MODELAGEM MULTICRITÉRIO INTEGRADA AO GEOPROCESSAMENTO PARA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS EM SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Isabela Cardinali[(1)]
Técnica em Edificações pela Escola Técnica Federal de Minas Gerais (CEFET-MG). Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária. Atua há mais de 18 anos na Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA-MG), com experiência em geoprocessamento, gestão operacional de sistemas de esgotamento sanitário e análise espacial aplicada ao saneamento.

Endereço[(1)]**:** Av. Airton Senna, 131 – Ponte Alta - Betim – Minas Gerais - CEP: 32.605.608 - Brasil - Tel: +55 (31) 99695-8612 - e-mail: isabela.cardinali@copasa.com.br.

RESUMO

A gestão de sistemas de esgotamento sanitário enfrenta desafios relacionados à identificação de áreas críticas e à priorização eficiente de intervenções operacionais. Abordagens predominantemente reativas têm se mostrado insuficientes para garantir eficiência operacional e mitigação de impactos ambientais.
Este estudo propõe a aplicação de um modelo multicritério integrado ao geoprocessamento para análise de criticidade em sub-bacias de contribuição de esgoto, por meio da integração de indicadores operacionais, ambientais e estruturais utilizando o método Analytic Hierarchy Process (AHP), resultando nos índices de Criticidade (IC) e Prioridade Operacional (IPO).
A aplicação do modelo demonstrou aumento do atendimento no prazo de aproximadamente 53% para valores superiores a 90%, além da redução da recorrência de falhas e maior eficiência operacional.
Os resultados evidenciam a transição de uma gestão reativa para um modelo preventivo orientado por dados e risco, com ganhos operacionais e ambientais.

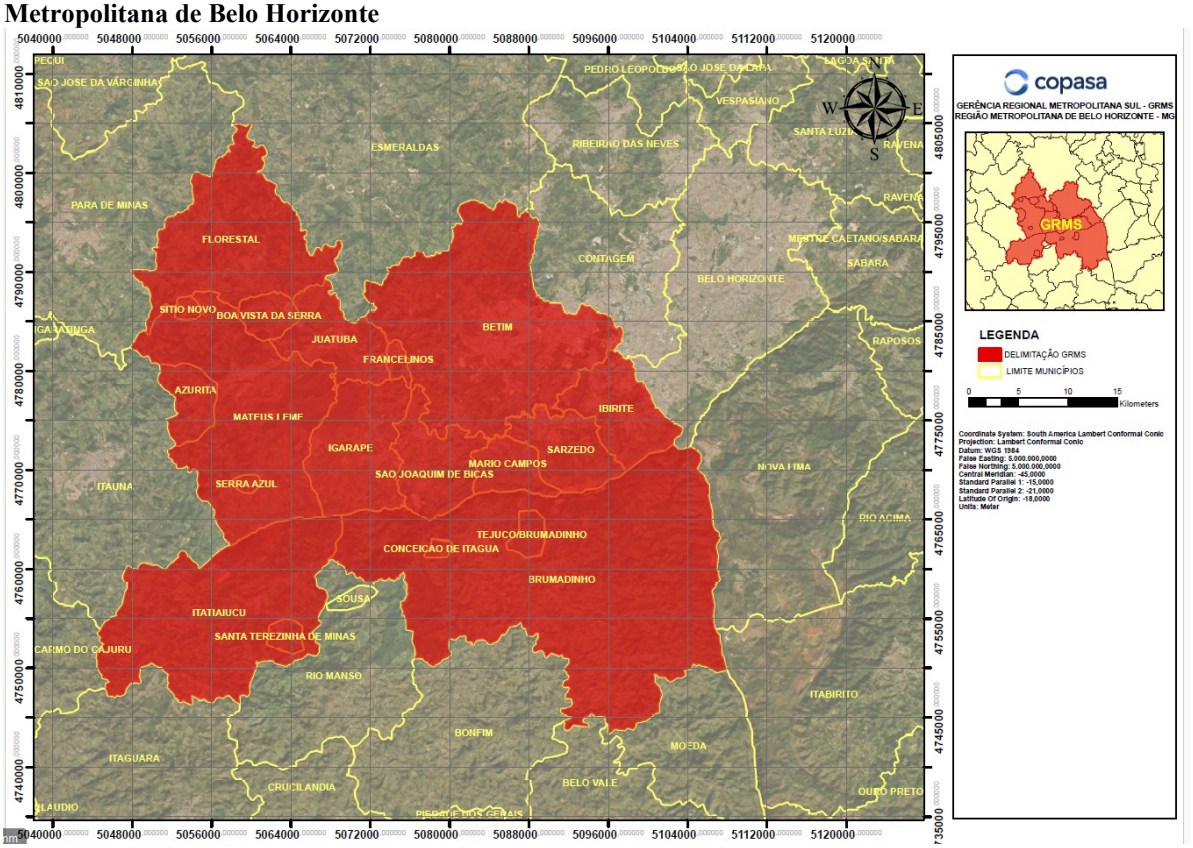
PALAVRAS-CHAVE: Esgoto, Geoprocessamento, Priorização.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de sistemas de esgotamento sanitário em áreas urbanas complexas enfrenta desafios significativos relacionados à elevada recorrência de falhas operacionais, à heterogeneidade territorial e à limitação na integração de dados técnicos e operacionais. Eventos como extravasamentos e refluxos de esgoto evidenciam fragilidades estruturais e operacionais dos sistemas, impactando diretamente a eficiência dos serviços e a qualidade ambiental.
Tradicionalmente, a priorização de intervenções nesses sistemas tem sido conduzida por abordagens predominantemente reativas, baseadas no atendimento às ocorrências registradas, sem a incorporação sistemática de critérios analíticos estruturados. Essa condição compromete a eficiência na alocação de recursos, favorece a recorrência de falhas e limita a capacidade de atuação preventiva.
Além disso, observa-se que, mesmo com a disponibilidade crescente de dados operacionais e georreferenciados, sua utilização de forma integrada ainda constitui um desafio, em razão da fragmentação entre sistemas de informação e da ausência de metodologias consolidadas que permitam a transformação desses dados em suporte efetivo à tomada de decisão.
Nesse contexto, a aplicação de técnicas de análise espacial associadas à modelagem multicritério tem se consolidado como uma abordagem promissora para o apoio à gestão de sistemas de saneamento, ao possibilitar a integração de diferentes dimensões do sistema, como desempenho operacional, impacto ambiental e características territoriais (MALCZEWSKI, 1999).
A aplicação do método AHP em sistemas de esgotamento sanitário tem se mostrado eficaz na priorização de intervenções operacionais, permitindo a estruturação hierárquica dos critérios e a hierarquização de alternativas com base em sua importância relativa, contribuindo para maior racionalidade e transparência no processo decisório.
A integração entre o método Analytic Hierarchy Process (AHP) e Sistemas de Informação Geográfica tem sido amplamente utilizada em estudos ambientais e territoriais, permitindo a combinação de múltiplos critérios a partir de sua distribuição espacial, por meio de técnicas como álgebra de mapas e análise multicritério (GOMES; BIAS, 2018).

A área de estudo compreende a área de atuação operacional da Gerência Regional Metropolitana Sul (GRMS), abrangendo os municípios de Betim, Brumadinho, Florestal, Ibirité, Igarapé, Itatiaiuçu, Juatuba, Mário Campos, Mateus Leme, São Joaquim de Bicas e Sarzedo, inseridos na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), conforme apresentado na Figura 1. A caracterização demográfica da área estudada é apresentada na Tabela 1.

Figura 1 - Delimitação da área de estudo e localização dos municípios atendidos pela GRMS na Região Metropolitana de Belo Horizonte



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados corporativos do COPAGIS (2024).

Tabela 1- Caracterização demográfica dos municípios integrantes da área de estudo

Município	População (hab.)
Betim	477.468
Brumadinho	37.965
Florestal	7.827
Ibirité	188.711
Igarapé	45.887
Itatiaiuçu	8.340
Juatuba	31.067
Mário Campos	17.600
Mateus Leme	26.532
São Joaquim de Bicas	26.832
Sarzedo	37.517
Total GRMS	**905.746**

Fonte: Base corporativa COPASA/GRMS (2026).

A população estimada de 905.746 habitantes corresponde ao somatório dos municípios de Betim, Brumadinho, Florestal, Ibirité, Igarapé, Itatiaiuçu, Juatuba, Mário Campos, Mateus Leme, São Joaquim de Bicas e Sarzedo,

abrangidos pela área de atuação operacional da GRMS. Com extensão aproximada de 2,25 mil km de redes de esgoto, o índice de atendimento de esgotamento sanitário situa-se em torno de 62,30%, evidenciando a coexistência de áreas consolidadas e regiões em expansão, com desafios associados à universalização e à eficiência operacional dos serviços.

Apesar dos avanços no uso de geoprocessamento e análise multicritério no setor de saneamento, observa-se a ausência de modelos integrados que considerem simultaneamente variáveis operacionais, ambientais e estruturais aplicadas à priorização de intervenções em escala de sub-bacia, com validação consistente dos resultados. Essa lacuna limita a consolidação de abordagens preventivas baseadas em risco no contexto operacional.

Diante desse cenário, torna-se necessária a adoção de metodologias estruturadas capazes de integrar múltiplos fatores condicionantes e orientar a priorização de intervenções de forma objetiva, consistente e baseada em risco.

Assim, o presente estudo propõe o desenvolvimento e aplicação de um modelo multicritério integrado ao geoprocessamento, estruturado a partir da combinação de indicadores operacionais, ambientais e espaciais, organizados em unidades territoriais representativas da dinâmica do sistema.

A abordagem visa superar limitações de modelos tradicionais baseados em variáveis isoladas, contribuindo para a transição de uma gestão reativa para um modelo analítico, preventivo e orientado por dados, com aplicação direta na melhoria da eficiência operacional dos sistemas de esgotamento sanitário.

2. OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo desenvolver e aplicar um modelo multicritério, integrado ao geoprocessamento, para identificação e priorização de áreas críticas em sistemas de esgotamento sanitário, com base na combinação estruturada de indicadores operacionais, ambientais e espaciais, visando aprimorar a eficiência na alocação de recursos e apoiar a transição de uma abordagem reativa para uma gestão orientada por dados e risco.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Estruturar e integrar bases de dados operacionais e georreferenciadas, assegurando consistência e comparabilidade das informações;
- Desenvolver indicadores sintéticos capazes de representar o desempenho operacional, o potencial de impacto ambiental e a distribuição espacial das ocorrências;
- Aplicar o método Analytic Hierarchy Process (AHP) para definição de pesos dos critérios, garantindo coerência e transparência no processo de priorização;
- Construir índices integrados de criticidade e prioridade operacional, capazes de sintetizar múltiplas dimensões do sistema em uma única métrica;
- Avaliar a aderência do modelo proposto à dinâmica operacional, por meio de validação estatística e espacial dos resultados.

3. METODOLOGIA UTILIZADA

O presente estudo possui caráter aplicado, com abordagem analítica baseada na integração de dados operacionais, ambientais, territoriais e estruturais em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG).
As sub-bacias de contribuição de esgotamento sanitário foram adotadas como unidade espacial de análise, por representarem de forma mais adequada a dinâmica hidráulica e o comportamento sistêmico dos sistemas de esgoto, permitindo a avaliação integrada dos fatores que influenciam a ocorrência de falhas operacionais.
Os dados geoespaciais relativos às redes coletoras, ligações e limites operacionais foram obtidos por meio do COPAGIS, sistema corporativo de informações geográficas da COPASA. Os registros de ocorrências operacionais foram extraídos do SIGOS – Sistema de Gestão de Ordens de Serviços e os dados cadastrais comerciais do SICOM – Sistema de Informações Comerciais. Após a extração, as bases foram integradas em ambiente SIG para processamento, análise espacial e geração dos indicadores utilizados na modelagem. Os dados foram submetidos a processos de validação, consistência e integração, com o objetivo de garantir qualidade, rastreabilidade e confiabilidade das informações utilizadas na modelagem.
Com o objetivo de garantir comparabilidade entre variáveis com diferentes unidades e escalas, a normalização dos indicadores foi realizada pelo método Min-Max (ver Equação 1), amplamente utilizado em modelagem multicritério (MALCZEWSKI, 1999), por preservar a proporcionalidade dos dados e permitir a comparação entre variáveis com diferentes escalas.
Apesar de sua sensibilidade à presença de valores extremos, a aplicação do método mostrou-se adequada ao conjunto de dados analisado, uma vez que os registros passaram por etapas prévias de consistência e validação.
Adicionalmente, a escolha do método favorece a interpretação dos resultados, ao manter os valores normalizados no intervalo (0,1), facilitando sua integração em modelos lineares ponderados.

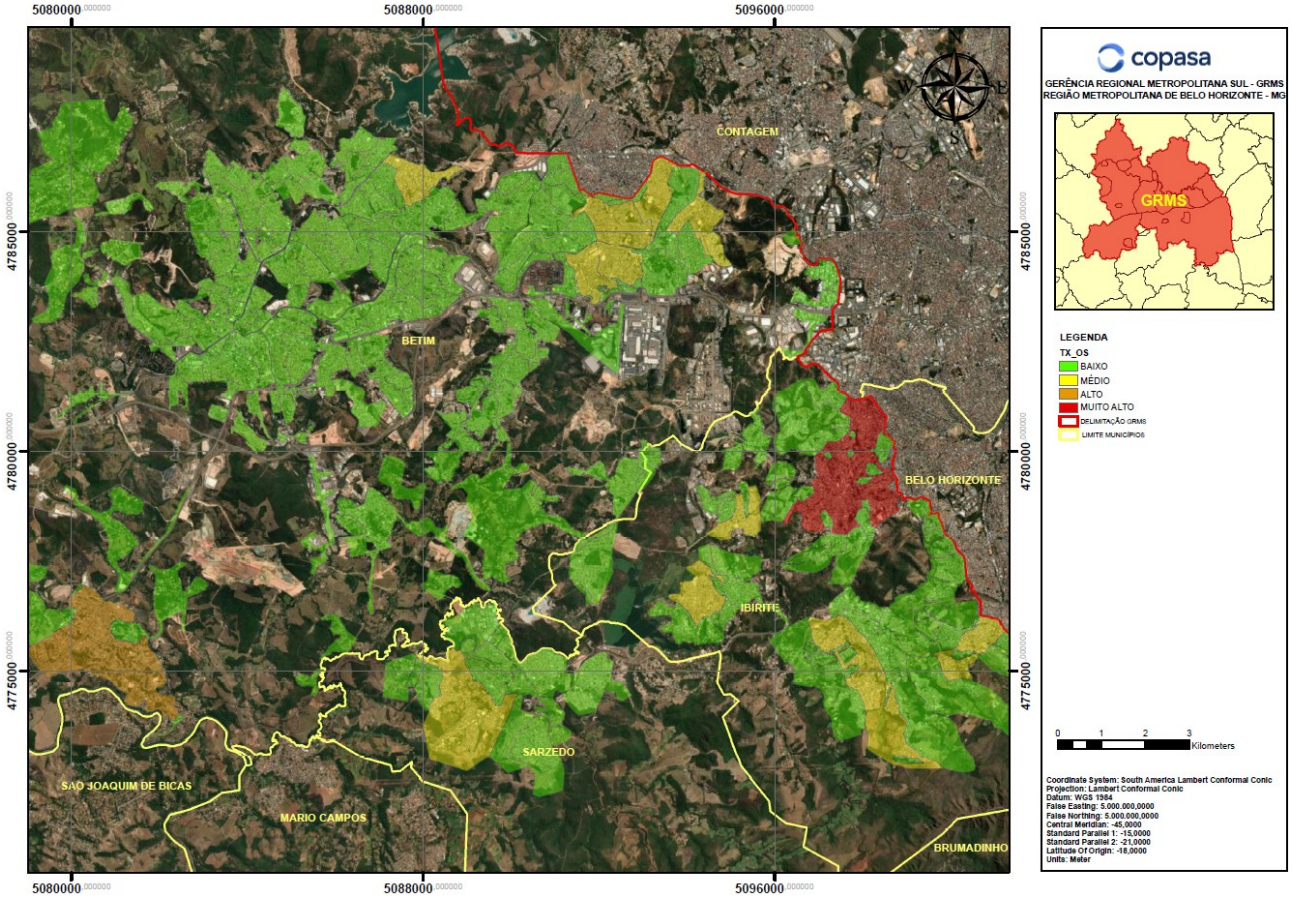
Equação 1: Xnorm = (Xi – Xmin) / (Xmax – Xmin)

- **Taxa de Ocorrência Operacional (TO)**

A Taxa de Ocorrência Operacional foi definida a partir da Equação 2 e representa a intensidade de falhas operacionais por unidade de atendimento, permitindo a comparação entre áreas com diferentes densidades de ligações (ver Figura 2).

Equação 2: TO = (OS / Economias) × 10.000

Figura 2 - Distribuição espacial da Taxa de Ocorrências Operacionais (TO) por sub-bacia de esgotamento sanitário



Fonte: autora (2024).

- **Carga Poluidora Estimada (DBO)**

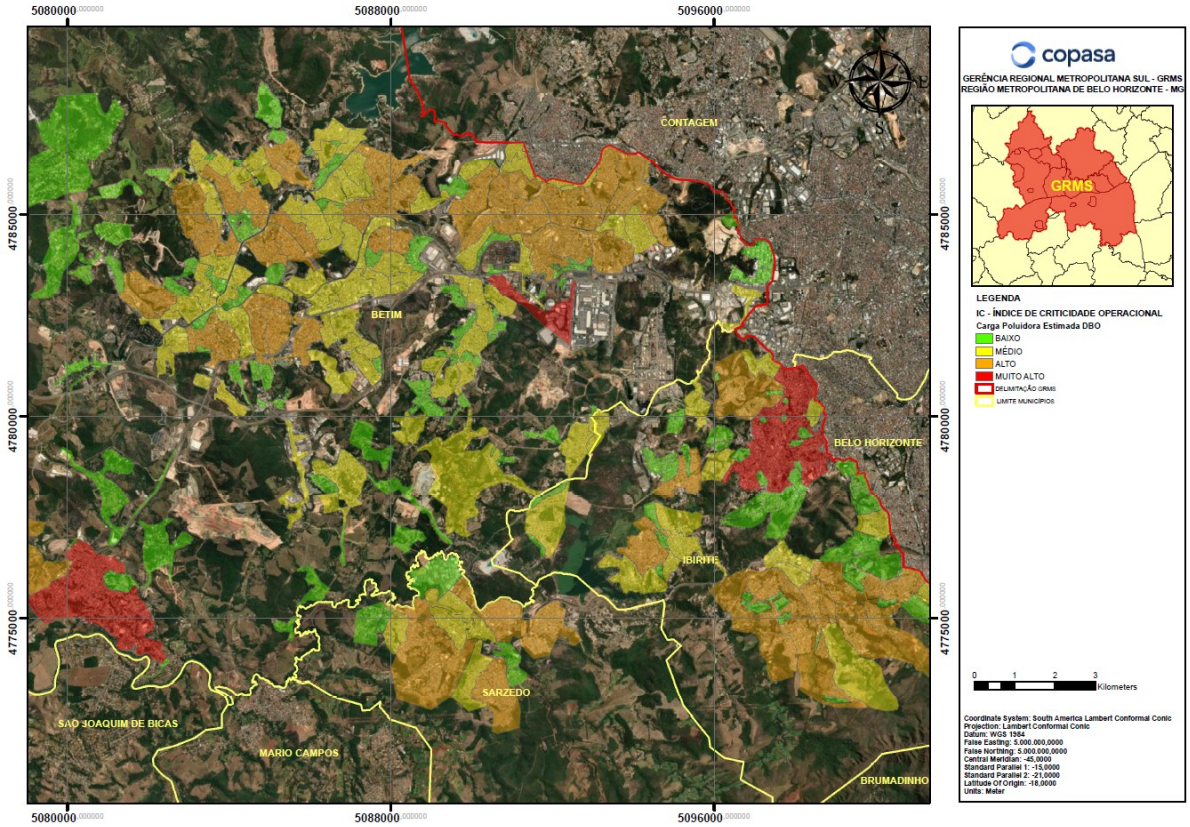
A Carga Poluidora Estimada (DBO) foi utilizada como proxy do potencial de impacto ambiental, sendo calculada a partir da estimativa de geração de carga orgânica por economia atendida (VON SPERLING, 2014), conforme Equação 3.

Ressalta-se que o indicador não diferencia tipologias de contribuição (residencial, comercial ou industrial), sendo utilizado como aproximação da carga orgânica potencial.

Apesar dessa simplificação, o indicador mostrou-se adequado para a finalidade de priorização, ao permitir a identificação de áreas com maior potencial de impacto em termos relativos (ver Figura 3):

Equação 3: DBO (kg/dia) = Economias × 0,216 kg DBO/economia·dia

Figura 3 - Distribuição espacial da Carga Poluidora Estimada (DBO) por sub-bacia de esgotamento sanitário



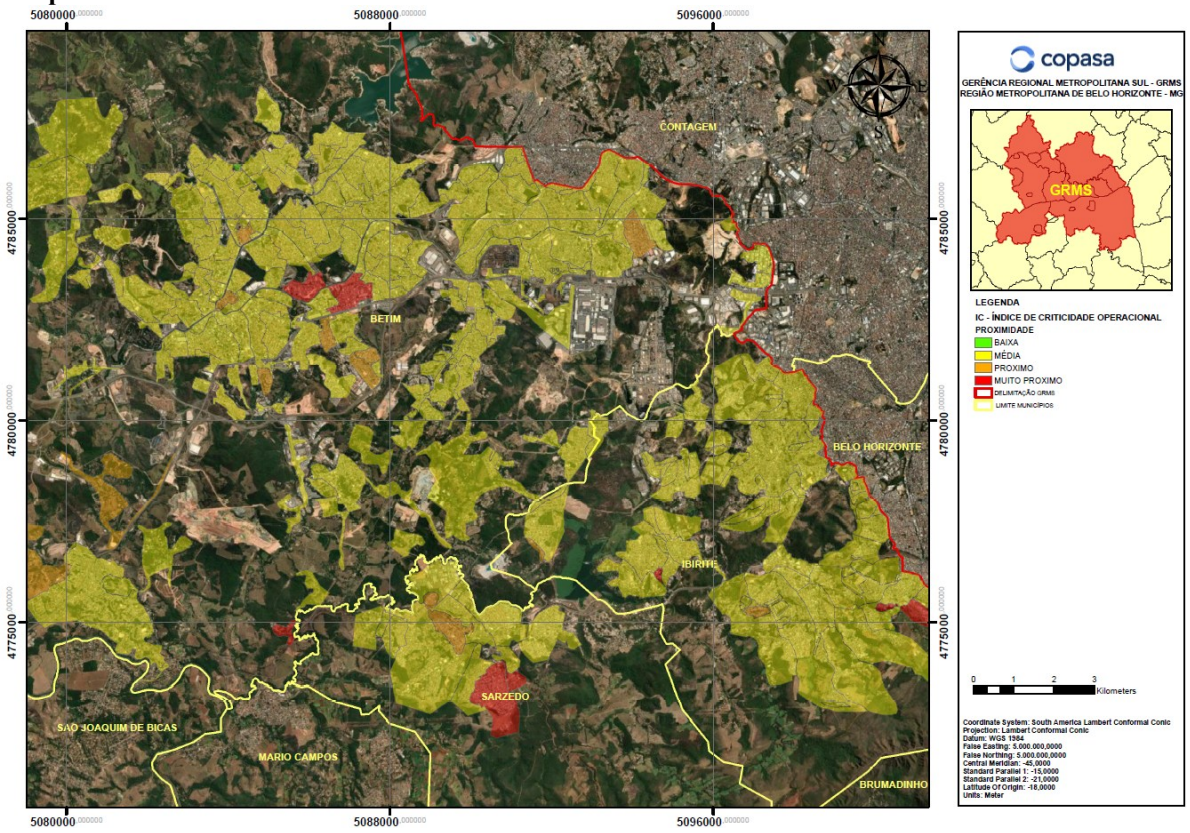
Fonte: autora (2024).

- **Proximidade de Corpos Hídricos (PH)**

A Proximidade de Corpos Hídricos (PH) foi incorporada como critério de sensibilidade ambiental, considerando que menores distâncias estão associadas a maior potencial de impacto em caso de falhas operacionais.

A utilização desse critério permite incorporar a dimensão ambiental no modelo, priorizando áreas com maior potencial de impacto em recursos hídricos (ver Figura 4).

Figura 4 - Classificação da proximidade entre sub-bacias de esgotamento sanitário e corpos hídricos receptores

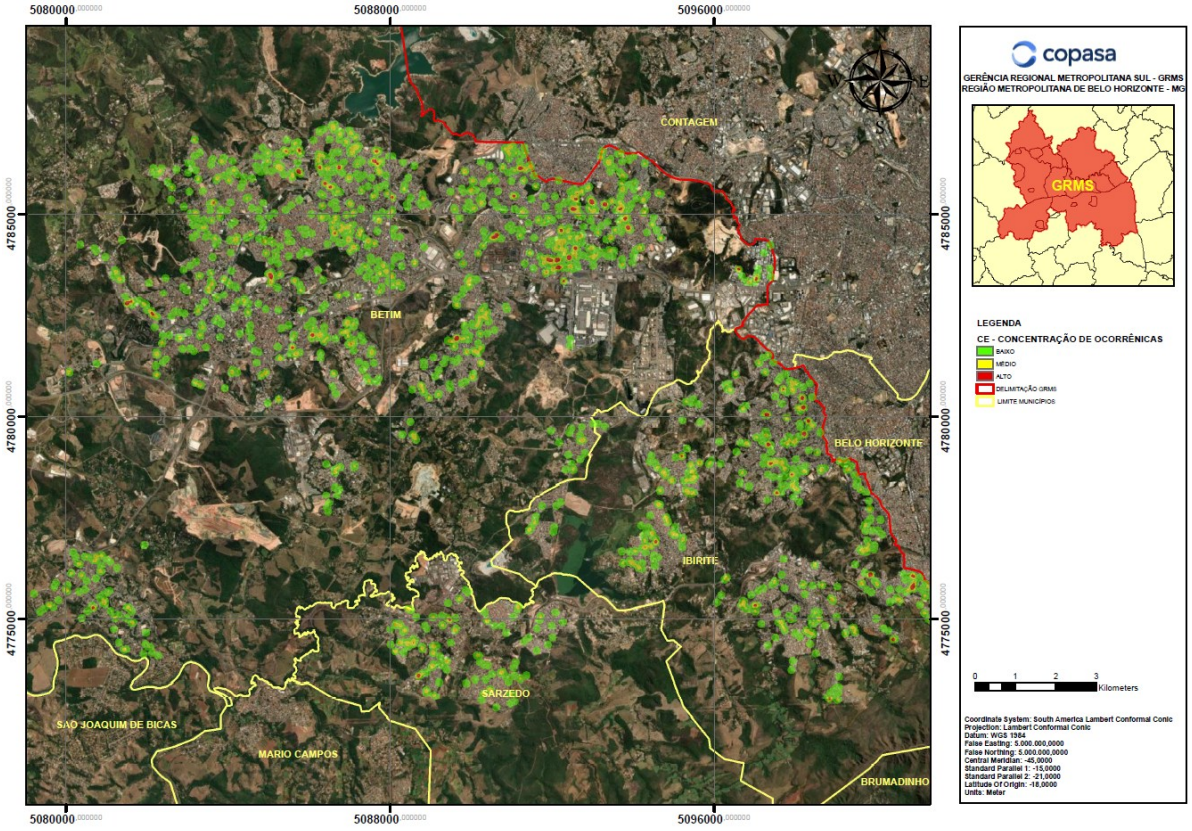


Fonte: autora (2024).

- **Concentração Espacial das Ocorrências (CE)**

A Concentração Espacial das Ocorrências (CE) foi obtida por meio de estimativa de densidade Kernel (ver Figura 5), técnica amplamente utilizada para identificação de padrões espaciais e agrupamentos de eventos (MALCZEWSKI, 1999; GOMES; BIAS, 2018). Esse procedimento possibilita a identificação de clusters operacionais, evidenciando áreas com maior concentração de eventos de extravasamentos

Figura 5 - Densidade Kernel das ocorrências operacionais e identificação de áreas com maior concentração de eventos



Fonte: autora (2024).

- **Índice de Criticidade (IC)**

Os indicadores foram integrados por meio de modelo multicritério ponderado e o IC dado pela Equação 4 com o resultado ilustrado pela Figura 6:

Equação 4: IC = (0,40 x TO_norm) + (0,18 x DBO_norm) +(0,22 x PH_norm) + (0,20 x CE_norm)
Razão de Consistência (CR) = 0,022

A definição dos pesos dos critérios foi realizada por meio de julgamentos pareados (ver Tabela 2), conforme a metodologia do Analytic Hierarchy Process (AHP), considerando a influência relativa de cada variável na ocorrência e recorrência de falhas operacionais no sistema de esgotamento sanitário.

Tabela 2 - Matriz de comparação pareada AHP, pesos relativos e razão de consistência dos critérios do Índice de Criticidade (IC)

CRITÉRIO	TO	DBO	PH	CE	Peso (w)
Taxa de ocorrência (TO)	1	3	2	2	0,40
Carga poluidora (DBO)	1/3	1	1/2	1	0,18
Proximidade de corpos hídricos (PH)	1/2	2	1	1	0,22
Concentração espacial (CE)	1/2	1	1	1	0,20

Fonte: autora (2024).

A Taxa de Ocorrência Operacional foi considerada o critério de maior relevância por representar diretamente o comportamento histórico do sistema, evidenciando a frequência de falhas já estabelecidas.

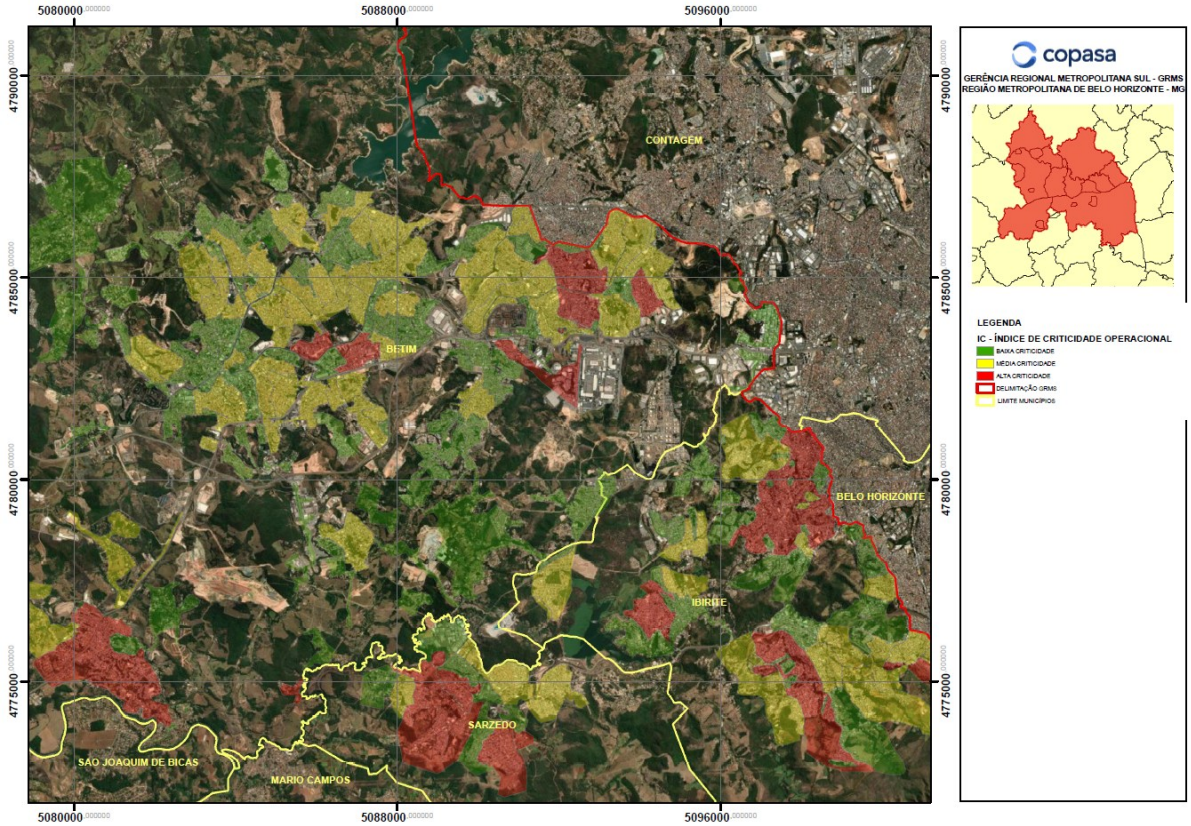
A Carga Poluidora Estimada foi posicionada como critério intermediário, por expressar o potencial de impacto ambiental associado às ocorrências, especialmente em áreas com maior densidade de contribuições.

A Proximidade de Corpos Hídricos foi incorporada como fator de sensibilidade ambiental, com maior relevância em cenários de risco de contaminação direta.

A Concentração Espacial das Ocorrências foi avaliada como indicadora de padrões de recorrência e formação de clusters operacionais, contribuindo para a identificação de áreas com comportamento crítico consolidado.

A matriz de comparação par a par foi estruturada com base nesses critérios, resultando em uma razão de consistência (CR) de 0,022, valor significativamente inferior ao limite de 0,10 estabelecido por Saaty, indicando elevada coerência dos julgamentos e robustez do processo decisório.

Figura 6 - Classificação espacial do Índice de Criticidade (IC) das sub-bacias de esgotamento sanitário



Fonte: autora (2024).

- **Avaliação da vulnerabilidade da rede (IVE)**

A vulnerabilidade estrutural da rede coletora foi avaliada por meio do Índice de Vulnerabilidade Estrutural (IVE), um indicador composto que considera as características físicas dos ativos, com ênfase na idade da rede e no material das tubulações. O modelo de vulnerabilidade estrutural foi estruturado com base nas variáveis

idade e material da rede, selecionadas em função da disponibilidade e consistência do cadastro técnico (ver Tabela 3 e 4).
Ressalta-se que, embora outros parâmetros relevantes, como diâmetro, declividade e condições hidráulicas, possam influenciar a vulnerabilidade da rede, sua incorporação foi limitada pela ausência de padronização e completude nas bases disponíveis.
Ainda assim, o modelo adotado apresenta capacidade satisfatória de representação da propensão a falhas estruturais, sendo considerado adequado para fins de priorização operacional no contexto estudado (ver Figura 7).
Como evolução futura, recomenda-se a ampliação do índice com a inclusão de variáveis hidráulicas e estruturais adicionais, de modo a aumentar sua capacidade preditiva. A idade da rede foi utilizada como parâmetro representativo do desgaste acumulado ao longo do tempo, refletindo processos naturais de deterioração estrutural. Paralelamente, o tipo de material foi incorporado ao índice por influenciar diretamente a durabilidade, resistência mecânica e comportamento da rede frente às condições operacionais e ambientais.

Tabela 3 – Critérios de idade utilizados na composição do Índice de Vulnerabilidade Estrutural (IVE)

Critério Classificação por idade	
Classe	**Nota**
até 10 anos	1
10-20 anos	2
20-30 anos	3
30-40 anos	4
acima de 40 anos	5

Tabela 4 - Critérios de materiais utilizados na composição do Índice de Vulnerabilidade Estrutural (IVE)

Critério Classificação por material	
Classe	**Nota**
PEAD/PVC	1
Concreto	2
Cerâmico	3
Ferro Fundido	4

O índice é dado pela Equação 5 a seguir:

Equação 5: IVE = (0,60 × Idade_norm) + (0,40 × Material_norm)

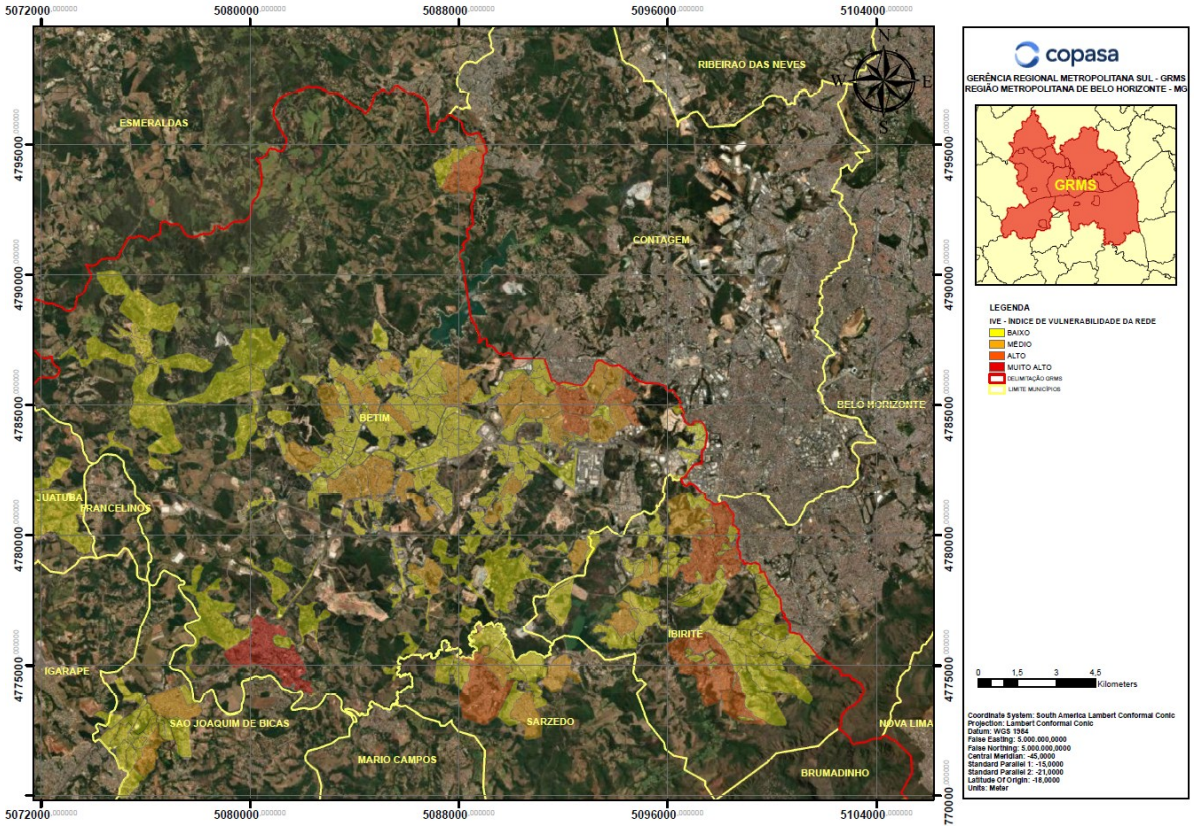
Os pesos foram definidos com base na influência relativa dos critérios na deterioração estrutural da rede, atribuindo maior relevância à idade como indicador do desgaste acumulado, enquanto o material representa a resistência dos ativos, conforme a Tabela ~~2~~5:

Tabela 5 - Pesos e justificativas utilizados na composição do Índice de Vulnerabilidade Estrutural (IVE)

IVE - ÍNDICE DE VULNERABILIDADE ESTRUTURAL *(idade + material)*		
Indicador	**Peso**	**Justificativa técnica**
Idade da rede	0,60	Representa deterioração estrutural acumulada ao longo do tempo
Material da rede	0,40	Influencia resistência mecânica e durabilidade

Fonte: autora (2024).

Figura 7 - Classificação espacial do Índice de Vulnerabilidade Estrutural (IVE) da rede coletora



Fonte: autora (2024).

A combinação desses critérios permite estimar a propensão a falhas estruturais mesmo na ausência de histórico operacional consolidado.

- **Índice de Prioridade Operacional (IPO)**

O Índice de Prioridade Operacional foi definido na Equação 6, considerando a combinação ponderada entre o Índice de Criticidade e o Índice de Vulnerabilidade Estrutural, representando a integração entre o comportamento histórico do sistema e sua propensão a falhas futuras.
A ponderação adotada na Tabela 6 e 7 prioriza a dimensão operacional, refletindo a necessidade de resposta imediata às falhas recorrentes, sem desconsiderar a vulnerabilidade estrutural da rede.

Equação 6: IPO = (0,70 x IC) + (0,30x IVE)

Tabela 6 - Faixas de classificação e critérios de priorização das sub-bacias segundo o Índice de Prioridade Operacional (IPO)

IPO - ÍNDICE DE PRIORIDADE OPERCIONAL			
Indicador	**Sigla**	**Peso**	**Justificativa técnica**
Índice de Criticidade	**IC**	**0,70**	Representa a síntese dos indicadores operacionais e ambientais, consolidando o comportamento geral do sistema
Índice de Vulnerabilidade Estrutural	**IVE**	**0,30**	Representa a propensão à ocorrência de falhas estruturais futuras

Fonte: autora (2024).

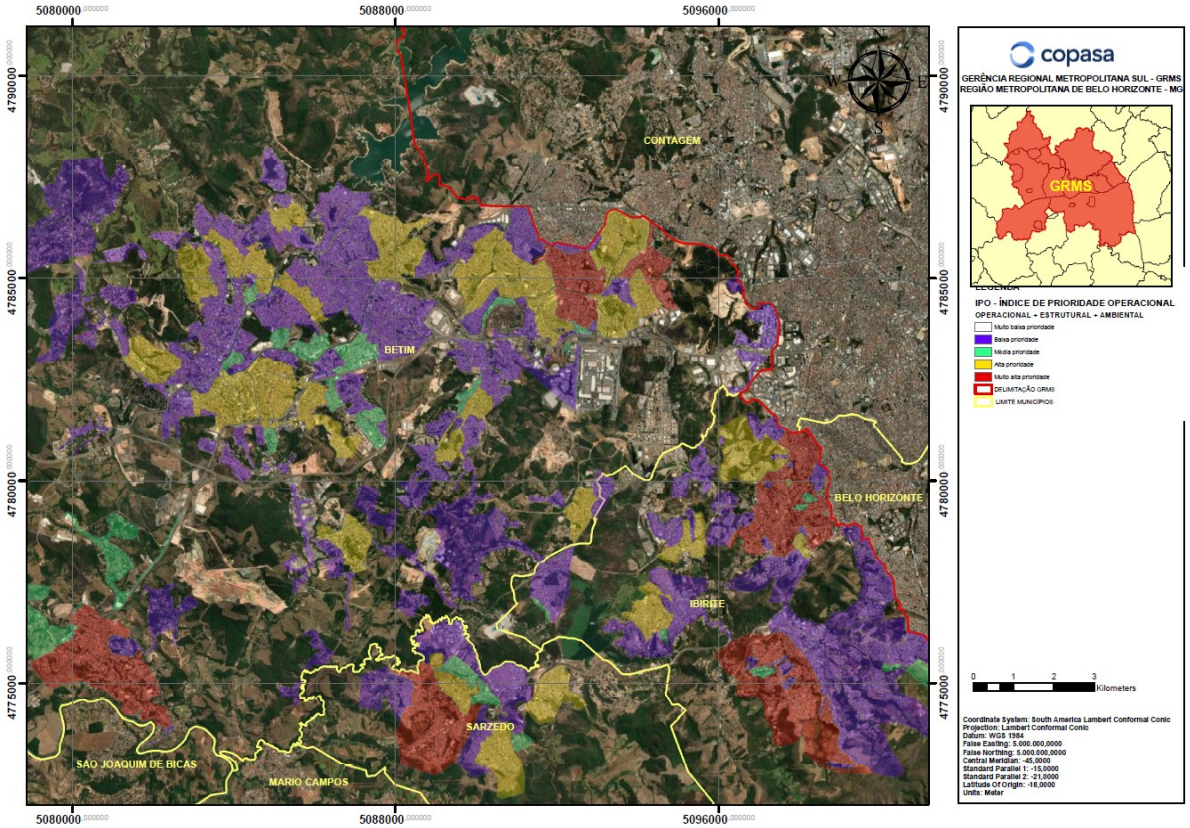
Tabela 7 - Critério de priorização das sub-bacias a partir dos resultados do IPO

Faixa	Classe
0,80 – 1,00	Muito alta prioridade
0,60 – 0,80	Alta prioridade
0,40 – 0,60	Média
0,20 – 0,40	Baixa
< 0,20	Muito baixa

Fonte: autora (2024).

A estrutura do IPO reflete uma lógica de priorização baseada em risco, ao integrar a criticidade observada e a propensão a falhas futuras, alinhando a tomada de decisão a princípios modernos de gestão de ativos e eficiência operacional. A Figura 8 representa os resultados do indicador.

Figura 8 - Mapa de priorização das sub-bacias segundo o Índice de Prioridade Operacional (IPO)



Fonte: autora (2024).

- **Síntese Metodológica**

A metodologia proposta integra múltiplas dimensões do sistema de esgotamento sanitário em um modelo estruturado de análise territorial, permitindo:

- Identificação de áreas críticas com base em múltiplos critérios
- Priorização operacional orientada por risco
- Suporte estruturado à tomada de decisão

Essa abordagem representa uma evolução do modelo tradicional reativo, consolidando uma gestão preventiva baseada em dados georreferenciados.

- **Validação do modelo**

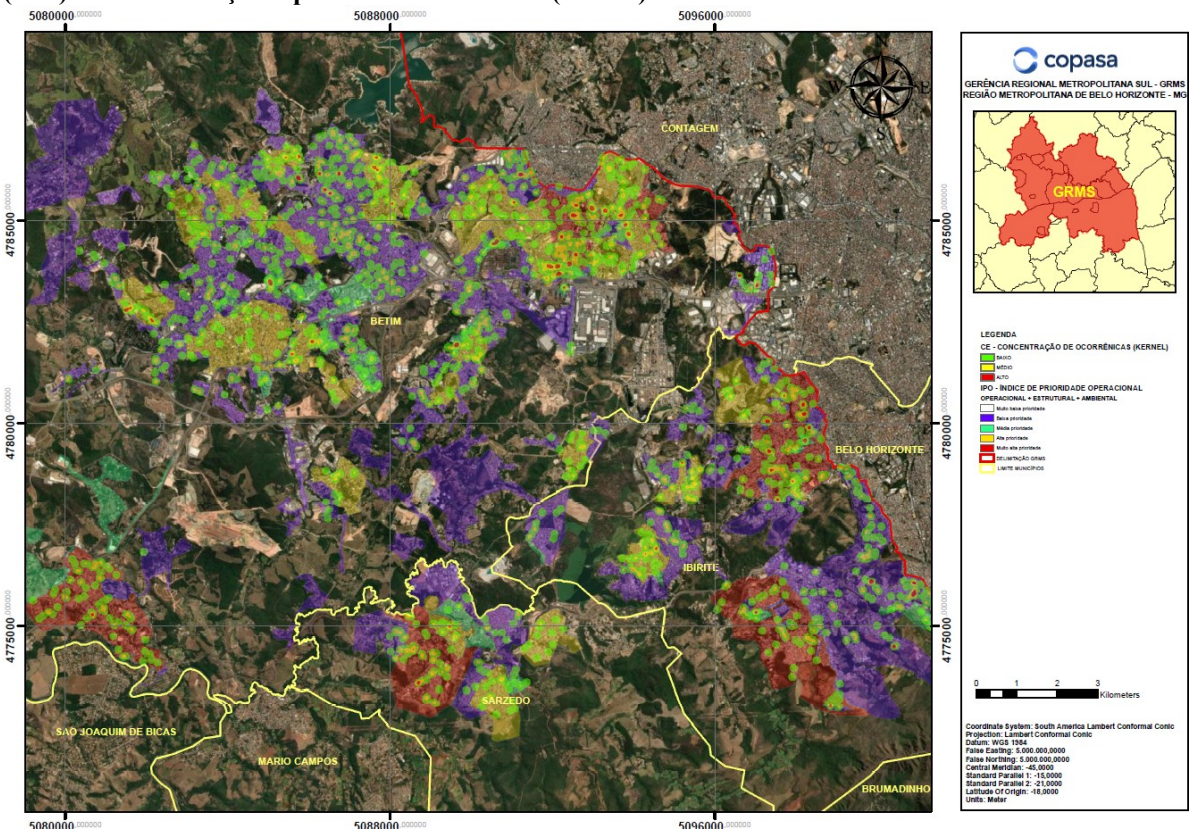
A robustez do modelo foi avaliada por meio de três abordagens complementares:

- análise de sensibilidade, com variação dos pesos dos critérios para verificação da estabilidade dos resultados;
- análise de correlação entre o índice de priorização e indicadores operacionais observados, permitindo avaliar a aderência do modelo à realidade do sistema;
- validação espacial, por meio da comparação entre áreas classificadas como críticas e padrões de concentração de ocorrências obtidos por estimativa Kernel (ver Figura 9).

A análise de sensibilidade indicou estabilidade dos resultados frente a variações moderadas nos pesos dos critérios, demonstrando que a hierarquização das áreas críticas não é significativamente alterada por pequenas mudanças nos parâmetros, o que reforça a robustez do modelo.

Essa característica é fundamental em aplicações operacionais, onde a subjetividade na definição de pesos pode representar uma fonte de incerteza.

Figura 9 - Validação espacial do modelo por comparação entre o Índice de Prioridade Operacional (IPO) e a concentração espacial das ocorrências (Kernel)



Fonte: autora (2024).

A partir da aplicação dos indicadores e da modelagem proposta, foram obtidos resultados que permitiram avaliar a efetividade do modelo tanto sob a perspectiva analítica quanto operacional.

4. RESULTADOS OBTIDOS

A aplicação do modelo multicritério proposto permitiu a identificação estruturada de áreas críticas no sistema de esgotamento sanitário, evidenciando elevada aderência entre os resultados da modelagem e o comportamento operacional observado em campo. Os índices de Criticidade (IC) e Prioridade Operacional (IPO) demonstraram capacidade consistente de representar a dinâmica das ocorrências, ao integrar variáveis operacionais, ambientais e espaciais em uma abordagem territorial única.

As sub-bacias classificadas com maiores valores de criticidade concentraram maior incidência de extravasamentos e refluxos de esgoto, confirmando a efetividade do modelo na identificação de áreas prioritárias para intervenção. Essa correspondência entre os resultados da modelagem e os eventos observados reforça a capacidade do método em apoiar a tomada de decisão orientada por risco.

Do ponto de vista operacional, observou-se melhoria significativa na eficiência dos serviços. O indicador de atendimento no prazo (ASPE) evoluiu de aproximadamente 53% para níveis superiores a 90%, representando um ganho absoluto superior a 37 pontos percentuais. Paralelamente, verificou-se redução consistente na taxa de refluxo por unidade de atendimento, indicando diminuição da recorrência de falhas operacionais nas áreas priorizadas.

Os resultados do Índice de Prioridade Operacional (IPO) passaram a subsidiar o direcionamento estratégico das equipes de campo, orientando a execução de programas e ações em sub-bacias classificadas como prioritárias. Entre essas ações destacam-se o Programa Caça Esgoto, as vistorias de confirmação de esgotamento sanitário, as fiscalizações de irregularidades e infrações, as inspeções operacionais e as atividades voltadas à regularização de ligações factíveis à rede coletora.

A utilização do IPO permitiu concentrar recursos e esforços nas áreas com maior criticidade e vulnerabilidade, aumentando a assertividade das intervenções e reduzindo a dispersão das ações de campo. Como consequência, observou-se maior efetividade na identificação de imóveis não conectados à rede, lançamentos irregulares de esgoto e outras inconformidades operacionais, ampliando a capacidade de regularização do sistema e contribuindo para a melhoria dos indicadores operacionais e ambientais.

Além dos benefícios operacionais, a metodologia produziu resultados financeiros relevantes. A priorização territorial das ações possibilitou a recuperação de economias factíveis de esgotamento sanitário e o incremento do faturamento associado à regularização de imóveis conectados à rede coletora. Adicionalmente, o aumento da coleta e do encaminhamento adequado dos efluentes contribuiu para maior aproveitamento da infraestrutura instalada e para a redução dos impactos ambientais decorrentes de lançamentos irregulares.

A análise consolidada dos resultados indicou retorno sobre investimento (ROI) estimado em aproximadamente 246%, evidenciando que a utilização do IPO como ferramenta de priorização não apenas aprimorou o desempenho operacional, mas também potencializou ações comerciais, ambientais e fiscalizatórias, promovendo maior eficiência na aplicação dos recursos disponíveis.

Do ponto de vista analítico, a validação estatística demonstrou correlação positiva significativa entre o Índice de Prioridade Operacional e os indicadores operacionais monitorados, evidenciando que áreas classificadas com maiores valores de IPO apresentam maior propensão à ocorrência de eventos críticos.

Complementarmente, a validação espacial, realizada por meio da comparação entre os mapas de criticidade e os padrões de concentração de ocorrências obtidos por estimativa de densidade Kernel, demonstrou elevada correspondência entre os clusters identificados e as áreas priorizadas pelo modelo, reforçando sua aderência à distribuição territorial das falhas.

De forma integrada, os resultados evidenciam que a aplicação da modelagem multicritério associada ao geoprocessamento permitiu não apenas representar com maior precisão a dinâmica dos sistemas de esgotamento sanitário, mas também transformar os resultados analíticos em ações operacionais efetivas, promovendo ganhos simultâneos de eficiência operacional, retorno financeiro e mitigação de impactos ambientais.

5. ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos demonstra que a aplicação de modelagem multicritério integrada ao geoprocessamento apresenta elevada capacidade de representar a dinâmica operacional dos sistemas de esgotamento sanitário.

A integração de variáveis operacionais, ambientais e espaciais em índices sintéticos permitiu superar limitações associadas à análise isolada de indicadores, proporcionando uma abordagem mais abrangente e coerente com o comportamento sistêmico da rede. Esse resultado reforça a aplicabilidade de métodos multicritério como ferramentas eficazes de apoio à tomada de decisão em sistemas urbanos, conforme destacado na literatura (MALCZEWSKI, 1999; GOMES; BIAS, 2018).

A utilização de sub-bacias de contribuição como unidade espacial de análise mostrou-se adequada para representar a dinâmica hidráulica do sistema, permitindo a incorporação de aspectos territoriais relevantes, como concentração de ocorrências e proximidade de corpos hídricos. Essa abordagem possibilitou maior precisão na identificação de áreas críticas, em comparação com métodos baseados apenas em limites administrativos ou localização pontual de eventos.

A aplicação do método Analytic Hierarchy Process (AHP) contribuiu para a estruturação do processo decisório, ao permitir a ponderação sistemática dos critérios com base em sua relevância relativa. A consistência obtida na definição dos pesos, associada à estabilidade evidenciada na análise de sensibilidade, indica robustez do modelo frente a variações moderadas nos parâmetros, reduzindo a subjetividade inerente à priorização operacional.

De forma consolidada, os resultados obtidos demonstram que a aplicação da modelagem multicritério contribuiu simultaneamente para a melhoria dos indicadores operacionais e financeiros, promovendo maior assertividade na alocação de recursos e redução da atuação reativa. A integração entre análise espacial e priorização por risco possibilitou intervenções mais eficazes, com reflexos diretos na eficiência do sistema, na redução de ocorrências críticas e na ampliação da base faturada.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou que a aplicação de modelagem multicritério integrada ao geoprocessamento constitui uma abordagem robusta e consistente para identificação e priorização de áreas críticas em sistemas de esgotamento sanitário.

A incorporação de indicadores operacionais, ambientais e espaciais em uma estrutura analítica única possibilitou uma leitura sistêmica do comportamento da rede coletora, superando limitações associadas à análise isolada de variáveis. Os índices sintéticos desenvolvidos apresentaram elevada capacidade de representar a dinâmica das ocorrências, permitindo a identificação objetiva de áreas prioritárias sob uma perspectiva orientada por risco.

A validação do modelo, por meio de análises estatística e espacial, evidenciou forte aderência entre os resultados obtidos e o comportamento operacional observado, confirmando sua consistência metodológica e aplicabilidade prática. A estabilidade dos resultados frente à variação dos parâmetros reforça a confiabilidade da estrutura multicritério adotada.

Do ponto de vista aplicado, a utilização do modelo contribuiu para a melhoria da eficiência operacional, ao direcionar as intervenções para áreas com maior criticidade, evidenciando que a qualidade da priorização exerce papel determinante no desempenho dos sistemas de esgotamento sanitário.

A abordagem proposta também apresenta potencial de evolução, especialmente no que se refere à incorporação de técnicas preditivas e automação dos processos analíticos, ampliando a capacidade de antecipação de falhas e suporte à tomada de decisão.

Ressalta-se que a eficácia do modelo está diretamente condicionada à qualidade das bases de dados utilizadas, sendo fundamental a manutenção de rotinas de atualização e validação das informações para garantir a continuidade da robustez analítica.

Dessa forma, conclui-se que a metodologia proposta se configura como ferramenta eficaz e replicável para apoio à gestão de sistemas de esgotamento sanitário, contribuindo para a transição de abordagens reativas para modelos analíticos, preventivos e orientados por dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARRETO, Tobias Ribeiro et al. Tomada de decisão em projetos de saneamento: utilização do método AHP na implementação de sistemas de esgotamento sanitário. Revista Interdisciplinar de Pesquisas Aplicadas, v. 2, n. 1, p. 67–78, 2021.

2. CALIJURI, Maria L.; MELO, Adriana L. O.; LORENTZ, Jorge F. Identificação de áreas para implantação de aterros sanitários com uso de análise estratégica de decisão. Informática Pública, v. 4, n. 2, p. 231–250.

3. DUARTE, Daniel Camilo de Oliveira et al. Análise multicritério aplicada à determinação de áreas de adequabilidade à valorização imobiliária. Revista Brasileira de Cartografia, v. 73, n. 2, p. 516–529, 2021.

4. EASTMAN, J. Ronald. IDRISI for Windows: user's guide. Worcester: Clark University, 1997.

5. GOMES, Raylton de Carvalho; BIAS, Edilson de Souza. Integração do método AHP e SIG como instrumento de análise do nível de conservação ambiental em bacias hidrográficas. Geociências, Rio Claro, v. 37, n. 1, p. 271–283, 2018.

6. LIMA, Grazielly dos Santos; NUNES, Ana Bárbara de Araújo; MAGALHÃES, Antônio Marcelo Costa; CAMPOS, Vanessa Ribeiro. Aplicação de metodologia de análise hierárquica (AHP) para priorização de intervenção em estações de tratamento de esgotos: estudo de caso na Bacia do Siqueira, Fortaleza/CE. Revista DAE, São Paulo, v. 68, n. 225, p. 34–50, 2020.

7. MALCZEWSKI, Jacek. GIS and multicriteria decision analysis. New York: John Wiley & Sons, 1999.

8. SAATY, Thomas L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. New York: McGraw-Hill, 1980.