

# **DINÂMICA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SANEAMENTO: UMA ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA NA MICROBACIA DO RIO MONJOLINHO**

*David Ávila Almeida<sup>1a</sup>; Luiz Henrique Rosolen Ferro<sup>1b</sup>; Gabriela Taveira Lima<sup>1c</sup>; Igor Luz Gonçalves<sup>1d</sup>; Natalia Fischer<sup>1e</sup>; Lyda Patricia Sabogal-Paz<sup>1f</sup>*

**RESUMO** – Este estudo investigou a correlação entre mudanças no uso do solo, saneamento e qualidade da água na microbacia do Rio Monjolinho (2011–2024). Utilizando QGIS, MapBiomass, dados SINISA e qualidade da água (CETESB), observou-se expansão urbana (3,68%) e retração de quase 50% das pastagens para o avanço da soja. Também ocorreu a diminuição das áreas úmidas, como campos alagados e corpos d’água. Análises de Spearman e *Random Forest* confirmaram a urbanização como principal condicionante da degradação, correlacionada ao aumento do carbono orgânico total (COT), condutividade elétrica e *E. coli*, assim como diminuição do oxigênio dissolvido (OD). Embora o tratamento de esgoto tenha acompanhado o crescimento populacional, outras variáveis apresentaram maior impacto. Conclui-se que a preservação da vegetação nativa foi o fator principal para a manutenção da qualidade da água e para o controle de poluentes na bacia.

**Palavras-Chave** – Qualidade da Água; Uso e Ocupação do Solo; Gerenciamento de Recursos Hídricos

**ABSTRACT**– This study investigated the correlation between land-use changes, sanitation, and water quality in the Monjolinho River micro-catchment (2011–2024). Utilizing QGIS, MapBiomass, SINISA data, and water quality parameters (CETESB), the results revealed an urban expansion of 3.68% and a reduction of nearly 50% in pasturelands due to the advancement of soybean cultivation. A decrease in wetlands, such as flooded fields and water bodies, was also observed. Spearman correlation and Random Forest analysis confirmed urbanization as the primary driver of environmental degradation, positively correlated with increases in Total Organic Carbon (TOC), electrical conductivity, and *E. coli*, as well as a reduction in dissolved oxygen (DO). Although sewage treatment accompanied population growth, its impact was surpassed by other variables. It is concluded that preservation of native vegetation was the main factor in preserving water quality and controlling pollutants within the micro-basin.

**Key-words** – Water quality; Land Use and Land Cover; Water Resources Management

## **1. INTRODUÇÃO**

A urbanização acelerada e a conversão de ecossistemas naturais em áreas antropizadas constituem desafios críticos à segurança hídrica contemporânea. Este processo promove a impermeabilização do solo, resultando na alteração do balanço hídrico e do ciclo hidrológico local. Consequentemente, essa mudança intensifica o escoamento superficial e o transporte de cargas poluidoras difusas para os corpos hídricos, degradando a qualidade da água. Nesse cenário, os

1) Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, CEP:13566-590, Tel: +55 (16) 3373-9552; a) david.avila@usp.br; b) luizferro@usp.br, c) gabriela.taveira@usp.br d) igorluz@usp.br; e) natalia.fischer@usp.br f) lysaboga@sc.usp.br

remanescentes de vegetação nativa e as áreas úmidas desempenham um papel vital como filtros biológicos e reguladores de vazão, sendo que sua supressão compromete a resiliência das bacias hidrográficas frente a estresses ambientais (Veiga et al., 2019; Prado, 2015; Bullock e Acremen, 2003)

No contexto brasileiro, a qualidade da água está intrinsecamente ligada à evolução dos indicadores de saneamento básico. Embora o país tenha avançado em marcos regulatórios, a defasagem entre o ritmo de crescimento populacional e a expansão da rede de coleta e tratamento de esgoto permanece como o principal fator de degradação de rios urbanos (Nascimento et al., 2019). A presença da microbacia do Rio Monjolinho no polo tecnológico de São Carlos (SP), aliada à predominância da mancha urbana municipal em sua área de contribuição (Figura 1.a4), exemplifica o conflito entre o desenvolvimento urbano-industrial e a preservação dos recursos hídricos.

O presente artigo tem como objetivo analisar a correlação entre as mudanças de uso e ocupação do solo, a evolução dos serviços de saneamento e a consequência na qualidade da água do Rio Monjolinho, delimitando uma microbacia para uma análise detalhada da integridade ambiental.

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1 Delimitação da Microbacia e Área de estudo**

A delimitação da área de estudo foi realizada considerando como exutório o ponto de monitoramento de qualidade da água da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) no Rio Monjolinho, localizado a jusante da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) municipal de São Carlos (conforme CETESB (2026), ponto com latitude 22° 02' 06" S e longitude 47° 57' 27" W). Essa configuração permitiu um refino escalar em relação à sub-bacia do Rio Monjolinho, escolha que possibilitou um maior detalhamento espacial. No *software* QGIS, obteve-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) via complemento *OpenTopography DEM Downloader*, com posterior processamento pelo *WhiteboxTools*. O MDE foi reprojetado para o sistema SIRGAS 2000 / UTM zone 23S (Figura 1.a1) para garantir a precisão métrica das análises.

O pré-processamento hidrológico consistiu na correção de imperfeições topográficas para assegurar a continuidade do fluxo digital. Aplicou-se a técnica de "quebra" de barreiras, *Breach Depressions*, seguida pelo preenchimento de depressões remanescentes pelo algoritmo de Wang e Liu, *Fill Depressions* (Lindsay, 2016; Wang e Liu, 2006).

Posteriormente, determinou-se a direção de fluxo pelo algoritmo *D8 Pointer* (Figura 1.a2). A partir desta matriz, gerou-se o acúmulo de fluxo (*D8 Flow Accumulation*) para identificação automatizada da rede de drenagem (Lindsay, 2016). A rede linear de canais foi extraída pela

ferramenta *Extract Streams* (Figura 1.a3). Por fim, a delimitação da microbacia foi executada via ferramenta *Watershed*, integrando o raster de direção de fluxo ao ponto de exutório para o rastreamento de todos os *pixels* contribuintes a montante (Figura 1.a3).

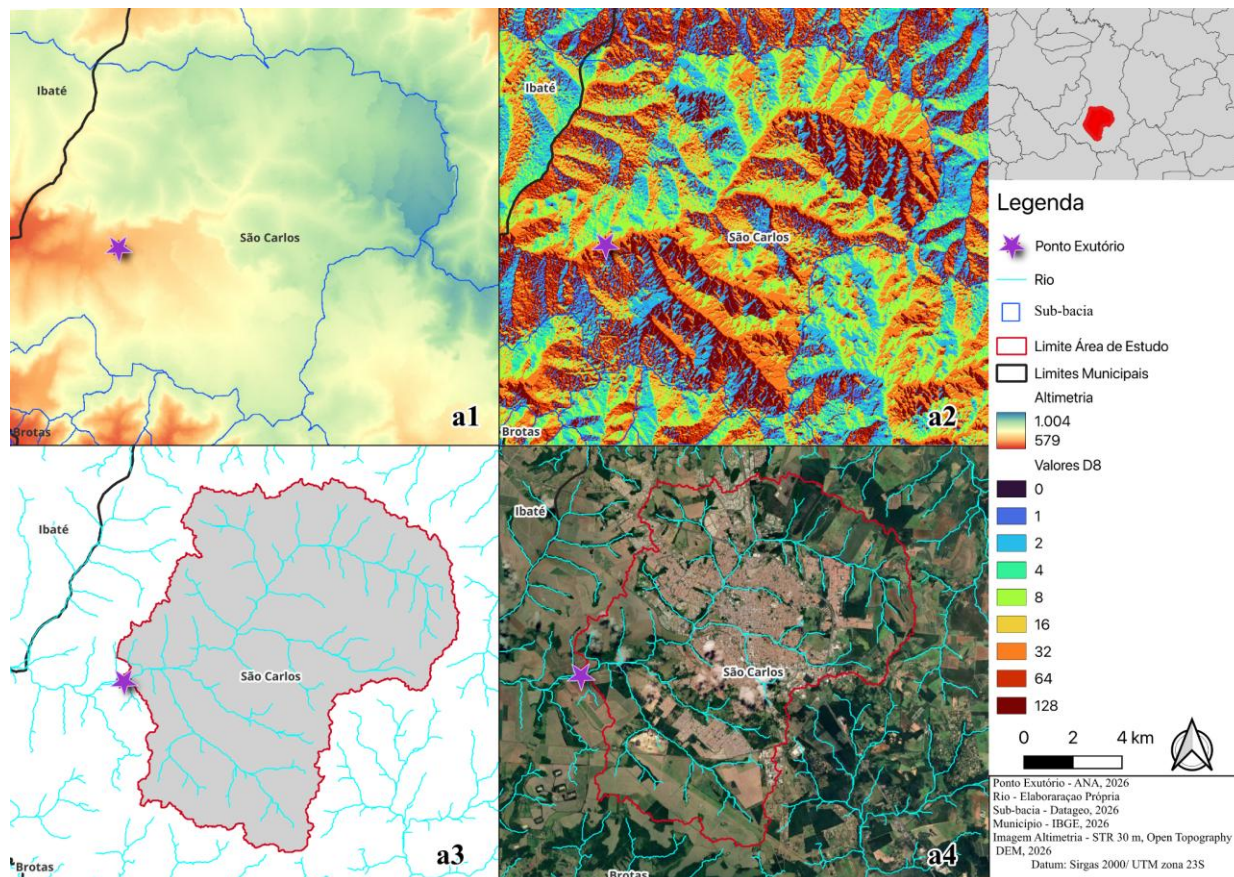


Figura 1 - Delimitação da Área de Estudo e processo para sua construção. (a1 - imagem raster da altimetria da região; a2 - resultado do processamento D8 flow accumulation; a3 - limites da área de estudo e rede de drenagem; a4 - imagem de satélite atual da região)

## 2.2 Aquisição de dados secundários, integração com indicadores socioambientais e método estatístico

Após a delimitação da microbacia, a segunda etapa consistiu no levantamento multitemporal de dados secundários. O uso e cobertura da terra foi obtido via MapBiomas da coleção Landsat (Mapbiomas, 2026), adotando-se como métrica a área percentual de cada classe. Em seguida, extraíram-se dados de saneamento e população de São Carlos através do Sistema Nacional de Informação em Saneamento Básico - SINISA (índice IES2004) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE/SIDRA (IBGE, 2026). A terceira base de dados compreendeu amostragens da CETESB de 2011–2026 (CETESB, 2026) coletadas no exutório. Analisaram-se as variáveis: carbono orgânico total (COT), oxigênio dissolvido (OD), *Escherichia coli* e condutividade elétrica. O comportamento temporal desses parâmetros foi examinado via gráficos de dispersão com regressão linear simples.

Cabe ressaltar que as análises de uso e ocupação do solo e as relações entre variáveis foram conduzidas para os anos de 2011, 2015, 2020 e 2024, considerando a disponibilidade dos dados de qualidade da água apenas a partir de 2011 e dos dados de saneamento até 2024. Adicionalmente, a adoção de intervalos quinquenais visou garantir a representatividade temporal das análises, bem como a viabilidade operacional no processamento e integração dos dados. A integração das bases permitiu avaliar a influência do uso e ocupação do solo e do saneamento na qualidade da água. Para isso, aplicou-se a Correlação de Spearman e a modelagem por *Random Forest* (Breiman, 2001) via Google Colab. Lacunas nos dados anuais foram preenchidas por interpolação automática para viabilizar as análises estatísticas.

### **3. RESULTADO E DISCUSSÕES**

#### **3.1 Análise do uso e ocupação do solo, indicadores de saneamento e qualidade da água**

Para viabilizar a análise estatística e a interpretação dos resultados, as classes de uso e cobertura da terra foram consolidadas em quatro macrocategorias (Tabela 1), procedimento necessário para assegurar a robustez do modelo de correlação e da modelagem preditiva empregados.

Na primeira macrocategoria, Áreas de Vegetação Nativa, observa-se que essas áreas apresentaram uma relativa estabilidade com leve tendência de declínio, passando de 16,5% em 2011 para 16,0% em 2024. Um dado preocupante é a perda de áreas pantanosas e campos alagados, com redução de 13%.

O segundo agrupamento, Áreas de Atividade Agropecuária, apresentou redução expressiva das áreas de pastagem, com retração de quase 50%. Esse espaço foi absorvido tanto pelo avanço da mancha urbana quanto pela intensificação agrícola, notadamente pela soja, que saltou de 0,03% para 2,4%. A cana-de-açúcar permanece como uma das principais forças do agronegócio local, mantendo-se estável em torno de 14%.

A terceira macrocategoria, Áreas Antropizadas Expansivas, representa um dado mais preocupante para a qualidade da água na microbacia, devido ao seu crescimento ininterrupto. Destaca-se a classe Área Urbanizada, que evoluiu cerca de 10,4%, passando a ocupar cerca de 40% de toda a área da microbacia.

A última macrocategoria refere-se aos Corpos d'Água, cuja classe é o Rio, Lago e Oceano, a diminuição de 0,30% para 0,19%, uma redução relativa de 36,7%, representa um diagnóstico crítico sob a perspectiva da dinâmica hidrológica local. Esse dado indica uma supressão ou degradação de áreas de armazenamento superficial.

Tabela 1 - Distribuição quantitativa e percentual das classes e macroclasses de uso e cobertura do solo

| Macro-categoria                   | Classe                         | 2011       |             | 2015       |             | 2020       |             | 2024       |             |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
|                                   |                                | Área (km²) | Porcentagem | Área (km²) | Porcentagem | Área (km²) | Porcentagem | Área (km²) | Porcentagem |
| Áreas de Vegetação Nativa         | Formação Florestal             | 18,40      | 14,0%       | 17,94      | 13,7%       | 17,99      | 13,7%       | 17,80      | 13,6%       |
|                                   | Formação Savânica              | 0,61       | 0,5%        | 0,59       | 0,5%        | 0,88       | 0,7%        | 0,92       | 0,7%        |
|                                   | Formação Campestre             | 0,00       | 0,0%        | 0,00       | 0,0%        | 0,00       | 0,0%        | 0,00       | 0,0%        |
|                                   | Campo Alagado e Área Pantanosa | 2,73       | 2,1%        | 2,60       | 2,0%        | 2,44       | 1,9%        | 2,35       | 1,8%        |
| Áreas de Atividades Agropecuárias | Pastagem                       | 16,34      | 12,5%       | 14,68      | 11,2%       | 11,70      | 8,9%        | 8,23       | 6,3%        |
|                                   | Cana                           | 21,07      | 16,1%       | 19,85      | 15,1%       | 18,88      | 14,4%       | 18,89      | 14,4%       |
|                                   | Soja                           | 0,04       | 0,0%        | 1,64       | 1,2%        | 2,91       | 2,2%        | 3,18       | 2,4%        |
|                                   | Café                           | 0,22       | 0,2%        | *          | *           | 0,03       | 0,0%        | 0,03       | 0,0%        |
|                                   | Citrus                         | *          | *           | 0,19       | 0,1%        | 0,19       | 0,1%        | 0,06       | 0,0%        |
|                                   | Outras Lavouras Temporárias    | *          | *           | 0,00       | 0,0%        | 0,75       | 0,6%        | 0,57       | 0,4%        |
|                                   | Outras Lavouras Perenes        | *          | *           | 0,02       | 0,0%        | 0,04       | 0,0%        | 0,04       | 0,0%        |
|                                   | Silvicultura                   | 1,27       | 1,0%        | 1,01       | 0,8%        | 1,09       | 0,8%        | 1,09       | 0,8%        |
|                                   | Mosaico de Usos                | 23,17      | 17,7%       | 23,48      | 17,9%       | 23,01      | 17,5%       | 25,36      | 19,3%       |
| Áreas Antropizadas Expansivas     | Área Urbanizada                | 46,27      | 35,3%       | 47,92      | 36,5%       | 49,98      | 38,1%       | 51,11      | 38,9%       |
|                                   | Mineração                      | *          | *           | *          | *           | 0,41       | 0,3%        | 1,00       | 0,8%        |
|                                   | Outras Áreas Não Vegetadas     | 0,70       | 0,5%        | 0,93       | 0,7%        | 0,59       | 0,4%        | 0,36       | 0,3%        |
| Corpos d'Água                     | Rio, Lago e Oceano             | 0,39       | 0,3%        | 0,36       | 0,3%        | 0,32       | 0,2%        | 0,24       | 0,2%        |

Em relação aos dados da evolução temporal do índice de tratamento de esgoto (IES 2004) e da população residente estimada no município de São Carlos entre 2011 e 2024, a Figura 2 apresenta, de forma geral, uma tendência de crescimento populacional contínuo no período, passando de 224.173 habitantes em 2011 para 265.294 em 2024, o que é coerente com a expansão da área urbanizada identificada anteriormente.

O índice de tratamento de esgoto coletado (IES2004) manteve-se elevado ao longo do período analisado (entre 84,92% e 100%), com exceção de 2024, quando recuou para 75,50%. Com relação ao Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020), cuja meta para universalização do tratamento de esgoto é de 90% da população com coleta e tratamento de esgoto até 2033 (Brasil, 2020), os dados sinalizam a necessidade de melhorias e atenção contínua para o cumprimento das metas legais.

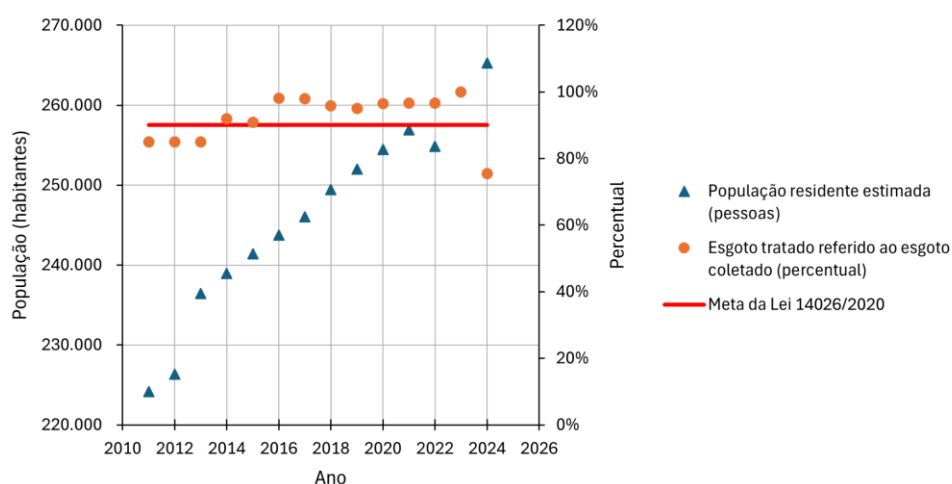


Figura 2 - Evolução do Índice de Esgoto Tratado Referido ao Esgoto Coletado e da população residente estimada no município de São Carlos/SP entre 2011 e 2024 (dados de 2023 indisponíveis devido à revisão Pós-censo 2022)

Em relação à análise dos dados de COT, OD, condutividade elétrica e *E. coli*, a Figura 3 mostra a evolução temporal desses parâmetros de qualidade da água ao longo dos anos, com base nas linhas de tendência ajustadas. De forma integrada, os resultados indicam as tendências de aumento de COT, condutividade elétrica e *E. coli*, e redução do OD. O aumento da área urbana, aliado à redução da macrocategoria Áreas de Vegetação Nativa, pode ser relacionado à degradação progressiva dos parâmetros analisados de qualidade da água. Conforme demonstrado pelas análises estatísticas apresentadas no item subsequente, as alterações estão diretamente relacionadas às mudanças no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica.

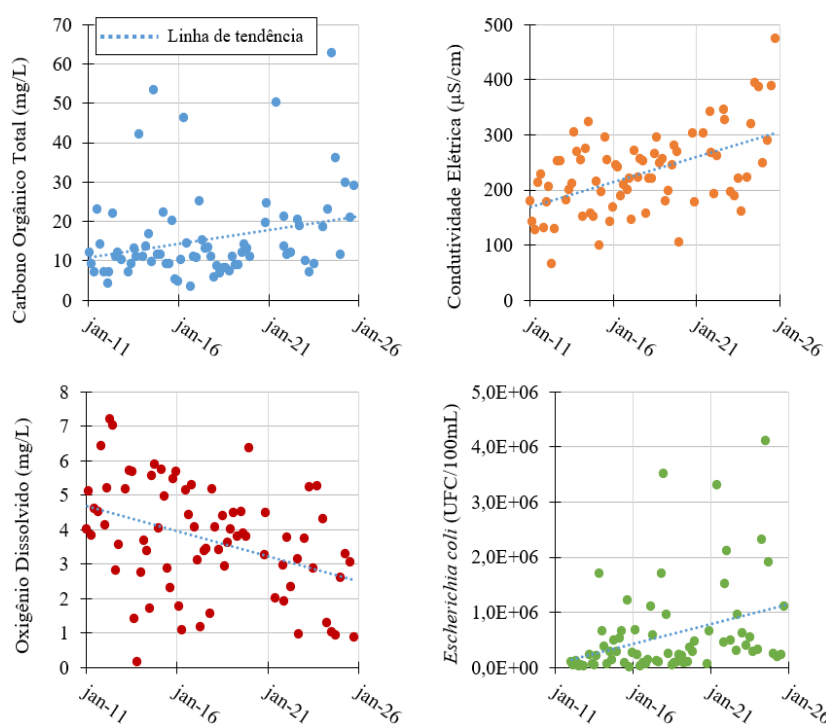


Figura 3 - Gráfico de dispersão de COT, OD, condutividade elétrica e *E. coli* no ponto exutório entre 2011 e 2026

### 3.2 Análise estatística

O coeficiente de correlação de Spearman foi adotado para quantificar as associações não paramétricas entre as variáveis físico-químicas e biológicas de qualidade da água, os índices de tratamento de efluentes e as métricas de uso e cobertura da terra. A Figura 4 detalha as matrizes de correlação resultantes, evidenciando as interdependências entre as pressões antropogênicas e a integridade do ecossistema aquático.

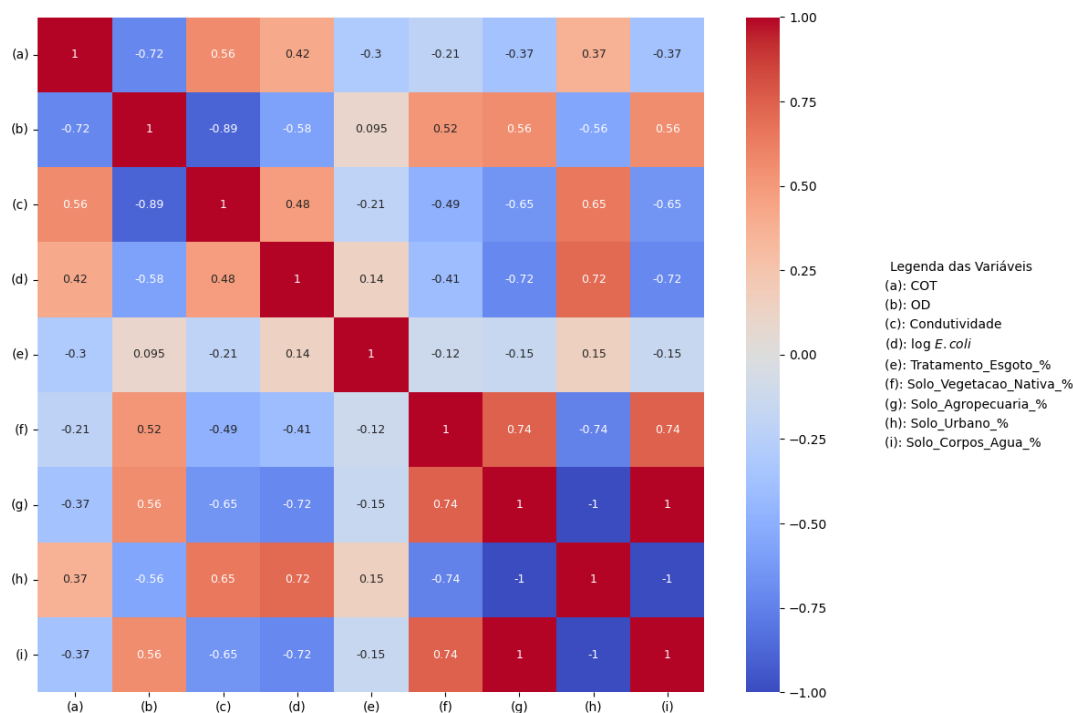


Figura 4 - Matriz de correlação de Spearman

Para a interpretação dos resultados, foram consideradas correlações fortes aquelas com  $|r| > 0,6$ . Observou-se que o índice de tratamento de efluentes não apresentou significância estatística em relação aos parâmetros de qualidade da água (COT, OD, condutividade elétrica e *E. coli*), tampouco com as variáveis de uso e cobertura do solo. Em contrapartida, constatou-se correlação forte entre as tipologias de ocupação do solo, especificamente nas transições entre as macrocategorias Agropecuária, Área Urbana e Corpos D'água.

No que se refere à contaminação microbiológica, identificou-se uma correlação negativa entre a concentração de *E. coli* e as variáveis OD, Atividades Agropecuária e Corpos d'água, indicando que o aumento da concentração bacteriana está inversamente relacionado a esses índices. Por outro lado, em relação às Áreas Antropizadas, observou-se uma correlação positiva, sugerindo que áreas impermeabilizadas influenciam diretamente a contaminação por *E. coli*. Além disso, nota-se que o

aumento das Áreas Antropizadas apresentou correlação positiva com a condutividade e negativa com o oxigênio dissolvido, comprovando o impacto do adensamento urbano sobre a qualidade da água.

Subsequentemente, aplicou-se o modelo *Random Forest*, avaliando a importância das variáveis, conforme apresentado no mapa de calor, apresentado na Figura 5.

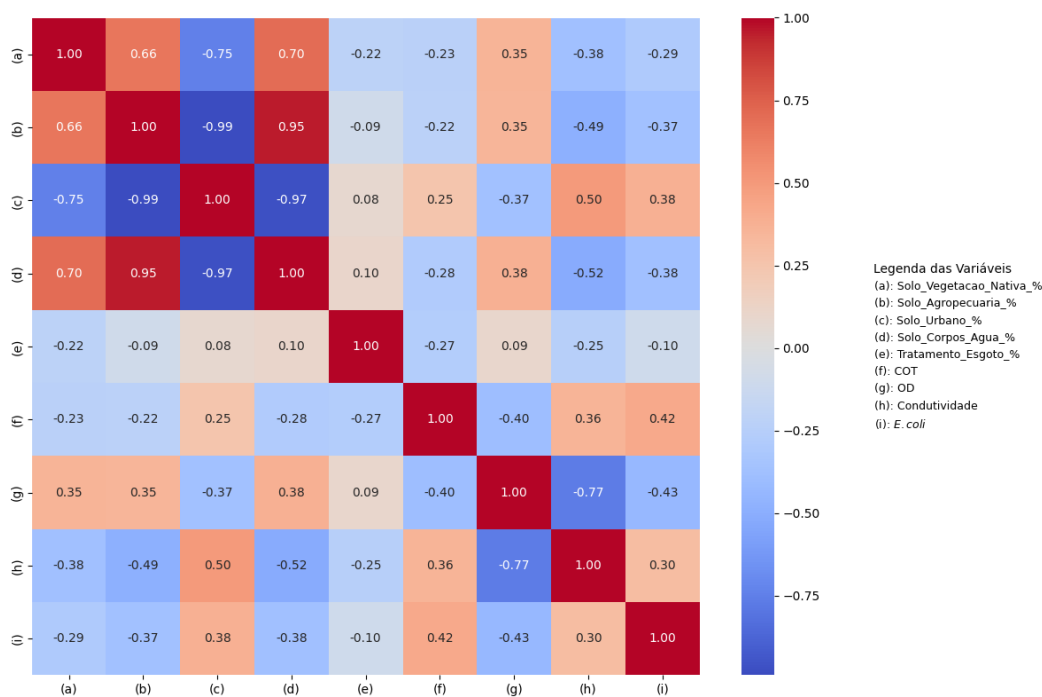


Figura 5 - Mapa de calor - Random Forest

De acordo com a escala de coloração, as relações em vermelho indicam proporcionalidade direta entre as variáveis, enquanto as células em azul indicam proporcionalidade inversa. Nota-se que o crescimento do tratamento de esgoto está associado à redução do COT, da condutividade elétrica e da concentração de *E. coli*, além de um aumento no oxigênio dissolvido, o que indica melhoria na qualidade da água. Comportamento análogo foi observado para a expansão da vegetação nativa e áreas de agropecuária.

O cenário se inverte ao analisar a ocupação urbana, onde os índices de COT, condutividade elétrica e *E. coli* apresentam uma tendência de crescimento com o aumento dessas áreas, enquanto o OD apresentou tendência de diminuição.

A partir dessa análise, identificaram-se os principais parâmetros que afetam os indicadores de qualidade da água. Nota-se na Figura 6 que, para o COT, o principal fator de interferência é a ocupação de solo urbano, enquanto para os índices OD, condutividade elétrica e *E. coli*, a vegetação nativa apresentou maior interferência para a análise.

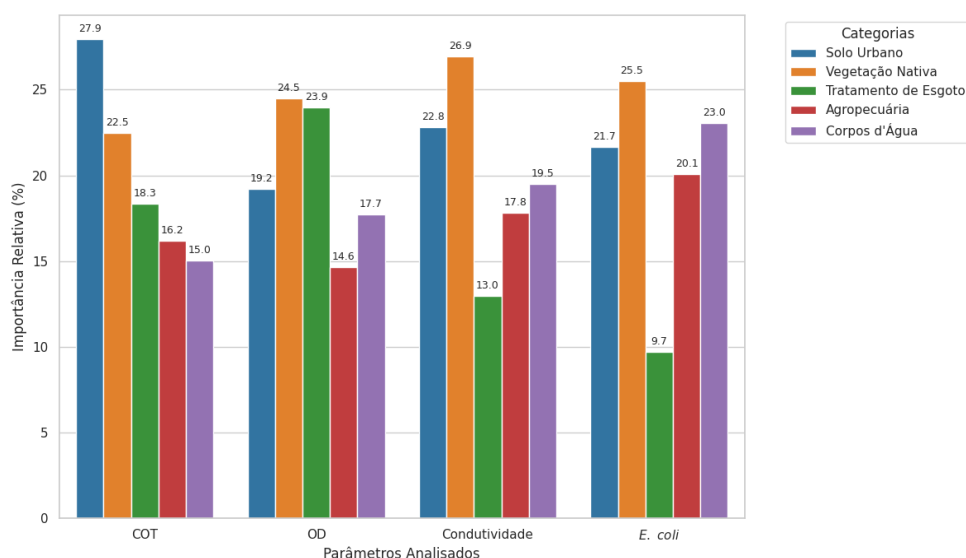


Figura 6 – Importância das Variáveis para os Parâmetros de Qualidade.

Entretanto, observa-se que o tratamento de esgoto demonstrou menor influência sobre a concentração de *E. coli*. Possivelmente, este resultado decorreu da ausência de quantificação no ano de 2011, sendo estes dados supridos por interpolação. Além disso, ressalta-se que, como as amostras temporais são determinadas anualmente, o número de leituras pode ser insuficiente para a calibração do modelo.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise integrada dos dados demonstra que a microbacia do Rio Monjolinho enfrenta um processo de degradação ambiental acentuado, impulsionado pela expansão urbana, pela intensificação agrícola e pela supressão de áreas úmidas e corpos d'água. A substituição de pastagens por superfícies impermeabilizadas alterou significativamente os indicadores de qualidade da água, resultando no aumento dos valores de COT, de condutividade elétrica, na elevação da contaminação por *E. coli* e na redução de OD, parâmetros fundamentais para a manutenção da vida aquática e a integridade do ecossistema.

Os dados de saneamento básico analisados revelam que, embora o município tenha aumentado o índice de tratamento de esgoto, acompanhando o crescimento populacional, demais fatores, como o uso e ocupação do solo, foram relacionados à degradação da qualidade da água. Estatisticamente, o modelo *Random Forest* evidenciou que, embora o tratamento de esgoto seja fundamental, a conservação das áreas de vegetação nativa exerceu maior influência na manutenção de parâmetros avaliados. A ausência de correlação forte entre o tratamento de esgoto e a melhoria imediata dos

parâmetros físico-químicos sugere que a poluição difusa urbana e possíveis passivos na rede de coleta se sobrepuseram aos ganhos da infraestrutura sanitária na microbacia analisada.

Portanto, a gestão da microbacia do Rio Monjolinho deve transcender a expansão da infraestrutura sanitária convencional, priorizando políticas de controle da impermeabilização do solo e a restauração estratégica de áreas de interesse, como as alagadas e os corpos d'água. Soluções que mitiguem o transporte de poluentes difusos e restaurem as funções ecossistêmicas de filtração e infiltração, como as soluções baseadas na natureza, podem ser um caminho a ser adotado.

## REFERÊNCIA

- BRASIL (2020). *Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Brasília: Presidência da República*, Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/14026.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/14026.htm). Acesso em: 17 abr. 2026.
- BREIMAN, L. (2001). *Random Forests*. Machine Learning, v. 45, n. 45, p. 5–32, 2001.
- BULLOCK, A.; ACREMAN, M. (2003). “*The role of wetlands in the hydrological cycle*”. Hydrology Earth System Sciences 7, pp. 358–389.
- CETESB (2026). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *InfoÁguas: Sistema de Informações de Qualidade das Águas*. São Paulo: CETESB, [s.d.]. Disponível em: <https://sistemainfoaguas.cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em 21 abr. 2026.
- LINDSAY, J. B. (2016). “*Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis*”. Computers & Geosciences 95, pp. 75–84.
- NASCIMENTO, L. P.; REIS, D. A.; ROESER, H. M. P.; SANTIAGO, A. F. (2019). “*Relationship between land use and water quality in a watershed impacted by iron ore tailings and domestic sewage*”. Revista Ambiente & Água 14(5), pp. 1-11.
- MAPBIOMAS (2026). *Coleções MapBiomas*. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acesso em 10 abr. 2026.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Ambiental – SINISA*. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa>. Acesso em: 14 abr. 2026.
- PRADO, R. B. (2015). *Modeling pollution potential input from the drainage basin into Barra Bonita reservoir, São Paulo – Brazil*. Brazilian Journal of Biology 75(20), pp. 314-323.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2026). *Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA: Estimativas de população*. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 17 abr. 2026.
- VEIGA, D. P. B.; GUANDIQUE, M. E. G.; NARDOCCI, A. C. (2019). “*Land use and water quality in watersheds in the State of São Paulo, based on GIS and SWAT data*”. Revista Ambiente & Água 14(5), pp. 1-14.
- WANG, L.; LIU, H. (2006). “*An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling*”. International Journal of Geographical Information Science 20(2), pp. 193 – 213.

**AGRADECIMENTOS** Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processos 442074/2023-9 e 302112/2025-1) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (PROEX, Código 001) pelos recursos e bolsas outorgados.