VII-784 - ANÁLISE DE FÁRMACOS E PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS NO ESGOTO DE CURITIBA

Marines Maria Wilhelm
Engenheira Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Mestre e Doutora em Sistemas Costeiros e Oceânicos pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), na linha de pesquisa Processos naturais e antrópicos em sistemas costeiros e oceânicos. Pesquisadora de pós-doutorado no Programa de Pós-Graduação em Gestão Urbana (PPGTU/PUCPR)

Demian da Silveira Barcellos[(1)]
Engenheiro Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Mestre e Doutor Gestão Urbana pela mesma universidade, na linha de pesquisa de Gestão e Tecnologias Ambientais. Professor do Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis (PPGCIS) da PUCPR, pesquisador de pós-doutorado no Programa de Pós-Graduação em Gestão Urbana (PPGTU/PUCPR).

Ramiro Gonçalves Etchepare
Engenheiro Ambiental pela Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), Mestre e Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor Adjunto do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná (DHS/UFPR).

Bárbara Zanicotti Leite
Engenheira de Alimentos pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Mestre em Tecnologia Química pela UFPR e Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR. Pesquisadora da Gerente da Gerência de Pesquisa e Inovação (GPIN) da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

Mario Prokopiuk
Administrador pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), Mestre em Gestão Urbana e Doutor em Administração pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Professor do Programa de Pós-Graduação em Gestão Urbana (PPGTU/PUCPR).

Endereço[(1)]: R. Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho, Curitiba - PR, 80215-901 - Brasil - Tel: (41) 3271-2623- e-mail: demian.barcellos@gmail.com

RESUMO

O aumento do consumo de medicamentos no Brasil tem gerado preocupações quanto ao descarte inadequado e à presença de resíduos farmacêuticos no esgoto doméstico, especialmente em grandes centros urbanos. Neste contexto, a Epidemiologia Baseada em Esgotos (WBE – *Wastewater-Based Epidemiology*) surge como ferramenta estratégica para monitorar micropoluentes e fornecer dados sobre padrões de uso de substâncias pela população. Este estudo avaliou correlações entre fármacos e parâmetros físico-químicos em esgoto bruto de Curitiba, com o objetivo de identificar marcadores eficientes para o monitoramento ambiental e sanitário. Foram analisadas amostras coletadas em cinco Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) utilizando extração em fase sólida (SPE), seguida de análise estatística por testes de normalidade e correlações de Spearman e Pearson. Os resultados revelaram correlações consistentes entre a demanda química de oxigênio (DQO) e a presença de micropoluentes como cafeína, sulfametoxazol e diclofenaco, destacando a DQO como potencial indicador da carga de poluentes orgânicos. Parâmetros como turbidez, pH e nitrogênio amoniacal também apresentaram associações relevantes com fármacos e vírus. A integração de dados físico-químicos e biológicos demonstrou o potencial da WBE para o rastreamento de surtos epidemiológicos, como evidenciado na correlação entre carga orgânica e concentração de SARS-CoV-2. Os achados reforçam a importância de estratégias integradas de monitoramento e investigações abrangentes sobre os impactos dos atuais sistemas de tratamento de esgoto nos teores de micropoluentes, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos hídricos e para políticas públicas de saúde urbana.

PALAVRAS-CHAVE: Epidemiologia baseada nos esgotos, Micropoluentes farmacêuticos, Gestão de recursos hídricos, Tratamento de esgoto, Monitoramento ambiental.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso de medicamentos cresceu significativamente, refletindo melhorias no acesso à saúde e na qualidade de vida da população. Esse avanço trouxe, no entanto, preocupações sobre o descarte inadequado de fármacos e sua presença no sistema de esgoto. No Brasil, o Sistema Único de Saúde (SUS) expandiu o acesso a medicamentos desde a década de 1990, especialmente para o tratamento de doenças crônicas (VIEIRA, 2018). Esse aumento no consumo de fármacos apresenta desafios ambientais e de saúde pública, especialmente devido à detecção desses compostos nos esgotos e corpos hídricos.

O esgoto doméstico contém substâncias químicas complexas, incluindo fármacos que não são totalmente metabolizados pelo organismo e são excretados na urina e fezes. Além disso, o descarte inadequado de medicamentos, motivado pela falta de informação e escassez de pontos de coleta (GASPARINI et al., 2011), agrava a presença desses compostos nas águas residuais. Estudos destacam que ETEs (Estações de Tratamento de Esgoto) convencionais não removem completamente esses micropoluentes, permitindo sua liberação em corpos d'água (SILVA et al., 2023; ASGHAR et al., 2018).

A epidemiologia baseada nos esgotos (Wastewater-Based Epidemiology - WBE) tem se destacado como ferramenta promissora para monitorar compostos químicos e avaliar padrões de uso de substâncias pela população. A WBE permite estimar a exposição a fármacos e outros contaminantes, fornecendo dados importantes para ações de saúde pública e ambiental (BARCELLOS et al., 2023). Esse método combina análises químicas e dados epidemiológicos para identificar tendências de consumo e riscos emergentes.

A presença de resíduos farmacêuticos nos efluentes tratados representa risco potencial para a saúde humana e ecossistemas, podendo contribuir para resistência antimicrobiana (NAVES et al., 2022). Essa preocupação reforça a necessidade de aprimorar estratégias de gestão de resíduos e processos de tratamento de esgoto para reduzir contaminantes no ambiente.

No Brasil, legislações como as Leis nº 17.211/2012 do Paraná e nº 13.978/2012 de Curitiba estabelecem a logística reversa para resíduos farmacêuticos, distribuindo responsabilidades entre fabricantes, distribuidores e consumidores (BARCELLOS et al., 2020). Essas medidas visam minimizar a contaminação ambiental, protegendo a saúde pública e promovendo a sustentabilidade.

Diante desse cenário, esta pesquisa utiliza a perspectiva da epidemiologia baseada nos esgotos para analisar a correlação entre as concentrações de fármacos em esgotos brutos e os parâmetros físico-químicos do esgoto bruto de cinco ETEs de Curitiba. Pretende-se identificar como variáveis, como pH, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio amoniacal (N-NH3), vazão e carga viral do SARS-CoV-2 se relacionam com os fármacos analisados. Espera-se que os resultados contribuam para aprimorar estratégias de monitoramento e gestão ambiental, alinhadas à saúde pública.

Além disso, os dados obtidos poderão subsidiar políticas públicas voltadas ao planejamento urbano, saúde pública e à gestão sustentável dos recursos hídricos. A identificação de padrões de contaminação pode orientar melhorias na infraestrutura de tratamento e controle de poluentes emergentes, promovendo um desenvolvimento mais sustentável e resiliente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Curitiba, capital do Paraná, com quase dois milhões de habitantes (1.829.225), é referência nacional em saneamento básico. A cidade possui cobertura de coleta de esgoto para 99,98% da população, com um índice de tratamento de 96,56% (SNIS 2024). O sistema de coleta é dividido em cinco macrorregiões, e o esgoto coletado é tratado integralmente em cinco Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Além de atender Curitiba, essas ETEs recebem efluentes de municípios vizinhos da região metropolitana, incluindo São José dos Pinhais (345.644 habitantes), Colombo (240.720 habitantes), Pinhais (131.199 habitantes), Piraquara (124.934 habitantes) e Araucária (160.038 habitantes).

O estudo utilizou duas rotinas distintas de amostragem para investigar parâmetros específicos nas águas residuais de Curitiba. A primeira rotina envolveu o monitoramento quinzenal do SARS-CoV-2 na entrada de cinco ETEs de Curitiba. As coletas, proporcionais ao tempo, ocorreram às terças-feiras, durante 4 horas (8h-12h), com o uso de amostradores automáticos. A segunda rotina analisou o esgoto afluente de duas ETEs (01 e 02). Amostras foram coletadas durante sete dias consecutivos, com coletas diárias compostas por 24 horas,

utilizando amostradores automáticos. Na ETE 02, técnicos realizaram a preparação das amostras compostas, enquanto na ETE 01, pesquisadores conduziram o processo, ajustando as proporções com base na vazão horária. O período de amostragem foi de setembro a dezembro de 2024.

Para as análises de fármacos, as amostras foram preparadas no Laboratório do Centro de Estudos em Biofarmácia (CEB) da UFPR, equipado para manipulação e processamento de resíduos líquidos. Posteriormente, foram analisadas no Laboratório Multiusuário de Equipamentos e Análises Ambientais (LAMEAA) da UTFPR para a determinação dos analitos. As análises físico-químicas do esgoto foram processadas nos laboratórios do Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS) e a determinação do SARS-CoV-2 foi feita nos laboratórios do Departamento de Patologia Básica da UFPR.

Foram selecionados 10 analitos distribuídos em diferentes classes terapêuticas: Estradiol, Etinilestradiol, Progesterona, Estrona, Cafeína, Cetoprofeno, Diclofenaco, Atenolol, Enalapril e Lansoprazol. Esses analitos foram priorizados por outros estudos devido à sua alta prevalência em efluentes, relevância ambiental e como marcadores de saúde pública (BARCELLOS et al., 2020)

A extração foi realizada por fase sólida (SPE) em um coletor de vácuo Waters (Milford, Massachusetts, EUA) com cartuchos Phenomenex Strata-X (Torrance, Califórnia, EUA) de 200 mg e 3 mL, permitindo um fator de concentração de 500 vezes. Os cartuchos foram preparados com 4 mL de metanol, seguido de 6 mL de água ultrapura. Posteriormente, 500 mL de amostra foram pré-concentrados no cartucho a uma vazão de 10 mL/min. Após secagem ao ar por 2 minutos, os analitos foram eluídos em 4 mL de metanol, evaporados em banho termostático a 30°C sob nitrogênio e redissolvidos em 1 mL de fase móvel (água e acetonitrila 50:50 v/v).

A vazão das ETEs é monitorada pela companhia de saneamento. As análises físico-químicas do esgoto e da carga viral do SARS-CoV-2 seguram as mesmas metodologias de Barquilha e colaboradores (2023). A demanda química de oxigênio (DQO) do esgoto bruto foi determinada utilizando o método colorimétrico em refluxo fechado. o nitrogênio amoniacal foi determinado utilizando o método do fenato que mede a intensidade da coloração azul adquirida pela solução a partir da formação de indofenol resultante da reação promovida. O pH foi determinado utilizando um pHmetro de bancada. A cor aparente foi medida com um colorímetro, a turbidez por um turbidímetro e a condutividade elétrica por meio de um condutivímetro portátil.

A análise estatística foi realizada no RStudio. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. Como nem todos os dados apresentaram distribuição normal, utilizou-se o teste não paramétrico de Spearman para avaliar a correlação entre variáveis. Adicionalmente, o teste de Pearson foi aplicado para investigar possíveis relações lineares. Essa combinação de métodos permitiu uma análise abrangente e robusta das associações entre variáveis físico-químicas e concentrações de fármacos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta uma matriz de correlação e uma rede de interações com base nos coeficientes de Spearman e Pearson para a ETE 01 na amostragem de 24h por sete dias consecutivos. O nitrogênio amoniacal apresenta uma correlação negativa significativa com vários fármacos, incluindo o E2-estradiol. Esse achado está alinhado com outras pesquisas que também destacaram a importância dessa variável físico-química para indicar a diluição da amostra na epidemiologia baseada nos esgotos (BARQUILHA et al., 2023). Porém, essa correlação sugere que processos biológicos associados à remoção de compostos nitrogenados podem impactar a degradação de certos micropoluentes. A cafeína, por sua vez, mostra forte correlação positiva com a DQO, reforçando o papel da carga orgânica como indicador da presença de micropoluentes.

Na ETE 02 (Figura 2), na amostragem de 24h, a turbidez emerge como um parâmetro de destaque, apresentando correlação positiva com fármacos como lansoprazol e progesterona. Isso indica que o aumento de particulados no efluente está associado à presença desses compostos, sugerindo que processos de floculação e sedimentação podem influenciar sua remoção. A DQO também exibe correlações significativas, especialmente com fármacos como diclofenaco, destacando seu papel central no monitoramento de carga orgânica.

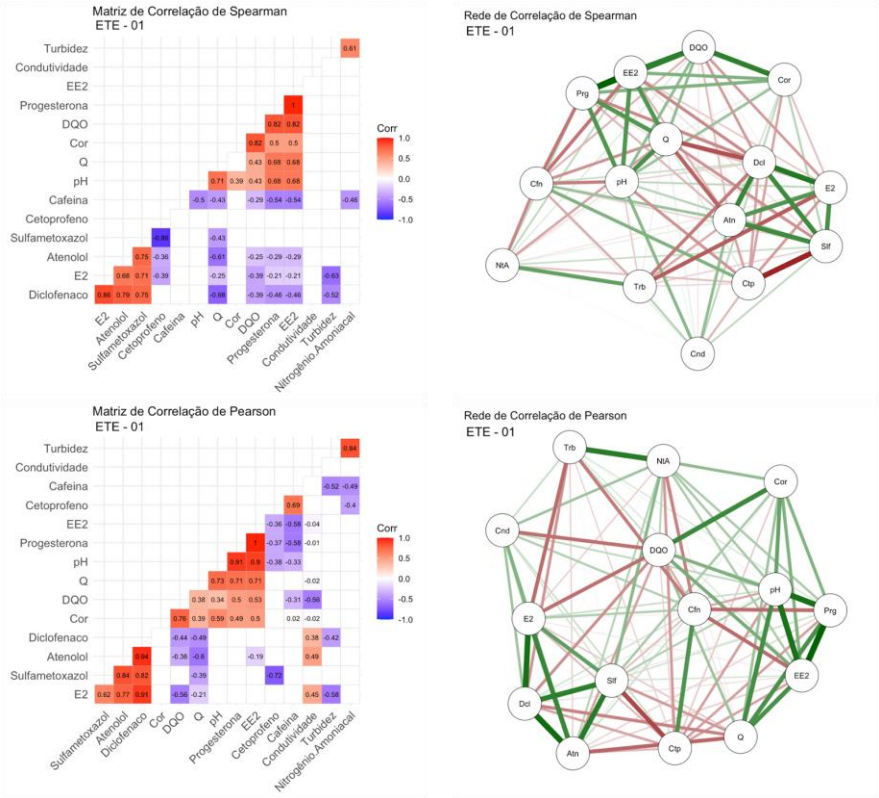

Figura 1: Amostragem de 24h, sete dias consecutivos na ETE 01.

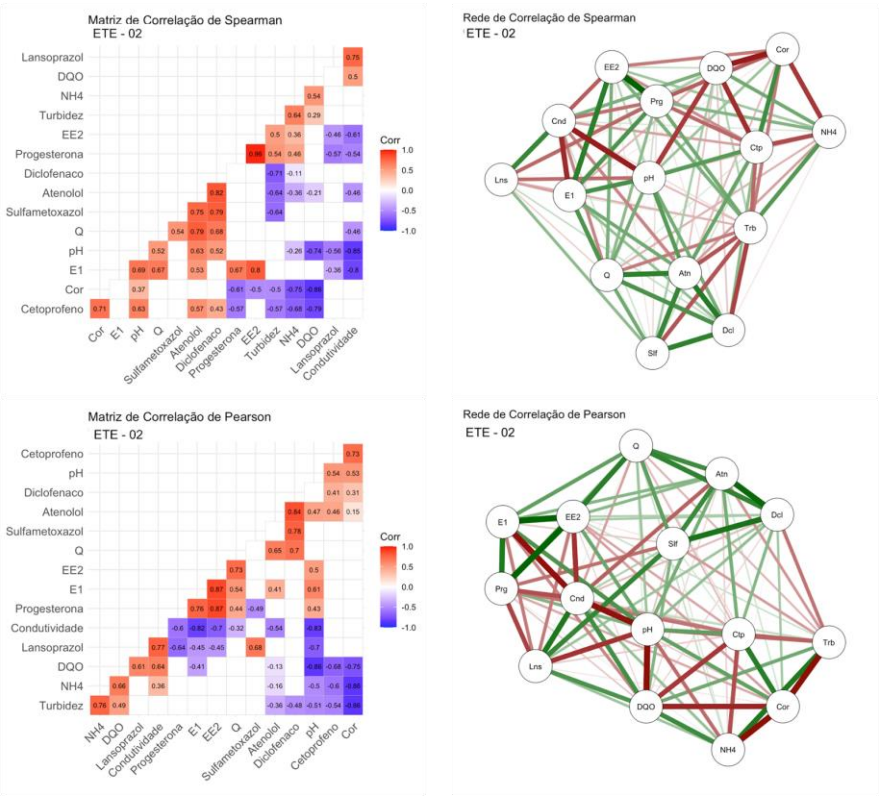

Figura 2: Amostragem de 24h, sete dias consecutivos na ETE 02.

Por outro lado, na ETE 01, na coleta de 4 horas (Figura 3), fica evidente uma forte interdependência entre a DQO e a concentração viral. Essa relação pode indicar que a presença de vírus no esgoto é influenciada pela carga orgânica, o que tem implicações epidemiológicas relevantes, especialmente em contextos de monitoramento de surtos virais. A cafeína e o sulfametoxazol também apresentam correlações significativas, reforçando seu papel como indicadores-chave de poluição farmacêutica.

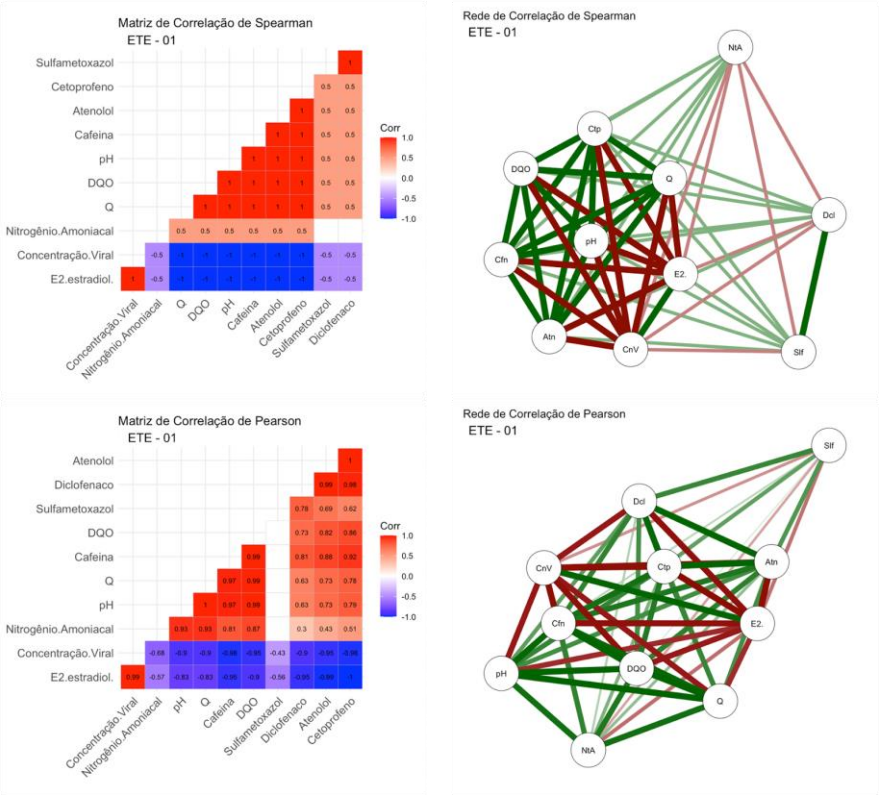

Figura 3: Amostragem coletas de 4 horas (8h-12h) às terças-feiras na ETE 01.

Enquanto, na ETE 02, na coleta de 4 horas (Figura 4), a rede de correlação evidencia o papel do sulfametoxazol como um fármaco central, com fortes correlações positivas com outros compostos, como diclofenaco e cafeína. O nitrogênio amoniacal também apresenta correlações significativas, sugerindo que menores teores de compostos nitrogenados podem estar relacionados à redução da presença de micropoluentes. Estudos sobre a remoção de micropoluentes farmacêuticos estão alinhados com esses achados pois demonstram que tratamentos avançados para a redução de compostos nitrogenados estão associados a redução de poluentes farmacêuticos (BARCELLOS et al., 2022). Além disso, a DQO novamente surge como um parâmetro de destaque, correlacionando-se com diversos compostos.

A ETE 04 (Figura 5) apresenta padrões similares aos observados nas demais ETEs, com a DQO exibindo forte correlação positiva com fármacos como cafeína e sulfametoxazol. Esses compostos estão diretamente relacionados à carga orgânica do esgoto, destacando a DQO como um indicador importante da presença de micropoluentes. Além disso, o pH demonstrou correlação negativa com o diclofenaco, indicando que alterações na acidez podem influenciar a persistência deste composto.

A ETE 03 (Figura 6) consolida os padrões de interação observados em todas as ETEs, reforçando a importância da DQO e do pH como indicadores de qualidade da presença de micropoluentes. A integração entre turbidez, nitrogênio amoniacal e outros parâmetros também é destacada, evidenciando a complexidade das interações entre as variáveis analisadas. Essa consolidação permite uma visão ampla das dinâmicas presentes nas diferentes estações.

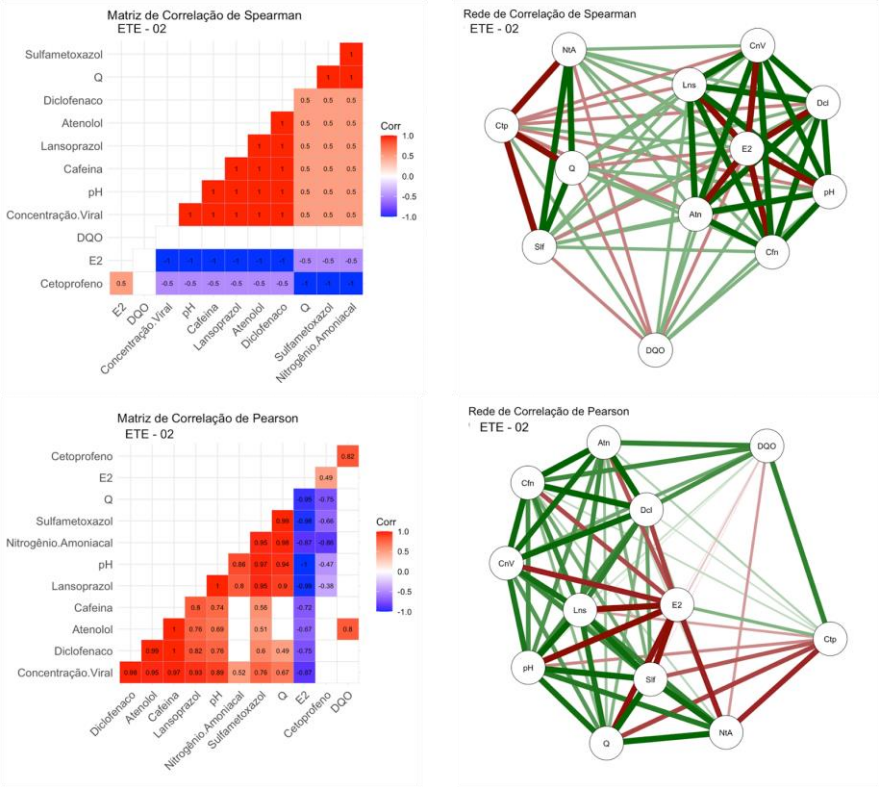

Figura 4: Amostragem coletas de 4 horas (8h-12h) às terças-feiras na ETE 02.

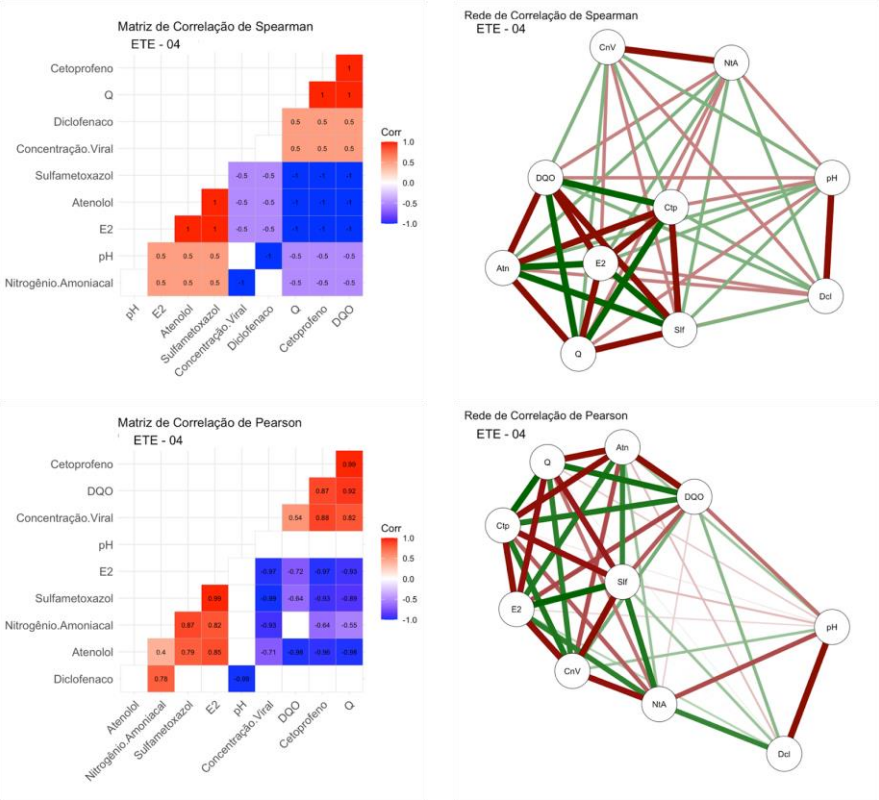

Figura 5: Amostragem coletas de 4 horas (8h-12h) às terças-feiras na ETE 04.

Os resultados apresentados em todas as figuras destacam padrões consistentes nas relações entre os parâmetros físico-químicos e os fármacos. A DQO desponta como o principal parâmetro, correlacionando-se positivamente com diversos micropoluentes, como cafeína, sulfametoxazol e diclofenaco, em todas as ETEs analisadas. Este resultado evidencia que a carga orgânica é um fator determinante para a presença de micropoluentes no esgoto, indicando que estratégias para redução de DQO podem impactar diretamente na remoção desses contaminantes.

Adicionalmente, a turbidez mostrou-se relevante em ETEs como 02 e 03, sugerindo que processos físicos de remoção de particulados podem influenciar a concentração de fármacos. Em contraste, o nitrogênio amoniacal exibiu correlações negativas com vários compostos, particularmente nas ETEs 01 e 04, destacando que processos biológicos que promovem sua remoção também podem ser determinantes para a degradação de micropoluentes.

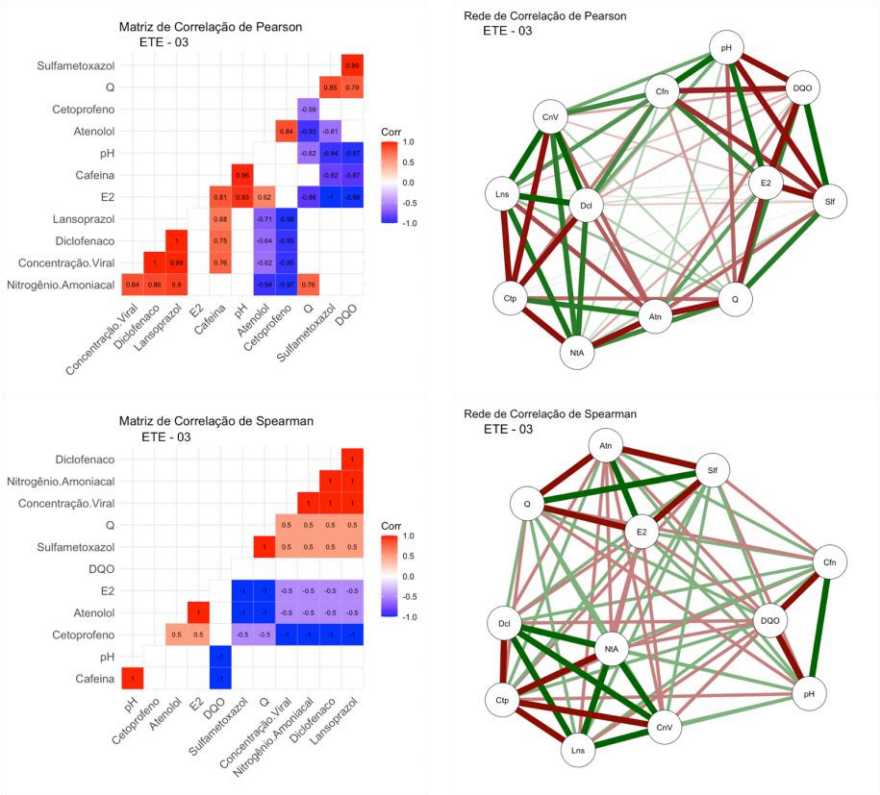

Figura 6: Amostragem coletas de 4 horas (8h-12h) às terças-feiras na ETE 03.

A correlação entre pH e fármacos como diclofenaco, observada na ETE 05 e outras estações, ressalta a influência das condições ácidas ou alcalinas no comportamento químico desses compostos. Este achado é particularmente relevante para a otimização de tratamentos secundários e terciários que dependem do controle do pH.

Por fim, a concentração viral, correlacionada à DQO em ETEs como 04, oferece uma importante contribuição à epidemiologia baseada nos esgotos. Esta relação pode ser explorada para o monitoramento de doenças infecciosas e a detecção precoce de surtos, destacando a importância de integrar dados físico-químicos e biológicos nos sistemas de monitoramento. Com a pandemia de COVID 19 a epidemiologia assumiu protagonismo na detecção precoce de surtos (BARCELLOS et al., 2023). No entanto, é essencial integrar parâmetros físico-químicos nos estudos desta área como já tem sido demonstrado por outras pesquisas (BARQUILHA et al., 2023) e aqui demonstramos a importância desses parâmetros também para o monitoramento de fármacos.

A análise apresentada reforça o papel da epidemiologia baseada nos esgotos como uma ferramenta poderosa para o monitoramento de fármacos e a promoção de políticas públicas. A forte correlação entre DQO e micropoluentes, como cafeína e sulfametoxazol, demonstra que dados de qualidade da água podem ser

utilizados para inferir padrões de consumo de medicamentos pela população. Isso possibilita o planejamento de campanhas de conscientização sobre o descarte correto de fármacos, além de subsidiar a implementação de tecnologias para tratamento de esgotos.

Ademais, o monitoramento de parâmetros como nitrogênio amoniacal e pH pode servir como um indicador indireto da eficiência dos tratamentos de esgotos na remoção de micropoluentes, orientando investimentos em infraestrutura e inovações tecnológicas. Por fim, a relação entre concentração viral e carga orgânica ressalta a possibilidade de utilizar dados de esgotos como uma estratégia complementar para a vigilância epidemiológica, contribuindo para a identificação precoce de riscos à saúde pública e o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis.

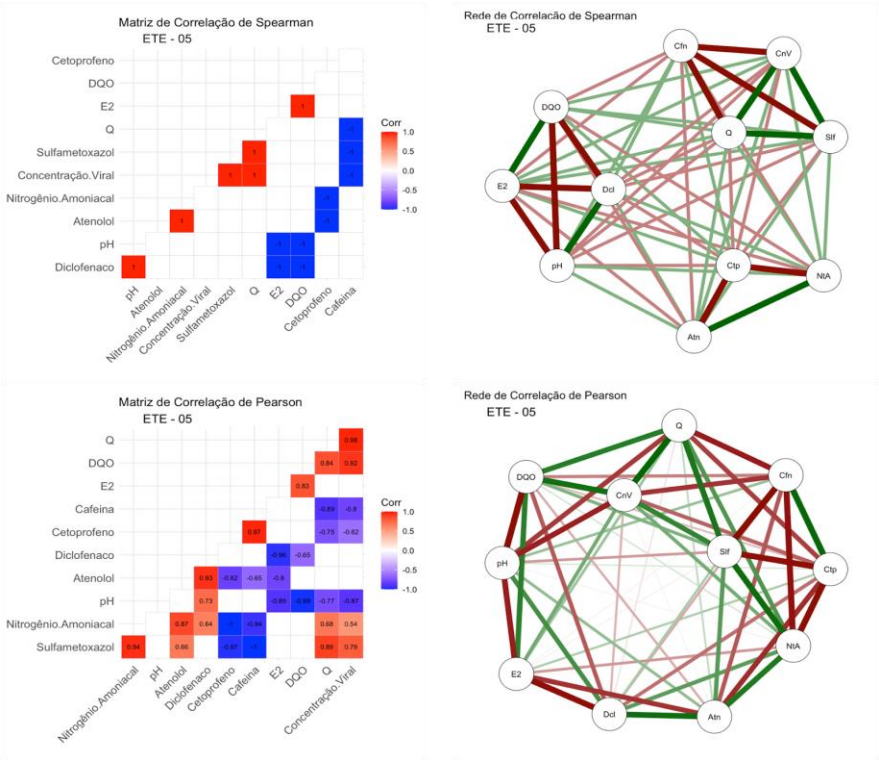

Figura 7: Amostragem coletas de 4 horas (8h-12h) às terças-feiras na ETE 05.

CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa evidenciam a relevância da epidemiologia baseada nos esgotos (WBE) como ferramenta estratégica para monitoramento ambiental e suporte à saúde pública. A correlação positiva consistente entre a demanda química de oxigênio (DQO) e fármacos, como cafeína e sulfametoxazol, destaca a carga orgânica como um indicador crítico para a presença de micropoluentes no esgoto. Por outro lado, parâmetros como turbidez e nitrogênio amoniacal demonstraram desempenhos complementares, oferecendo perspectivas importantes para otimizar os processos de tratamento e monitoramento de efluentes.

A identificação de padrões consistentes nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) de Curitiba ressalta a necessidade de investigar tratamentos para reduzir os micropoluentes farmacêuticos e os nutrientes conjuntamente, além de processos que considerem ajustes no pH para minimizar a persistência de compostos como o diclofenaco. Essa abordagem multifacetada pode melhorar a qualidade dos corpos d'água receptores e contribuir para a mitigação de problemas emergentes, como a resistência antimicrobiana.

Do ponto de vista da saúde pública, a associação entre DQO e concentrações virais fornece uma oportunidade única para integrar o monitoramento de compostos farmacêuticos ao rastreamento de doenças infecciosas. Esse avanço pode contribuir para a detecção precoce de surtos epidemiológicos, como já demonstrado no contexto da COVID-19, e para a avaliação de riscos sanitários em tempo real.

Assim, esta pesquisa não só reforça a importância de estratégias integradas para o monitoramento ambiental, como também apresenta caminhos para melhorar a saúde pública e promover a sustentabilidade no uso dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

1. ASGHAR, M. A.; ZHU, Q.; SUN, S.; SHUAI, Q. Suspect screening and target quantification of human pharmaceutical residues in the surface water of Wuhan, China, using UHPLC-Q-Orbitrap HRMS. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 828-837, 2018.
2. BARCELLOS, D. S. et al. How has the COVID-19 pandemic impacted wastewater-based epidemiology? **Science of the Total Environment**, v. 892, p. 164561, 2023.
3. BARCELLOS, D. S. et al. Management of pharmaceutical micropollutants discharged in urban waters: 30 years of systematic review looking at opportunities for developing countries. **Science of the Total Environment**, v. 809, p. 151128, 2022.
4. BARCELLOS, D. S. et al. Priority pharmaceutical micropollutants and feasible management initiatives to control water pollution from the perspective of stakeholders in metropolis of southern Brazil. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, p. 955-967, 2020.
5. BARQUILHA, C. E. R. et al. Monitoramento epidemiológico espaço-temporal de SARS-CoV-2 no esgoto de Curitiba-PR. **Cadernos Técnicos de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 3, p. 115-123, 2023.
6. BRASIL. **Instituto Trata Brasil. Ranking do saneamento do Instituto Trata Brasil de 2024** (SNIS 2022). 2024. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2024/04/Relatorio-Completo-Ranking-do-Saneamento-de-2024-TRATA-BRASIL-GO-ASSOCIADOS.pdf. Acesso em: jan. 2025.
7. GASPARINI, J. C.; GASPARINI, A. R.; FRIGIERI, M. C. Estudo do descarte de medicamentos e consciência ambiental no município de Catanduva-SP. **Ciência & Tecnologia**, v. 2, n. 1, 2011.
8. GÖBEL, A.; McARDELL, C. S.; JOSS, A.; SIEGRIST, H.; GIGER, W. Fate of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in different wastewater treatment technologies. **Science of the Total Environment**, v. 372, n. 2-3, p. 361-371, 2007.
9. NAVES, J. I. T. R.; BARBOSA, D. S.; LACERDA, C. A. Micropoluentes emergentes de origem farmacêutica em águas superficiais no BRICS: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 11, e244111133454, 2022.
10. SILVA, V. W. P. D. et al. Descarte de medicamentos e os impactos ambientais: uma revisão integrativa da literatura. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 28, p. 1113-1123, 2023.
11. VIEIRA, F. S. **Evolução do gasto com medicamentos do Sistema Único de Saúde no período de 2010 a 2016.** Brasília: IPEA, 2018. (Texto para Discussão, n. 2356).