ANÁLISE DAS CARGAS DE NITROGÊNIO E FÓSFORO EM SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DO ESTADO DE SÃO PAULO

Karen Tavares Zambrano[(1)]
Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento (PPGSHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Graduada em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP), Mestra em Ciências (Hidráulica e Saneamento) pela EESC/USP e Especialista em Gestão de Projetos pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq/USP).
João Miguel Merces Bega[(2)]
Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento (PPGSHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Graduado em Engenharia Civil e Mestre em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP).
Davi Gasparini Fernandes Cunha[(3)]
Professor Associado do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Graduado em Engenharia Ambiental e Doutor em Ciências (Hidráulica e Saneamento) pela EESC/USP.

Endereço[(1)]**:** Av. Trab. São Carlense, 400, Laboratório de Biotoxicologia em Águas Continentais e Efluentes (BIOTACE) – Centro – São Carlos - SP - CEP: 13566-590 - Brasil - Tel: +55 (16) 3373-9560 - e-mail: ktvazambrano@gmail.com.

RESUMO

São Paulo é o estado mais populoso e economicamente desenvolvido do Brasil, contando com ampla cobertura de serviços de esgotamento sanitário. No entanto, o aporte de nutrientes aos cursos de água continua sendo um desafio. O volume de esgotos lançados sem tratamento, combinado com o volume tratado com remoção parcial de nutrientes em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) de nível secundário, representa uma fonte significativa de poluição por nitrogênio (N) e fósforo (P). O presente estudo buscou caracterizar a situação dos sistemas municipais de esgotamento sanitário do estado de São Paulo e quantificar as cargas potenciais e remanescentes de N e P. Foram utilizados dados do Atlas Esgotos, referentes ao período de 2015 e 2016. Foram identificadas 768 ETEs. A redução da carga potencial de N e P dos municípios foi de apenas 37% e 25%, respectivamente, o que pode ser atribuído às deficiências no tratamento de esgoto. As eficiências médias das ETEs foram estimadas em 56,5% para a remoção de N e 37,3% para a remoção de P. Das cargas de 327,48 t N e 40,93 t P geradas diariamente, 206,53 t N e 30,60 t P foram lançadas no meio ambiente, principalmente em rios e córregos.

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de esgoto, carga remanescente, nutrientes.

INTRODUÇÃO

O estado de São Paulo é o mais populoso no Brasil, concentrando 44,4 milhões de habitantes, o que representa cerca de 21% da população brasileira (IBGE, 2022). Além disso, é um dos estados mais desenvolvidos economicamente, com um Produto Interno Bruto (PIB) de R$ 2,72 trilhões, equivalente a 30,2% do PIB nacional em 2021 (Seade, 2021). A infraestrutura de saneamento em São Paulo está próxima da universalização, com 95,2% da população tendo acesso à água potável e 90,5% sendo atendida pela coleta de esgoto (Brasil, 2022). Esses números indicam um avanço significativo em comparação com estados de outras regiões do país, principalmente do Norte e Nordeste. No entanto, mesmo com os esforços para melhorar a cobertura e a eficiência do tratamento de esgotos, a remoção de nutrientes continua a ser um desafio (Stepping, 2016; Von Sperling, 2016). Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) indicam que 28,6% do esgoto gerado e 11,8% do esgoto coletado no estado de São Paulo não recebem qualquer tratamento antes de serem lançados em corpos hídricos receptores (Brasil, 2022). Além disso, a maioria das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) no Brasil utiliza tecnologias de tratamento de nível secundário, que possuem baixa eficiência na remoção de nitrogênio (N) e fósforo (P), pois são projetadas principalmente para remover matéria orgânica carbonácea (Von Sperling, 2016). Como consequência, o volume de esgotos lançados sem tratamento, somado ao volume tratado com remoção parcial de nutrientes, continua a ser uma fonte significativa de poluição hídrica (Stepping, 2016; Preisner *et al*., 2020).

O tratamento de esgoto é um dos componentes mais importantes da infraestrutura de saneamento, pois promove a remoção de poluentes, contribuindo para a prevenção de doenças de veiculação hídrica e manutenção da qualidade da água (Carey; Migliaccio, 2009; Gamache, 2021). O esgoto representa uma das principais fontes de poluição por nutrientes (Hasan *et al.,* 2021; Rout *et al.,* 2021), contendo grandes quantidades de N e P provenientes de dejetos humanos, alimentos e alguns tipos de sabões e detergentes (Manuel, 2014). O excesso de nutrientes nos corpos de água pode causar impactos ambientais, sociais e econômicos negativos, desencadeando processos de eutrofização, degradando a qualidade da água e levando à perda de biodiversidade (Dalu *et al.*, 2019; Mia *et al.*, 2020). Apesar disso, a remoção de nutrientes no tratamento de esgotos nem sempre é viável do ponto de vista técnico-financeiro, especialmente em países em desenvolvimento que possuem restrições financeiras, de gestão e de infraestrutura (Carey & Migliaccio, 2009; Hasan *et al.,* 2021; Rout *et al.,* 2021). Para maiores eficiências de remoção de N e P, são necessárias tecnologias avançadas de tratamento, que geralmente aumentam o consumo de recursos e os custos operacionais (Hasan, 2021).

Para avançar nas discussões sobre estratégias de mitigação eficazes, mais pesquisas são necessárias para avaliar a magnitude e o impacto das cargas de nutrientes provenientes do esgoto (Gallego-Schmid; Tarpani, 2019). Nesse sentido, o presente estudo objetivou analisar as cargas potenciais e remanescentes de N e P nos sistemas municipais de esgotamento sanitário do estado de São Paulo, utilizando a base de dados do Atlas Esgotos (ANA, 2020a, 2020b). Além disso, buscou avaliar a situação das ETEs existentes em termos de utilização da infraestrutura, tecnologias de tratamento e eficiências esperadas de remoção de N e P. Essas análises são essenciais para compreender a dimensão da problemática dos nutrientes, contribuindo para a melhoria do tratamento de esgoto no estado de São Paulo.

MATERIAL E MÉTODOS

O banco de dados do Atlas Esgotos foi utilizado para as análises deste estudo. O Atlas Esgotos foi desenvolvido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em colaboração com a Secretaria Nacional de Saneamento (SNS) do Ministério das Cidades. Os principais produtos do Atlas Esgotos são as planilhas de dados, os fluxogramas dos sistemas de esgotamento sanitário dos 5.570 municípios brasileiros, e o relatório executivo intitulado "Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas", que descreve a situação do tratamento de esgoto a nível nacional. O foco da publicação do Atlas Esgotos é avaliar as implicações do lançamento das cargas orgânicas nos corpos d'água e estabelecer estratégias para a melhoria da infraestrutura de coleta e tratamento de esgotos até 2035 (ANA, 2020a).

O levantamento de dados para esta pesquisa foi realizado utilizando os seguintes documentos, disponibilizados nos recursos online do Atlas Esgotos (ANA, 2020a): i) Informações por Município (Planilha); ii) Estações de Tratamento de Esgoto (2013); iii) Estações de Tratamento de Esgoto (2019); e iv) croqui dos sistemas de esgotamento sanitário dos 645 municípios do estado de São Paulo (período de referência entre 2015 e 2016; ANA, 2020b). Os dados das planilhas do Atlas Esgotos foram cuidadosamente organizados em três novas planilhas: i) dados de vazão e carga afluente às ETEs por município, separando a contribuição referente a cada município (N = 858); ii) dados de população atendida, vazão de esgoto e carga afluente, vazão de projeto, eficiência de remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e corpo receptor referente à cada ETE (N = 768); e iii) dados de população urbana, carga potencial e remanescente de DBO e índices de atendimento de cada município para as categorias de esgoto coletado e tratado, esgoto coletado mas não tratado, soluções individuais e sem atendimento, de forma análoga ao Atlas Esgotos (N = 645). Essas planilhas foram revisadas e atualizadas a partir das informações dos croquis dos sistemas. Além disso, realizou-se uma avaliação da consistência dos dados, seguida pela correção de inconsistências. No Atlas Esgotos, são disponibilizadas as cargas potenciais de DBO utilizando como referência os valores de contribuição per capita de 54 g/hab.dia e os índices de atendimento dos municípios para cada categoria. Dessa forma, a soma das cargas potenciais atribuídas a cada categoria foi comparada com a carga calculada para a população urbana do município, informada no croqui. Quando a diferença, em módulo, foi maior do que 0,5 kg/dia, os dados foram verificados e corrigidos utilizando cálculos básicos de balanço de cargas. Após essa verificação, os índices foram recalculados e as cargas potenciais de N e P de cada município foram estimadas utilizando os valores de contribuição per capita de 8 g/hab.dia e 1 g/hab.dia, respectivamente (valores típicos da literatura; Von Sperling, 2014).

A análise da situação dos municípios quanto à cobertura com serviços de coleta e tratamento de esgotos foi realizada a partir do cálculo dos índices médios de atendimento para as categorias de esgoto coletado e tratado, esgoto coletado, mas não tratado, esgoto encaminhado para soluções individuais e sem atendimento com

serviços de esgotamento sanitário. Para isso, calculou-se a relação entre o somatório da carga de todos os municípios para cada categoria e o somatório das cargas totais. A influência do porte do município nos índices de atendimento foi avaliada a partir da comparação entre os índices médios gerais e por faixas populacionais, definidas conforme Seade (2021): municípios de pequeno porte I (até 20.000 habitantes), pequeno porte II (20.001 a 50.000 habitantes), médio porte (50.001 a 100.000 habitantes), grande porte (100.001 a 900.000 habitantes); e metrópoles (acima de 900.000 habitantes).

Em seguida, a distribuição das ETEs nos municípios de São Paulo foi avaliada e um mapa foi elaborado com o software R. Para a classificação das ETEs existentes no estado de São Paulo, adotaram-se os critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 377 (Brasil, 2006), que categoriza de acordo com a capacidade nominal (ou vazão de projeto). As ETEs foram classificadas em três categorias: pequeno porte, com capacidade de até 50 L/s; médio porte, com capacidade entre 50 e 400 L/s; e grande porte, com capacidade superior a 400 L/s. As vazões de projeto das ETEs foram obtidas a partir dos croquis dos sistemas de esgotamento sanitário dos municípios (ANA, 2020b). Em seguida, calculou-se o índice de utilização da infraestrutura de tratamento de esgotos (UT, em %), relacionando a vazão afluente de esgoto e a vazão de projeto, conforme a equação (1). Para apresentação dos dados, foram utilizados gráficos do tipo boxplot. Após a verificação de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$, dados não possuem distribuição normal), a diferença entre as medianas dos índices dos grupos de ETEs de pequeno, médio e grande porte foi avaliada pelo teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis e teste post-hoc de Dunn, com um nível de significância de 0,05. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R.

$$\mathbf{UT\ (\%) = 100\ x\ Q_{af.} / Q_{proj.}} \qquad \text{equação (1)}$$

Em que: UT é o índice de utilização da infraestrutura de tratamento de esgotos, em %; $Q_{af.}$ é a vazão afluente à ETE; e $Q_{proj.}$ é a vazão nominal de projeto da ETE.

O uso das tecnologias de tratamento nas ETEs do estado de São Paulo foi avaliado de forma geral e por faixa de população atendida, a fim de verificar a influência do número de habitantes na escolha do processo de tratamento. No caso de sistemas integrados, que recebem esgotos de mais de um município, considerou-se a população total atendida pela ETE para definir a faixa populacional. Os diferentes processos de tratamento de esgoto das ETEs foram agrupados nas seguintes tecnologias: biofiltro aerado submerso, disposição no solo, tanque séptico com pós-tratamento, lagoas de estabilização, reatores aeróbios e lodos ativados, reatores anaeróbios com pós-tratamento, reatores anaeróbios sem pós-tratamento e tratamento primário. O pré-tratamento não foi considerado no agrupamento dos processos, pois é comumente utilizado nas ETEs para remoção de sólidos grosseiros. Após essa análise, a eficiência esperada de remoção de N e P foi atribuída a cada um das ETEs, com base em faixas típicas disponíveis na literatura (Von Sperling, 2014). Para as soluções individuais, foram consideradas as eficiências de remoção de tanques sépticos (30% de remoção de N e 35% de remoção de P; Von Sperling, 2014). É importante ressaltar que, em muitos casos, não foi obtida uma correspondência exata entre o processo empregado na ETE e aquele cuja eficiência estava disponível na literatura. Nesses casos, adotou-se uma simplificação do sistema de tratamento existente.

A partir dos dados de carga afluente à ETE e eficiências de remoção de N e P, calculou-se a carga efluente referente à contribuição de cada município (equação 2). A carga efluente das soluções individuais foi calculada de forma análoga. Por fim, foram calculadas as cargas remanescentes de N e P dos municípios do estado de São Paulo, utilizando a equação (3). Neste estudo, a carga remanescente se refere à parcela da carga de esgotos gerada nos municípios que é lançada no meio ambiente. Em relação à carga potencial, reduz-se a parcela que é removida no tratamento das ETEs e das soluções individuais, com diferentes níveis de eficiência. A distribuição das cargas potenciais e remanescentes foi representada por meio de boxplots e as medianas foram comparadas pelo teste não-paramétrico de Wilcoxon para amostras pareadas, com um nível de significância de 0,05.

$$\mathbf{C_{ef.} = C_{af.}\ x\ (100 - EF)} \qquad \text{equação (2)}$$

Em que: $C_{ef.}$ é a carga efluente à ETE; $C_{af.}$ é a carga afluente à ETE; e EF é a eficiência esperada de remoção, em %.

$$\mathbf{C_{rem.} = CP_{sem} + CP_{col.} + C_{ef.} + C_{ind.}} \qquad \text{equação (3)}$$

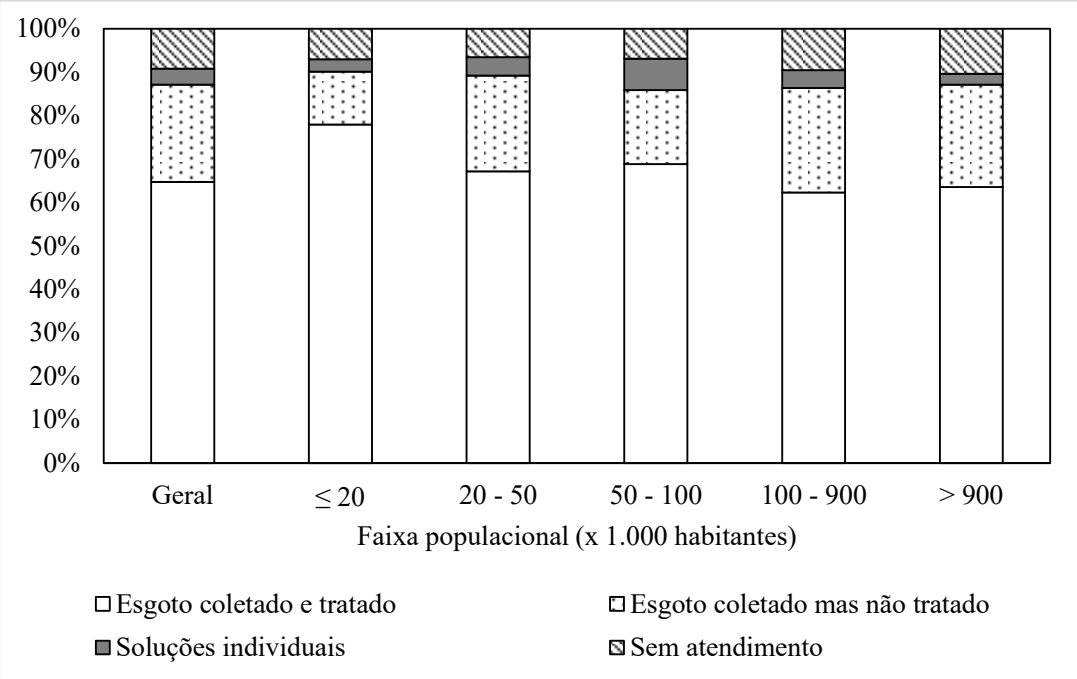
Em que: $C_{rem.}$ é a carga remanescente do município; CP_{sem} é a carga potencial sem atendimento; $CP_{col.}$ é a carga potencial coletada, mas não tratada; $C_{ef.}$ é a carga efluente à ETE; e $C_{ind.}$ é a carga efluente da solução individual.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dos 645 municípios do estado de São Paulo, 62 não possuem ETE, enquanto 583 possuem ao menos uma ETE. Entre os municípios com infraestrutura de tratamento de esgotos, 490 possuem apenas uma ETE e 93 possuem mais de uma ETE. A análise detalhada revela que a maioria dos municípios com até 20 mil habitantes têm ETEs (91,2%), mas apenas 4,5% desses municípios possuem mais de uma ETE. Nos municípios com população entre 20 e 50 mil habitantes, 84,8% possuem ETEs, com 16,2% tendo mais de uma. Para os municípios de médio porte (50-100 mil habitantes) e de grande porte (100-900 mil habitantes), 95,7% e 86,7% possuem ETEs, respectivamente. O percentual com mais de uma ETE é de 40% para os municípios de médio porte e de 51,4% para os de grande porte. Por fim, os três municípios do estado com mais de 900 mil habitantes possuem múltiplas ETEs. Esses dados sugerem que municípios menores tendem a adotar um sistema de tratamento centralizado, enquanto que municípios maiores frequentemente adotam uma abordagem mais descentralizada, a fim de gerenciar os volumes crescentes de esgoto associados ao aumento populacional.

A Figura 1 apresenta a variação da cobertura com serviços de coleta e tratamento de esgotos conforme a faixa populacional dos municípios do estado de São Paulo. De modo geral, 64,8% do volume gerado é coletado por redes de esgoto e encaminhado para ETEs (i.e., sistemas coletivos), 22,3% é coletado, mas não tratado, 3,7% é encaminhado para soluções individuais (e.g., tanques sépticos) e 9,2% não possui cobertura com serviços de esgotamento sanitário. A maior cobertura com tratamento de esgotos foi observada em municípios de até 20 mil habitantes (77,9%, N = 422) e a menor cobertura em municípios entre 100 e 900 mil habitantes (62,3%, N = 70). A porcentagem de esgoto coletado, mas não tratado, foi maior nos grandes municípios: 24,1% para aqueles com 100 a 900 mil habitantes e 23,6% para municípios com mais de 900 mil habitantes. Em contrapartida, essa proporção é de 12,2% nos municípios de até 20 mil habitantes. O atendimento com sistemas individuais de tratamento foi maior em municípios de médio porte (7,2%, N = 45), enquanto a falta de acesso a serviços de esgotamento sanitário aumentou em municípios com mais de 100 mil habitantes. Esses resultados sugerem que municípios menores tendem a possuir uma maior cobertura com serviços de coleta e tratamento de esgotos, enquanto municípios maiores enfrentam mais desafios para fornecer esses serviços a toda a população. Isso pode ser atribuído ao aumento da complexidade de gestão da infraestrutura em sistemas que recebem volumes maiores de esgoto. Além disso, existem desafios técnicos e econômicos para implementar sistemas de esgoto eficientes em áreas urbanas densamente povoadas (Teklehaimanot *et al.*, 2015). Isso ocorre principalmente em municípios que possuem uma grande parcela da população em favelas e comunidades urbanas.

Figura 1 - Variação da cobertura com coleta e tratamento de esgoto por faixa populacional em municípios do estado de São Paulo



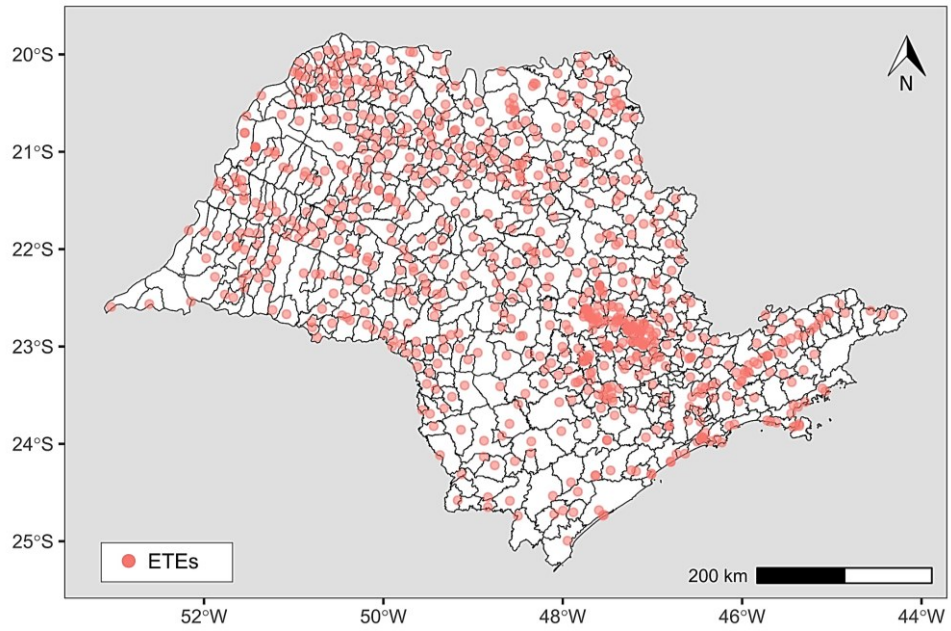
Fonte: elaboração própria a partir de dados do Atlas Esgotos (ANA, 2020a).

Segundo os dados dos fluxogramas dos sistemas do Atlas Esgotos, a população urbana do estado de São Paulo era de 40,09 milhões de habitantes (ANA, 2020a). Com base nesses dados, estimou-se que, diariamente, a carga potencial de DBO era de 2.210,46 toneladas, enquanto que a carga remanescente era de 990,41 toneladas. Isso sugere uma remoção média de DBO de aproximadamente 55,2% nos sistemas de tratamento, evidenciando a necessidade de ampliação da cobertura para reduzir a carga poluidora residual. Em termos de nutrientes, as cargas potenciais de N e P foram estimadas em 327,48 e 40,93 toneladas por dia, respectivamente. De forma geral, as ETEs do estado recebiam 64,8% dessas cargas, o que corresponde a 1.431,43 toneladas de DBO, 212,06 toneladas de N e 26,51 toneladas de P.

ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Entre 2015 e 2016, foram identificadas 768 ETEs ativas no estado de São Paulo (Figura 2), sendo 760 sistemas isolados e oito sistemas integrados (que atendem mais de um município). Esses sistemas integrados atendiam a 31 municípios diferentes e a uma população de cerca de 8,92 milhões de habitantes, correspondente a 33,6% da população atendida pela totalidade das ETEs (26,5 milhões de habitantes). A maior parte das ETEs do estado atendia a uma população de até 50.000 habitantes (89,5%, N = 687). Apenas as ETEs ABC, Barueri e Parque Novo Mundo, localizadas na região metropolitana de São Paulo, atendiam mais de 900 mil habitantes.

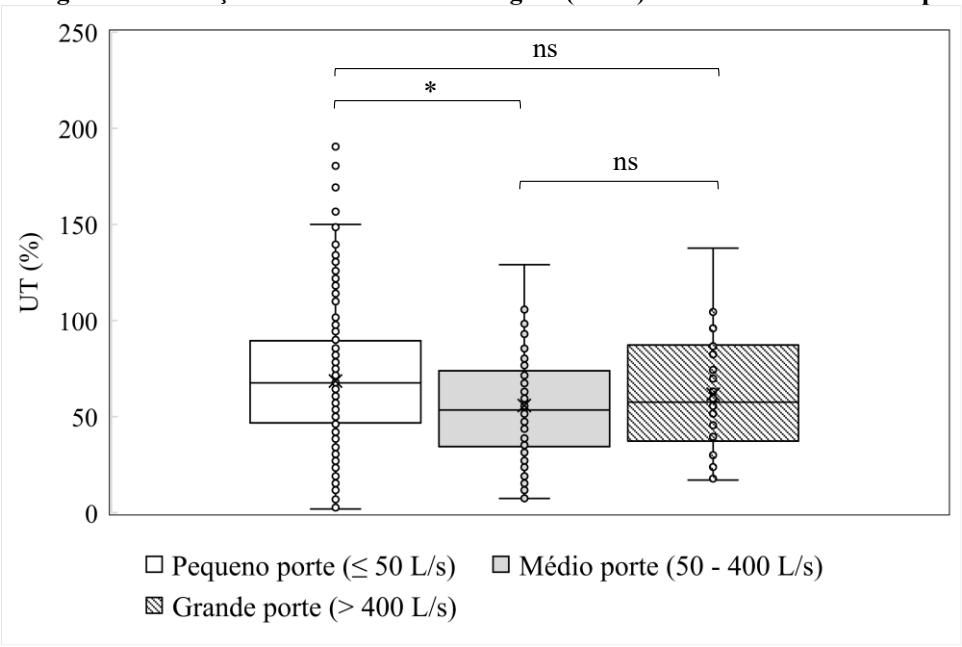
Figura 2 - Distribuição espacial das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do estado de São Paulo



Fonte: elaboração própria a partir de dados do Atlas Esgotos (ANA, 2020a).

A vazão afluente mediana das ETEs no estado de São Paulo foi de 12,1 L/s, variando de 0,2 a 10.042,2 L/s. Das 585 ETEs com dados de vazão de projeto disponíveis nos croquis do Atlas Esgotos, 405 (69,2%) foram classificadas como de pequeno porte, com capacidade de até 50 L/s, e 142 (24,3%) como de médio porte (50 a 400 L/s). Apenas 38 (6,5%) possuíam vazão de projeto superior a 400 L/s. As medianas dos índices de utilização das ETEs de pequeno, médio e grande porte foram de 67,5% (2,0 – 190,5%), 53,4% (7,5 – 129,0%) e 57,5% (17,1 – 137,7%), respectivamente (Figura 3). Apesar das diferenças aparentes nas medianas, foram observadas diferenças estatisticamente significativas somente entre os índices de utilização das ETEs de pequeno e médio porte ($p < 0,0001$). De forma geral, a maior parte das ETEs (66,8%) apresentou índices de utilização inferiores a 80%. As ETEs de pequeno e grande porte foram as que mais utilizaram a sua capacidade projetada, com 37,5% e 34,2% delas operando com índice de utilização superior a 80%, respectivamente. Em contrapartida, 79,6% (N = 113) das ETEs de médio porte apresentaram índices inferiores a 80%.

Figura 3 – Gráfico de boxplot para comparação do índice de utilização de infraestrutura de tratamento de esgotos das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do estado de São Paulo por porte



Nota: Teste de Kruskal-Wallis ($p < 0,001$) e teste post-hoc de Dunn, ns = não significativo, * = $p < 0,0001$
Fonte: elaboração própria a partir de dados do Atlas Esgotos (ANA, 2020a).

Estudos indicam que, quanto mais próxima a vazão de operação da ETE estiver de sua capacidade projetada, mais eficiente será a sua utilização de energia e menores serão os custos operacionais (Lindtner; Schaar; Kroiss, 2008. Silva; Rosa, 2015). Segundo Vaccari *et al.* (2018), índices de utilização entre 70% e 80% levam a custos operacionais mais baixos. Por outro lado, índices de utilização maiores podem sobrecarregar a planta e reduzir sua eficiência de remoção, principalmente de N e P (Zhang *et al*., 2016). Vale destacar que 73,9% das ETEs de médio porte atendiam a populações de até 50 mil habitantes entre 2015 e 2016. Esses resultados sugerem uma possível subutilização das ETEs existentes. Portanto, existe oportunidade para aumentar o volume de esgoto tratado sem a necessidade imediata de expansão de infraestrutura de tratamento. Contudo, ainda é necessário ampliar as conexões entre a rede coletora e as ETEs, a fim de reduzir o volume de esgoto lançado em corpos de água sem tratamento. Esse lançamento representa um risco de eutrofização dos ambientes aquáticos, podendo comprometer os usos múltiplos da água (Preisner *et al*., 2020).

TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

A Tabela 1 apresenta a distribuição das tecnologias de tratamento de esgoto utilizadas nas ETEs do estado de São Paulo, por faixas populacionais. As lagoas de estabilização foram predominantes nos municípios menores, com populações de até 100 mil habitantes, o que pode ser atribuído aos menores custos de instalação e operação. Conforme o aumento da população, a utilização das lagoas de estabilização diminuiu significativamente, indicando que, em municípios maiores, onde a densidade populacional é maior e o espaço é limitado, há uma necessidade de tecnologias mais compactas e eficientes. Os reatores anaeróbios com pós-tratamento foram adotados principalmente em municípios de médio porte. Em municípios com mais de 100 mil habitantes, os sistemas de lodos ativados foram predominantes, possivelmente porque oferecem maior eficiência de tratamento e são mais adequados para a alta densidade populacional.

Tabela 1 - Tecnologias empregadas nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do estado de São Paulo, por faixa de população atendida

Tecnologia de tratamento	Faixa populacional (x 1.000 habitantes)				
	≤ 20	20 - 50	50 - 100	100 - 900	> 900
Biofiltro aerado submerso	0,3%	0,0%	2,6%	0,0%	0,0%
Disposição no solo	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Tanque séptico com pós-tratamento	7,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Lagoas de estabilização	**71,0%**	**67,0%**	**48,7%**	17,9%	0,0%
Reatores aeróbios e lodos ativados	14,6%	20,6%	17,9%	**46,2%**	**100,0%**
Reatores anaeróbios com pós-tratamento	4,2%	12,4%	25,6%	20,5%	0,0%
Reatores anaeróbios sem pós-tratamento	1,0%	0,0%	2,6%	2,6%	0,0%
Tratamento primário	1,5%	0,0%	2,6%	12,8%	0,0%

Nota: o valor destacado corresponde à tecnologia de tratamento mais utilizada em cada faixa populacional
Fonte: elaboração própria a partir de dados do Atlas Esgotos (ANA, 2020a, 2020b).

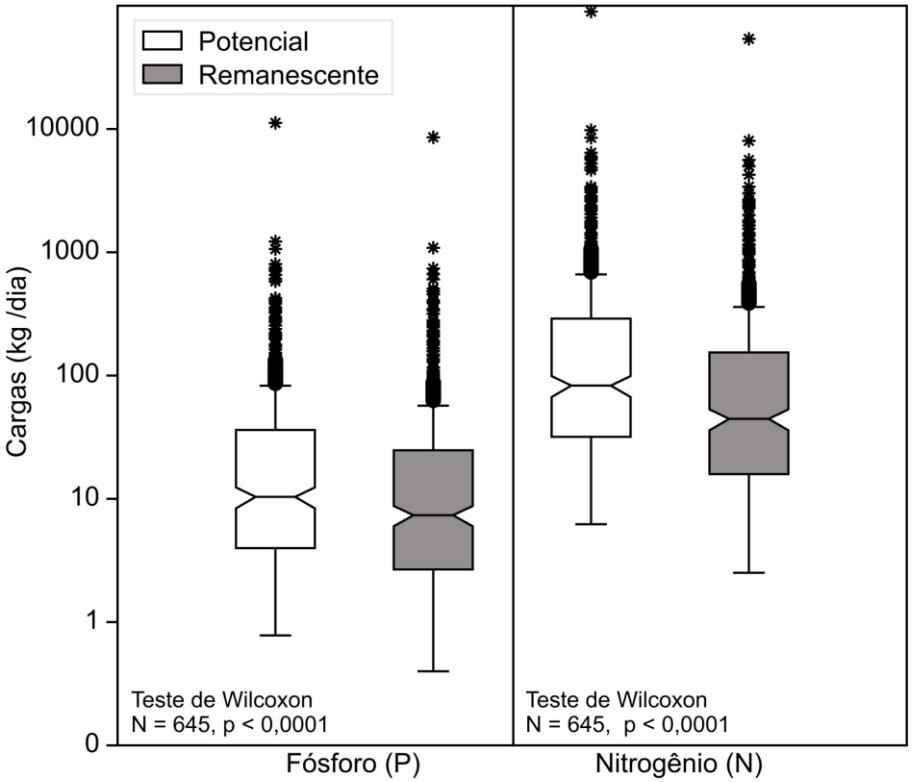
Outras tecnologias, como o tanque séptico com pós-tratamento e o tratamento primário, foram menos utilizadas, com a primeira sendo encontrada principalmente em municípios pequenos (7,12% nos municípios de até 20 mil habitantes) e a segunda aparecendo de forma predominante em Estações de Pré-Condicionamento de Esgoto (EPCs). A escassa utilização do biofiltro submerso aerado e do reator anaeróbio sem pós-tratamento sugere que essas tecnologias são menos preferidas, possivelmente devido às limitações em eficiência ou aplicabilidade. Resultados similares foram observados no levantamento realizado por Von Sperling (2016) em 2.187 ETEs brasileiras.

Quanto às eficiências esperadas de remoção de N e P das ETEs do estado de São Paulo, foram observados valores entre 30% e 75% para o N, com média de 56,5% e mediana de 60%, e entre 35% e 75% para o P, com média de 37,3% e mediana de 35%. Esses resultados eram esperados, uma vez que os processos convencionais de tratamento biológico proporcionam uma baixa remoção de nutrientes, pois foram projetados para remover as cargas orgânicas (Hasan *et al.*, 2021). A análise detalhada das ETEs evidencia que apenas 49 (6,4%) incluíam uma fase específica para a remoção de N ou P, sendo que a maior parte foi projetada para a remoção biológica de N (85,7%). A remoção de nutrientes dos esgotos é um desafio global que afeta principalmente os países em desenvolvimento, pois requer tecnologias avançadas que aumentam a complexidade e os custos operacionais (Rout *et al.*, 2021). Em ETEs chinesas, Zhang *et al.* (2016) observaram uma remoção média de nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_3$) de 80%, mas destacaram que aproximadamente 50% dessas ETEs não atendem ao padrão de lançamento de nitrogênio.

CARGAS REMANESCENTES DE NITROGÊNIO E FÓSFORO

A carga total remanescente dos sistemas de esgotamento sanitário do estado de São Paulo foi de 206,53 t N/dia e de 30,60 t P/dia, indicando uma remoção média de 37% e 25% para N e P, respectivamente. Esses dados evidenciam a importância de otimizar os processos de tratamento de esgoto para melhorar a eficiência de remoção de nutrientes. Embora exista uma pequena remoção, a carga residual ainda é substancial, apontando para a necessidade de investimentos em tecnologias mais avançadas de tratamento de esgotos. A análise da distribuição das cargas dos municípios do estado revelou cargas potenciais medianas de 82,95 kg N/dia, variando de 6,22 a 89.603,4 kg N/dia, e de 10,37 kg P/dia, variando de 0,78 a 11.200,43 kg P/dia. Por outro lado, as cargas remanescentes variaram de 2,51 a 53.885,71 kg N/dia, com mediana de 44,54 kg N/dia, e de 0,40 a 8.562,89 kg P/dia, com mediana de 7,36 kg P/dia. Foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as medianas das cargas potenciais e remanescentes em ambos os casos (Figura 4). Em termos de lançamento, 92,4% das ETEs lançavam os esgotos tratados em rios e córregos, 0,3% em lagos ou reservatórios, 1,8% no mar e 0,7% no solo. A informação relativa ao corpo receptor não estava disponível para 37 ETEs (4,8%).

Figura 4 – Distribuição das cargas potenciais e remanescentes de fósforo e nitrogênio nos sistemas de esgotamento sanitário dos municípios do estado de São Paulo



Fonte: elaboração própria a partir de dados do Atlas Esgotos (ANA, 2020a, 2020b).

CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar a situação dos sistemas municipais de esgotamento sanitário do estado de São Paulo e quantificar as cargas potenciais e remanescentes de N e P. Para isso, foram utilizados dados disponibilizados nos recursos online do Atlas Esgotos, cujo período de referência variou entre 2015 e 2016 (ANA, 2020a, 2020b). As principais conclusões obtidas após a análise das 768 ETEs existentes nos 645 municípios do estado foram:

- Em média, 64,8% dos esgotos gerados no estado de São Paulo passavam por tratamento em ETEs. A maior cobertura com tratamento de esgotos foi observada em municípios de até 20 mil habitantes (77,9%) e a menor cobertura em municípios entre 100 e 900 mil habitantes (62,3%);
- O maior número de ETEs atendia a uma população de até 50 mil habitantes (89,5%), com capacidade nominal de até 50 L/s (69,2%), e fazia parte de sistemas isolados (99,0%), com gestão centralizada;
- Os índices de utilização da infraestrutura de tratamento foram inferiores a 80% para a maioria das ETEs (66,8%), com destaque para as que atenderam populações de até 50 mil habitantes;
- As lagoas de estabilização foram utilizadas predominantemente em municípios de até 100 mil habitantes, especialmente em municípios de pequeno porte, com redução do uso à medida que a população aumenta. Por outro lado, o uso de reatores aeróbios e lodos ativados aumentou nos municípios maiores e foi predominante nas populações acima de 100 mil habitantes;
- As eficiências médias de remoção de N e P nas ETEs foram de, respectivamente, 56,5% e 37,3%. A maioria das ETEs empregavam tecnologias de nível secundário, focadas na remoção de matéria orgânica. Uma etapa específica para a remoção de N ou P estava incorporada em um pequeno número de ETE (6,4%);
- A redução da carga potencial de N e P dos municípios foi baixa devido à falta de cobertura com tratamento de esgoto (média de 37% e 25% para N e P, respectivamente), especialmente nas grandes cidades, associada à baixa eficiência de remoção de N e P dos sistemas de tratamento existentes. Da carga total de 327,48 t N e 40,93 t P geradas diariamente, 206,53 t N e 30,60 t P foram lançadas no meio ambiente, frequentemente em rios e córregos.

O presente estudo contribui para pesquisas recentes sobre o tema, destacando a necessidade de avaliar, em pesquisas futuras, os impactos dos lançamentos de nutrientes nos corpos receptores. As cargas remanescentes de N e P nos municípios foram substanciais, o que sugere que a cobertura com tratamento de esgotos e as eficiências de remoção das ETEs podem ser insuficientes para atender aos padrões ambientais. Entre as limitações da pesquisa, destaca-se a utilização de uma base de dados que pode não representar os avanços mais recentes dos municípios em termos de infraestrutura de esgotamento sanitário. Além disso, o cálculo das cargas e a definição das eficiências de remoção de N e P foram simplificados, baseando-se em faixas típicas da literatura científica. No entanto, trata-se de um levantamento abrangente cujo objetivo é fornecer um panorama geral da situação do esgotamento sanitário no estado de São Paulo, do ponto de vista da gestão de nutrientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. Resolução CONAMA nº 377, de 9 de Outubro de 2006. Dispõe sobre licenciamento ambiental simplificado de Sistemas de Esgotamento Sanitário. Brasília: Presidência do Conselho, 2006.

2. BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNS). Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS. *Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto - Visão Geral*. Ano de referência 2022. Brasília: SNS, 2022.

3. CAREY, R. O.; MIGLIACCIO, K. W. *Contribution of wastewater treatment plant effluents to nutrient dynamics in aquatic systems: A review*. Environmental Management, v. 44, n. 2, p. 205–217, 21 mai. 2009.

4. DALU, T.; WASSERMAN, R. J.; MAGORO, M. L.; FRONEMAN, P. W.; WEYL, O. L. F. *River nutrient water and sediment measurements inform on nutrient retention, with implications for eutrophication.* Science of The Total Environment, v. 684, p. 296–302, set. 2019.

5. GALLEGO-SCHMID, A.; TARPANI, R. R. Z. *Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review*. Water Research, v. 153, p. 63–79, abr. 2019.

6. GAMACHE, K. R. *Critical infrastructure: Water and wastewater systems sector.* In: Encyclopedia of Security and Emergency Management. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 171–181.

7. HASAN, Mohd Najibul *et al. Recent technologies for nutrient removal and recovery from wastewaters: A review*. Chemosphere, v. 277, p. 130328, 2021.

8. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados: São Paulo. 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp.html. Acesso em: 01 jun. 2024.

9. LINDTNER, Stefan; SCHAAR, Heidemarie; KROISS, Helmut. *Benchmarking of large municipal wastewater treatment plants treating over 100,000 PE in Austria*. Water science and technology, v. 57, n. 10, p. 1487-1493, 2008.

10. MANUEL, John. *Nutrient pollution: A persistent threat to waterways*. Environmental Health Perspectives, Volume 122, Issue 11, 2014.

11. MIA, S.; ALAM, Md. R.; SATTAR, Md. A.; DIJKSTRA, F. A. *Nutrient loading in the river systems around major cities in Bangladesh: A quantitative estimate with consequences and potential recycling options.* In: Statistics for Data Science and Policy Analysis. Singapore: Springer Singapore, 2020. p. 111–128.

12. PREISNER, M.; NEVEROVA-DZIOPAK, E.; KOWALEWSKI, Z. *Analysis of eutrophication potential of municipal wastewater.* Water Science and Technology, v. 81, n. 9, p. 1994–2003, 1 maio 2020.

13. ROUT, Prangya Ranjan *et al. Nutrient removal from domestic wastewater: A comprehensive review on conventional and advanced technologies.* Journal of Environmental Management, v. 296, p. 113246, 2021.

14. SEADE - Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. Seade PIB Anual. Seade, 2021. Disponível em: https://pib.seade.gov.br/anual/. Acesso em: 22 mai. 2024.

15. SILVA, Catarina; ROSA, Maria Joao. *Energy performance indicators of wastewater treatment: a field study with 17 Portuguese plants.* Water Science and Technology, v. 72, n. 4, p. 510-519, 2015.

16. STEPPING, K. *Urban sewage in Brazil: drivers of and obstacles to wastewater treatment and reuse. Governing the Water-Energy-Food Nexus Series*. Discussion Paper, No. 26/2016. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE), 2016.

17. TEKLEHAIMANOT, G. Z. *et al. Population Growth and Its Impact on the Design Capacity and Performance of the Wastewater Treatment Plants in Sedibeng and Soshanguve, South Africa*. Environmental Management 56, 984–997, 2015.

18. VACCARI, M. *et al. Benchmarking of energy consumption in municipal wastewater treatment plants–a survey of over 200 plants in Italy*. Water Science and Technology, v. 77, n. 9, p. 2242-2252, 2018.

19. VON SPERLING, M. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Vol. 1. Minas Gerais: Editora UFMG, 2014.

20. VON SPERLING, Marcos. *Urban wastewater treatment in Brazil.* (IDB Technical Note 970). Inter-American Development Bank, 2016. Disponível em: https://webimages.iadb.org/publications/english/document/Urban-Wastewater-Treatment-in-Brazil.pdf. Acesso em: 01 jun. 2024.

21. ZHANG, Q. H. *et al. Current status of urban wastewater treatment plants in China*. Environment international, v. 92, p. 11-22, 2016.