apresentando inúmeras rachaduras e afundamentos em moradias e vias do bairro. Após as fortes chuvas de verão ocorridas no dia 15 de fevereiro de 2018 e o abalo sísmico de magnitude 2,4mR (escala de magnitude regional para o Brasil) ocorrido no dia 3 de março de 2018, esses fenômenos se intensificaram, produzindo danos como fissuras, trincas e rachaduras em edificações, ruas e passeios em uma área expressiva do bairro, com a interdição de diversas moradias.

Através dos estudos, foi constatado que está ocorrendo desestabilização das cavidades provenientes da extração de sal-gema, provocando halocinese (movimentação do sal) e criando, a princípio, uma situação dinâmica com reativação de estruturas geológicas preexistentes, subsidência e deformações rúpteis em superfície em parte dos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro (CPRM, 2019).

Nestes locais, além dos danos sociais, econômicos e emocionais, os efeitos foram observados também na infraestrutura da cidade, impactando de forma direta no sistema de abastecimento de água (SAA) da região, tendo em vista o alto número de desocupação de residências, gerando um menor consumo de água na região e alteração de parâmetros como pressão e vazão da rede de distribuição.

Sabe-se que um SAA, em quantidade e qualidade adequadas para suprimento da população, é atividade essencial e necessária, tendo em vista sua importância às diferentes atividades humanas, sobretudo à saúde. Sua operação consiste em um conjunto de ações com o objetivo de garantir o funcionamento e a eficiência de todas as unidades componentes, de modo que todos os pontos de consumo sejam plenamente abastecidos, de acordo, também, com parâmetros técnicos e econômicos (MENESES, 2011). No entanto, os SAA podem sofrer problemas técnicos importantes e podem ser afetados por condições ambientais como a que ocorreu nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro.

Os levantamentos de perdas econômicas provocadas por desastres naturais ou de origem antrópica, por exemplo, demonstram que os SAA estão entre as

infraestruturas mais suscetíveis aos impactos destes fenômenos. Além disso, a falta de água pós-desastre aumenta os riscos de surtos de doenças. Em uma situação de emergência, provocada por fenômenos de origem natural ou antropogênica, é imprescindível garantir água potável em quantidade e qualidade adequadas. Por esta razão, na gestão de abastecimento de água potável é preciso considerar as diferentes situações que podem provocar interrupções dos serviços. (NAVARRO-ROA, 2008).

Para entender ou evitar este tipo de problema, bem como para o planejamento de intervenções futuras, ampliações ou adequações das redes de distribuição, pode-se fazer uso dos modelos de simulação hidráulica, que atuam como ferramenta de auxílio na tomada de decisões, a partir da análise do comportamento hidráulico, através da criação de cenários, trazendo maior confiabilidade no estabelecimento de regras operativas nos sistemas.

A utilização desses modelos reduz os erros e incertezas, de maneira a evitar e solucionar problemas de operação de sistemas de abastecimento, objetivando a sua melhoria contínua (CALDO, 2015). Para isso, pode-se fazer uso de programas como o EPANET e o QGIS, que permitem a execução da simulação hidráulica e auxiliam na construção do modelo, respectivamente.

Nesse contexto, o presente trabalho auxiliará na caracterização e mapeamento do cenário atual da rede de abastecimento das áreas afetadas, que compreende os bairros de Pinheiro, Bebedouro, Bom Parto, Mutange e Farol, localizados na cidade de Maceió, Alagoas, propondo estratégias que auxiliem na tomada de decisões para a redução dos danos e preservação da saúde pública.

1.2 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar o impacto da desocupação de residências em virtude da instabilidade do terreno no abastecimento de água da região afetada, que compreende os bairros do Pinheiro, Bebedouro, Bom Parto, Farol e Mutange, visando à proposição de estratégias para reduzir as implicações geradas.

1.3 Objetivos específicos

- Caracterizar e mapear a situação atual da rede de abastecimento dos bairros afetados;
- Avaliar os impactos causados no sistema devido ao cenário atual da região, fazendo uso da simulação hidráulica;
- Propor meios para minimizar os impactos, avaliando alternativas a partir de simulação hidráulica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistemas de Abastecimento de Água

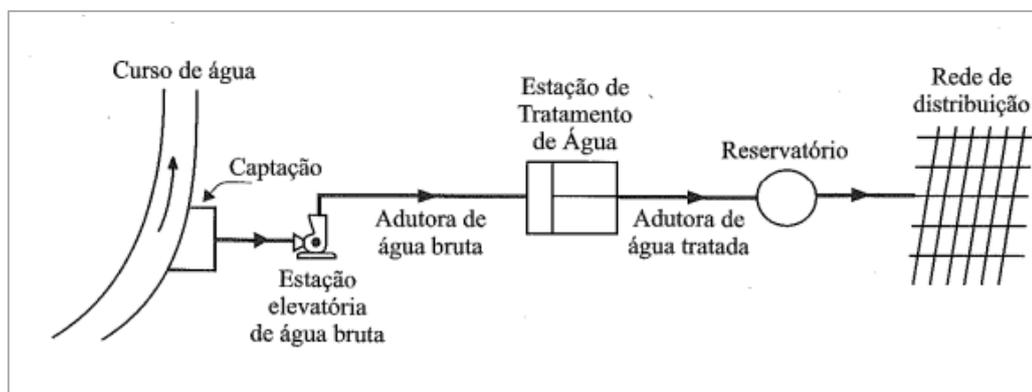
De acordo com Azevedo Netto et al. (1998), o Sistema de Abastecimento de Água consiste em um conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados ao abastecimento de água potável de uma comunidade para fins de consumo doméstico, serviços públicos, consumo industrial e outros usos.

Os sistemas de abastecimento de águas são infraestruturas complexas que têm por finalidade captar água bruta de acordo com as disponibilidades e necessidades, produzir água potável através da água bruta captada obedecendo às normas de qualidade, armazenar e distribuir essa água para a população de forma adequada e confiável (DINIZ, 2019).

O marco legal do saneamento básico do Brasil (BRASIL, 2020) define o abastecimento de água potável como *“constituído pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e seus instrumentos de medição”*

De um modo geral, um sistema de abastecimento é constituído pelos seguintes componentes: manancial, captação, adutoras, estações elevatórias, estação de tratamento, reservatórios e rede de distribuição, conforme Figura 1.

Figura 1 - Concepção de um Sistema de Abastecimento de Água



Fonte: TSUTIYA (2006).

Estes componentes dizem respeito a:

a) Manancial: é o local onde é captada água para o abastecimento. Esta captação pode ser de uma fonte subterrânea ou superficial e deve ser suficiente para atender a demanda de projeto. Podem ser rios, lagos, barragens, entre outros (TSUTIYA, 2006).

b) Captação: estrutura e equipamentos com finalidade de retirar água do manancial de abastecimento.

c) Estação elevatória: conjunto de estruturas e equipamentos destinados a recalcar a água de um ponto mais baixo para outro de cota mais elevada. Podem ser estações elevatórias de água bruta ou de água tratada, assim como em forma de “booster” em redes de distribuição com intuito de aumentar pressão e vazão em determinados pontos.

d) Adutoras: são canalizações dos sistemas de abastecimento de água com o propósito de conduzir água para as unidades que antecedem a rede de distribuição do sistema. As adutoras, em geral, não distribuem água aos consumidores e são responsáveis pela interligação da captação, estação de tratamento e reservatórios (TSUTIYA, 2006).

e) Estação de Tratamento de Água (ETA): conjunto de estruturas e equipamentos com objetivo de tornar a água potável para consumo humano, atendendo aos padrões de qualidade exigidos pelo ministério da Saúde. Basicamente o tratamento da água é dividido nas seguintes etapas: Coagulação, Floculação, Decantação, Filtração, Fluoretação, Cloração e Correção de PH.

f) Reservatórios: são estruturas para garantir a reserva de água do sistema, no tocante aos consumos e também às reservas de incêndio, bem como equilibrar as pressões e vazões na distribuição. Podem ser classificados em reservatórios do tipo enterrado, semienterrado, apoiado e elevado.

g) Rede de distribuição: é a unidade do sistema que conduz a água para os pontos de consumo (prédios, indústrias, etc.). É constituída por um conjunto de tubulações e peças especiais dispostas convenientemente, a fim de garantir o abastecimento dos consumidores de forma contínua nas quantidades e pressão recomendadas (AZEVEDO NETTO, 1998). É composta de condutos principais e secundários, em que os condutos principais são as tubulações de maiores diâmetros e que alimentam os condutos secundários, enquanto os condutos secundários são as canalizações de menor diâmetro e que abastecem os consumidores.

A NBR 12218:2017, intitulada “Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento”, estabelece os seguintes valores de referência para rede de distribuição de água:

- Pressão estática máxima = 400 kPa (40 mca)
- Pressão dinâmica ou de serviço mínima = 100 kPa (10 mca)
- Diâmetro mínimo = DN 50
- Velocidade mínima = 0,60 m/s
- Velocidade máxima = 3,50 m/s

Segundo Gomes (2004), a eficiência do sistema ou de sua operação pode ser mensurada pela adequação das vazões e pressões disponíveis aos pontos de consumo, pela garantia de água potável fornecida ao consumidor, pela intermitência ou não do sistema, pelos níveis de perda de água e pelo uso racional de energia (*apud* CARMO, 2009)

No sistema de abastecimento, o consumo de água representa o volume de água num determinado período de tempo que se consome nos diferentes pontos de uma rede de abastecimento, designando-se por consumo urbano. O conhecimento dos padrões de consumo em áreas de características distintas e a sua influência nas

infraestruturas da rede, designadamente nos reservatórios, podem referir-se como uma ferramenta importante na gestão dos sistemas de abastecimento de água (CARDOSO-GONÇALVEZ, 2014 *apud* PIRES, 2020).

2.2 Principais problemas em redes de distribuição de água

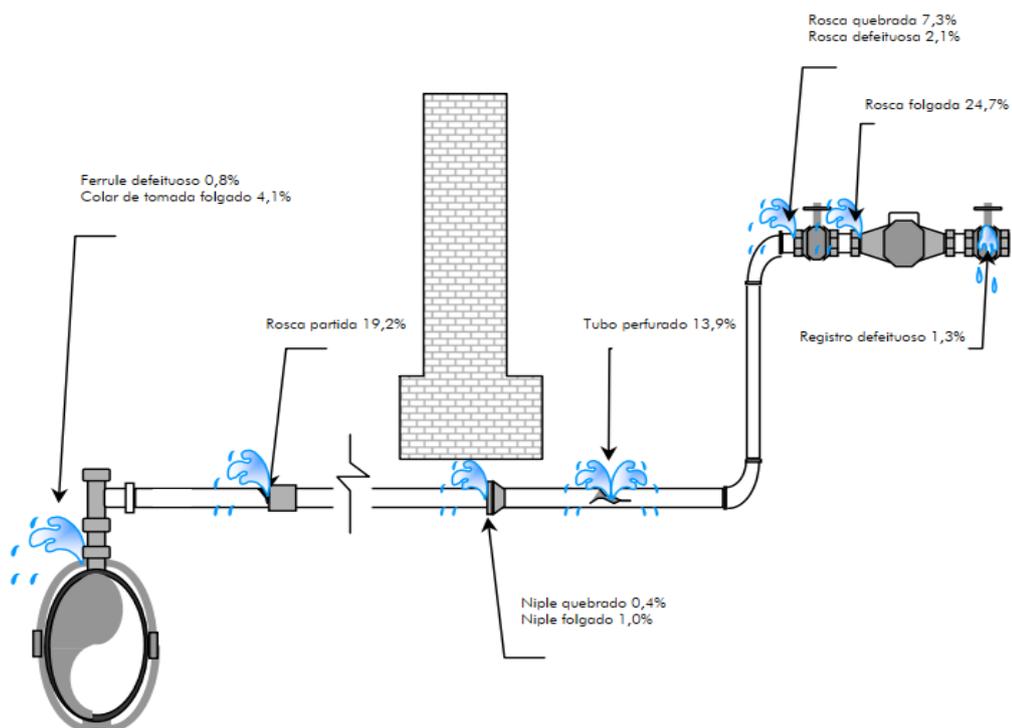
A operação do SAA se constitui na principal ação de gestão das empresas de saneamento, influenciando diretamente na qualidade do sistema de abastecimento em termos sanitários, ambientais, econômicos e sociais. Problemas operacionais são comuns em sistemas de abastecimento de água, principalmente naqueles sistemas planejados, projetados, executados e/ou operados inadequadamente. Dentre os principais problemas, é possível citar (CARMO, 2009):

- Ocorrência de zonas de baixa pressão: são áreas com pressão inferior àquelas recomendadas pela NBR 12218:2017. Essas zonas podem ocorrer principalmente nas áreas mais afastadas do reservatório ou de cotas mais elevadas, e os principais fatores que contribuem para isso são: localização e/ou altura do reservatório inadequada; grandes perdas de carga nas tubulações; presença de grandes vazamentos; extensão de rede em áreas localizadas fora da área de abrangência do projeto (demandas espontâneas não previstas no projeto);
- Ocorrência de zonas de elevada pressão: são áreas que apresentam pontos na rede de distribuição com grandes diferenças de cota em relação ao nível da lâmina d'água do reservatório de distribuição, ocorrendo principalmente em áreas como morros e baixadas. Os maiores índices de perdas reais de água são identificados nessas zonas, que apresentam uma elevada ocorrência de vazamentos devido às elevadas pressões na rede;
- Elevadas perdas de carga: é a energia perdida durante o percurso de escoamento do fluido, que ocorre devido ao atrito das partículas do fluido entre si e entre as paredes da tubulação nas quais o fluido escoar. Pode ser provocada pelos acessórios na tubulação, como válvulas, registros, curvas e conexões, que alteram o módulo e/ou direção da velocidade. Com a ocorrência de elevadas perdas de carga no sistema, as pressões dinâmicas previstas no

dimensionamento podem ficar comprometidas, impactando na quantidade de água que chega ao consumidor final;

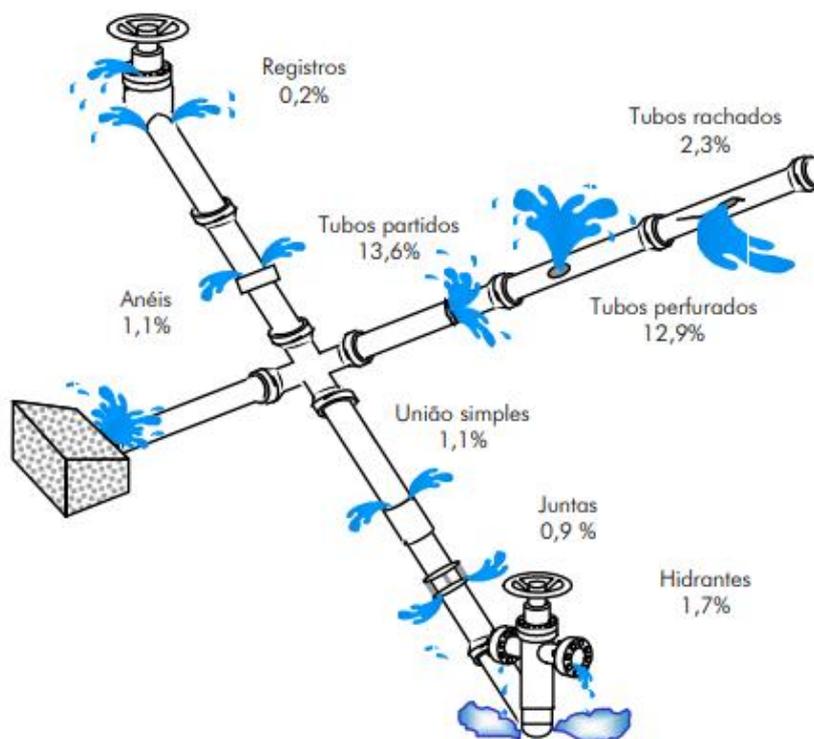
- Vazamentos: a maior incidência de ocorrências de vazamentos está nos ramais prediais, onde cerca de 35% é oriundo das roscas dos registros e hidrômetros (Figura 2), mas em termos de volume perdido, a maior quantidade é nas tubulações da rede de distribuição, sendo cerca de 25% oriundas de tubulações perfuradas/partidas (Figura 3) (BRASIL, 2003). Reis e Porto (1993) afirmam que as perdas por vazamento são diretamente proporcionais às pressões no interior da rede, podendo atingir cerca de 50% do volume total de alimentação das mesmas. Isso preocupa os profissionais da área e os leva a propor soluções para evitar ou logo recuperar as rupturas das tubulações (*apud* CARMO, 2009);
- Intermittência do fornecimento de água: é toda e qualquer interrupção do fornecimento de água em uma rede de distribuição, ou em parte dela. Os principais fatores que podem causar intermitência são: (a) produção e reservação insuficientes para vencer as demandas nos horários de pico, paralisação dos conjuntos motor-bomba, por falta de energia elétrica, pane nos equipamentos do sistema, elevados índices de perdas e desperdícios, acidentes, etc. A intermitência no fornecimento de água nos sistemas públicos de abastecimento precisa ser evitada, não apenas pelo incômodo gerado pela falta da água, mas também por prejudicar a qualidade da água; pois o processo de esvaziamento das tubulações gera pressões negativas, que podem provocar a sucção de contaminantes presentes no solo para o interior dos tubos, no caso da rede apresentar trechos com vazamentos (CARMO, 2009).

Figura 2 - Pontos frequentes de vazamento em ramais



Fonte: BRASIL (2003)

Figura 3 - Pontos frequentes de vazamento em redes de distribuição



Fonte: BRASIL (2003)

2.3 Vulnerabilidade em sistemas de abastecimento de água

Para Navarro-Roa (2008), a determinação da vulnerabilidade do SAA se inicia com a determinação da vulnerabilidade dos componentes (confiabilidade mecânica) e termina com a determinação da vulnerabilidade hidráulica do sistema (confiabilidade hidráulica). No entanto, dada as complexidades destes sistemas, é preciso definir quais são os componentes que mais influenciam nos seus desempenhos ou quais são os componentes importantes.

A identificação dos componentes críticos ou importantes é baseada na interdependência destes elementos. Aqueles componentes que tenham interdependência com outros e que possam provocar uma emergência maior no sistema são componentes fundamentais. Portanto, a configuração é um fator importante na avaliação da vulnerabilidade do sistema, pois a configuração define a inter-relação entre componentes (AGARDY, 2001).

Segundo Toro (2002), a vulnerabilidade de um sistema de abastecimento de água pode ser definida como "nível relativo de sensibilidade que tem a estabilidade do sistema avaliado em relação a um risco determinado", ou seja, o quanto determinado risco irá impactar no desempenho do sistema. Para a OMS/OPAS (1998) a suscetibilidade à perda de um elemento ou conjunto de elementos, como resultado da ocorrência de um desastre, define a vulnerabilidade em sistemas de abastecimento de água.

Para CMEOE/DEP (2001), a emergência no SAA pode ser dividida em 5 níveis:

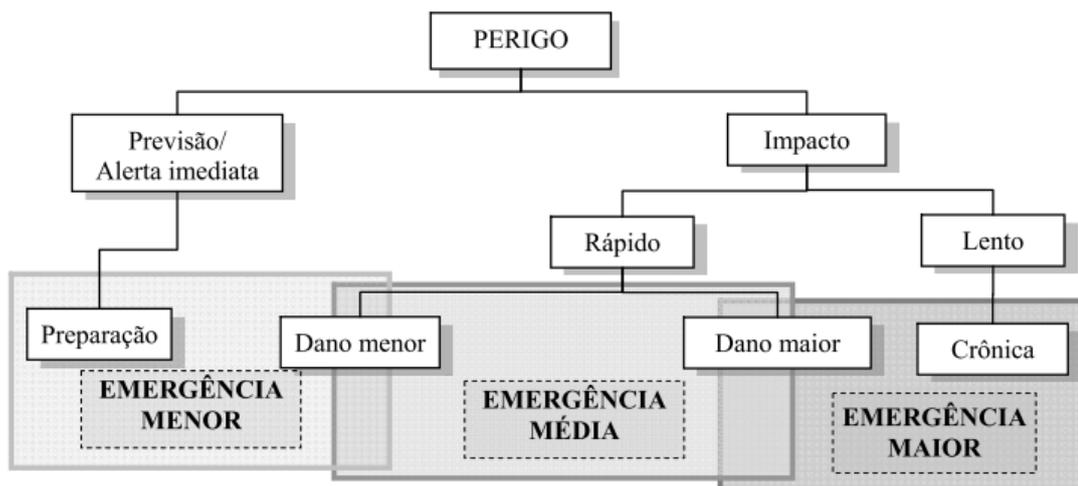
- Nível I - Problema de rotina: incidente com interrupção menor na distribuição de água, que afeta 10% ou menos do sistema e se prevê a reabilitação ou solução dentro de 24 horas ou menos. Exemplo: ruptura de tubulação principal ou problemas mecânicos na estação de bombeamento.
- Nível II - Emergência Menor/Alerta: interrupção do sistema de água que afeta 50% ou menos do sistema e estima-se que a reabilitação ou resolução não toma mais de 72 horas. Exemplo: detecção de coliformes totais em um local, problema mecânico maior na estação de bombeamento ou ETA, ou falha no fornecimento de produtos químicos.
- Nível III - Emergência Maior: incidente com interrupção muito significativa do sistema de água que afeta mais do 50% do sistema e/ou se estima mais de

72 horas para reparar ou resolver o problema. Exemplo: ruptura em adutora ou tubulação principal, perda ou falha de estações de tratamento, perda da fonte (ruptura de represa, escassez de água, contaminação, etc.), detecção geral de coliformes, detecção de coliformes fecais ou *Escherichia coli* ou atos de sabotagem.

- Nível IV - Desastre Natural: incidente comumente causado por um evento hidrometeorológico ou geológico, que interrompe o serviço de água, afetando mais de 50% do sistema e/ou requerendo mais de 7 dias para recuperar o serviço. O evento pode causar danos estruturais na ETA ou contaminar a fonte com esgoto não tratado ou substância perigosa, entre outras consequências.
- Nível V - Desastre Nuclear/Ato de Terrorismo: incidente que envolve grande e incontrolada liberação de material ou composto radioativo dentro do ambiente e fonte de abastecimento de água; ou ato deliberado que afeta um sistema de água. No caso de desastre nuclear, fontes de água superficiais dentro de raio de aproximadamente 80 km do foco de emissão podem ser contaminadas imediatamente. Fontes de água subterrâneas podem permanecer seguras por um determinado período de tempo

Deve-se ainda, levar em conta a previsibilidade ou imprevisibilidade da emergência, entendendo que a partir disso há a possibilidade de preparação e garantia de que os danos sejam menores, conforme Figura 4. Agardy (2001) estabelece uma diferença entre a emergência provocada por perigos não monitoráveis e perigos monitoráveis, como por exemplo os furacões sazonais que por ter um caráter previsível, permite a possibilidade de alertar sobre a emergência e avisar na iminência do impacto.

Figura 4 - Classificação de emergência segundo impacto de perigos ambientais em sistemas de abastecimento de água



Fonte: NAVARRO (2008), adaptado a partir de AGARDY, 2001; CMEOE/DEP, 2001.

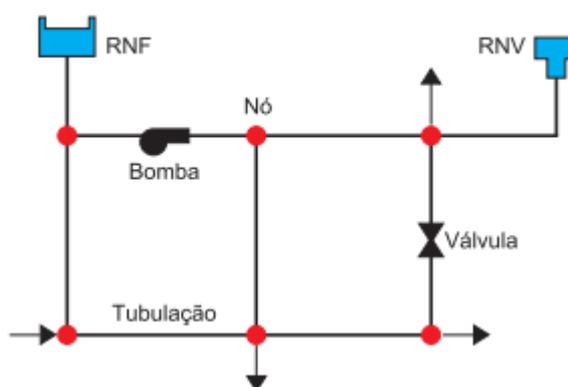
2.4 Modelo de simulação hidráulica utilizando o *software* EPANET

O EPANET é um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição pressurizada. Uma rede é constituída por tubulações, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável. O EPANET permite obter os valores da vazão em cada tubulação, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas através da rede durante o período de simulação, subdividido em múltiplos intervalos de cálculo (LENHS, 2009).

O EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, onde se destacam como principais características: dimensão ilimitada do número de componentes da rede analisada; consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc.; modelagem de bombas de velocidade constante ou variável; modelagem dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de vazão; modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água e múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo (LENHS, 2009).

Na modelagem, através do EPANET é possível modelar um sistema de distribuição de água como sendo um conjunto de trechos ligados a nós, em que os trechos representam as tubulações, bombas e válvulas de controle e os nós representam conexões, reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV), conforme Figura 5.

Figura 5 - Componentes de um sistema de distribuição de água.



Fonte: LENHS (2009)

Como dados de entrada principais para o nós, tem-se: cota do terreno, consumo base e qualidade inicial da água, obtendo como principais resultados: carga hidráulica total, pressão e qualidade da água. Para as tubulações, os principais parâmetros inseridos são: nó inicial e final, diâmetro, comprimento e coeficiente de rugosidade, obtendo como resultados: vazão, velocidade e perda de carga.

No EPANET também é possível inserir padrões temporais. Um padrão temporal é constituído por um conjunto de fatores multiplicativos que podem ser aplicados ao valor de uma determinada grandeza, de forma a representar a sua variação no tempo. Para os nós, é possível inserir o padrão de consumo e para o RNF é possível inserir o padrão de nível.

O padrão de consumo é utilizado para caracterizar a variação do consumo com o tempo. O padrão fornece um conjunto de fatores multiplicativos que são aplicados ao consumo-base para determinar o consumo corrente num determinado instante de tempo. Como exemplo, se o fator multiplicativo for 2.0, todos os consumos são dobrados, 0.5 diminui para metade e 1.0 mantém os consumos inalterados.

Já o padrão de nível é utilizado para modelar a variação da carga hidráulica com o tempo no reservatório de nível fixo, sendo fornecido também um conjunto de fatores multiplicativos.

Para efetuar o cálculo do desempenho hidráulico de um sistema de distribuição de água, o EPANET atualiza, em cada intervalo de cálculo, os níveis de água nos reservatórios de nível fixo e os consumos nos nós, de acordo com o padrão temporal que lhes está associado, enquanto que a altura de água no reservatório de nível variável é atualizada em função da vazão de saída.

A solução para o valor da carga hidráulica e para a vazão num ponto particular da rede, em determinado instante, é obtida resolvendo, simultaneamente, a equação da continuidade (conservação da massa), para cada nó, e a equação da conservação da energia, para cada trecho da rede. Este procedimento, designado por “Balanço Hidráulico” da rede, requer a utilização de técnicas iterativas para resolver as equações não lineares envolvidas. O EPANET emprega o “Método do Gradiente” para atingir este objetivo (LENHS, 2009).

Para o cálculo da perda de carga, são consideradas as fórmulas apresentadas na Tabela 1, onde C é o coeficiente da fórmula de Hazen-Williams, ϵ é a rugosidade absoluta, f o fator de Darcy-Weisbach, n o coeficiente de rugosidade de Manning, d o diâmetro da tubulação (m), L o comprimento da tubulação e Q a vazão (m³/s).

Tabela 1 - Fórmulas para o cálculo da perda de carga

Fórmula	Termos
Hazen-Williams	$10,674 \cdot Q^{1,852} \cdot C^{-1,852} \cdot d^{-4,871} \cdot L$
Darcy-Weisbach	$0,0827 \cdot Q^2 f(\epsilon, d, q) \cdot d^{-5} \cdot L$
Chezy-Manning	$10,29 \cdot Q^2 \cdot n^2 \cdot d^{-5,33} \cdot L$

Fonte: Autora (2021) adaptado de LENHS (2009)

O EPANET permite, ainda, que se comparem os resultados da simulação com os dados de medições em campo, realizando a calibração do modelo através da inserção de um arquivo de texto com os dados e retornando gráficos de séries temporais para comparação. Caso a diferença entre os dois valores não satisfaça o critério determinado previamente, que dependerá dos objetivos de utilização do modelo, os parâmetros são modificados e é feita uma nova análise. Esse processo é repetido até que o critério seja atendido, e assim o modelo é dito calibrado.

Diversos autores utilizam o EPANET 2.0 para avaliar o desempenho de sistemas de água. Vaz (2015) efetuou a integração do EPANET no QGIS para simular o comportamento do sistema de distribuição de água. Navarro-Roa (2008), utilizou o EPANET para avaliar uma metodologia que permita medir a vulnerabilidade hidráulica de sistemas de abastecimento de água, através de simulação hidráulica, quando um componente importante do sistema é impactado. Barroso e Galdastini (2010), estudaram as possibilidades de redução de vazamentos em um setor de distribuição de água, através da simulação hidráulica. Ostfeld, Kogan e Shamir (2002) e Ostfeld (2001) avaliam sistemas de água considerando perdas ou aumento desproporcionado da demanda em nós de consumo. Meneses (2011) elaborou um diagnóstico de um sistema de abastecimento, com o auxílio da modelagem hidráulica, para subsidiar a melhoria da gestão do sistema.

2.5 Modelagem de sistemas de distribuição de água em SIG

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) é um conjunto de sistemas de *softwares* e dados geográficos que permitem uma representação gráfica, relacionando vários tipos de dados com uma localização geográfica. Os dados do SIG conseguem ter em pouco tempo uma quantidade de informações sobre os sistemas e o território que ocupam, como topografia do terreno, estradas, limites físico-geográficos, entre outros, o que facilita a tomada de decisões (GONZALES e BEJARANO, 2019).

Originalmente, a principal função dos SIG nos sistemas de distribuição de água resumia-se à realização de mapas de localização dos elementos do sistema. Contudo, os SIG são muito mais do que uma ferramenta para realizar mapas. Oferece um extenso conjunto de ferramentas de análise espacial e gestão dos dados que, quando integrada com um modelo de simulação hidráulica, permitem obter vantagens operacionais excepcionais (VAZ, 2015).

A utilização de SIG facilita a identificação da localização específica de determinado fenômeno, por exemplo, o local de um vazamento, permitindo o acompanhamento e a análise comparativa desse fenômeno com o de outros espaços. Portanto, o SIG é importante no gerenciamento ao disponibilizar resultados mais rápidos e confiáveis, em comparação às formas convencionais de armazenamento e análise de dados (GOMES, 2010).

Atualmente, esses sistemas possuem maior compatibilidade com *softwares* de modelagem hidráulica, sendo cada vez mais utilizados para redes de distribuição de água, visto que permitem um melhor planejamento e cadastro. Através dele, é possível fazer o mapeamento de toda a rede e georreferenciá-la, inserindo dados e informações a partir da localização dos componentes. Para esse ambiente, o *software* QGIS pode ser utilizado de maneira ampla, visto que é um *software* livre, com custo de licença gratuito e interface de fácil utilização pelo usuário.

Para o desenvolvimento do projeto de uma rede de distribuição em conjunto com um *software* do ambiente SIG, é necessária a escolha de um *software* simulador que atenda às necessidades do projeto, sendo o EPANET uma das opções bastante utilizadas.

O EPANET permite a integração com Sistemas de Informação Geográfica através de módulos ou extensões dos programas. Para o QGIS, existem extensões como Qwater, Giswwater e o QGISRed, sendo esta última a solução escolhida para este trabalho, que permitem realizar a simulação hidráulica do EPANET em ambiente SIG. Contudo, estas soluções de integração com o SIG possuem limitações, como a não realização da calibração.

QGISRed é uma ferramenta desenvolvida pelo Grupo de Pesquisa REDHISP (Redes Hidráulicas e Sistemas de Pressão) do Instituto de Engenharia Hídrica e Ambiental (IIAMA) da Universidade Politécnica de Valência (UPV). Foi projetada como um complemento (*plugin*) do *software* livre QGIS para auxiliar na construção e análise de modelos hidráulicos de redes de distribuição de água de qualquer complexidade, no ambiente SIG. Permite ao usuário georreferenciar todos os elementos da rede, usar camadas geográficas de fundo, editar dados gráficos, usar ferramentas de geoprocessamento, visualizar dados por camadas, personalizar a simbologia, etc.

Além disso, o QGISRed fornece inúmeras ferramentas para ajudar a construir modelos hidráulicos, gerenciar cenários de demanda e para analisar os resultados, como: importar/exportar arquivos EPANET INP; interpolação automática de elevações de nós do MDE (Modelo Digital de Elevação); estimativa automática da rugosidade do tubo a partir do material e da idade dos tubos; visualização de múltiplas demandas e fontes de qualidade como camadas distintas e edição integrada de suas propriedades junto com as dos nós; visualização dos resultados da simulação por meio de tabelas, camadas codificadas por cores, setas e rótulos flutuantes ou estáticos.

2.6 Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros afetados de Maceió

A partir dos estudos feitos nos bairros Bebedouro, Mutange e Pinheiro desde o ano de 2018, quando começaram a surgir as primeiras ocorrências, foi constatado que o problema teve início em uma fissura de aproximadamente 280 metros de extensão, após um intenso período chuvoso, no mês de fevereiro de 2018.

Em março desse mesmo ano, houve um abalo sísmico de magnitude 2,4mR (escala de magnitude regional para o Brasil), que foi sentido pela população, embora tenha sido de baixa magnitude pela escala Richter. Danos como fissuras, trincas e rachaduras em edificações começaram a surgir, resultando na interdição de diversas moradias.

No Hospital Psiquiátrico Miguel Couto, localizado no bairro do Bebedouro, foram observados afundamentos expressivos, em que o terreno foi invadido pela água da lagoa (Figura 6). Outros edifícios próximos apresentam trincas e rachaduras que indicam recalque diferencial do terreno.

Figura 6 - Fundos do Hospital Miguel Couto inundado pela lagoa

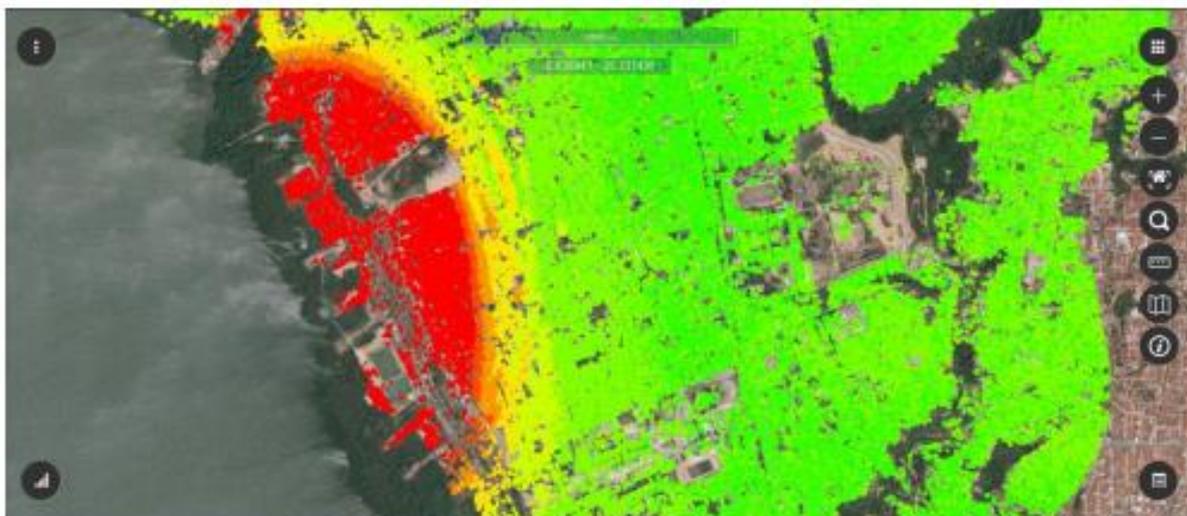


Fonte: CPRM (2019).

Dessa forma, o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) deu início a uma série de ensaios geológico-geotécnicos, geofísicos e hidrogeológicos para apurar as causas do ocorrido e através da interferometria, estudo baseado em imagens de satélite com

o objetivo de apontar as áreas com deformação do terreno e sua velocidade de deformação com alta precisão de resultado, foi possível observar uma deformação radial se espalhando do centro da área, onde atinge 40 cm de subsidência (afundamento) a partir das cavidades de extração de sal-gema localizadas à margem da Lagoa Mundaú.

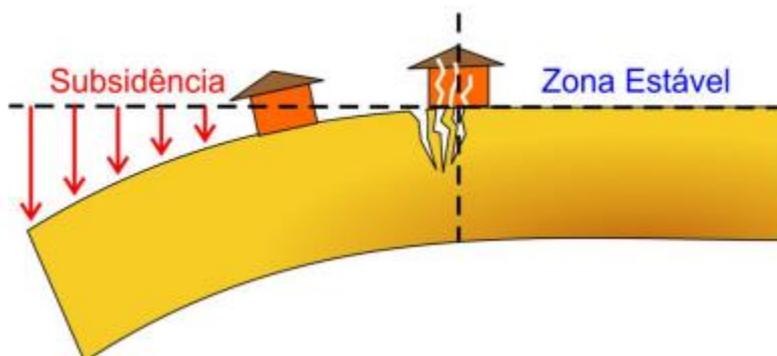
Figura 7 - Mapa interferométrico da região



Fonte: CPRM (2019)

A Figura 8 mostra como se dá o processo do afundamento observado pela interferometria, onde a região em vermelho da Figura 7 representa a região de subsidência; a região em amarelo representa a área de fissuras e trincas nas residências; e a região em verde representa a zona estável.

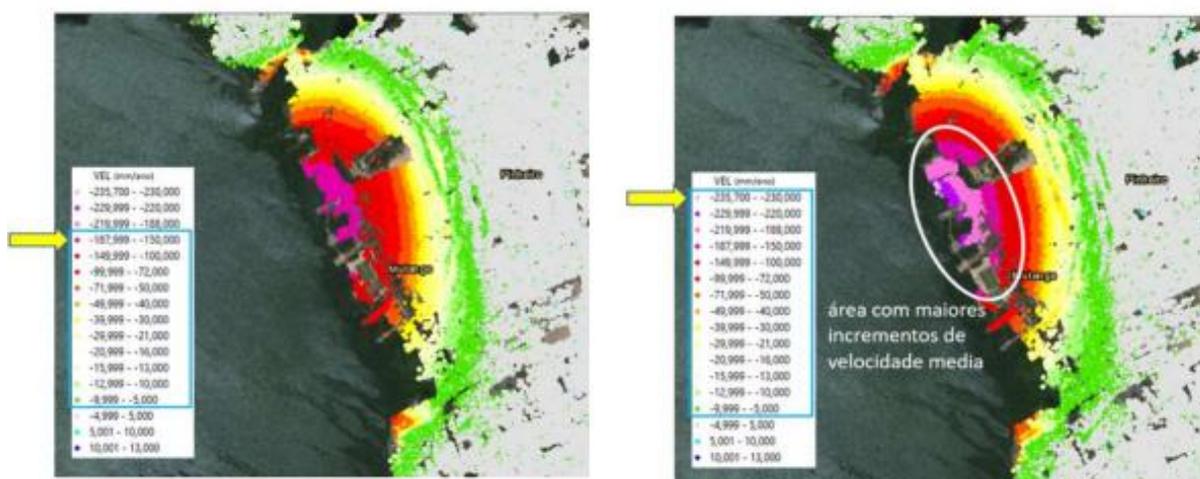
Figura 8 - Esquema ilustrativo do processo de subsidência e danos causados na superfície do terreno



Fonte: CPRM (2019).

Os dados atualizados da interferometria, recebidos pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM em final de janeiro de 2020, registram um maior incremento na intensidade das velocidades dos Persistent Scatterers – PS, que variaram de -187,99 até -72 mm/ano na análise de referência, para -235,7 até -100 mm/ano, conforme Figura 9 (CPRM, 2020).

Figura 9 - Evolução da subsidência entre os anos 2016 a 2018 (à esquerda) e 2018 a 2019 (à direita)



Fonte: CPRM (2020).

De modo a garantir a segurança da população, foi elaborado um mapa de desocupação pela Braskem, em conjunto com a Defesa Civil de Maceió, conforme Figura 10. Atualmente, cerca de 94,5 % da população já foi retirada da área.

Figura 10 - Mapa de desocupação dos locais afetados



Fonte: BRASKEM (2021)

Para a CPRM (2020), as possibilidades de ocorrência de colapso são elevadas. A desestruturação de alguma das minas de exploração de sal-gema permite estabelecer um cenário em que o colapso das próprias poderá produzir sério efeito danoso, como a reativação de estruturas geológicas que poderão acelerar os danos em Pinheiro, Mutange, Bebedouro e outros bairros.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização do sistema de abastecimento de água em estudo

Para a caracterização da área em estudo, foram levantados dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

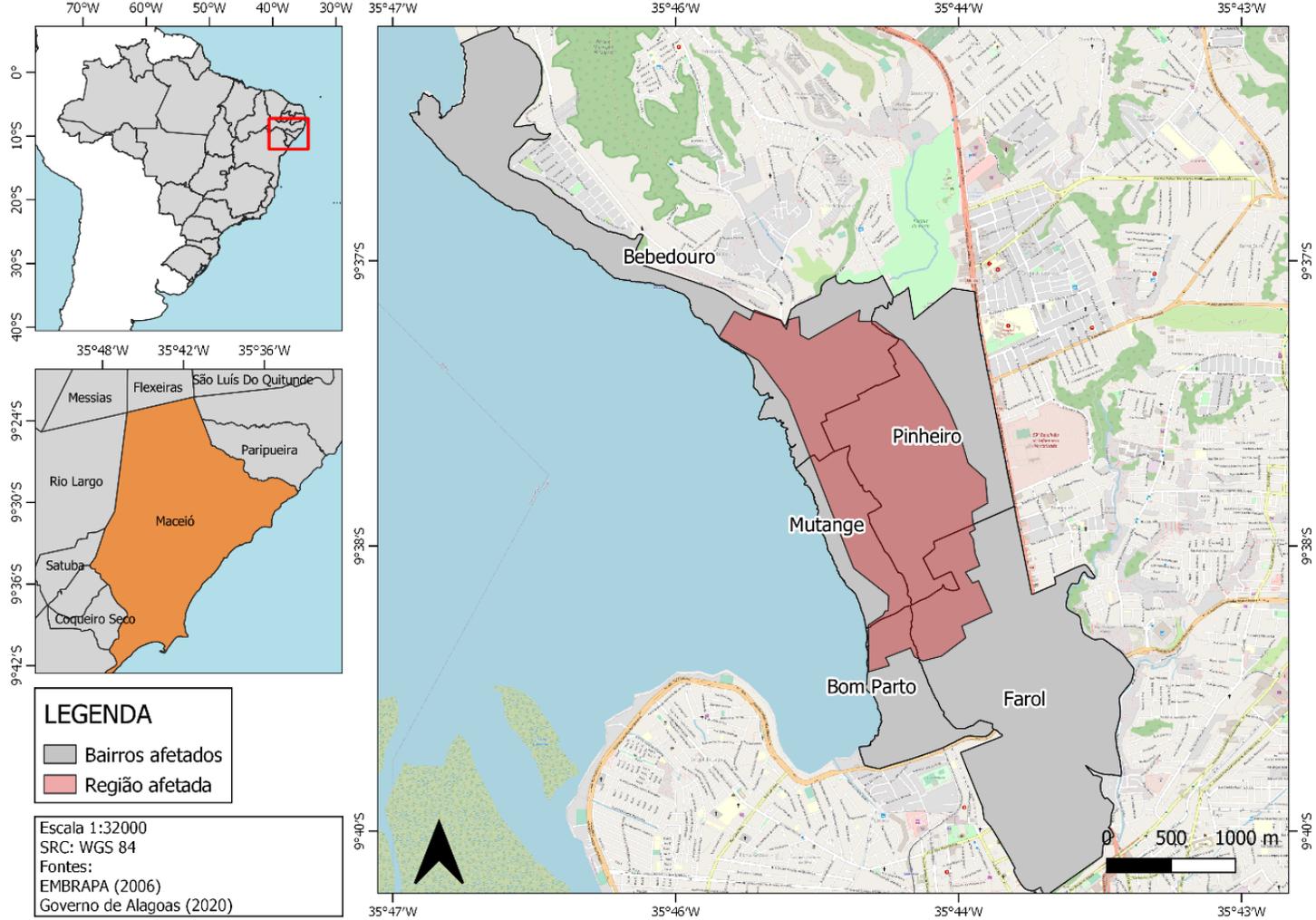
Com relação ao sistema de abastecimento de água em si, a descrição teve como base os documentos, plantas e cadastros fornecidos pela Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL) – antiga concessionária do fornecimento de água de Maceió e da empresa BRK Ambiental – atual concessionária, através de dados como:

informações da rede (diâmetro, comprimento e material), reservatórios, poços, dados de consumo atuais e antes da ocorrência no bairro do Pinheiro, ligações ativas e inativas da região e histórico de vazamento do local.

Para melhor compreensão espacial do sistema de abastecimento estudado, foram elaborados mapas com auxílio do *software* QGIS, através dos arquivos *shapefiles* e de extensão *.kmz* disponibilizados pela BRK Ambiental e pelo mapa-base do Google Satélite disponível no próprio QGIS.

A área de estudo situa-se na cidade de Maceió, Alagoas, e compreende os bairros do Pinheiro, Mutange, Bom Parto e Farol, conforme mapa da Figura 11. A área delimitada teve como base o mapa de desocupação elaborado pela BRASKEM, que diz respeito às regiões afetadas pelo afundamento do solo.

Figura 11 - Área de estudo



Fonte: Autora (202)

Conforme dados do IBGE (2010), a população para o bairro do Pinheiro em 2010 era de 19.062 habitantes, para o bairro do Mutange de 2.632 habitantes, para o bairro do Farol de 16.859 habitantes, para o bairro do Bom Parto de 12.841 habitantes e para o bairro do Bebedouro de 10.103 habitantes.

A cidade de Maceió é característica de uma geomorfologia de planície marinho-lagunar (parte baixa) e planalto sedimentar do tabuleiro (parte alta), entrecortado por áreas de vales, formando encostas de acentuado declive na transição de um para outro (OLIVEIRA, 2004 *apud* SANTOS et al., 2021). Essas características geomorfológicas interferiram no modo de ocupação, em que se concentrou no tabuleiro a construção horizontal, enquanto a verticalização predominou na região de planície litorânea marítima, inicialmente. Bairros como Bebedouro, Mutange e Bom Parto fazem parte da planície litorânea lagunar e são áreas ambientalmente frágeis de topografia acidentada, com encostas e grotas que, devido ao inchaço urbano e processo de crescimento da cidade, sobretudo após a instalação da Braskem, acabaram sendo ocupadas por uma população de baixa renda; diferente dos bairros Pinheiro e Farol, localizados numa área de platô, com exceção de algumas áreas abaciadas, na conhecida “parte alta” da cidade (SANTOS et al., 2021).

Ainda segundo a CPRM (2019), os bairros do Pinheiro e Farol são predominantemente residenciais com uma população diversificada e uma clara tendência a um padrão de renda mais elevado. Estes bairros oferecem comércio e serviços mais variados, em especial, na Avenida Fernandes Lima, um dos mais importantes eixos viários de Maceió. Os bairros do Bebedouro, Bom Parto e Mutange, por sua vez, apresentam predomínio de uma população com baixo poder aquisitivo e um comércio simples voltado para as necessidades básicas da comunidade local.

3.2 Simulação hidráulica e avaliação dos impactos

Nesta etapa, foram realizados modelos de simulação hidráulica através dos *softwares* QGIS e EPANET considerando duas situações: a situação atual do SAA e a situação anterior à ocorrência no bairro do Pinheiro.

3.2.1 Levantamento dos dados para a construção do modelo

Os dados necessários para a construção do modelo proposto neste trabalho são:

- Diâmetro das tubulações;
- Comprimento das tubulações;
- Material das tubulações;
- Coeficiente de rugosidade;
- Consumo de água;
- Cota do terreno;
- Padrão de consumo;
- Padrão de nível da água;
- Nível de água dos reservatórios e poços.

As informações de diâmetro, comprimento e material da tubulação foram obtidas da empresa BRK Ambiental, responsável pela operação da rede de distribuição.

Foi utilizado um coeficiente de rugosidade de 130 para as redes de PVC, 105 para as redes de Ferro Fundido, 115 para as redes de Aço Carbono e 120 para a rede de Cimento Amianto, considerando mais ou menos 20 anos de uso, conforme recomendação de Azevedo Netto (1998) (Tabela 2).

Tabela 2 - Valor do coeficiente C sugerido para a fórmula de Hazen-Williams

Tubos	Novos	Usados ± 10 anos	Usados ± 20 anos
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	-	-
Aço galvanizado roscado	125	100	-
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado comum	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	-	-
Concreto, acabamento comum	130	120	110
Ferro Fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro Fundido, revestimento de argamassa de cimento	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado	110	110	110
Latão	130	130	130

Tubos	Novos	Usados ± 10 anos	Usados ± 20 anos
Madeira, em aduelas	120	120	110
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Vidro	140	-	-
Plástico (PVC)	140	135	130

Fonte: Autora (2021) adaptado de Azevedo Netto (1998).

O consumo base foi obtido com os dados de volume consumido ($m^3/mês$) por quadra, fornecidos pela CASAL, conforme Apêndice A. Foi calculado através da média de consumo em cada quadra por bairro, convertendo o valor para L/s. Os resultados foram inseridos por meio da tabela de atributos do shape de nós no QGIS.

Dessa forma, para a simulação do cenário atual, foi considerado o volume consumido por quadra do mês de junho de 2021, e para a simulação do cenário anterior à ocorrência do evento, considerou-se o volume consumido por quadra do mês de janeiro de 2018, sendo este o dado utilizado para diferenciar os cenários.

Para a inserção do parâmetro cota, foi considerado que os nós estavam no nível da rua e a rede possuía profundidade constante, visto que não se tem informação da profundidade da rede estudada. Os valores foram extraídos do programa Google Earth e inseridos manualmente em cada nó.

O padrão de consumo dos nós, foi obtido através do gráfico de vazão fornecido pela CASAL do DMC Samambaia, que considera um perfil de médio e baixo consumo e do DMC Gruta de Lourdes, que possui um perfil de consumo mais elevado. Os dados foram obtidos através de um sistema de telemetria e possibilita a visualização dos horários de maior consumo e menor consumo, influenciando diretamente nos valores de pressão de cada nó, conforme Figuras 12 e 13, em que a variável *multiplier* são os fatores multiplicativos.

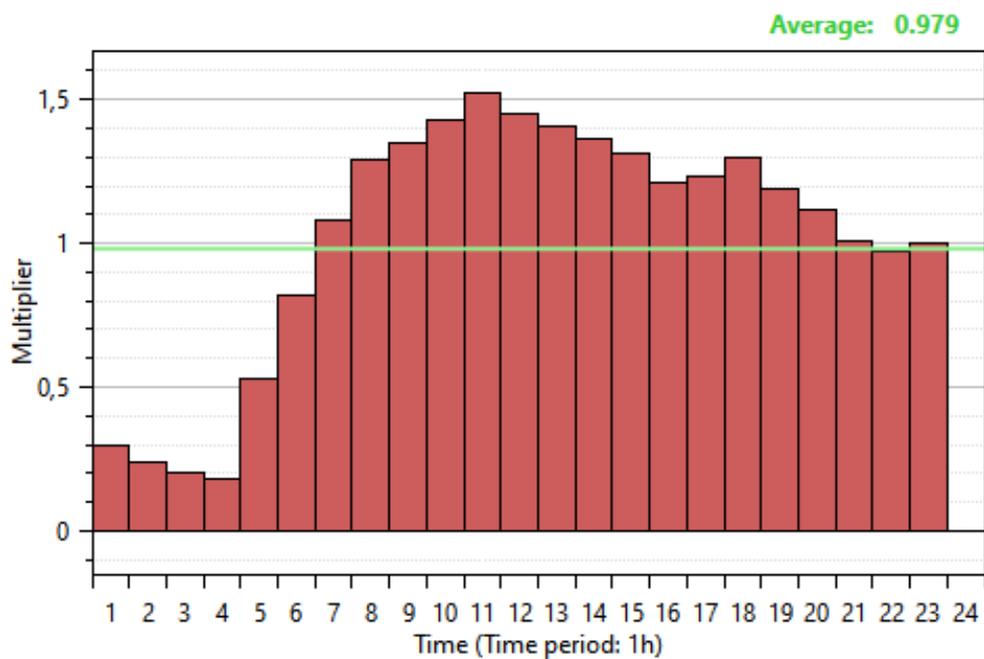
Para os bairros Bom Parto, Bebedouro e Mutange foi inserido o padrão de consumo do DMC Samambaia e para os bairros Pinheiro e Farol, foi inserido o padrão de consumo do DMC Gruta de Lourdes.

Para os reservatórios, foi adotado um padrão de nível constante, com fator multiplicativo no valor de 1.

Os dados de nível de água dos reservatórios R4 e R3A foram obtidos do Centro Controle Operacional da BRK Ambiental, consistindo em 1,75m e 0,35m, respectivamente. Os dados de nível de água do poço P-FA03 e do reservatório R8 foram obtidos através de informações de funcionários da CASAL, considerando a

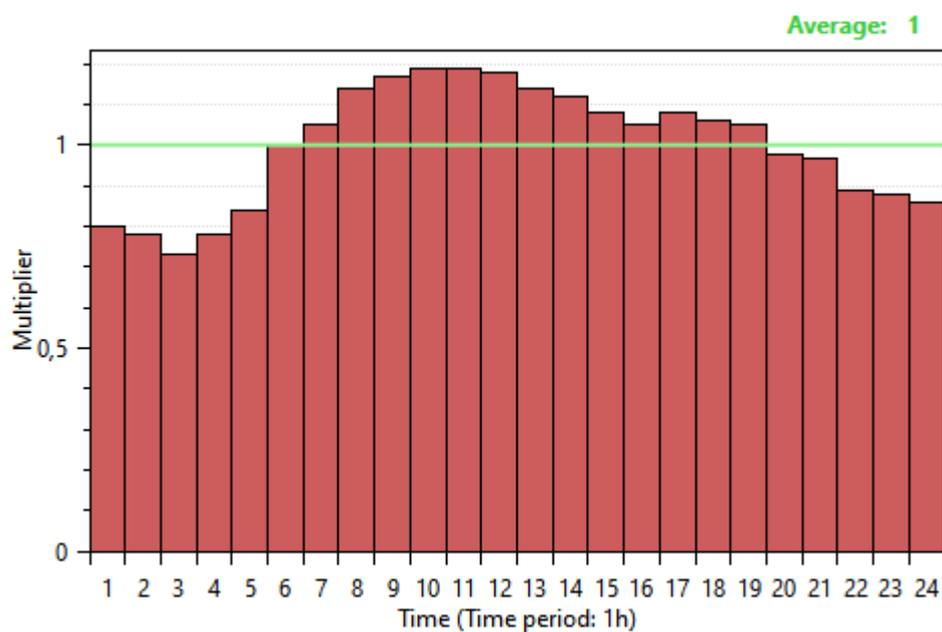
pressão próxima à saída do poço e a pressão fornecida pelo reservatório R8 na rede simulada, consistindo em 13 mca e 15 mca, respectivamente.

Figura 12 - Padrão de consumo DMC Samambaia



Fonte: Autora (2021).

Figura 13 - Padrão de consumo DMC Gruta de Lourdes

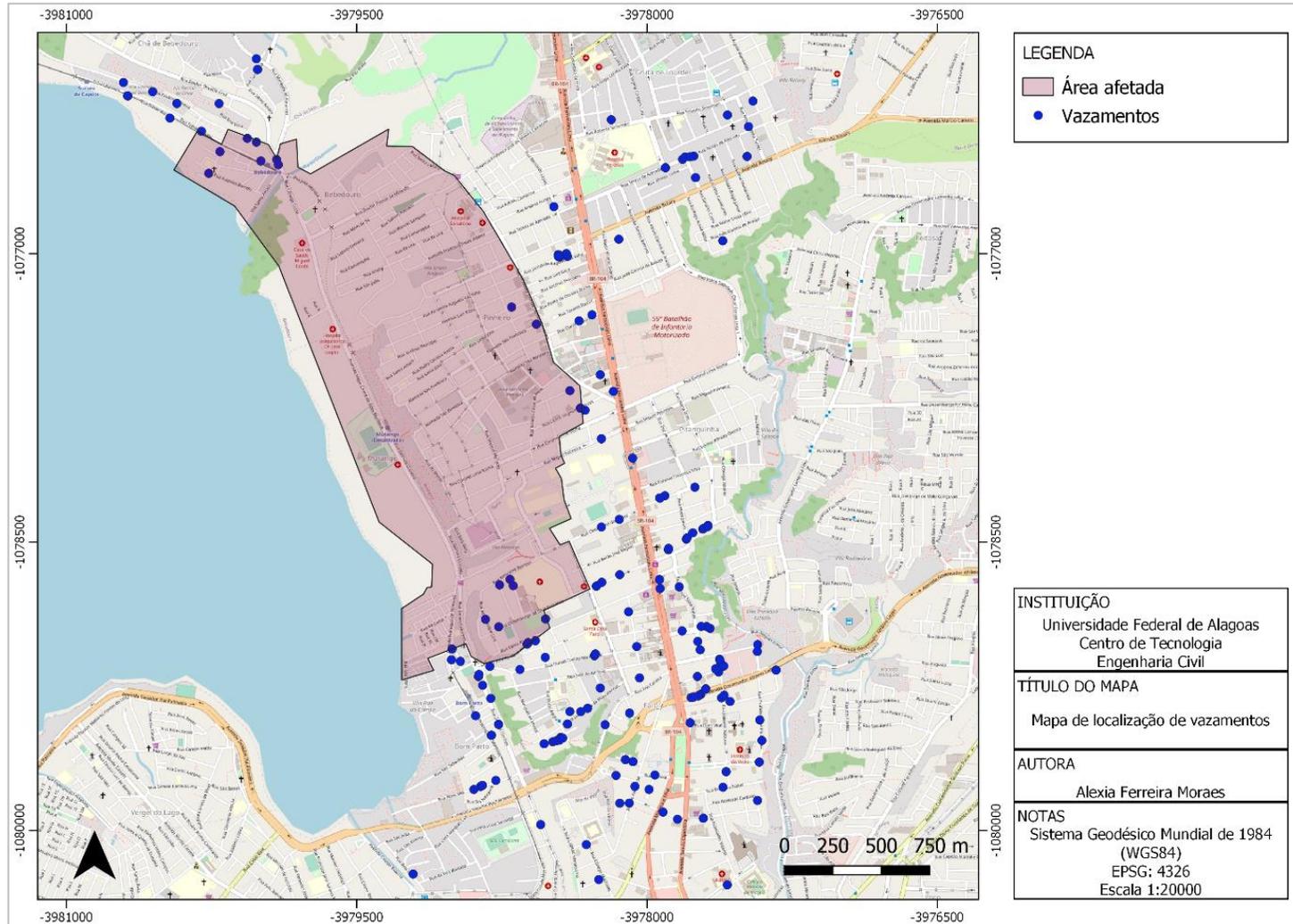


Fonte: Autora (2021).

O mapa da Figura 14 mostra a ocorrência de vazamentos na rede de distribuição no período de julho à outubro de 2021. É possível observar que a área afetada não apresentou nenhum registro de ocorrência de vazamento, apesar de existirem pontos em seu entorno. Isto ocorre em decorrência da desautorização dada pela BRASKEM e Defesa Municipal para a atuação da empresa BRK Ambiental, atual concessionária dos serviços de distribuição de água e coleta de esgoto, nesta região, em virtude dos altos riscos de afundamento existentes nessa área.

Os dados de ocorrência de vazamentos são obtidos pela atual concessionária mediante contato dos consumidores, através dos canais da empresa, sendo realizado o registro das coordenadas geográficas e demais informações pertinentes. Estes casos abrangem, em sua maioria, vazamentos aparentes. Os vazamentos ocultos podem ser identificados mediante reclamação de falta de água, baixa pressão ou qualquer outro indício de perda de água. Para esses casos, é utilizado o aparelho geofone para identificação do local exato do vazamento.

Figura 14 - Mapa de ocorrência de vazamentos no entorno da região afetada



Fonte: Autora (202)

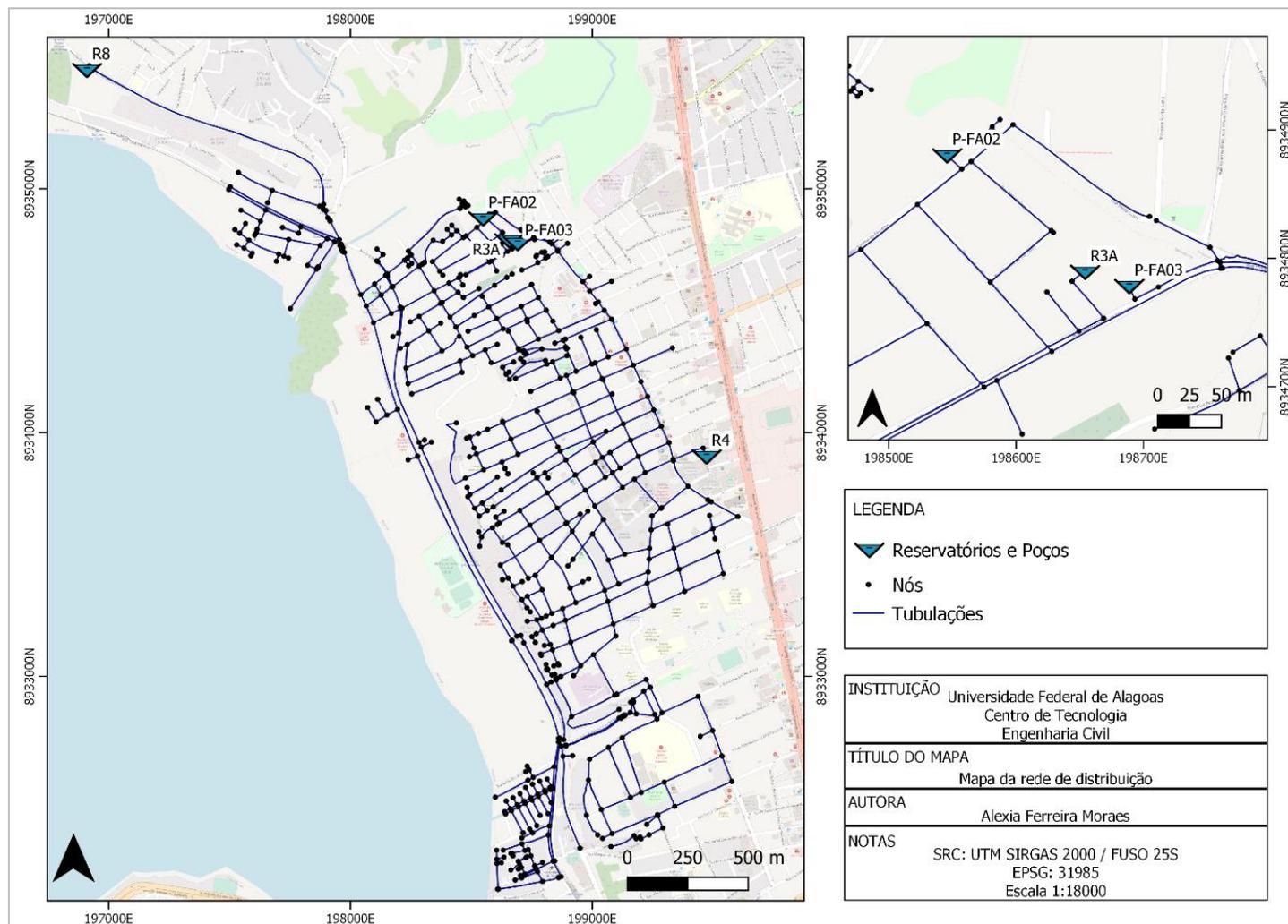
3.2.2 Construção do modelo

A elaboração do modelo do sistema de distribuição de água foi formulada através do software QGIS, por meio do plug-in QGISRed, que permite o traçado e a análise de sistemas de distribuição. De posse das informações da rede de distribuição, realizou-se o traçado da rede, considerando a localização dos poços e reservatórios, conforme Figura 15, e em seguida a inserção dos parâmetros das tubulações, sendo eles diâmetro, comprimento e tipo de material, e dos nós, sendo eles consumo, cota do terreno, padrão de consumo e níveis dos reservatórios e dos poços. Estes foram representados como reservatórios de nível fixo.

Para estas simulações, a setorização da rede e a completa independência de outras redes, de modo a não sofrer interferências, são fatores determinantes para a maior precisão possível da simulação. Como toda a rede dos bairros estudados é interligada, foram considerados nós para os pontos de consumo fora da área afetada, representando o consumo das quadras não estudadas, de modo que a simulação seja a mais próxima possível da realidade (Figura 16).

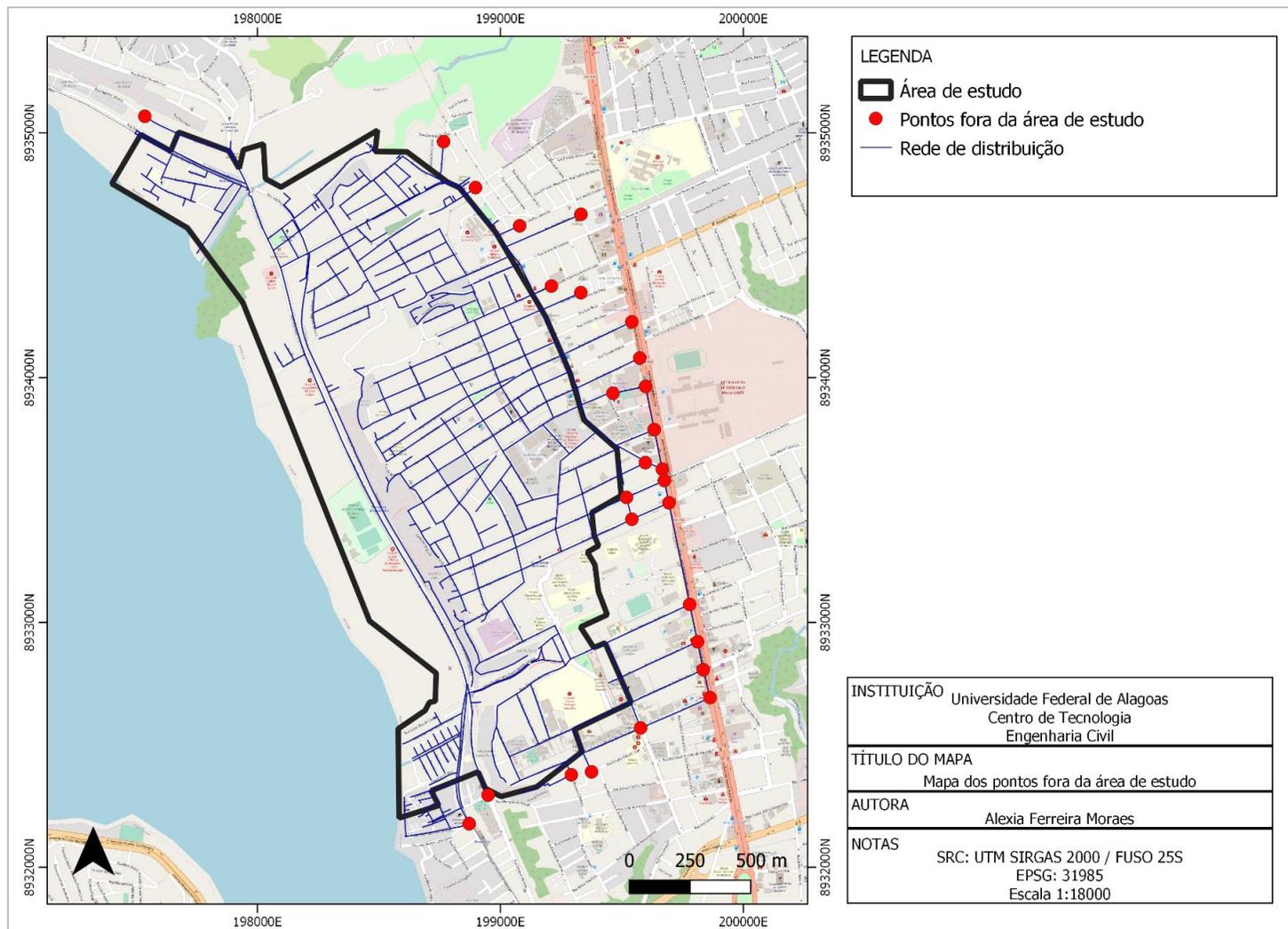
Para representar a obstrução em determinados locais da rede, foram instaladas VRPs (Válvulas Redutoras de Pressão), de modo a reproduzir a redução do valor de pressão nas tubulações.

Figura 15 - Rede de distribuição de água da área em estudo



Fonte: Autora (2021)

Figura 16 - Mapa dos pontos fora da área de estudo



Fonte: Autora (2022)

3.2.3 Cenários de simulação e calibração do modelo

O modelo foi exportado para o EPANET, conforme Figura 17, onde foram definidas as condições de contorno do sistema para a realização das simulações, como: tipo de simulação (estática ou dinâmica), passo de tempo hidráulico para o caso de simulação dinâmica, método de cálculo e calibração do modelo.

Foi utilizada a simulação dinâmica, com passo de tempo hidráulico de 1 hora, durante 24 horas e método de cálculo através da fórmula de Hazen-Williams.

Figura 17 - Modelo hidráulico do sistema no EPANET



Fonte: Autora (2022)

Os cenários de simulação, anterior ao evento de subsidência do solo e após o evento, denominados “cenário antigo” e “cenário atual”, foram construídos com os mesmos parâmetros, sendo alterado apenas o parâmetro do consumo base em decorrência da desocupação das residências e alteração no consumo de água.

Os resultados de pressão e perda de carga de cada cenário foram analisados e comparados a fim de identificar os impactos gerados.

Para a calibração, foram consideradas as pressões informadas por um funcionário da CASAL, medidas durante os anos de atividades de operação desta concessionária na região em estudo, conforme valores da Tabela 3. Tendo em vista que esses valores foram referentes a uma situação anterior ao afundamento do solo, a calibração foi feita para o cenário antigo. Assim foi calibrado, conseqüentemente, o cenário atual.

Tabela 3 - Dados de calibração

NÓ	HORÁRIO	PRESSÃO (MCA)	LOCAL
J35	12:00	16	Rua Miguel Palmeira
J319	15:00	16	Rua Professor José da Silva Camerino
J121	21:00	22	Alameda São Francisco
J210	15:00	16	Alameda Doutor Durval da Rcha Cortez
J185	15:00	18	Rua Professor Mario Marroquim
J953	12:00	13	Rua Doutor Passos de Miranda
J442	14:00	16	Rua Senador Bernado Mendonça
J625	14:00	15	Rua Faustino Silveira
J509	15:00	15	Avenida Major Cicero de Goes Monteiro
J516	13:00	11	Rua Santa Rita de Cássia
J564	14:00	8	Rua General Hermes

Fonte: Autora (2022)

3.2.4 Avaliação dos impactos

Os resultados de pressão e perda de carga nas redes foram comparados, considerando os dois cenários simulados, e analisados graficamente e estatisticamente, através do gráfico de isolinhas obtido do software EPANET, considerando os valores limites estabelecidos na NBR 12218:2017 e através da diferença de pressão nos nós, com enfoque aos nós com variação de pressão acima de 10 mca, sendo este o valor mínimo estabelecido em norma para abastecimento dos consumidores.

3.3 Proposição de estratégias para minimização dos impactos

Com base nos resultados das simulações dos dois cenários, foram identificadas e analisadas as alterações que podiam ser benéficas ao SAA na situação atual, realizando nova simulação a fim de estabelecer a estratégia para a minimização dos impactos.

Para tanto, foi estudada a localização espacial dos componentes do sistema e propostas duas estratégias:

1. Realização de manobras operacionais nos registros - fechamento e abertura para redirecionar o fluxo da água.
2. Capeamento de toda a rede de distribuição – interrupção do abastecimento e manutenção das adutoras principais.

Não foi considerada nenhum tipo de implantação ou substituição de rede, tendo em vista o custo necessário para a execução dessas propostas e a desocupação da região, que não exige maiores investimentos. A estratégia foi pensada considerando a evacuação total da área.

Foi utilizado o cenário atual da modelagem hidráulica para validação da estratégia. O parâmetro analisado para essa verificação foi a pressão, considerando como valor de referência mínimo 10 mca e valor de referência máximo 40 mca nos pontos de distribuição das adutoras, com base no que preconiza a NBR 12218:2017, que estabelece uma pressão dinâmica mínima de 10 mca e uma pressão estática máxima de 40 mca para a rede pública de distribuição de água.

Assim, quando a estratégia foi capaz de garantir valores de pressão entre 10 e 40 mca, ela foi considerada eficaz e o impacto foi considerado minimizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

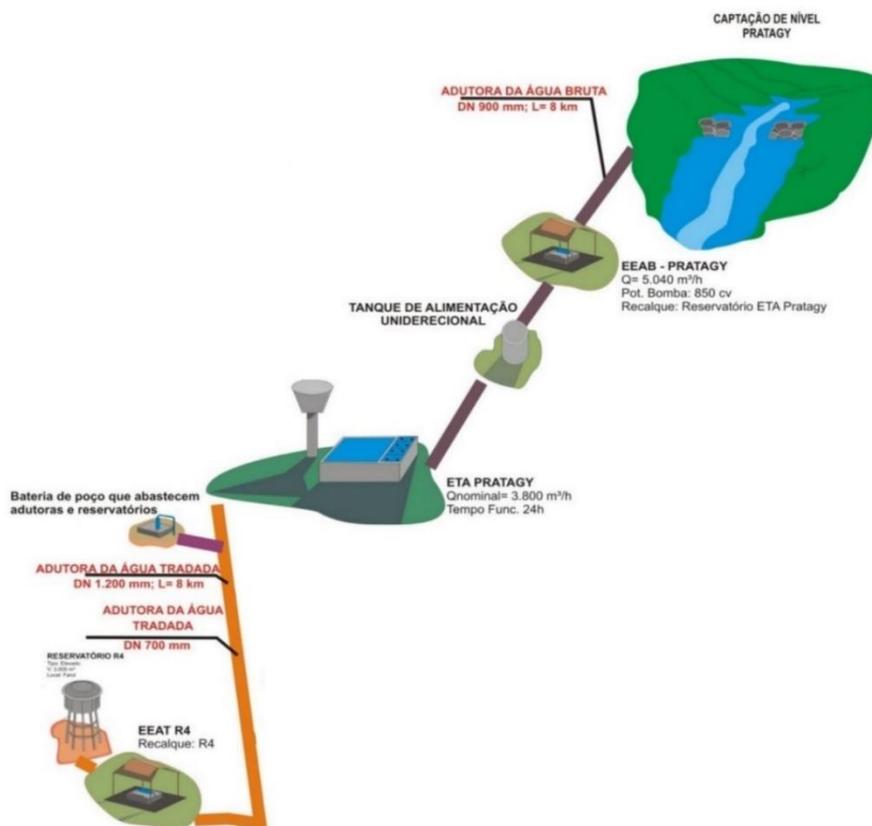
4.1 Sistema de abastecimento de água da área em estudo

O sistema de abastecimento de água em estudo pertence ao município de Maceió, abrangendo uma área de cerca de 2,81 km². Foi operado pela CASAL do ano de 1962 até o dia primeiro de julho de 2021, quando a responsabilidade do abastecimento de água e coleta de esgoto de Maceió passou a ser da empresa BRK Ambiental.

Os bairros Farol e Pinheiro fazem parte do sistema R4. Esse sistema é composto pelo Reservatório elevado R4 e seis Distritos de Medição e Controle (DMC): DMC Gruta de Lourdes, DMC Farol, DMC Sanatório, DMC São Benedito, DMC Pitanguinha e DMC Canaã. O Reservatório R4 possui capacidade de 3.000m³ e é abastecido pelo Sistema Pratagy, responsável pelo abastecimento de 40% da cidade de Maceió.

O Sistema Pratagy – até o Reservatório R4 – é composto pela captação no Rio Pratagy, seguido da Estação Elevatória de Água Bruta, Tanque de Alimentação Unidirecional, Estação de Tratamento de Água, Estação Elevatória de Água Tratada e por fim o Reservatório R4, conforme Figura 18, produzindo cerca de 892 L/s.

Figura 18 - Esquema do Sistema Pratagy até o Reservatório R4

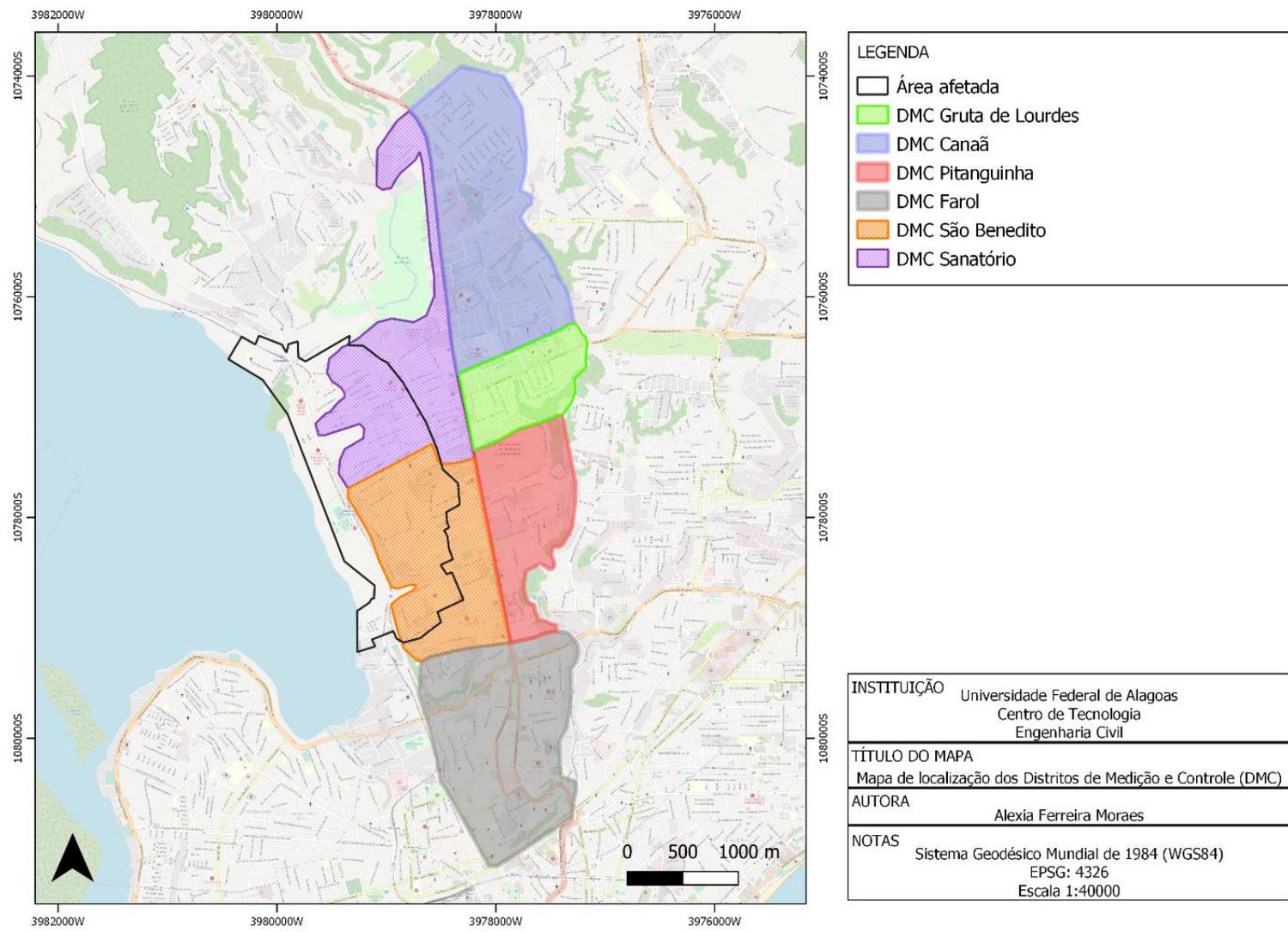


Fonte: Prefeitura de Maceió (2016).

Nesse sistema, uma adutora de Ferro Fundido com diâmetro variando entre 400, 700 e 1.200mm leva a água da ETA Pratagy no bairro do Benedito Bentes ao Reservatório R4, no bairro do Farol. Do Reservatório R4, uma adutora de 450mm distribui água para os DMCs (Figura 19), formando o Sistema R4.

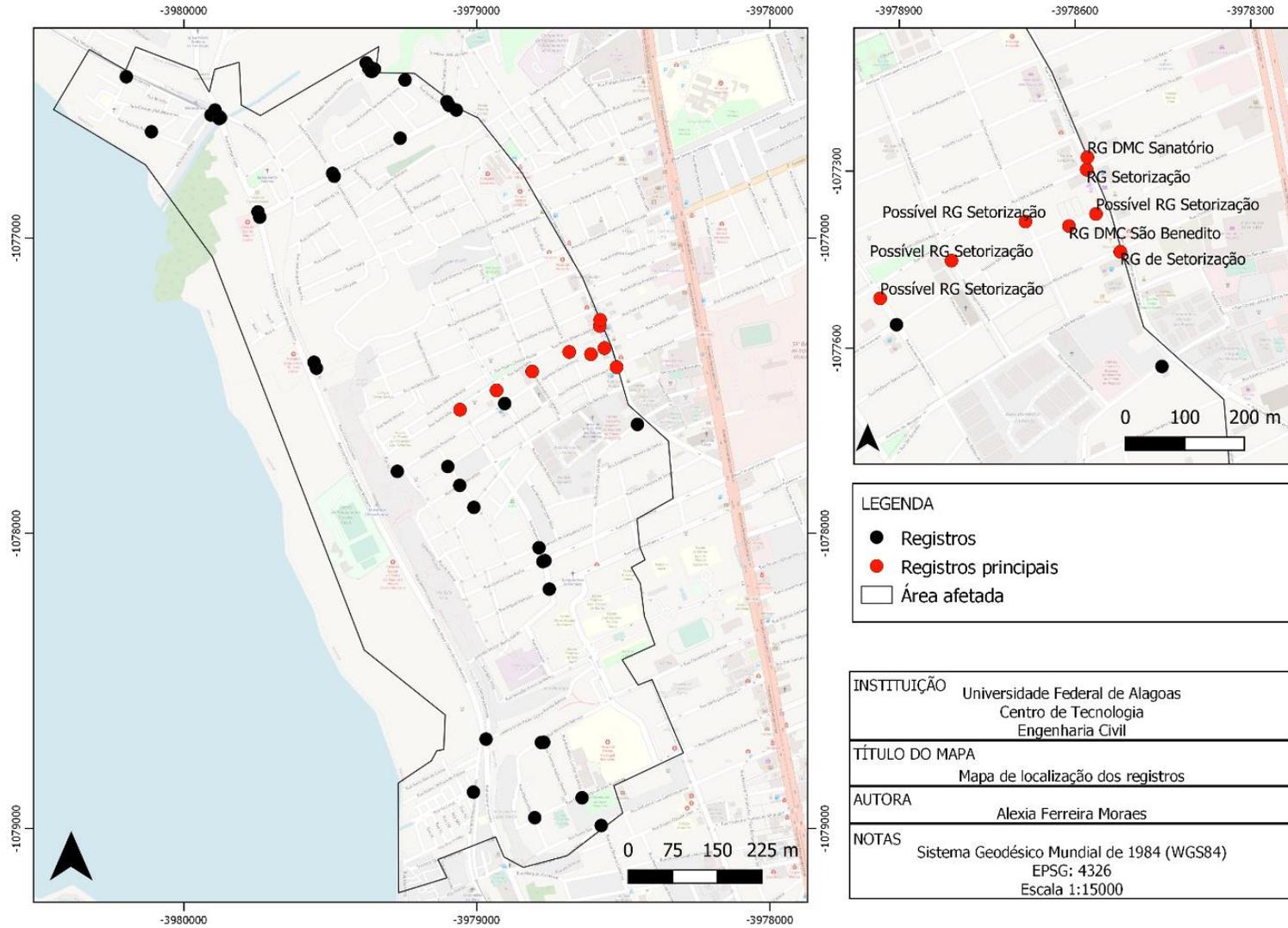
A região afetada compreende os DMCs Sanatório e São Benedito, e conta com aproximadamente 51 registros, entre ativos e inativos, sendo os principais deles: registro de setorização do DMC São Benedito, registro DIREPLAN, registro do DMC Sanatório e o registro de setorização do DMC Sanatório (Figura 20). Atualmente, não se tem a informação exata de quantos registros estão ativos e quantos estão inativos, sendo necessária uma pesquisa de campo para verificar as informações.

Figura 19 - Mapa de localização dos DMCs do Sistema R4



Fonte: Autora (2021).

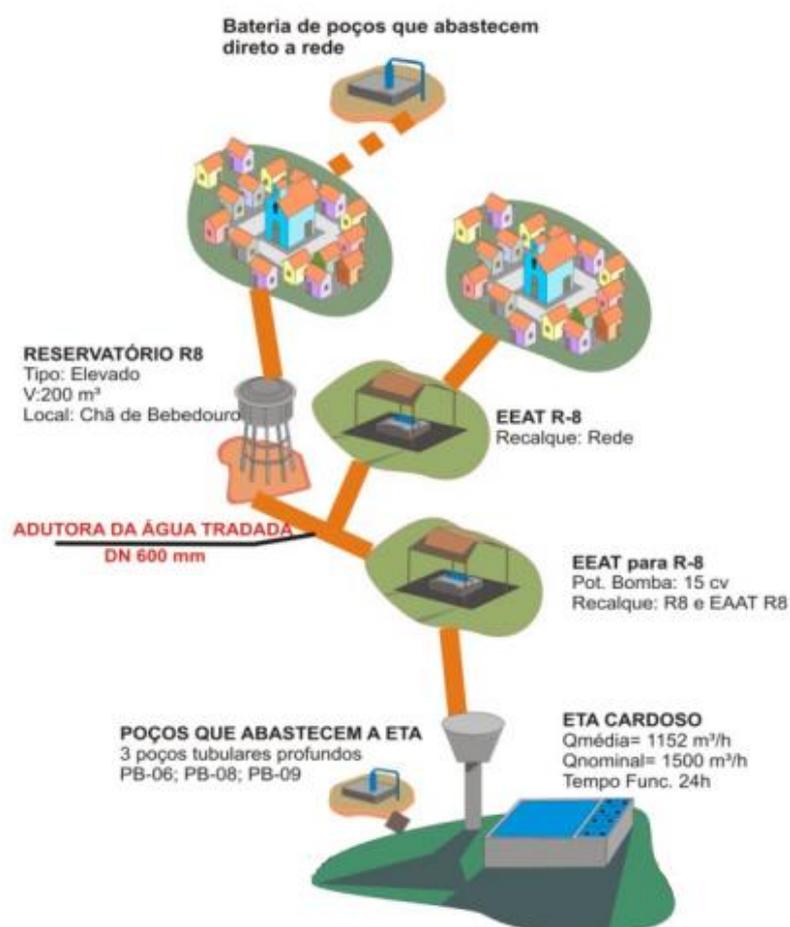
Figura 20 - Mapa de localização dos registros



Fonte: Autora (2021).

O bairro do Bebedouro é abastecido pelo Sistema R8 e pelo Reservatório R3A, este abastece também os bairros do Mutange e do Bom Parto. O Sistema R8 é composto pela Estação Elevatória de Água Tratada e pelo Reservatório R8, localizados no bairro Chã do Bebedouro, recebendo água da ETA Catolé-Cardoso, conforme Figura 21, localizada no bairro do Bebedouro.

Figura 21 - Esquema da ETA Cardoso até o Reservatório R8



Fonte: Prefeitura de Maceió (2016).

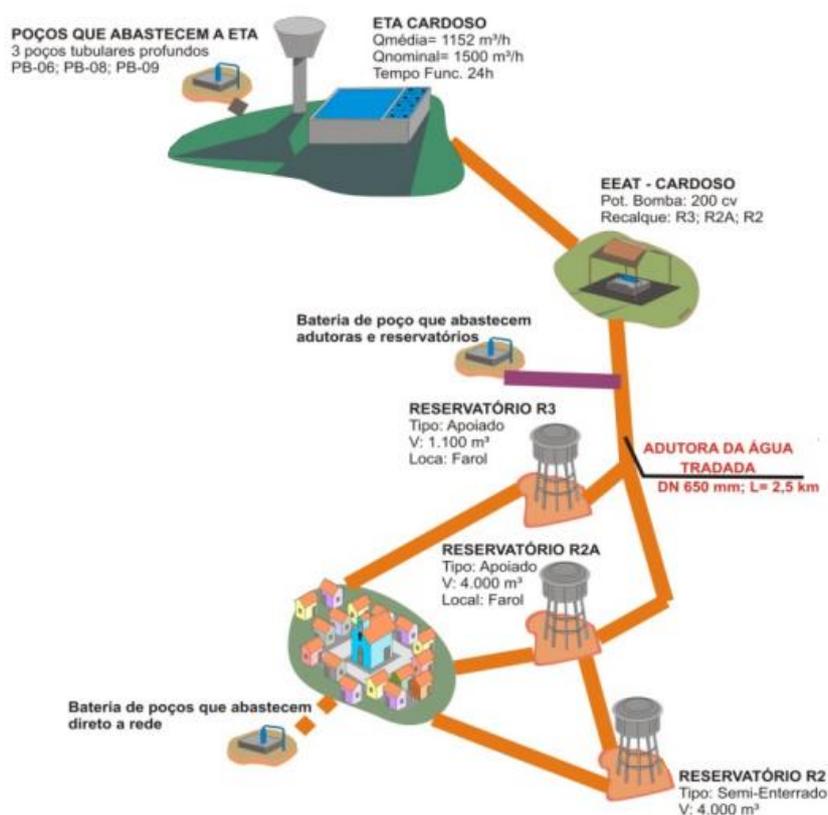
A barragem Catolé regulariza uma vazão de captação de cerca de 320 L/s, conduzida por gravidade pelo aqueduto, o qual possui, aproximadamente, 12 km de comprimento, que se estende ao longo da encosta que margeia a lagoa Mundaú, ligando a captação à Estação de Tratamento do Cardoso, no bairro Bebedouro. Este aqueduto é feito em concreto, que inicia com seção quadrada (de lado 1m), e próximo

a ETA Cardoso passa a ter seção circular com 1.000 mm de diâmetro (Prefeitura de Maceió, 2016).

Segundo a Prefeitura de Maceió (2016), a adutora que leva água tratada até o Reservatório R8 é de ferro fundido e possui 600 mm de diâmetro. Uma parte das águas deste Reservatório é recalçada para Jardim Petrópolis antes que chegue ao Reservatório R8. A Estação Elevatória que recalca água para o R8 possui um conjunto motobomba de 15 cv de potência.

O Reservatório R3A é abastecido por uma derivação da adutora de 2,5 km, de 600 mm de diâmetro que se estende da ETA Cardoso até o reservatório R2A e está localizado no bairro do Bebedouro (Figura 22), além de receber contribuição do poço P-FA02. O poço P-FA03, localizado na área do Reservatório R3A, injeta água direto na rede de distribuição, contribuindo para o abastecimento do bairro do Pinheiro.

Figura 22 - Esquema da ETA Cardoso até o Reservatório R3A



Fonte: Prefeitura de Maceió (2016).

A ETA Cardoso e o Reservatório R3A estão localizados dentro da área afetada pela subsidência do solo, assim como os poços P-B06 e P-B09, que reforçam o

abastecimento da ETA. Esta abastece os bairros do Centro, Trapiche da Barra, Prado, Ponta Grossa, Vergel do Lago, Pontal da Barra, Mutange, Bebedouro, Rio Novo e Loteamento Palmar. As estruturas atualmente apresentam fissuras e estão comprometidas. A CASAL, em conjunto com a BRK Ambiental, está realizando estudos para realocamento das estruturas, bem como das adutoras que partem da ETA para os reservatórios, de modo que não prejudique as regiões abastecidas pela ETA Cardoso.

O Quadro 1 apresenta um resumo dos componentes do sistema, com os locais abastecidos e localização das estruturas. O reservatório R3A e a ETA Cardoso estão localizados em área de afundamento, e os reservatórios R8 e R4 localizados em regiões que podem estar dentro da área afetada futuramente.

Quadro 1 - Resumo do abastecimento dos bairros afetados

ETA	Reservatório	Locais abastecidos	Localização do Reservatório	Localização da ETA
Pratagy	R4	Farol, Pinheiro, Gruta, Canaã, Pitanguinha, Sanatório	Farol	Benedito Bentes
Cardoso	R8	Bebedouro, Santa Amélia, Chã de Bebedouro	Chã de Bebedouro	Bebedouro
	R3A	Bebedouro, Mutange, Bom Parto, Levada	Bebedouro	

Fonte: Autora (2021).

A rede da região afetada é composta predominantemente de tubulações de Ferro Fundido, com diâmetros variando entre 25mm e 500mm. As tubulações são antigas e apresentam histórico de incrustação. A adutora de 500mm que distribui água do R4 para a região, margeia o limite da área afetada.

A Tabela 3 apresenta as características da rede dessa região.

Tabela 4 - Características da rede da região afetada

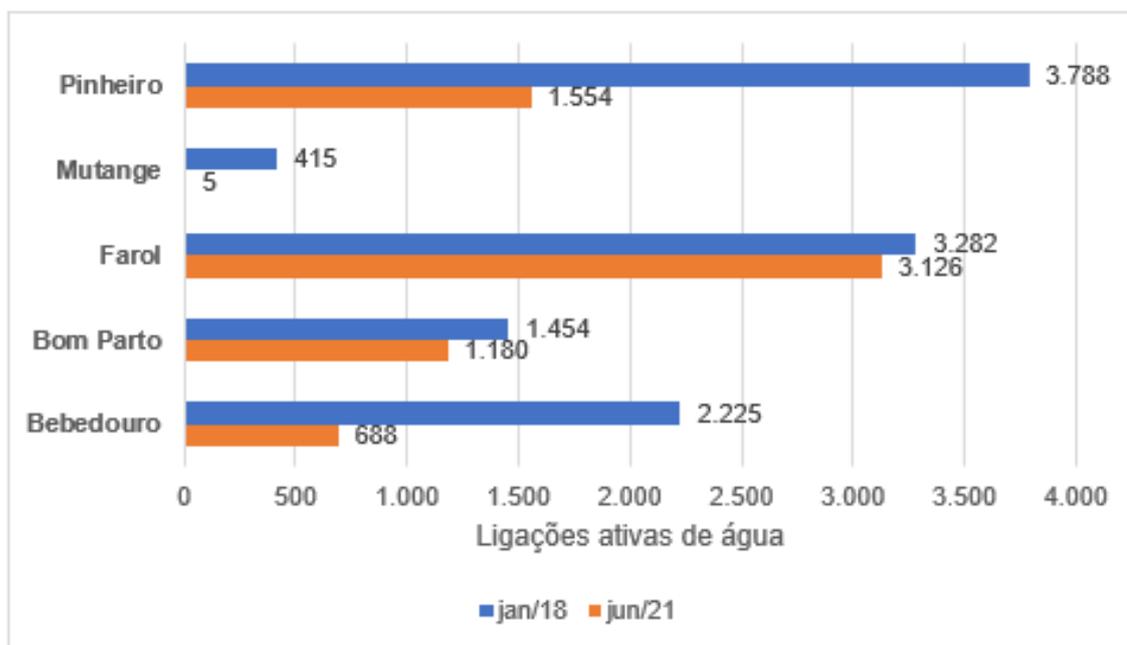
MATERIAL	EXTENSÃO (KM)	QUANTIDADE (%)
PVC	12,1	23,1
FOFO	40,1	76,6
CIMENTO AMIANTO	0,072	0,14
AÇO CARBONO	0,087	0,16

Fonte: Autora (2021)

Com a desocupação das moradias nos bairros da região afetada, houve significativa redução no número de ligações ativas de água, conforme apresentado na Figura 23 e na Tabela 5. A região em que houve maior impacto foi o bairro do Mutange, passando de 415 ligações ativas em janeiro de 2018, antes do ocorrido, para 5 ligações ativas em junho de 2021, representando uma redução de 98,80%, seguido do bairro do Bebedouro, que apresentou uma redução de 69,08%, passando de 2225 ligações ativas de água para 688. Os dois bairros situam-se à beira da lagoa, em área de subsidência do solo.

O bairro do Farol apresentou a menor redução, de 4,75%, tendo em vista sua recente inclusão no mapa de desocupação, sendo o bairro com maior distância ao foco do evento geológico. Ao todo, houve uma redução 41,30% das ligações ativas de água da área afetada.

Figura 23 - Gráfico de ligações ativas de água da área afetada em janeiro de 2018 e junho de 2021.



Fonte: Autora (2021)

Tabela 5 - Porcentagem de ligações ativas na área afetada em janeiro de 2018 e junho de 2021

Bairro	Redução (%)
Bebedouro	69,08
Bom Parto	18,84
Farol	4,75
Mutange	98,80
Pinheiro	58,98
TOTAL	41,30

Fonte: Autora (2021)

Com relação ao consumo de água, a região com maior redução de volume de água consumido foi o bairro do Mutange, com uma redução de 88,86%, seguido do bairro do Bebedouro, com uma redução de 75,62%, conforme Tabela 6. Ambos os bairros apresentaram também as maiores porcentagens de redução de ligações ativas de água.

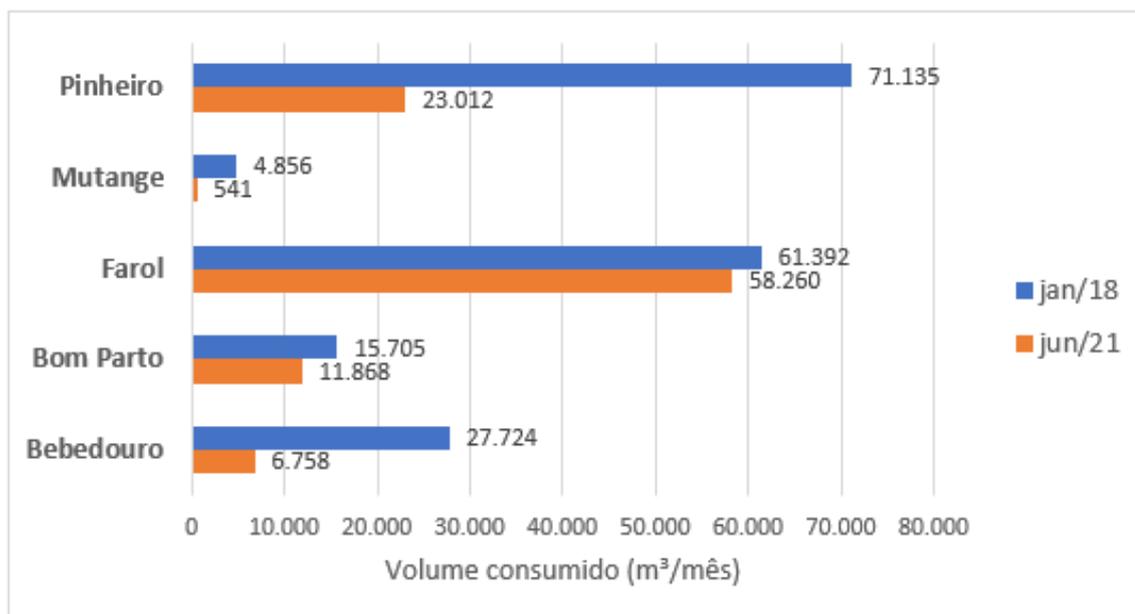
O gráfico da Figura 24 mostra que o volume de água consumido no bairro do Pinheiro em janeiro de 2018 foi de 71.135 m³/mês e de 61.392 m³/mês no bairro do Farol, valores que são significativamente maiores que o volume nos bairros do Mutange e Bebedouro, que apresentaram valores de 4856 m³/mês e 27.724 m³/mês, respectivamente. Isso mostra a diferença no perfil de consumo entre os bairros, onde nos bairros do Farol e Pinheiro os consumidores podem ser caracterizados como de média e alta renda, enquanto nos bairros do Bebedouro, Mutange e Bom Parto, os consumidores podem ser classificados como de baixa renda.

Além disso, a diferença no valor do consumo pode ser explicada pelo número de habitantes em cada bairro. No bairro do Pinheiro, conforme apresentado anteriormente, a população era de aproximadamente 19.062 habitantes, enquanto no bairro do Mutange esse valor cai para 2.632 habitantes.

Os bairros Farol e Bom Parto apresentaram pouca redução de volume consumido, com porcentagens de 5,10% e 24,43% respectivamente, visto que foram os bairros recentemente incluídos no mapa de desocupação da BRASKEM (2021), apresentando pouca redução do número de consumidores, comparados aos demais bairros.

Ao todo, houve uma redução de 44,45% de volume de água consumido por mês na área afetada, representando cerca de 80373 m³/mês.

Figura 24 - Gráfico do volume de água consumido na área afetada (m³/mês) em janeiro de 2018 e junho de 2021.



Fonte: Autora (2021).

Tabela 6 - Porcentagem de redução do volume de água consumido em janeiro de 2018 e junho de 2021

Bairro	Redução (%)
Bebedouro	75,62
Bom Parto	24,43
Farol	5,10
Mutange	88,86
Pinheiro	67,65
TOTAL	44,45

Fonte: Autora (2021)

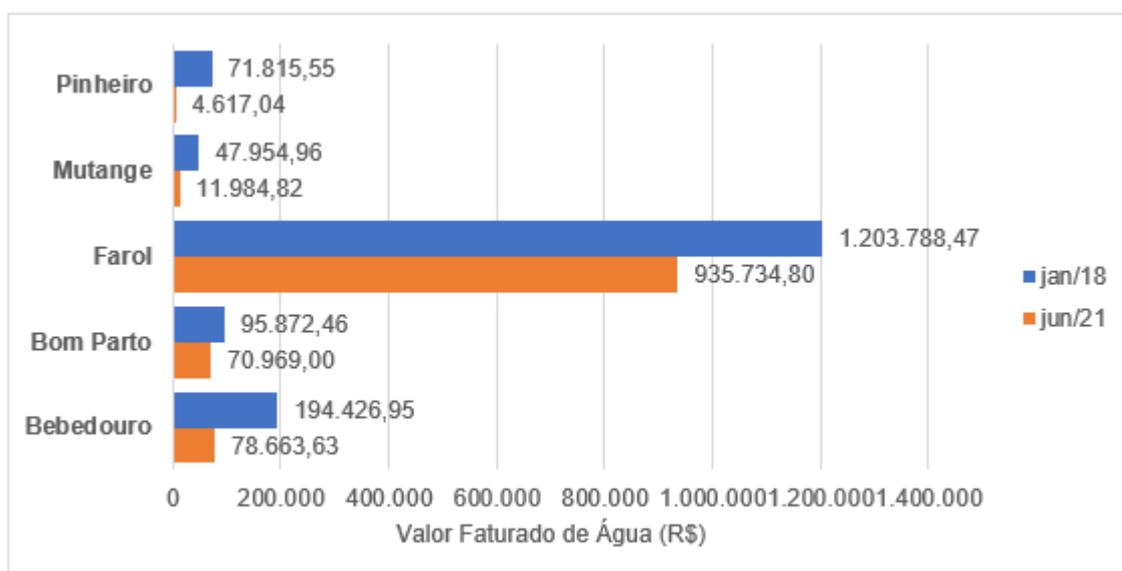
Como consequência da redução do número de ligações ativas de água e do volume de água consumido, houve uma queda no faturamento da concessionária responsável pelo abastecimento da região no período de janeiro de 2018 à junho de 2021, com relação ao volume de água consumido. Conforme mostra o gráfico da Figura 25 e Tabela 7, a região com maior queda no faturamento foi o bairro do Pinheiro, com uma redução de 93,57%, apesar de ser o bairro do Mutange a região com maior redução de ligações, corroborando com os fatores de perfil de consumo e número de habitantes apresentados anteriormente.

No bairro do Farol, apesar da pouca redução no número de ligações (4,75%) e no volume de água consumido (5,10%), houve significativa redução no faturamento

(22,27%), próximo à redução de faturamento no bairro do Bom Parto (25,98%) que apresentou uma redução de 18,84% no número de ligações. Isso comprova que o impacto financeiro na concessionária responsável será maior à medida que a delimitação da área afetada for avançando no bairro do Farol, que apresenta, atualmente, poucas ruas no mapa de desocupação, e nos bairros adjacentes ao bairro do Farol, que possuem um perfil de consumidor semelhante.

Ao todo, houve uma redução de 31,72% no faturamento do volume de água consumido, que representa um prejuízo de mais de 500 mil reais por mês.

Figura 25 – Gráfico de faturamento do volume de água consumido na área afetada, em janeiro de 2018 e junho de 2021.



Fonte: Autora (2021).

Tabela 7 - Porcentagem de redução do faturamento na área afetada em janeiro de 2018 e junho de 2021

Bairro	Redução (%)
Bebedouro	59,54
Bom Parto	25,98
Farol	22,27
Mutange	75,01
Pinheiro	93,57
TOTAL	31,72

Fonte: Autora (2021)

4.2 Simulação hidráulica e avaliação dos impactos

De posse dos dados necessários para a simulação, tais como: dados de consumo, coeficiente de rugosidade, diâmetro e extensão da rede, nível do reservatório e padrão de consumo, foi realizada, inicialmente, a simulação hidráulica considerando o cenário antigo, anterior à ocorrência do evento.

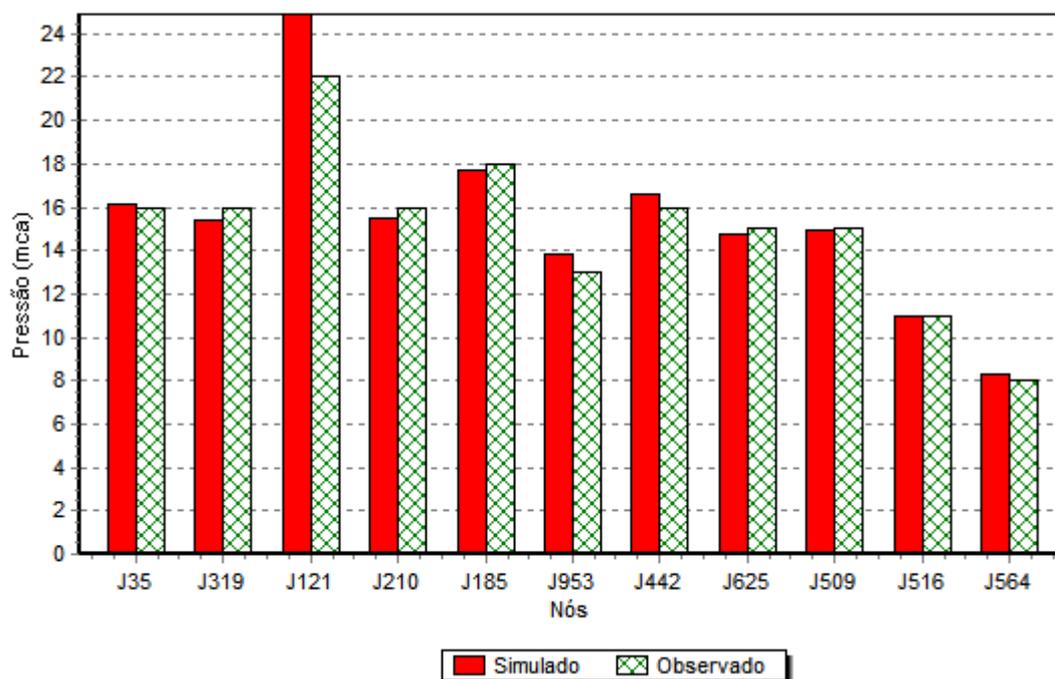
A calibração do cenário foi realizada comparando os resultados de pressão da simulação do modelo com os dados de medição em campo, obtendo um erro médio de 0,58 mca e um desvio padrão de 0,972, conforme Tabela 8. O gráfico da Figura 26 mostra a comparação entre as pressões, sendo possível observar pouca discrepância entre os valores.

Tabela 8 - Resultados da calibração

NÓS	PRESSÃO OBSERVADA	PRESSÃO SIMULADA	ERRO MÉDIO	DESVIO PADRÃO
J35	16	16.12	0.123	0.123
J319	16	15.38	0.624	0.624
J121	22	24.91	2.905	2.905
J210	16	15.54	0.463	0.463
J185	18	17.72	0.278	0.278
J953	13	13.86	0.861	0.861
J442	16	16.63	0.632	0.632
J625	15	14.8	0.197	0.197
J509	15	14.98	0.022	0.022
J516	11	11.01	0.008	0.008
J564	8	8.27	0.268	0.268
MÉDIA TOTAL	15.09	15.38	0.58	0.972

Fonte: Autora (2022)

Figura 26 - Gráfico de comparação dos valores médios de pressão



Fonte: Autora (2022)

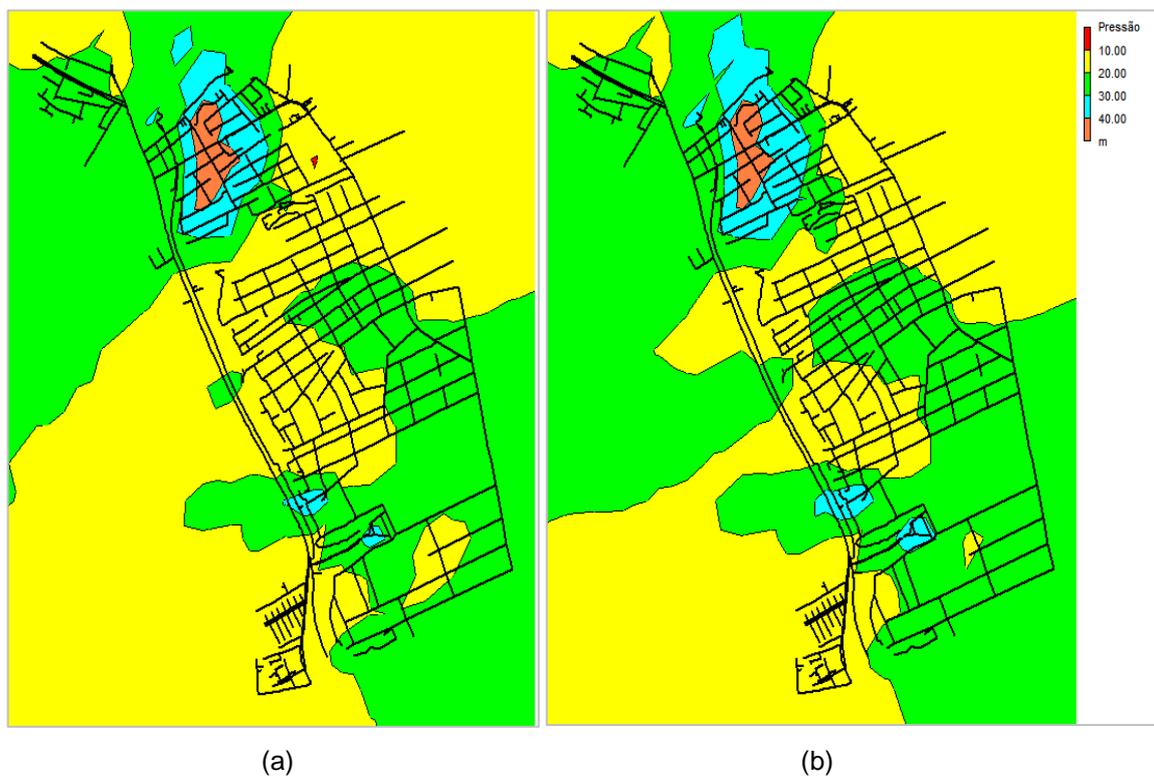
Segundo critérios de Earnshaw *et al.* (1989) de validação da calibração, a diferença entre a pressão medida no local e a pressão computada de todos os pontos coletados deve estar dentro da faixa de ± 2 mca. Para Cunha e Pinto (2014), uma diferença menor que 1,5 mca é considerada aceitável para uma boa calibração do modelo. Assim, pode-se concluir que o cenário antigo já estava calibrado. No cenário atual foi utilizado o modelo calibrado, visto que as características físicas dos elementos permaneceram as mesmas.

Nas simulações dos cenários, foi observado que o horário de menor consumo de água é às 3 horas, horário em que as pressões apresentam os maiores valores e há maior probabilidade da ocorrência de vazamentos, aumentando o índice de perda real da água. Na Figura 27a, é possível observar os resultados para o cenário antigo, em que a maior parte da região apresenta pressões entre 10 e 30 mca. A região com valores acima de 40 mca, valor máximo recomendado pela NBR 12.218:2017, pode ser melhor observada na Figura 28, em que o maior valor é de 51,29 mca.

Comparando com o cenário atual, na Figura 27b, é possível observar que a região com valores de pressão maiores que 40 mca continuou a mesma, com pouca

variação, como pode ser observado na Figura 29, em que o maior valor de pressão é 52,01 mca, uma diferença de 0,72 mca.

Figura 27 – Valores de pressão dinâmica (mca) às 3h no cenário antigo (a) e atual (b).

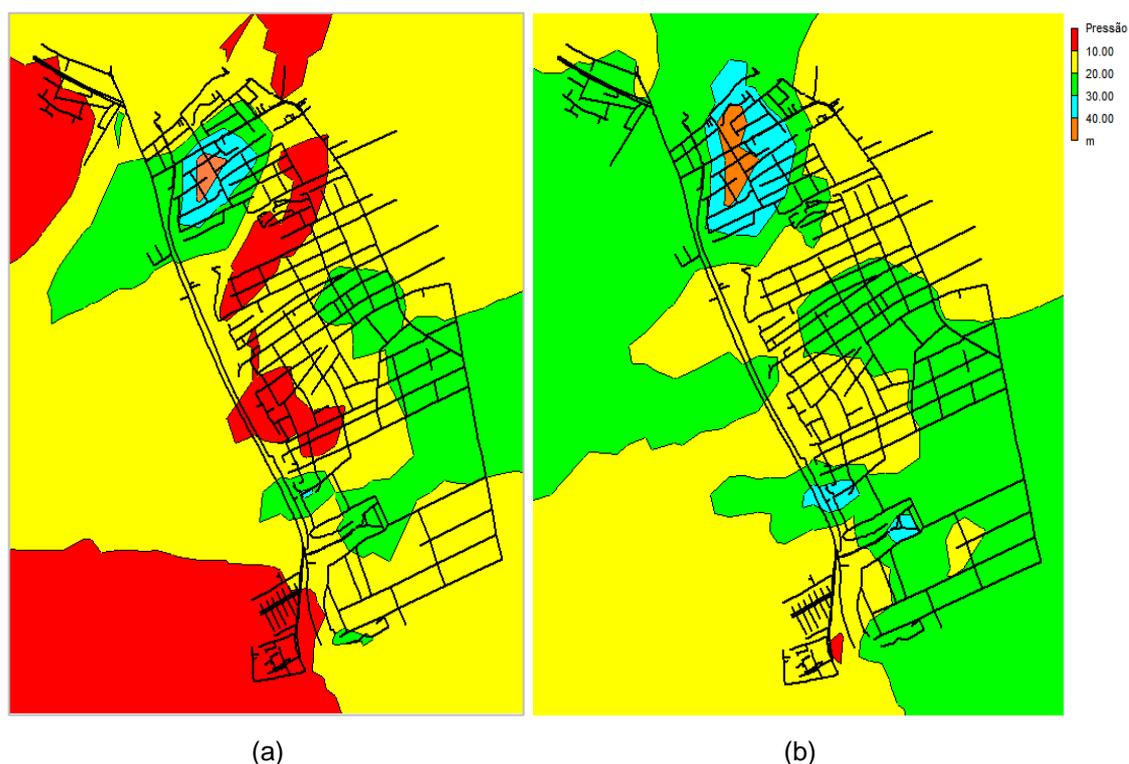


Fonte: Autora (2022)

O horário de maior consumo de água observado foi às 10 horas, horário em que as pressões apresentaram os menores valores. A Figura 30a, referente ao cenário antigo, mostra 5 regiões com pressões abaixo de 10 mca devido às incrustações encontradas nessas tubulações e ao fato de algumas estarem localizadas no final da rede de distribuição do sistema, o que as coloca em situação de um fornecimento de água com pressões mais baixas. Neste horário, a maior parte da área estudada apresenta pressões entre 10 e 20 mca.

No cenário atual, na Figura 30b, não são observadas pressões abaixo de 10 mca, tendo em vista a diminuição do consumo. As pressões da área estudada variaram, em sua maioria, entre 10 e 20 mca. Devido ao tempo de uso e ao tipo de material da tubulação, que é em sua maioria de Ferro Fundido, os acréscimos de pressão podem desgastar a tubulação e ocasionar vazamentos.

Figura 30 – Valores de pressão dinâmica (mca), às 10h, no cenário antigo (a) e no cenário atual (b)



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 9 apresenta o aumento da pressão observado no cenário atual em relação ao cenário antigo. A maioria dos nós (55,46%) apresentou um acréscimo de até 5 mca. 15,14% dos nós apresentou um acréscimo maior que 10 mca no valor da

pressão, indicando que, possivelmente, esses locais já estão totalmente desocupados. O mapa da Figura 31 e a Tabela 10 apresenta as ruas onde esses valores foram observados.

Tabela 9 - Acréscimo de pressão nos nós da rede de distribuição

ACRÉSCIMO NO VALOR DA PRESSÃO	QUANTIDADE DE NÓS	QUANTIDADE (%)
ENTRE 0 E 5 MCA	315	55,46
ENTRE 5 E 10 MCA	167	29,40
MAIOR QUE 10 MCA	86	15,14

Fonte: Autora (2022)

Tabela 10 - Locais com variação de pressão acima de 10 mca

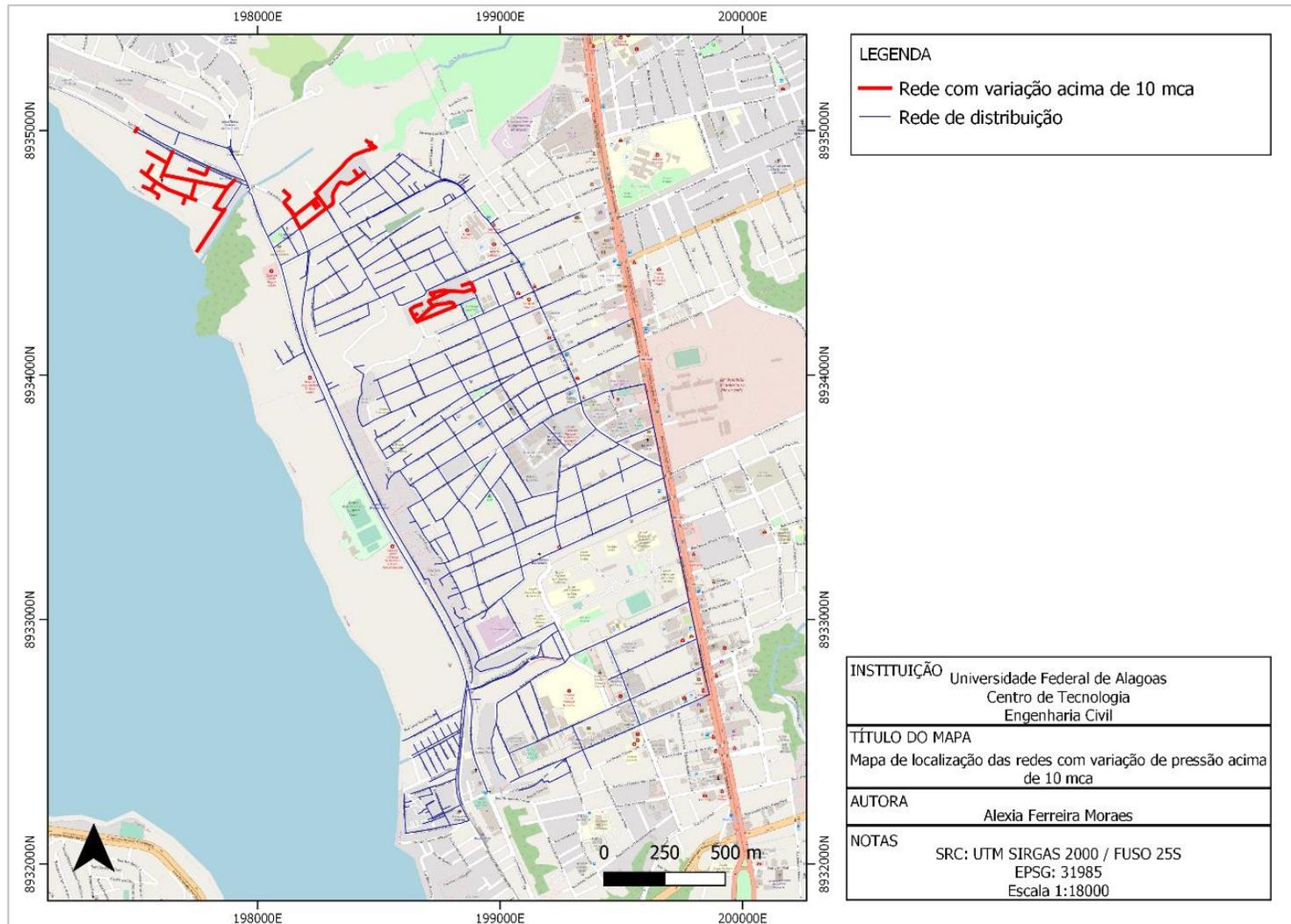
NÓS	DIFERENÇA DO VALOR DE PRESSÃO (MCA)	LOGRADOURO
J274	10.49	Rua Padre Cícero
J275	11.91	Rua Padre Cícero
J276	11.98	Rua Padre Cícero
J277	12.32	Rua Padre Cícero
J278	12.52	Rua Padre Cícero
J279	12.14	Rua Ernesto Gama
J280	12.44	Rua Ernesto Gama
J281	12.78	Rua Ernesto Gama
J282	12.9	Rua Ernesto Gama
J283	12.24	Rua Ernesto Gama
J284	14.78	Rua Frei Damião
J285	16.71	Rua Frei Damião
J286	16.82	Rua Frei Damião
J287	16.18	Rua Frei Damião
J288	16.18	Rua Frei Damião
J289	16.69	Rua Frei Damião
J290	16.8	Rua Frei Damião
J291	16.85	Rua Frei Damião
J292	16.87	Rua Frei Damião
J362	12.88	Travessa Santa Luzia
J375	12.92	Travessa Santa Luzia
J376	14.95	Travessa Santa Luzia
J377	15.17	Travessa Santa Luzia
J378	16.54	Travessa Santa Luzia
J430	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça

NÓS	DIFERENÇA DO VALOR DE PRESSÃO (MCA)	LOGRADOURO
J431	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J432	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J433	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J434	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J435	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J436	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J437	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J438	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J439	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J440	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J441	19.39	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J442	15.47	Rua Senador Bernardo de Mendonça
J443	32.79	Travessa Pedro Beltrão
J444	32.42	Travessa Pedro Beltrão
J445	32.21	Travessa Pedro Beltrão
J446	32.29	Travessa Pedro Beltrão
J447	23.72	Travessa Pedro Beltrão
J448	10.59	Rua José Moreira
J449	10.57	Rua José Moreira
J450	10.47	Rua Pedro Beltrão
J451	15.9	Rua José Moreira
J452	16.35	Rua José Moreira
J453	15.23	Rua João Leite Sobrinho
J454	15.57	Rua João Leite Sobrinho
J455	15.81	Rua João Leite Sobrinho
J456	15.64	Rua João Leite Sobrinho
J457	15.37	Rua João Leite Sobrinho
J484	12.71	Rua Santo Amaro
J488	12.69	Rua Santo Amaro
J489	11.01	Primeira Travessa Tobias Barreto
J490	12.45	Primeira Travessa Tobias Barreto
J491	12.62	Rua Vereador Jorge Omena
J492	12.69	Rua Santo Amaro
J493	14.41	Rua Joaquim Ferreira de Barros
J498	21.78	Rua José Moreira
J499	21.08	Rua José Moreira
J500	20.02	Rua José Moreira
J501	15.9	Rua José Moreira
J627	19.17	Rua Vereador Jorge Omena
J628	19.43	Rua Vereador Jorge Omena
J629	11.32	Rua Brasília
J630	11.29	Rua Brasília
J631	11.25	Rua Brasília

NÓS	DIFERENÇA DO VALOR DE PRESSÃO (MCA)	LOGRADOURO
J632	20.43	Rua Vereador Jorge Omena
J633	20.43	Rua Vereador Jorge Omena
J634	20.43	Travessa Sargento Oséias Costa
J636	14.44	Travessa Sargento Oséias Costa
J637	11.75	Travessa Sargento Oséias Costa
J638	11.68	Travessa Sargento Oséias Costa
J639	11.29	Travessa Sargento Oséias Costa
J640	11.61	Travessa Sargento Oséias Costa
J641	11.65	Rua Argemiro de Morais
J642	21.17	Travessa Augusto Barreto
J643	20.9	Travessa Augusto Barreto
J644	22.4	Travessa Augusto Barreto
J645	22.5	Travessa Augusto Barreto
J646	20.37	Travessa Augusto Barreto
J647	10.71	Rua Tobias Barreto
J648	10.85	Rua Tobias Barreto
J688	18.95	Rua Vereador Jorge Omena
J689	18.96	Rua Vereador Jorge Omena

Fonte: Autora (2022)

Figura 31 - Mapa de localização das redes com variação de pressão acima de 10 mca



Fonte: Autora (2022)

Os resultados de perda de carga dos dois cenários foram analisados às 10h, conforme Figuras 32 e 33, visto que é o horário em que a perda de carga causa um maior impacto para o consumidor, reduzindo a pressão fornecida.

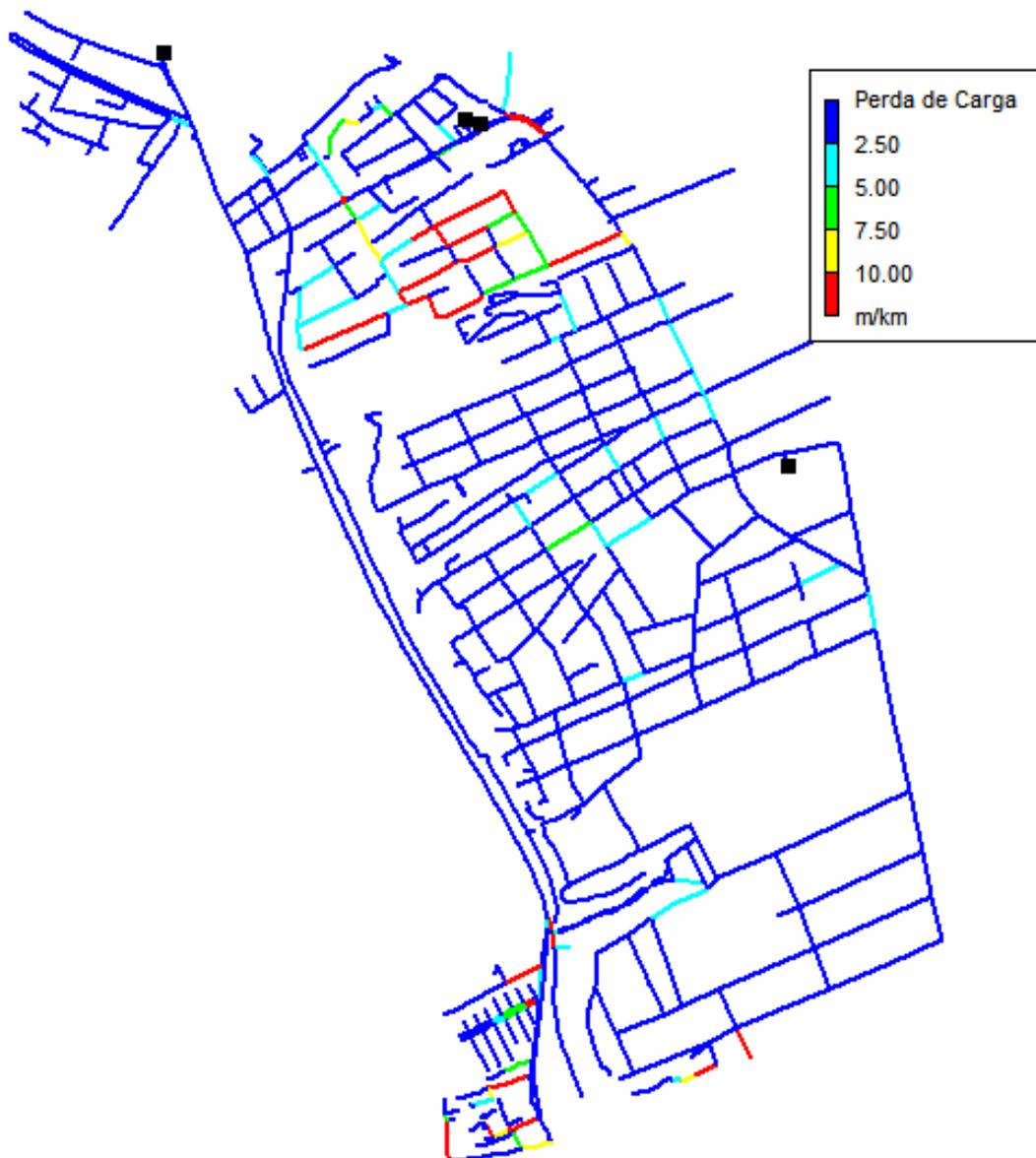
Confrontando os valores, é possível observar que no cenário atual, onde houve uma redução do consumo, os valores de perda de carga diminuíram devido a diminuição do atrito do líquido com as paredes dos condutos, causado pela variação de consumo ao longo do dia.

Figura 32 - Perda de carga no cenário antigo às 10h



Fonte: Autora (2022)

Figura 33 - Perda de carga no cenário atual às 10h



Fonte: Autora (2022)

4.3 Estratégias para minimização dos impactos

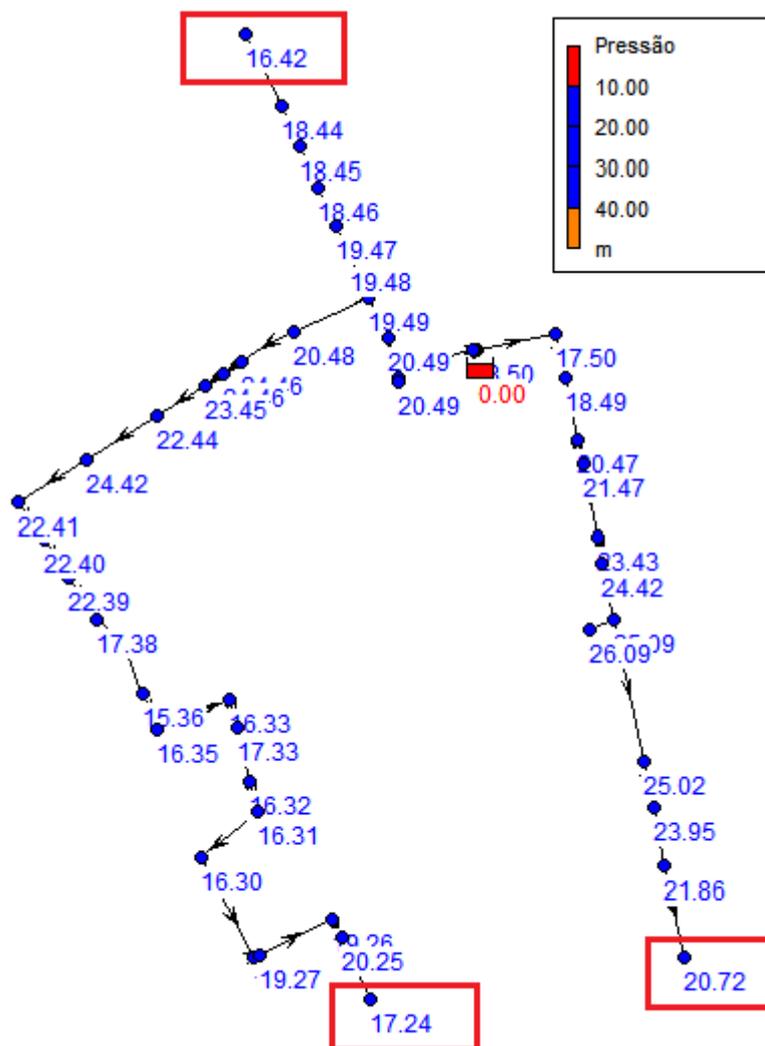
Para a estratégia 1 - Realização de manobras operacionais nos registros - fechamento e abertura para redirecionar o fluxo da água, foi identificado visualmente que não existem registros capazes de reduzir o fluxo da água somente na área em estudo, sem que afete as redes de distribuição à montante ou à jusante da rede de distribuição estudada, que ainda não estão dentro da região em subsidência de solo.

Foi considerada a estratégia 2 - Capeamento de toda a rede de distribuição – interrupção do abastecimento e manutenção das adutoras principais, tendo em vista que a área será totalmente desocupada a médio prazo, o que inviabiliza qualquer tipo de investimento. As adutoras principais do reservatório R4, reservatório R3A e o poço P-FA03, localizadas dentro da área de afundamento e responsáveis por abastecer outras regiões, foram mantidas. A adutora principal do reservatório R8 não foi mantida na simulação, visto que a rede pertencente ao sistema R8 dentro da área de afundamento é a última a ser abastecida, não havendo impacto em outros locais desse sistema.

As Figuras 34, 35 e 36 mostram as simulações realizadas com as adutoras principais. Nos nós localizados no final da rede de cada sistema, foram inseridos os consumos em L/s, calculado pela soma do consumo das quadras pertencentes às regiões a serem atendidas pelas adutoras. Os dados estão apresentados no Apêndice B. Da figura é possível observar que no horário de maior consumo, às 10h, todas as adutoras fornecem pressão acima de 10 mca para a rede de distribuição, conforme recomendado pela NBR 12.218:2017.

O valor de pressão às 10h no ponto de distribuição da adutora principal do reservatório R4 para a região do bairro do Pinheiro fora da área de afundamento, foi de 16,42 mca. Para as regiões do bairro do Farol fora da área de afundamento, os valores de pressão na adutora foram de 17,24 e 20,72 mca (Figura 34).

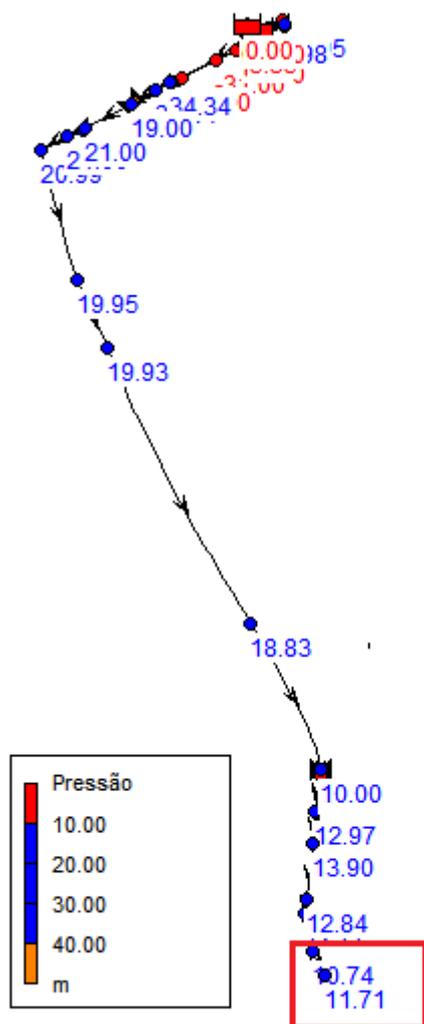
Figura 34 - Valores de pressão nas adutoras do reservatório R4 às 10h



Fonte: Autora (2022)

O valor de pressão às 10h no ponto de distribuição da adutora principal do reservatório R3A para a região do bairro do Bom Parto fora da área de afundamento, foi de 11,71 mca (Figura 35).

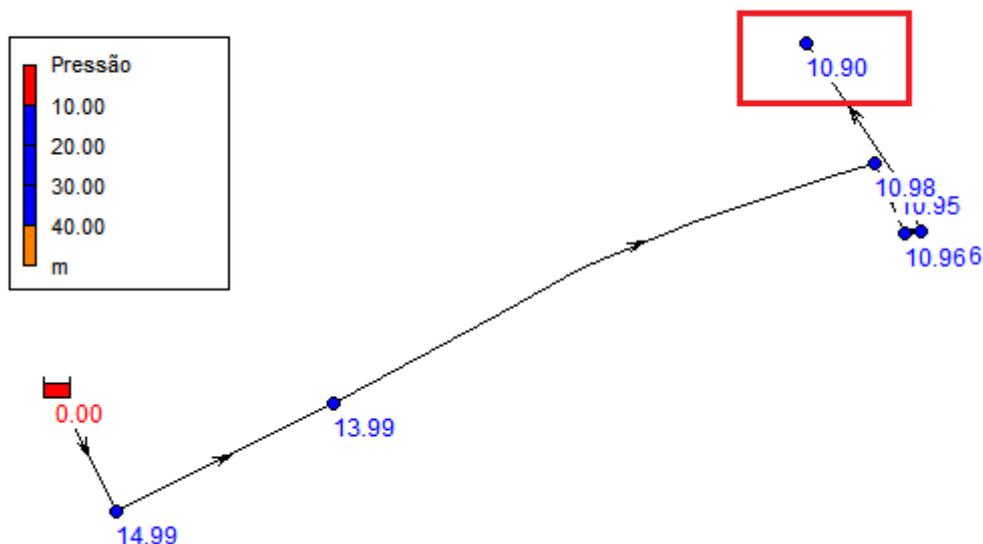
Figura 35 - Valores de pressão nas adutoras do reservatório R3A às 10h



Fonte: Autora (2022)

O valor de pressão às 10h no ponto de distribuição da adutora principal do poço P-FA03, que abastece uma região do Pinheiro fora da área afetada, foi de 10,90 mca (Figura 36).

Figura 36 - Valores de pressão na adutora do poço P-FA03 às 10h

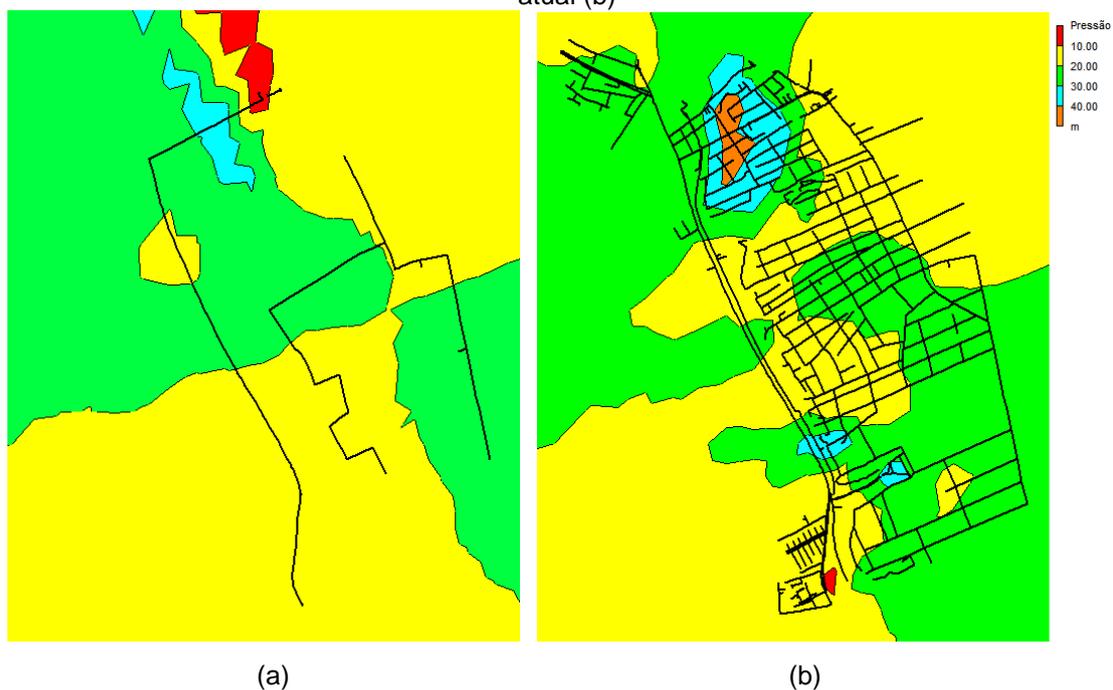


Fonte: Autora (2022)

Comparando com o cenário atual, é possível observar que houve pouca variação de pressão, que permaneceram, em sua maioria, entre 10 e 20 mca, conforme Figura 37. A região que apresenta pressões menores que 10 mca, é a região que seria abastecida somente pelo sistema do poço P-FA03, que fornece água com valores menores de pressão. Contudo, esta região recebe reforço da adutora do sistema R4, apresentando pressões superiores à 10 mca.

A Tabela 11 corrobora com o fato observado graficamente, visto que 87,34% dos nós apresentaram variação de pressão entre 0 e 1 mca. Isso mostra que a estratégia utilizada abastecerá as regiões não afetadas pela subsidência do solo de forma semelhante ao que é realizado hoje, com pressões suficientes para abastecimento.

Figura 37 - Valores de pressão dinâmica (mca), às 10h, no cenário com a estratégia (a) e no cenário atual (b)



Fonte: Autora (2022)

Tabela 11 - Variação de pressão entre o cenário com a estratégia e o cenário atual

VARIAÇÃO DA PRESSÃO	QUANTIDADE DE NÓS	QUANTIDADE (%)
ENTRE 0 E 1 MCA	69	87.34%
ENTRE 1 E 3 MCA	10	12.66%

Fonte: Autora (2022)

5 CONCLUSÕES

Eventualmente, os sistemas de abastecimento de água necessitam operar em situação de emergência, cabendo a análise de alternativas que garantam o abastecimento da população de forma adequada, evitando problemas como a perda real de água. As análises podem ser realizadas através da modelagem hidráulica, que permite a avaliação de parâmetros importantes do sistema de abastecimento, como pressão, vazão e perda de carga.

Conhecer e caracterizar um sistema de abastecimento é fundamental para a identificação dos problemas e análise das possíveis alternativas de minimização de impactos. Nesse sentido, foi possível identificar que existem estruturas dentro da área de fundamento responsáveis por abastecer outras regiões da cidade de Maceió, como a ETA Cardoso e o Reservatório R3A. Além disso, foi possível identificar os seguintes impactos causados pela desocupação da comunidade local:

- Redução no número de ligações ativas de água em 41,30%, com o maior valor de redução observado no bairro do Mutange, passando de 415 ligações ativas em janeiro de 2018, para 5 ligações ativas em junho de 2021, representando uma redução de 98,80%.
- Redução de 44,45% do volume de água consumido, representando 80373 m³/mês. O bairro do Mutange apresentou uma redução de 88,86%, sendo o maior valor entre os bairros.
- Redução de 31,72% no faturamento do volume de água consumido, representando um prejuízo de mais de 500 mil reais por mês. O bairro do Pinheiro apresentou uma redução de 93,57%, sendo o maior valor entre os bairros.

Através da simulação hidráulica, foi possível analisar os impactos gerados em termos de pressão e perda de carga, nos horários de maior e menor consumo de água, comparando o cenário antigo em relação ao cenário atual da região estudada, sendo eles:

- Para a área com valores acima de 40 mca, a variação de pressão não foi significativa.

- Para as áreas com valores abaixo de 10 mca, observadas no cenário antigo, houve um acréscimo de pressão devido à diminuição do consumo. A maioria das tubulações, no cenário atual, variam entre 10 e 20 mca.
- 15,14% da rede apresentou um acréscimo maior que 10 mca no valor da pressão, indicando que, possivelmente, esses locais já estão totalmente desocupados.
- No cenário atual, os valores de perda de carga diminuíram devido à redução do atrito do líquido com as paredes dos condutos, causado pela variação de consumo ao longo do dia.

A proposição das estratégias para minimizar os impactos gerados resumiu-se no capeamento das redes de distribuição da área afetada, com a manutenção das adutoras principais, tendo em vista a inviabilidade e falta de retorno financeiro para investimentos na região. A estratégia foi avaliada por meio de simulação hidráulica, considerando o abastecimento de regiões fora da área de estudo. Dessa forma, foi possível analisar as pressões nas saídas das adutoras, de modo a garantir um fornecimento de água adequado. A estratégia utilizada cumpriu com os valores de referência de pressão estabelecidos em norma, reduzindo as possíveis ocorrências de vazamento devido às altas pressões na rede e, conseqüentemente, reduzindo as perdas de água – impactos gerados pela desocupação na área de afundamento do solo.

Em pesquisas futuras, pode-se confrontar os locais com maior diferença de pressão entre os cenários, com a ocorrência de vazamentos, quantificando a perda real de água. Além disso, pode-se estudar o realocamento das adutoras e estruturas que estão dentro da área afetada.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12218: **Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 2017.
- AGARDY, Franklin. J. RAY, Arliss D. **Emergency planning for water utility management (M19)**. 3º Ed. Americam Water Works Association. Denver, 2001.
- AZEVEDO NETTO, José Martiniano. FERNANDEZ, Miguel Fernandez.; ARAUJO, Roberto; EIJIITO, Acácio. **Manual de Hidráulica**. 8ª ed. Blucher. São Paulo, Brasil, 1998.
- BARROSO, Lidiane Bittencourt. GASTALDINI, Maria do Carmo Cauduro. **Redução de vazamentos em um setor de distribuição de água de Santa Maria – RS**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 15, n.2, 2010. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=7&SUMARIO=92>. Acesso em: 06 set. 2021.
- BRASIL. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Brasília, 2020. 80 p. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art6. Acesso em: 01 dez. 2021.
- BRASIL. Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNDCA). DTA – **Documento Técnico de Apoio A2 – Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água**. Brasília, 2003. 80 p. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/saneamento/proeesa/101-secretaria-nacional-de-saneamento/biblioteca/3151-publicacoes>. Acesso em: 28 nov. 2021.
- BRASKEM. **Atualização Maceió**. Maceió, 2021. 31 slides, color. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/mapa-da-area-de-desocupacao>. Acesso em: 04 set. 2021.
- CALDO, Leandro de Almeida; RAMALHO, Tiago Batista; SELVA, Ricardo Verde. **Desenvolvimento de ferramenta operacional para o sistema de abastecimento de água de Coxim-MS por meio de modelagem hidráulica**. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2015, Rio de Janeiro.

CARMO, Félix Júnior Justino. **Vazamentos na rede de distribuição de água: impactos no faturamento e no consumo de energia elétrica do 3º setor de abastecimento de água da região metropolitana de Belém.** 2009. 145 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/7913/1/Dissertacao_VazamentosRedeDistribuicao.pdf. Acesso em: 07 set. 2021.

CMEOE/DEP - COMMONWEALTH OF MASSACHUSETTS EXECUTIVE OFFICE OF ENVIRONMENTAL AFFAIRS/DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION. **Handbook for Water Supply Emergencies.** 2ª Impresão (1ª Impresão 1990), Boston. 2001. Disponível em: <http://www.mass.gov/dep/water/laws/emershdbk.pdf>. Acesso em: 01 set. 2021

CUNHA, Agne Pereira; PINTO, Willian Teles. **Calibração de modelo hidráulico via algoritmos genéticos para rede de abastecimento de água.** 2014. 68 f. Monografia, Universidade Federal de Goiás, Belém, 2014.

DINIZ, Tibério Gomes. **Vulnerabilidade ao desabastecimento em situação de intermitência no abastecimento de água.** 2019. 65 f. Dissertação (Mestrado), Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <http://www.ppgeca.ufcg.edu.br>. Acesso em: 01 set. 2021.

EARNSHAW, Frank; WATER MAINS COMMITTEE; WATER RESEARCH CENTRE. **Network analysis – a code for practice.** Editora Swindon, Wilts, 1989.

GOMES, Heber Pimentel. **Sistemas de Saneamento: Eficiência Energética.** João Pessoa, Paraíba: Editora Universitária. Universidade Federal da Paraíba, 2010. Disponível em: http://www.lenhs.ct.ufpb.br/wp-content/uploads/arquivos/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf. Acesso em: 07 set. 2021.

GONZALES Esteban Alberto; BEJARANO Esteban. **Sistemas de información geográfica y modelado hidráulico de redes de abastecimiento de agua potable: estudios de caso en la provincia de Guanacaste, Costa Rica.** 2019. Revista Geográfica de América Central, vol. 1, no. 64, p. 3, ISSN 1011-484X, Universidad Nacional de Costa Rica (Guanacaste), Costa Rica.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010 - Sinopse por setores.** 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/?nivel=st>. Acesso em: 28 nov. 2021

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA EM SANEAMENTO (LEHNS). **Manual do usuário – EPANET 2.0 Brasil.** Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2009.

MENESES, Ronaldo Amâncio. **Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água: o caso de campina grande**. 2011. 162 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br/>. Acesso em: 31 ago. 2021

NAVARRO-ROA, Zacarías. **Avaliação da vulnerabilidade hidráulica de um sistema de abastecimento de água: o caso da cidade de Santiago de los Caballeros, República Dominicana**. 2008. 169 f. Tese (Doutorado). Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br>. Acesso em: 31 ago. 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Organização Pan-Americana de Saúde. **Mitigación de desastres naturales em sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario**. Washington, 1998. 100 p. Disponível em: <<https://iris.paho.org>>. Acesso em: 01 set. 2021

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Guidelines for Drinking-Water Quality**. 4^a ed. Geneva, 2017. 631 p. Disponível em: <https://www.who.int/publications>. Acesso em: 28 nov. 2021.

OSTFELD, Avi; KOGAN, Dimitri; SHAMIR, Uri. **Reliability simulation of water distribution systems – single and multiquality**. In: Urban Water, v. 4 (2002), p. 53–61.

PIRES, Wilson Diniz Fernandes. **Gestão de Riscos em Sistemas de Abastecimento de Água - uma abordagem**. 2020. 69 f. Dissertação (Mestrado). Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2020. Disponível em: <http://sigarra.up.pt/>. Acesso em: 31 ago. 2021

PREFEITURA DE MACEIÓ. **Plano de Saneamento Básico do Município de Maceió/AL**. Maceió, 2016. 199 p. Disponível em: http://www.sedet.maceio.al.gov.br/servicos/pmsb/pdf/pmsb/fase2/etapa6/relatorio_fin_al.pdf. Acesso em: 15 out. 2021.

SANTOS, Caroline Gonçalves, et al. **A necessidade de evacuação de bairros em Maceió-AL e os impactos urbanos socioespaciais: novos desafios para o planejamento urbano na cidade**. 2021. In: 9^o Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável, 954., 2021.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. **Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL): volume I, relatório síntese dos resultados n. 1**. Maceió, abr. 2019. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21133>>. Acesso em: 02 set. 2021.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. **Informe técnico 01:**

monitoramento da instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange, Bebedouro e Bom Parto. Brasília, mar. 2020. Disponível em: < <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21734> >. Acesso em: 02 set. 2021.

TORO, Dumar M. **Metodología para el Análisis de Vulnerabilidad de Sistema de Agua Potable y Saneamiento.** In: III Curso Internacional Microzonificación y Su Aplicación En La Mitigación De Desastres. Empresa Pública de Medellín ESP/Unidad Estratégica de Negocios Águas/Coordinación Riesgos UEN Aguas. Lima, Peru. 2002.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de Água.** 3ª edição. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 643p. São Paulo, 2006.

USGS. United States Geological Survey. **Earth Explorer.** 2021. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 28 nov. 2021.

VAZ, Luísa Cláudia Pires. **Aplicação de um modelo de simulação hidráulica num sub-bloco do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira - Integração com Sistema de Informação Geográfica.** 2015. 116 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Sistemas de Informação Geográfica – Recursos Agro-Florestais e Ambientais, Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal, 2015. Disponível em: <http://repositorio.ipcb.pt/>. Acesso em: 31 ago. 2021

APÊNDICES

APÊNDICE A – Dados de consumo por quadra

Bairro	Quadra	Volume (m³/mês)	
		jan/18	jun/21
Bebedouro	10	1.684	105
Bebedouro	20	278	5
Bebedouro	30	363	0
Bebedouro	330	929	7
Bebedouro	340	226	13
Bebedouro	350	354	9
Bebedouro	360	259	0
Bebedouro	370	570	20
Bebedouro	380	813	22
Bebedouro	40	746	0
Bebedouro	50	693	28
Bebedouro	60	554	28
Bebedouro	70	406	5
Bebedouro	75	232	0
Bebedouro	80	596	0
Bebedouro	90	1.209	12
Bebedouro	100	582	22
Bebedouro	110	270	0
Bebedouro	120	159	0
Bebedouro	130	390	0
Bebedouro	140	419	0
Bebedouro	150	929	0
Bebedouro	200	720	13
Bebedouro	210	587	10
Bebedouro	220	140	22
Bebedouro	240	38	4
Bebedouro	250	302	60
Bebedouro	260	221	0
Bebedouro	270	0	0
Bebedouro	280	373	0
Bebedouro	290	2.395	569
Bebedouro	390	621	509
Bebedouro	400	1.159	677
Bebedouro	410	462	214
Bebedouro	415	195	101
Bebedouro	420	482	368
Bebedouro	425	723	296
Bebedouro	430	428	14
Bebedouro	435	273	0

Bairro	Quadra	Volume (m³/mês)	
		jan/18	jun/21
Bebedouro	440	705	441
Bebedouro	445	322	4
Bebedouro	450	48	100
Bebedouro	460	1.809	1.216
MÉDIA (m³/mês)		574	114
MÉDIA (L/s)		0,221	0,044
Bom Parto	300	184	145
Bom Parto	310	130	116
Bom Parto	320	135	96
Bom Parto	330	88	20
Bom Parto	340	1.29	874
Bom Parto	390	561	12
Bom Parto	450	610	0
Bom Parto	470	1.825	957
MÉDIA (m³/mês)		713	438
MÉDIA (L/s)		0,275	0,169
Farol	100	393	353
Farol	140	1.409	1.351
Farol	150	757	532
Farol	160	719	634
Farol	170	615	377
Farol	180	807	702
Farol	190	367	261
Farol	200	706	511
Farol	250	946	148
Farol	350	2.192	360
Farol	355	265	187
MÉDIA (m³/mês)		834	492
MÉDIA (L/s)		0,322	0,190
Mutange	410	260	0
Mutange	420	113	0
Mutange	430	365	10
Mutange	460	2.192	521
Mutange	10	211	10
Mutange	19	106	0
Mutange	20	76	0
Mutange	21	83	0
Mutange	22	92	0
Mutange	23	59	0
Mutange	24	188	0
Mutange	30	55	0

Bairro	Quadra	Volume (m³/mês)	
		jan/18	jun/21
Mutange	40	454	0
Mutange	50	404	0
Mutange	70	198	0
MÉDIA (m³/mês)		324	36
MÉDIA (L/s)		0,125	0,014
Pinheiro	1000	278	0
Pinheiro	1010	242	0
Pinheiro	1020	843	52
Pinheiro	1030	380	25
Pinheiro	1110	418	135
Pinheiro	1120	437	4
Pinheiro	1130	1.376	0
Pinheiro	1140	450	16
Pinheiro	1145	326	0
Pinheiro	1150	2.419	17
Pinheiro	1170	411	0
Pinheiro	1180	441	0
Pinheiro	1190	791	0
Pinheiro	1200	384	0
Pinheiro	1220	224	0
Pinheiro	1230	49	0
Pinheiro	1240	0	
Pinheiro	1250	357	41
Pinheiro	260	785	73
Pinheiro	270	167	22
Pinheiro	280	171	0
Pinheiro	290	907	63
Pinheiro	300	924	171
Pinheiro	310	769	360
Pinheiro	320	499	556
Pinheiro	340	1.144	589
Pinheiro	350	392	123
Pinheiro	360	303	74
Pinheiro	370	764	271
Pinheiro	410	76	43
Pinheiro	420	246	92
Pinheiro	430	661	242
Pinheiro	440	3.458	81
Pinheiro	445	380	39
Pinheiro	450	454	604
Pinheiro	460	415	15

Bairro	Quadra	Volume (m³/mês)	
		jan/18	jun/21
Pinheiro	470	831	20
Pinheiro	480	389	24
Pinheiro	490	0	0
Pinheiro	500	466	0
Pinheiro	510	2.124	0
Pinheiro	520	471	23
Pinheiro	530	104	0
Pinheiro	540	677	0
Pinheiro	550	401	0
Pinheiro	555	215	0
Pinheiro	560	318	29
Pinheiro	565	5	0
Pinheiro	570	678	0
Pinheiro	580	541	0
Pinheiro	590	1.488	0
Pinheiro	600	840	0
Pinheiro	610	658	0
Pinheiro	620	221	0
Pinheiro	630	1.373	1.155
Pinheiro	660	248	118
Pinheiro	670	252	109
Pinheiro	680	222	65
Pinheiro	690	126	8
Pinheiro	700	1	0
Pinheiro	705	19	30
Pinheiro	710	519	0
Pinheiro	720	1.112	0
Pinheiro	730	569	21
Pinheiro	740	737	16
Pinheiro	750	691	0
Pinheiro	760	584	19
Pinheiro	770	1.641	0
Pinheiro	775	109	0
Pinheiro	780	59	0
Pinheiro	790	27	0
Pinheiro	800	458	0
Pinheiro	810	1.507	9
Pinheiro	820	524	0
Pinheiro	830	286	2
Pinheiro	840	0	0
Pinheiro	845	0	

Bairro	Quadra	Volume (m ³ /mês)	
		jan/18	jun/21
Pinheiro	850	250	0
Pinheiro	860	175	12
Pinheiro	870	380	153
Pinheiro	910	254	57
Pinheiro	920	242	30
Pinheiro	930	344	0
Pinheiro	940	298	0
Pinheiro	950	525	5
Pinheiro	960	394	0
Pinheiro	965	405	45
Pinheiro	970	403	26
Pinheiro	980	389	0
Pinheiro	990	253	0
Pinheiro	360	182	86
Pinheiro	370	79	53
Pinheiro	380	318	170
Pinheiro	400	1.309	135
Pinheiro	440	516	0
Pinheiro	445	116	0
Pinheiro	80	128	0
Pinheiro	100	654	571
Pinheiro	110	75	48
Pinheiro	120	240	159
Pinheiro	130	362	185
Pinheiro	265	156	121
Pinheiro	290	44	34
Pinheiro	295	195	174
Pinheiro	310	0	
Pinheiro	320	1.667	1.553
Pinheiro	35	53	0
MÉDIA (m³/mês)		502	86
MÉDIA (L/s)		0,194	0,033

APÊNDICE B – Dados de consumo das regiões atendidas pelas adutoras

Bairro	Quadra	Volume (m ³ /mês)
Bom Parto	10	1096
Bom Parto	1000	0
Bom Parto	130	103
Bom Parto	140	0
Bom Parto	160	749
Bom Parto	170	345
Bom Parto	180	3
Bom Parto	185	0
Bom Parto	190	1791
Bom Parto	20	153
Bom Parto	200	448
Bom Parto	210	742
Bom Parto	215	2180
Bom Parto	220	234
Bom Parto	230	230
Bom Parto	240	210
Bom Parto	250	163
Bom Parto	260	172
Bom Parto	270	67
Bom Parto	275	0
Bom Parto	280	21
Bom Parto	290	31
Bom Parto	30	319
Bom Parto	40	449
Bom Parto	50	142
TOTAL (m³/mês)		9.648
TOTAL (L/s)		3,722
Pinheiro	140	5
Pinheiro	150	788
Pinheiro	155	154
Pinheiro	160	86
Pinheiro	170	192
Pinheiro	180	263
Pinheiro	190	144
Pinheiro	200	263
Pinheiro	210	165
Pinheiro	220	133
Pinheiro	230	86

Bairro	Quadra	Volume (m³/mês)
Pinheiro	240	91
Pinheiro	250	21
Pinheiro	260	295
Pinheiro	265	121
Pinheiro	270	252
Pinheiro	280	84
Pinheiro	290	34
Pinheiro	295	174
Pinheiro	300	1097
Pinheiro	320	1553
Pinheiro	390	886
Pinheiro	400	548
Pinheiro	410	0
Pinheiro	420	462
TOTAL (m³/mês)		7.897
TOTAL (L/s)		3,047
Farol	10	2337
Farol	100	727
Farol	110	686
Farol	120	10
Farol	130	0
Farol	140	1202
Farol	150	0
Farol	160	157
Farol	170	102
Farol	180	266
Farol	240	335
Farol	250	408
Farol	260	42
Farol	270	423
Farol	280	310
Farol	290	3340
Farol	30	17
Farol	300	350
Farol	310	343
Farol	320	249
Farol	330	371
Farol	340	538
Farol	350	401
Farol	355	0

Bairro	Quadra	Volume (m³/mês)
Farol	360	120
Farol	370	331
Farol	380	364
Farol	390	246
Farol	400	301
Farol	410	30
Farol	420	0
Farol	430	380
Farol	440	936
Farol	450	0
Farol	460	367
Farol	470	352
Farol	480	336
Farol	490	101
Farol	495	0
Farol	50	2282
Farol	500	348
Farol	510	634
Farol	520	82
Farol	530	326
Farol	540	150
Farol	550	657
Farol	560	0
Farol	570	472
Farol	580	887
Farol	590	0
Farol	60	423
Farol	600	290
Farol	610	918
Farol	620	0
Farol	630	594
Farol	640	0
Farol	650	0
Farol	660	106
Farol	670	324
Farol	675	2752
Farol	680	1082
Farol	681	0
Farol	682	0
Farol	685	1318

Bairro	Quadra	Volume (m³/mês)
Farol	690	1690
Farol	70	409
Farol	700	692
Farol	710	380
Farol	720	360
Farol	730	301
Farol	740	398
Farol	750	1287
Farol	760	953
Farol	770	1018
Farol	780	714
Farol	80	2891
Farol	81	15
Farol	82	67
Farol	83	5
Farol	90	113
TOTAL (m³/mês)		41.416
TOTAL (L/s)		15,978