



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO
PROGRAMA DE CIÊNCIAS NATURAIS
LICENCIATURA EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

GERLAN SILVA CAVALCANTE

**EPIDEMIOLOGIA BASEADA EM ESGOTO APLICADA À COVID-19: ANÁLISE DA
PRESENÇA DE SARS-COV-2 EM ESGOTOS URBANOS DE SANTARÉM-PA**

**SANTARÉM-PA
2025**

GERLAN SILVA CAVALCANTE

**EPIDEMIOLOGIA BASEADA EM ESGOTO APLICADA À COVID-19: ANÁLISE DA
PRESENÇA DE SARS-COV-2 EM ESGOTOS URBANOS DE SANTARÉM-PA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Ciências Naturais, para a obtenção do grau de Licenciatura em Ciências Biológicas; Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Ciências da Educação.
Orientador: Dr. Marcos Prado Lima

**SANTARÉM-PA
2025**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/Ufopa

- C377e Cavalcante, Gerlan Silva
Epidemiologia baseada em esgoto aplicada à COVID-19: análise da presença de SARS-COV-2 em esgotos urbanos de Santarém-PA./ Gerlan Silva Cavalcante. – Santarém, 2025.
39p.: il.
Inclui bibliografias.
- Orientador: Marcos Prado Lima.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Ciências da Educação, Programa de Ciências Naturais, Licenciatura em Ciências Biológicas.
1. Águas residuais. 2. Vigilância epidemiológica. 3. COVID-19. I. Lima, Marcos Prado, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 616.2414098115

GERLAN SILVA CAVALCANTE

**EPIDEMIOLOGIA BASEADA EM ESGOTO APLICADA À COVID-19: ANÁLISE DA
PRESENÇA DE SARS-COV-2 EM ESGOTOS URBANOS DE SANTARÉM-PA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Ciências Naturais, para a obtenção do grau de Licenciatura em Ciências Biológicas; Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Ciências da Educação.
Orientador: Dr. Marcos Prado Lima

Conceito: APROVADO

Data de aprovação: 03 / 07 / 2025

Prof. Dr. Marcos Prado Lima - Orientador
Universidade Federal do Oeste do Pará

Prof. Dr. José Almir Moraes da Rocha
Universidade Federal do Oeste do Pará



Documento assinado digitalmente
JOSE ALMIR MORAES DA ROCHA
Data: 23/07/2025 11:18:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luis Reginaldo Ribeiro Rodrigues
Universidade Federal do Oeste do Pará



Documento assinado digitalmente
LUIS REGINALDO RIBEIRO RODRIGUES
Data: 21/07/2025 17:56:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha avó, Marilene Feitosa, por seu apoio incondicional e compreensão durante toda a minha vida e trajetória acadêmica, não haveria eu sem a senhora.

Agradeço a minha mãe, Carmelita Sousa e meu pai, Gerlan Feitosa, por toda a ajuda recebida, sempre imediata e gentil, além da inspiração pelos exemplos de resiliência e honestidade.

Agradeço ao meu avô paterno João Teixeira, minha avó materna Valdina Sousa, às minhas tias e todos os meus familiares, que sempre me incentivaram e acreditaram em mim.

Aos meus amigos, minha gratidão profunda por tornarem esse caminho mais leve, pelo companheirismo e admiração mútua de sempre.

Agradeço aos meus colegas de sala pela amizade e gentileza comigo ao longo dessa graduação, jamais chegaria aqui sem a reciprocidade de vocês durante essa jornada.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Prado, pela oportunidade de trabalhar no Labimol e nessa pesquisa, pela paciência, confiança e cordialidade ao longo de todo esse processo.

Agradeço aos colegas integrantes do Labimol e Labtar por todo auxílio na realização desse trabalho e à própria estrutura desses laboratórios.

Aos meus professores, minha sincera admiração por todo o empenho e paixão pela educação e a competência que cada um tem na sua área de atuação, suas contribuições para a nossa formação são imensuráveis.

Agradeço a Universidade Federal do Oeste do Pará pela oportunidade de experienciar a vida acadêmica, os eventos, as viagens e todo o conhecimento adquirido a partir disso, contribuindo para minha formação como profissional e ser humano.

RESUMO

O estudo avaliou a presença do vírus SARS-CoV-2 em amostras de esgoto bruto coletadas em nove Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) na zona urbana do município de Santarém-PA, entre abril e dezembro de 2023, com o objetivo de identificar possíveis subnotificações de casos de COVID-19 e aprofundar a compreensão da dinâmica da doença. Das 104 amostras analisadas, 59 apresentaram resultado positivo para SARS-CoV-2, indicando circulação viral na comunidade. Os resultados revelaram um aumento na circulação viral nos meses de agosto, setembro e outubro de 2023, coincidindo com um período de baixo número de casos, sugerindo subnotificação. A Epidemiologia Baseada em Esgoto (EBE) demonstrou ser uma ferramenta valiosa para monitorar a COVID-19, especialmente em regiões com limitações na testagem clínica. O estudo destaca a importância da EBE como sistema de alerta precoce para surtos e como estratégia complementar aos métodos tradicionais de vigilância.

Palavras-chave: Águas Residuais; Vigilância Epidemiológica; COVID-19

ABSTRACT

This study evaluated the presence of SARS-CoV-2 in raw sewage samples collected from nine Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in the urban area of Santarém-PA, Brazil, between April and December 2023. The objective was to identify potential underreporting of COVID-19 cases and enhance the understanding of the disease's dynamics. Among the 104 samples analyzed, 59 tested positive for SARS-CoV-2, indicating community viral circulation. The results revealed an increase in viral circulation during August, September, and October 2023, coinciding with a period of low reported cases, suggesting underreporting. Wastewater-Based Epidemiology (WBE) proved to be a valuable tool for monitoring COVID-19, especially in regions with limited clinical testing. The study highlights the importance of WBE as an early warning system for outbreaks and as a complementary strategy to traditional surveillance methods.

Keywords: Wastewater; Epidemiological Surveillance; COVID-19.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa da zona urbana de Santarém-PA.....	20
Figura 2 - Fluxograma do processo de coleta de águas residuais.....	21
Quadro 1 - Identificação dos pontos e número de coletas realizadas.....	22
Gráfico 1 - Concentração viral normalizada nos pontos de coleta por semana epidemiológica entre abril e dezembro de 2023.....	25
Gráfico 2 - Carga viral identificada e casos de COVID-19.....	27

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

COVID-19 – Doença do Coronavírus 2019 (Coronavirus Disease 2019)

Cosanpa – Companhia de Saneamento do Pará

EBE – Epidemiologia Baseada em Esgoto

EEE – Estação Elevatória de Esgoto

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

MERS-CoV – Coronavírus da Síndrome Respiratória do Oriente Médio (Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus)

OMS – Organização Mundial da Saúde

PBS – Tampão Salina-Fosfato (Phosphate-Buffered Saline)

PEG – Polietilenoglicol (Polyethylene Glycol)

RPI – Índice de Prevalência Relativa

RNA – Ácido Ribonucleico

RNase – Ribonuclease

RT-qPCR – Reação em Cadeia da Polimerase via Transcriptase Reversa quantitativa (Reverse Transcription Quantitative Polymerase Chain Reaction)

SARS-CoV-2 – Coronavírus da Síndrome Respiratória Aguda Grave 2 (Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2)

Sinan – Sistema de Informação de Agravos de Notificação

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

+ssRNA – RNA de fita simples positiva (Positive-sense Single-Stranded RNA)

UASB – Reator Anaeróbico de Manta de Lodo de Fluxo Ascendente (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

UBOX – Unidade Pré-moldada de Inspeção em Formato de Caixa, utilizada em sistemas de esgotamento sanitário ou drenagem pluvial.

VOCs – Variantes de Preocupação (Variants of Concern)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1 Características gerais do SARS-CoV-2.....	12
2.2 Variantes de SARS-Cov-2	13
2.3 Saneamento Básico e Saúde Pública em Santarém-PA.....	14
2.4 Histórico do LABIMOL e sua importância para Santarém e região	17
3 OBJETIVOS.....	18
3.1 Objetivo Geral	18
3.2 Objetivos Específicos.....	18
4 MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1 Área de estudo.....	18
4.2 Coleta e preparo das amostras	20
4.3 Concentração, extração e purificação de RNA viral	22
4.4 Quantificação Viral	23
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
7 REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

A pandemia de COVID-19, causada pelo vírus SARS-CoV-2 expôs as fragilidades dos sistemas de saúde pública em todo o mundo, especialmente em regiões com recursos limitados como o Brasil (SILVA et al., 2023). A vigilância epidemiológica tradicional, baseada na notificação individual de casos e na testagem clínica, mostrou-se insuficiente para acompanhar a rápida disseminação do vírus, resultando em subnotificação e atrasos na implementação de medidas de controle eficazes (AGUIAR-OLIVEIRA et al., 2020). Neste contexto, a Epidemiologia Baseada em Esgoto (EBE) emerge como uma ferramenta inovadora e complementar, capaz de fornecer informações valiosas sobre a saúde da população por meio da análise de águas residuais (POLO et al., 2020).

A EBE baseia-se no princípio de que indivíduos infectados, sintomáticos ou assintomáticos, eliminam patógenos em suas fezes e urina, que são transportados pela rede de esgoto (XAGORARAKI; O'BRIEN, 2020). A eficácia dessa abordagem para monitoramento de agentes infecciosos está bem documentada na literatura científica. Em Belo Horizonte-MG, o monitoramento detectou RNA de SARS-CoV-2 em 100% das regiões analisadas durante o pico epidemiológico, com carga viral no esgoto superando em até 20 vezes o número de casos clínicos confirmados, revelando a capacidade da EBE para captar infecções não diagnosticadas, inclusive em populações assintomáticas (CHERNICHARO et al. 2021). Já em São José do Rio Preto-SP, um estudo longitudinal de um ano demonstrou que as variações na concentração viral no esgoto antecederam em média cinco dias o registro de novos casos clínicos. Além disso, identificou correlações significativas entre a carga viral e fatores ambientais, como temperatura e vazão do esgoto (MARTINS, 2022). Na Holanda, a análise em seis cidades e no aeroporto de Schiphol revelou que o RNA viral de SARS-CoV-2 foi detectado no esgoto seis dias antes da notificação do primeiro caso clínico, com as concentrações aumentando progressivamente conforme a epidemia avançava (MEDEMA et al., 2020).

Pesquisas também demonstram que o método é valioso para vírus entéricos, como evidenciado por um estudo na Suécia que detectou norovírus em esgotos semanas antes da identificação de surtos clínicos (HELLMER et al., 2014). No contexto de doenças erradicadas clinicamente, como a poliomielite, a OMS

recomenda oficialmente a vigilância ambiental como componente essencial dos programas de erradicação, destacando sua sensibilidade superior em áreas de baixa transmissão (OMS, 2022). Dessa forma, a análise do RNA do SARS-CoV-2 em amostras de esgoto mostrou-se eficaz para estimar a prevalência do vírus, identificar tendências de aumento ou diminuição da carga viral e até detectar variantes emergentes, mesmo em regiões com baixa testagem clínica (MENDES et al., 2022; MARTIN et al., 2020). Esse método pode servir como um sistema de alerta precoce para surtos de COVID-19, detectando a presença do vírus no esgoto dias antes do aumento de casos notificados (RANDAZZO et al., 2020).

O município de Santarém, localizado no oeste do estado do Pará, apresenta um contexto desafiador para o controle de doenças infecciosas, com desigualdades sociais e o saneamento básico atendendo apenas 3,81% da população (BRASIL, 2022). A falta de acesso à água tratada e a coleta e tratamento inadequado de esgoto contribuem para a propagação de doenças e dificultam a implementação de medidas de higiene eficazes. No entanto, o monitoramento em ETEs, tanto públicas como privadas, mostra-se como uma alternativa viável para identificar tendências de transmissão comunitária e orientar de forma antecipada medidas de resposta a surtos de doenças virais (ORIVE et al., 2020), demonstrando que mesmo regiões com saneamento precário podem se beneficiar da metodologia, ainda que requeiram adaptações para compensar as deficiências estruturais regionais (BARBOSA et al., 2022).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Características gerais do SARS-CoV-2

A COVID-19, doença causada pelo coronavírus SARS-CoV-2, foi oficialmente declarada uma pandemia pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 11 de março de 2020. Esse anúncio ocorreu quando o vírus já havia se espalhado para mais de 100 países, com aproximadamente 118.000 casos confirmados e 4.291 mortes registradas em todo o mundo (OMS, 2020). A declaração representou um marco na resposta global à doença, que teve seu início identificado em dezembro de 2019, quando os primeiros casos de pneumonia de causa desconhecida foram reportados em Wuhan, na China (HUANG et al., 2020).

O SARS-CoV-2 pertence à família Coronaviridae, gênero *Betacoronavirus*, que inclui outros vírus responsáveis por surtos graves nas últimas décadas, como o SARS-CoV (2002-2003) e o MERS-CoV (2012) (CUI; LI; SHI, 2019). Esta família de vírus é caracterizada por causar infecções respiratórias em humanos e outros animais, com manifestações que variam desde resfriados comuns até síndromes respiratórias agudas graves (HUANG et al., 2020).

Estruturalmente, o SARS-CoV-2 apresenta três componentes principais que definem sua capacidade infecciosa. Primeiramente, seu material genético consiste em um RNA de fita simples positiva (+ssRNA) com aproximadamente 30.000 nucleotídeos, um dos maiores genomas entre os vírus de RNA (FEHR; PERLMAN, 2015). O vírus é envolto por um envelope lipídico derivado da membrana celular do hospedeiro, uma característica compartilhada por muitos vírus +ssRNA (como dengue e HIV) num processo em que as proteínas virais substituem a maioria das proteínas celulares, característica que o torna sensível a desinfetantes como álcool 70% (KAMPF et al., 2020). Na superfície viral, destacam-se as projeções formadas pelas proteínas *spike* (S), que criam a aparência de coroa característica dos coronavírus e que mediam a entrada nas células alvo do hospedeiro (WALLS et al., 2020).

O ciclo de infecção pelo SARS-CoV-2 apresenta características temporais bem estabelecidas na literatura científica. Pesquisas indicam que a excreção viral nas fezes se inicia entre 2 e 3 dias após a infecção, com estudos demonstrando detecção de RNA viral já no primeiro dia de sintomas em pacientes sintomáticos

(ZHANG et al., 2020). O pico de excreção ocorre tipicamente de 5 a 7 dias após a infecção, conforme observado em análises longitudinais de carga viral (XU et al., 2021), podendo persistir por períodos variáveis de 1-3 semanas em diferentes indivíduos. O período de incubação mostra variação considerável, com a maioria dos estudos reportando médias de 5 dias, embora alguns casos possam se estender até 14 dias (MCALOON et al., 2020). A excreção respiratória atinge seu ápice geralmente 1-2 dias antes do surgimento de sintomas, conforme demonstrado em estudos de transmissibilidade (HE et al., 2020), enquanto a excreção fecal pode ocorrer independentemente da presença de sintomas, sendo observada tanto em casos sintomáticos quanto assintomáticos ((WU et al., 2020).

2.2 Variantes de SARS-Cov-2

A pandemia evidenciou a importância de compreender os mecanismos de evolução viral e suas implicações para a saúde pública. O SARS-CoV-2, como outros vírus de RNA, apresenta alta taxa de mutação, o que favorece o surgimento de novas variantes. Entre os fatores que influenciam essa evolução, destacam-se a pressão seletiva exercida pela imunidade populacional (tanto natural quanto vacinal) e a ampla circulação do vírus. Esses processos levaram ao surgimento e a circulação de variantes com características distintas, especialmente na proteína *Spike*, que desempenha papel crucial na infecção viral e é o principal alvo da resposta imune. (OMS, 2021).

Tais mutações podem alterar a infectividade, transmissibilidade e capacidade de escape imunológico do vírus (HARVEY et al., 2021). Dentre as Variantes de Preocupação (VOCs), destacam-se a Alpha (maior transmissibilidade), Beta e Gamma (escape imunológico parcial), Delta (maior virulência) e Ômicron, sendo esta o maior desafio para a imunidade adquirida (escape vacinal significativo) (HARVEY et al., 2021; FARAONE et al., 2023). Assim, a compreensão detalhada dessas características estruturais tornou-se fundamental para orientar as estratégias de diagnóstico, prevenção e tratamento durante toda a pandemia (DENG et al., 2020).

Com o surgimento de subvariantes cada vez mais transmissíveis e com maior escape imunológico, a EBE ganha nova dimensão e múltiplas interpretações,

o que requer a integração de dados genômicos com informações clínicas, epidemiológicas e ambientais, como as obtidas por meio da EBE. A análise genômica de amostras ambientais permite rastrear a dinâmica espacial e temporal dessas subvariantes a nível populacional em diferentes contextos, superando limitações da testagem individual (HAQUE et al., 2023).

Diversos estudos demonstram que países que implementaram sistemas robustos de sequenciamento, como Reino Unido e África do Sul, foram capazes de identificar precocemente variantes preocupantes (VOLZ et al., 2021; TEGALLY et al., 2021). No Brasil, a detecção da variante Gamma em Manaus-AM (FARIA et al., 2021) evidenciou a necessidade de manter uma rede de alerta rápido capaz de identificar ameaças emergentes a partir da integração da vigilância genômica com dados clínicos e epidemiológicos para melhor compreensão da dinâmica viral (GRUBAUGH et al., 2021).

A vigilância genômica associada à EBE se torna, então, fundamental para orientar estratégias de saúde pública, como a vacinação e o monitoramento de variantes emergentes. Essas abordagens permitem a detecção precoce de variantes do SARS-CoV-2 em esgotos, antecipando em até 16 dias as tendências observadas nos dados clínicos, o que potencializa a capacidade de resposta das autoridades de saúde. Além disso, a EBE supera limitações como viés de amostragem e custos elevados, oferecendo dados representativos e em tempo real para a tomada de decisão. A integração dessas informações genômicas com dados clínicos e epidemiológicos é essencial para avaliar a eficácia de tratamentos e antecipar possíveis surtos, reforçando a importância da vigilância ambiental no contexto da saúde pública (XU et al., 2023).

2.3 Saneamento Básico e Saúde Pública em Santarém-PA

O município de Santarém, localizado no oeste do Pará, enfrenta graves desafios no sistema de saneamento básico, especialmente no esgotamento sanitário. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), o município possui um dos menores percentuais de cobertura de coleta de esgoto entre os 100 mais populosos do Brasil, com apenas 3,81% da população atendida, índice muito abaixo da média nacional, que foi de 56% no

mesmo ano. Essa deficiência se reflete na posição do município no Ranking do Saneamento, onde figura entre os 20 piores, ocupando a 98ª colocação no indicador de Atendimento Total de Esgoto, além da 96ª posição no Ranking de Saneamento em Tratamento e está entre as cidades com menor investimento per capita (R\$ 34,30/habitante/ano entre 2018-2022), muito abaixo do necessário para a universalização do serviço (R\$ 231,09). Além disso, ainda apresenta as maiores perdas de água (1.537,70 L/ligação/dia em 2022), ficando em último lugar nesse indicador (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2024).

A infraestrutura existente é centralizada, composta por redes coletoras, transporte, tratamento e disposição final. Santarém conta com duas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e uma Estação Elevatória de Esgoto (EEE):

- ETE Irurá: opera desde 2016, projetada para ter oito módulos com capacidade para 25 mil habitantes (50 L/s) cada, porém foram construídos apenas dois, funcionando somente um, abaixo da capacidade.
- ETE Urumari: projetada para ter um módulo que atenderia 25 mil habitantes (50 L/s) e permitir expansões futuras, mas as obras nunca foram finalizadas e a estação também opera muito abaixo da capacidade.
- EEE Salvação: projetada para bombear os esgotos do Residencial Salvação, do programa Minha Casa Minha Vida, até um ponto elevado na Rodovia Fernando Guilhon, de onde seguem por gravidade até a ETE Irurá, que se encontrava subutilizada devido à ausência de redes, coletores e elevatórias previstas no projeto original. A implantação da estação elevatória foi, portanto, fundamental para viabilizar a operação parcial da ETE Irurá, sendo atualmente a sua principal fonte de esgoto tratado. Atende uma rede coletora de 21,9 km com 3.195 mil ligações residenciais.

Ambas as ETEs utilizam o sistema UBOX, com reatores anaeróbios e aeróbios, seguindo as etapas de tratamento primário (remoção de sólidos), secundário (degradação de matéria orgânica) e terciário (desinfecção com cloro). A infraestrutura existente apresenta graves deficiências, o que resulta no lançamento

direto de esgoto *in natura* em Igarapés e nos rios Tapajós e Amazonas (DO NASCIMENTO MONTE et al., 2021). Todas as estações operam abaixo da capacidade projetada pela falta de manutenção preventiva, carência de fiscalização e insuficiência de investimentos, causando entupimentos e vazamentos (OLIVEIRA et al., 2020). Diante disso, a população recorre a soluções inadequadas como fossas sépticas, rudimentares, valas a céu aberto ou lançamento direto em corpos d'água. A expansão da rede coletora é custosa, sistemas descentralizados (como reatores UASB) seriam boas alternativas nesse cenário, especialmente em áreas periféricas e em processo de expansão urbana, não atendidas pelas redes convencionais (CUNHA et al., 2024).

As consequências ambientais e sanitárias desse quadro são extremamente preocupantes. Estudos realizados na orla de Santarém em 2018 detectaram concentrações alarmantes de coliformes totais e *Escherichia coli* (*E. coli*) nas águas do Rio Tapajós, ultrapassando em muito os limites estabelecidos por órgãos reguladores. Além da contaminação microbiológica, o lançamento de esgoto não tratado introduz quantidades excessivas de nutrientes como fósforo e nitrogênio nos corpos hídricos, favorecendo processos de eutrofização e o surgimento de florações de cianobactérias tóxicas no rio Tapajós (DO NASCIMENTO MONTE et al., 2021). O problema se agrava pelo fato de que os peixes, base da alimentação local, podem, ainda, atuar como vetores secundários de contaminação, criando uma cadeia de transmissão de patógenos (como a *Vibrio cholerae* e *Salmonella spp*) que vai além do contato direto com a água poluída (DO NASCIMENTO MONTE et al., 2021).

O panorama reflete as disparidades regionais do saneamento no Brasil, especialmente na Amazônia, onde investimentos insuficientes e a gestão fragilizada comprometem a universalização do serviço (SANTARÉM, 2019). Essa realidade sanitária, portanto, contribui significativamente para o risco epidemiológico na região, pois a contaminação hídrica facilita a disseminação de patógenos, incluindo o SARS-CoV-2, cujo RNA pode persistir em esgoto não tratado (WURTZER et al., 2021; ROLLEMBERG et al. 2020). Tais limitações estruturais impõem desafios para a implementação da EBE na região e demandam adaptações metodológicas e altos investimentos em estrutura e equipamentos.

2.4 Histórico do LABIMOL e sua importância para Santarém e região

O Laboratório de Biologia Molecular (LABIMOL) foi inaugurado em 10 de julho de 2020, nas dependências do Hospital Regional do Baixo Amazonas (HRBA), em Santarém, como uma iniciativa conjunta entre a Universidade Federal do Oeste do Pará e a Secretaria de Saúde Pública do Pará. Surgiu em um contexto crítico da pandemia de COVID-19, quando a testagem no estado estava centralizada em Belém, gerando atrasos no diagnóstico e sobrecarga no sistema de saúde. Com capacidade inicial para processar diariamente 200 exames de RT-PCR para o diagnóstico da Covid-19 na região oeste do Estado do Pará, o LABIMOL representou um marco na descentralização da testagem, permitindo respostas mais ágeis e eficientes no enfrentamento da pandemia.

Em fevereiro de 2021, o LABIMOL foi reinaugurado nas dependências da UFOPA, integrando-se à Central Analítica da universidade. Essa mudança ampliou sua atuação, transformando-o não apenas em uma estrutura de diagnóstico, mas também em um centro de pesquisa multidisciplinar voltado para a saúde e meio ambiente. Equipado com tecnologia de ponta, como termocicladores em tempo real e infraestrutura para análises genômicas, o laboratório passou a apoiar projetos além da COVID-19, incluindo estudos sobre outras doenças infecciosas e pesquisas em biologia molecular. Como o passar do tempo, diversas doenças endêmicas passaram a ser diagnosticadas pelo LABIMOL, como a Dengue, Zika vírus, Chikungunya, Influenza A e Influenza B e Histoplasmose. Essa transição fortaleceu a conexão entre ciência, saúde pública e formação acadêmica, consolidando o LABIMOL como um polo de inovação na Amazônia.

Durante a pandemia, o LABIMOL desempenhou um papel crucial na vigilância epidemiológica regional, processando mais de 30 mil testes RT-PCR e atendendo a 21 municípios do Oeste do Pará. Sua atuação permitiu a identificação precoce de casos, o monitoramento de variantes do SARS-CoV-2 e a otimização de recursos hospitalares. Além disso, o laboratório tem sido fundamental para estudos inovadores, como este trabalho que utiliza a Epidemiologia Baseada em Esgoto (EBE), demonstrando sua capacidade de adaptação a novas abordagens científicas. Tais contribuições destacam sua importância não apenas para o diagnóstico, mas também para a geração de conhecimento aplicado à saúde pública.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Determinar a presença e a concentração de RNA de SARS-CoV-2 em amostras de esgoto bruto coletadas em nove pontos da zona urbana de Santarém-PA.

3.2 Objetivos Específicos

Identificar áreas com maior circulação de SARS-CoV-2 na zona urbana do município de Santarém-PA.

Comparar a incidência de SARS-CoV-2 no esgoto ao longo do tempo com os dados oficiais de casos de COVID-19 no município de Santarém-PA.

Avaliar a eficácia da Epidemiologia Baseada em Esgoto como ferramenta complementar do monitoramento da COVID-19 no contexto amazônico.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

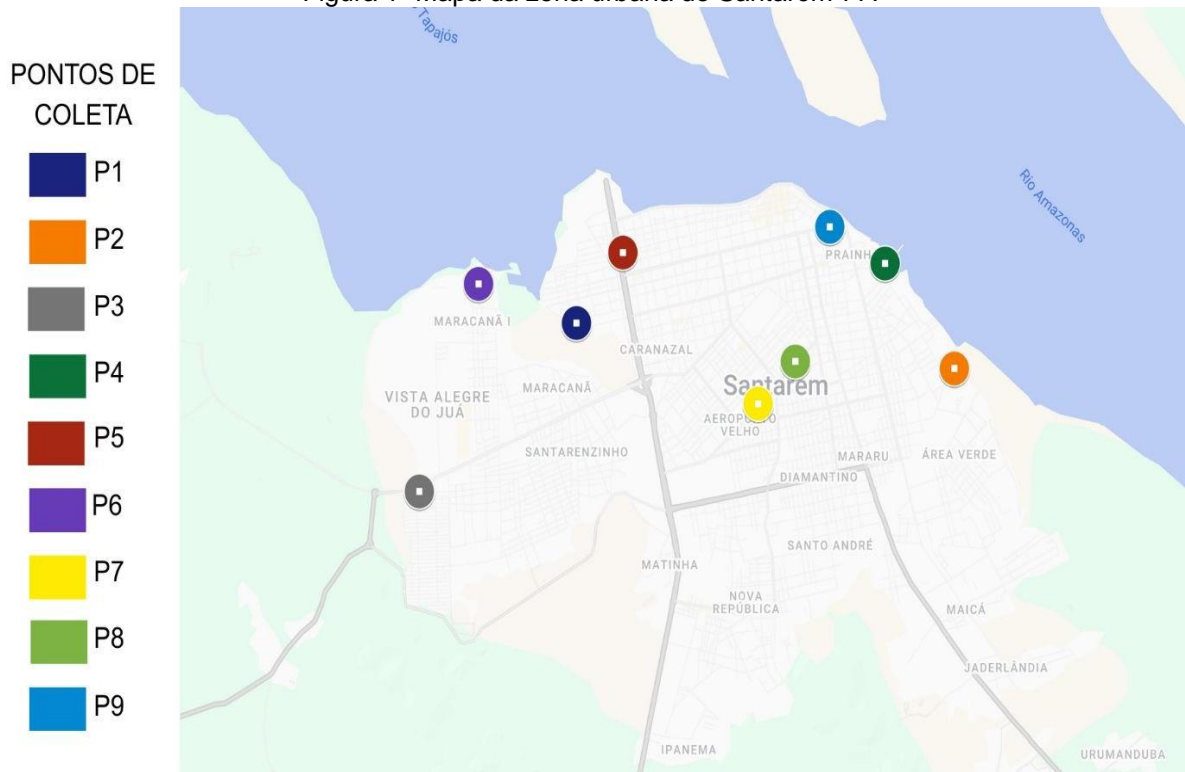
4.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido no município de Santarém, localizado na região oeste do Estado do Pará, Brasil. Foram selecionadas nove Estações de Tratamento de Esgoto distribuídas em diferentes locais da zona urbana do município, conforme ilustrado na figura 1. A escolha dos pontos de coleta considerou a representatividade de diferentes áreas da cidade.

- P1: Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Irurá: Localizada no bairro Mapiri, recebe a maior parte dos efluentes de cerca de 3.195 mil residências do programa Minha Casa Minha Vida, localizadas no bairro Salvação, além de parte da região central da cidade. Sua vazão média estimada é de 2.400 m³/dia (27,78 L/s)

- P2: Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Urumari: Localizada no bairro Uruará, atende um total de 1.500 habitantes. Sua vazão média estimada é de 180 m³/dia (2,08 L/s).
- P3: Estação Elevatória de Esgoto do Residencial Salvação: Localizada no bairro Salvação, essa estação bombeia o esgoto bruto para a ETE Irurá (P1). Sua vazão média estimada é de 2.400 m³/dia (27,78 L/s).
- P4: Terminal Hidroviário de Santarém: Localizado no bairro Prainha, este terminal recebe passageiros de toda a região Oeste do Pará e de estados vizinhos, com um fluxo médio de 3.500 pessoas por dia. Sua vazão média estimada é de 16,4 m³/dia (0,19 L/s).
- P5: Residencial Izabel Parente (Aldeia): Localizado em um ponto estratégico da cidade, próximo ao centro, este residencial é ocupado por cerca de 226 pessoas. Sua vazão média estimada é de 27,12 m³/dia (0,31 L/s).
- P6: Condomínio Praia Ville Residence (Maracanã): Localizado em uma área de intensa movimentação da população, por possuir a segunda maior orla da cidade (praia do Maracanã), este residencial abriga cerca de 352 pessoas. Sua vazão média estimada é de 42,24 m³/dia (0,49 L/s).
- P7: Residencial Bouganville (Aeroporto Velho): Localizado na região central da área urbana da cidade, com intensa presença de moradias e situado nas proximidades do Hospital Regional do Baixo Amazonas, este residencial é ocupado por cerca de 184 pessoas. Sua vazão média estimada é de 22,08 m³/dia (0,25 L/s).
- P8: Gran Ville Residence (Aeroporto Velho): Localizado praticamente no centro da área urbana da cidade, com intensa presença de moradias e situado nas proximidades do Hospital Regional do Baixo Amazonas, este residencial é ocupado por cerca de 427 pessoas. Sua vazão média estimada é de 51,24 m³/dia (0,59 L/s).
- P9: Edifício Mirage (Aldeia): Localizado no centro da área urbana da cidade, com intensa presença de moradias e comércios, este residencial é ocupado por cerca de 151 pessoas. Sua vazão média estimada é de 18,12 m³/dia (0,21 L/s).

Figura 1- Mapa da zona urbana de Santarém-PA



Fonte: Elaboração própria (2025)

4.2 Coleta e preparo das amostras

As coletas foram realizadas a cada 14 dias durante os meses de abril a dezembro de 2023. As amostras foram coletadas a partir dos afluentes (esgoto bruto) das estações de tratamento, às 8h da manhã, utilizando baldes de 5L e 15L, funil e peneira para filtrar partículas sólidas. As coletas foram feitas em cinco etapas, com intervalos de 10 minutos entre cada uma, utilizando o balde menor para passar o esgoto ao balde maior, através da peneira. Ao final da quinta coleta, o material era homogeneizado e um volume de 500 mL da amostra transferidos para um frasco lacrado e previamente identificado, em seguida transportado em caixas de isopor com gelo artificial/reutilizável e armazenado em ultrafreezer a uma temperatura de -80°C, conforme ilustrado no fluxograma da figura 2.

Figura 2 – Fluxograma do processo de coleta de águas residuais



Fonte: Elaboração própria (2025)

O processo ilustrado na figura 2, desde a coleta *in loco* até o armazenamento das amostras, foi replicado em todos os pontos de coleta. Considerando a periodicidade estabelecida e a distribuição espacial em nove pontos estratégicos, o estudo totalizou amostras de 104 coletas, obtidas entre os meses de abril a dezembro de 2023. O quadro 1, ilustrado abaixo, consolida esse esforço amostral, indicando a quantidade de amostras obtidas em cada ponto de monitoramento no período estudado.

Quadro 1 - Identificação dos pontos e número de coletas realizadas

IDENTIFICAÇÃO	PONTO DE COLETA	BAIRRO	NÚMERO DE COLETAS
P1	ETE Irurá	Mapiri	2
P2	ETE Urumari	Uruará	3
P3	EEE Salvação	Residencial Salvação	2
P4	Terminal Hidroviário	Prainha	16
P5	Residencial Izabel Parente	Aldeia	19
P6	Praia Ville Residence	Maracanã	16
P7	Residencial Bouganville	Aeroporto Velho	19
P8	Gran Ville Residence	Aeroporto Velho	8
P9	Edifício Mirage	Aldeia	19

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto; EEE: Estação Elevatória de Esgoto
 Fonte: Elaboração própria (2025)

Importante destacar a interrupção nas coletas nos pontos P1, P2 e P3 durante a semana epidemiológica 24, devido problemas burocráticos com a Companhia de Saneamento do Pará (Cosanpa), que impossibilitou a realização de coletas durante o período de junho a dezembro.

4.3 Concentração, extração e purificação de RNA viral

As análises das amostras foram realizadas utilizando a metodologia descrita por Cabral et al. (2020), com pequenas adaptações.

As amostras foram descongeladas e precipitadas com a utilização de polietilenoglicol (PEG). Uma alíquota de 40 mL de esgoto bruto foi misturada com 4 g de PEG 8000 e 0,9 g de cloreto de sódio (NaCl) em um tubo de centrífuga de 50 mL. A amostra foi homogeneizada até a dissolução completa dos solutos e então centrifugada a 15.000 g por 60 minutos a 4°C. Após a centrifugação, o sobrenadante foi descartado, e o precipitado, contendo o material concentrado, dissolvido em 0,4 mL de solução tampão salina-fosfato (PBS).

Extração: O precipitado dissolvido em PBS foi transferido para um microtubo de polipropileno com capacidade para 1,5 mL. Adicionou-se 1 mL de fenol ácido ao microtubo, agitou-se vigorosamente e centrifugou-se a 12.000 g por 10 minutos a

4°C. A fase aquosa, contendo macromoléculas solúveis, foi transferida para outro microtubo de 2 mL. Neste novo microtubo, adicionou-se 1 mL de Trizol e 200 µL de clorofórmio. A mistura foi homogeneizada e centrifugada a 12.000 g por 10 minutos a 4°C. A fase aquosa, agora contendo ácidos nucleicos (DNA e RNA), foi transferida para um microtubo de 2 mL contendo 1,5 mL de etanol absoluto. O microtubo foi homogeneizado por inversão e centrifugado a 12.000 g por 10 minutos a 4°C. O sobrenadante foi descartado e, o precipitado, lavado com 1 mL de etanol a 70%. Novamente, o microtubo foi homogeneizado por inversão e centrifugado a 12.000 g por 10 minutos a 4°C. O sobrenadante foi descartado e o microtubo invertido em papel absorvente para secar em temperatura ambiente.

Purificação: o precipitado seco, agora purificado, foi dissolvido em 40 µL de água ultrapura livre de RNase. O material foi armazenado em ultrafreezer a -80°C até o momento do uso.

4.4 Quantificação Viral

A quantificação de SARS-CoV-2 nas amostras de esgoto foi realizada mediante técnica de RT-qPCR, seguindo protocolo validado para detecção do material genético viral em matriz ambiental (CABRAL et al., 2020). Foram analisadas as regiões N1 e N2 do gene do nucleocapsídeo viral, utilizando sistema comercial específico para identificação do vírus.

As reações de amplificação foram conduzidas em equipamento termociclador (7500 PCR System, ABI) utilizando a metodologia TaqMan®. O programa padronizado incluiu etapa inicial de transcrição reversa a 50°C por 30 minutos. A amplificação subsequente consistiu em 40 ciclos de desnaturação a 95°C por 3 segundos e anelamento a 55°C por 30 segundos, com monitoramento contínuo da fluorescência.

Para calibração do sistema analítico, empregou-se curva padrão construída com diluições seriadas de controle positivo contendo sequências-alvo em concentrações conhecidas. Incluíram-se controles internos e réplicas de análise para verificação da qualidade dos resultados. O cálculo da concentração viral considerou os volumes de amostra processada e de eluição do material genético, conforme parâmetros estabelecidos na metodologia de referência (CABRAL et al., 2020).

A concentração média de RNA viral (cópias/ μ L) obtida pela reação de RT-qPCR em cada data de coleta foi normalizada com a vazão média estimada (L/d) de cada ponto de coleta (P1 a P9) e convertida em cópias por litro, facilitando a observação da dinâmica ao longo dos meses e permitindo uma comparação mais adequada da real presença de RNA do vírus SARS-CoV-2 em cada local de coleta. A fórmula adotada foi:

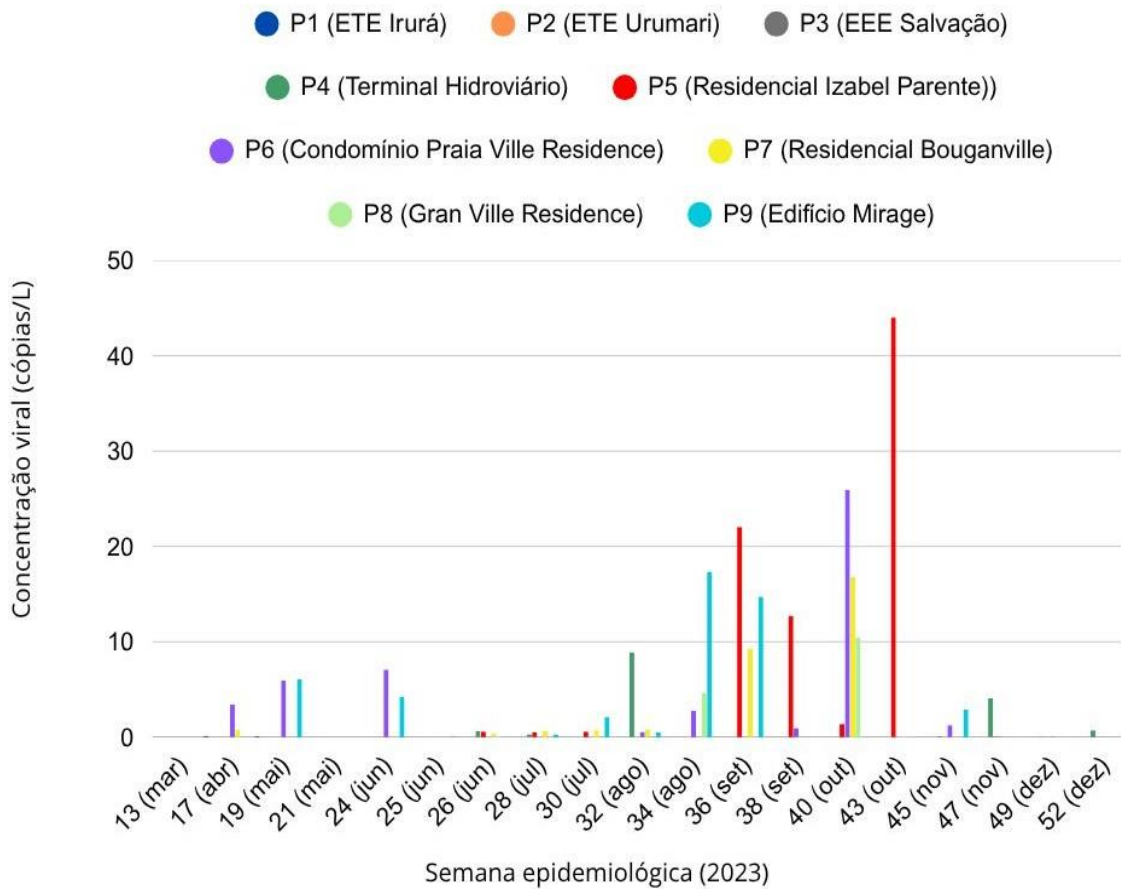
$$\text{Concentração Normalizada (cópias/L)} = (\text{Concentração Média (cópias}/\mu\text{L)} / \text{Vazão (L/d)}) \times 10^6$$

A partir desse cálculo obtivemos os dados para a elaboração do Gráfico 1. O Gráfico 2 foi elaborado utilizando os dados do Ministério da Saúde a partir de novos casos registrados no município de Santarém ao longo das semanas epidemiológicas correspondentes (SINAN, 2023), além da carga viral, obtida a partir da soma das concentrações normalizadas (cópias/L) de todos os pontos em uma mesma semana.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das coletas realizadas foram analisadas 104 amostras de águas residuárias coletadas em nove pontos estratégicos do município de Santarém, no período de abril a dezembro de 2023. Desse total, 59 amostras apresentaram resultado positivo para a presença de SARS-CoV-2, o que indica a circulação do vírus de forma intermitente, com maior frequência nos meses de agosto, setembro e, principalmente, outubro, período entre as semanas 32 a 43, sugerindo um aumento na circulação viral nesses meses. O Gráfico 1 demonstra essa variação nas concentrações em diferentes pontos, enquanto o Gráfico 2 representa a variação dos casos registrados no município e a carga viral detectada nos pontos de coleta durante o mesmo período.

Gráfico 1 – Concentração viral normalizada nos pontos de coleta por semana epidemiológica entre abril e dezembro de 2023.



Fonte: Elaboração própria (2024)

A ETE Irurá (P1) apresentou concentrações virais relativamente baixas ao longo do período estudado, indicando circulação viral consistente, porém em níveis moderados. Já as estações Urumari (P2) e Salvação (P3) não registraram nenhuma detecção de RNA viral, resultado que persiste mesmo considerando suas diferentes vazões e áreas de abrangência. Destaca-se o número menor de coletas nesses pontos devido a problemas burocráticos com a Cosanpa, que não permitiu acesso às instalações sob sua responsabilidade durante os meses de junho a dezembro.

O Terminal Hidroviário de Santarém (P4) apresentou uma dinâmica viral com grande variabilidade temporal. Foram observados dois picos expressivos: em agosto (semana 32) e novembro (semana 47), padrão que parece refletir diretamente o intenso fluxo de pessoas de diversas regiões que caracteriza este ponto de coleta.

No bairro Aldeia, os resultados revelaram padrões distintos entre os pontos monitorados. O residencial (P5) registrou variação significativa, com pico máximo de 44,0429 cópias/L em outubro (semana 43). Enquanto o edifício (P9) apresentou circulação viral mais dispersa, com detecções em agosto e setembro, sugerindo um padrão de transmissão diferente entre os locais analisados.

O residencial localizado no bairro do Maracanã (P6) destacou-se pela maior frequência de detecção, com resultados positivos em 15 das 16 amostras analisadas e pico de 25,9574 cópias/L em outubro (semana 43), padrão que, juntamente com os picos simultâneos observados em P5 e P7, sugere um evento epidêmico mais amplo na cidade durante o mês de outubro de 2023.

Os conjuntos residenciais localizados no bairro Aeroporto Velho (P7 e P8) mostraram comportamento similar, com detecções positivas em diversas datas e pico coincidente em outubro (semana 40).

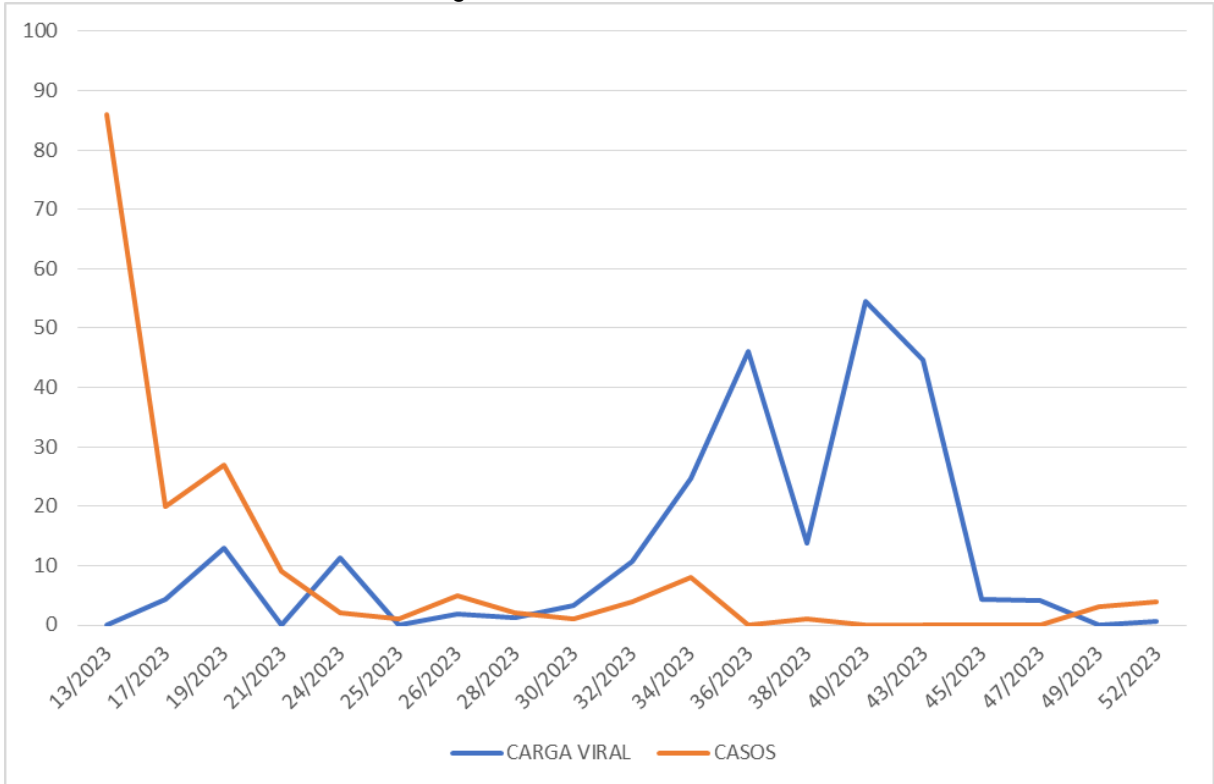
Quanto ao pico de carga viral observado em outubro de 2023, é necessário apontar que Santarém registrou condições climáticas atípicas, caracterizadas por uma acentuada redução nas chuvas e temperaturas significativamente acima da média histórica. O período, que normalmente marca o início da transição para a estação chuvosa na região, apresentou uma prolongada estiagem, com déficits pluviométricos que exacerbaram os impactos da seca já em curso na Amazônia (MARENGO et al., 2024). As temperaturas elevadas, associadas à baixa umidade relativa do ar, criaram um cenário climático extremo, com reflexos diretos nos ecossistemas locais e nos sistemas hídricos da região.

Estudos indicam que períodos de baixa pluviosidade estão associados a menores vazões nos sistemas de esgoto, resultando em uma menor diluição do material fecal e, conseqüentemente, em maiores concentrações do vírus (WILDER et al., 2021). Esses fatores destacam a importância de considerar as condições climáticas, especialmente a pluviosidade, na interpretação dos dados de vigilância baseada em esgotos, pois podem influenciar tanto a concentração quanto a estabilidade do RNA viral nas amostras.

A análise da circulação viral nos diferentes pontos de coleta revela padrões espaço-temporais que podem ser correlacionados com a dinâmica epidemiológica do município. Para contextualizar esses achados em relação ao cenário mais amplo, o Gráfico 2 compara a variação da carga viral total em cópias/L (somatório das

cargas virais por semana) com o número de casos de Covid-19 registrados oficialmente em Santarém, permitindo avaliar se os picos de RNA viral antecederam ou acompanharam as notificações clínicas.

Gráfico 2 – Carga viral identificada e casos de COVID-19



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados próprios (2025) e do Ministério da Saúde (2023).

A detecção do vírus SARS-CoV-2 nas águas residuais de Santarém iniciou-se somente em abril, na semana epidemiológica 17/2023, com amostras positivas em três pontos: P1, P6 e P7. Nessa semana foram registrados em Santarém 20 novos casos de COVID-19. Em maio de 2023 houve um aumento na detecção viral, com resultados positivos em P1, P6 e P9 na semana 19/2023, coincidindo com a notificação de 27 novos casos. Essa tendência diminuiu, tanto na detecção viral quanto no número de casos na semana 21/2023, com detecção apenas em P1 e nove casos de COVID-19 registrados.

Durante os meses de junho e julho de 2023, ou seja, da semana 24 a 30/2023, foi constatada uma queda nas concentrações de RNA viral nas amostras, apesar de detecções razoáveis em P6 e P9, além de concentrações baixas em P4, P5, P7 e P8. Essa redução na detecção viral acompanhou a tendência de queda nos

casos novos de COVID-19, que oscilaram entre 1 e 5 por semana nos meses de junho e julho.

Durante os meses de agosto e setembro de 2023, ou seja, da semana 32 a 38, foi um período de alta circulação viral nos esgotos de Santarém, com picos de concentração em P4, P5, P6, P7 e P9. As concentrações normalizadas subiram consideravelmente, apesar de apenas um leve aumento no número de casos notificados. Os valores pouco expressivos encontrados nas semanas 34/2023, apenas oito novos casos, e 36/2023, quando nenhum novo caso foi identificado, indicam um momento de possível surto subnotificado no município.

Apesar do aumento na concentração viral no esgoto em diversos pontos de coleta a partir da semana epidemiológica 34/2023, foi somente no mês de outubro que se observou o pico mais expressivo de carga viral, atingindo seu valor máximo na semana 43/2023. Esse mês também apresentou as maiores concentrações normalizadas dentre todo o período analisado. Curiosamente, durante essa semana de pico, nenhum novo caso foi registrado oficialmente, o que levanta questões importantes sobre a possível subnotificação de infecções na população do município de Santarém.

Após o pico de outubro, observou-se uma tendência de declínio na concentração viral nos meses subsequentes. Em novembro e dezembro de 2023, embora o vírus ainda fosse detectado, as cargas foram significativamente menores em comparação com o mês anterior. Essa redução na detecção viral coincidiu com uma diminuição no número de novos casos reportados, que variaram entre 0 e 4 por semana no mesmo período. No entanto, a persistência de positividade em P4 até o final de dezembro reforça a vulnerabilidade de áreas com alto fluxo de pessoas, mesmo em períodos de aparente baixa transmissão.

Diversos trabalhos têm demonstrado que alguns fatores contribuem para a subnotificação de casos de COVID-19, incluindo a limitação na disponibilidade de testes diagnósticos e as barreiras de acesso aos serviços de saúde, especialmente para casos leves (ORELLANA et al., 2020). Evidências demonstram que as estratégias de testagem tendem a priorizar pacientes com quadros graves, geralmente em contexto hospitalar, o que resulta em uma avaliação incompleta da transmissão comunitária (DE OLIVEIRA; ARAÚJO, 2020). Estudos de revisão sistemática indicam que a proporção de infecções assintomáticas pode atingir

aproximadamente 40% do total de casos, representando um desafio significativo para a vigilância epidemiológica tradicional (MA et al., 2021; WANG et al., 2023).

Análises recentes utilizando modelagem estatística identificaram padrões espaciais de risco diferenciado para transmissão comunitária em Santarém, com áreas como Mapiri, Uruará, Salvação, Aldeia, Maracanã e Aeroporto Velho sendo classificadas como de alto risco (GUEDES et al., 2024). Esses achados apresentam consistência com os resultados obtidos nas análises ambientais, mesmo considerando as limitações operacionais nas coletas realizadas nos pontos gerenciados pela Cosanpa.

A Epidemiologia Baseada em Esgoto (EBE) já demonstrou ser valiosa em outras regiões do Brasil. Em Santa Catarina, um estudo retrospectivo em Florianópolis detectou o vírus em amostras de esgoto coletadas em 27 de novembro de 2019, 66 dias antes do primeiro caso reportado nas Américas e 91 dias antes da confirmação oficial no país (FONGARO et al., 2020). As cargas virais mantiveram-se estáveis até fevereiro de 2020, quando um aumento significativo coincidiu com o primeiro diagnóstico clínico no estado. Esses achados não apenas anteciparam em meses a vigilância tradicional, como também sugeriram uma transmissão comunitária silenciosa durante o período pré-pandêmico. Outro estudo realizado nas cidades do ABC Paulista-SP, Foz do Iguaçu-PR e Distrito Federal-DF comprovou que a análise do esgoto pode antecipar surtos e revelar a circulação do vírus, inclusive em pessoas assintomáticas que não são detectadas pelos sistemas de saúde (BUENO et al., 2022). Pesquisas em Curitiba-PR confirmaram, ao longo de 20 meses, a sincronia entre a carga viral no esgoto e os casos clínicos (BELMONTE-LOPES et al., 2023). Já em Goiânia-GO, o monitoramento da ETE que recebe 70% do esgoto da capital trouxe contribuições para o entendimento da dinâmica viral durante diferentes fases da pandemia. Enquanto nos primeiros meses houve predominância de altas cargas virais associadas à baixa cobertura vacinal, o período posterior mostrou quedas significativas acompanhando a ampliação da imunização. Um achado relevante foi a detecção, em janeiro de 2022, de um aumento súbito da carga viral três semanas antes do crescimento de casos clínicos, coincidindo com a introdução da variante Ômicron na região (MENDES et al., 2022).

No contexto internacional, o monitoramento de SARS-CoV-2 em esgotos nas cidades de Lima, Callao e Arequipa, no Peru, realizado entre fevereiro e outubro de

2021, abrangeu 7 milhões de habitantes (65% da população de Lima/Callao) e 800 mil em Arequipa, utilizando pontos estratégicos em redes de esgoto e estações de tratamento. Os resultados mostraram forte correlação entre as cargas virais detectadas e os indicadores de saúde, como ocupação de leitos e mortalidade, além de antecipar em semanas o surgimento de novas ondas da COVID-19. Um achado relevante foi a identificação de *hotspots* em áreas de baixa renda e alta circulação turística, como no centro de Arequipa, onde o Índice de Prevalência Relativa (RPI) atingiu valores significativos durante a segunda onda de contágio. A pesquisa também destacou desafios, como a heterogeneidade socioeconômica e a cobertura limitada da rede de esgoto em regiões periféricas, que podem subestimar a prevalência real (SANTA-MARIA et al., 2022).

Na Índia, a vigilância em esgotos nas cidades de Bengaluru abrangeu 11 milhões de habitantes, utilizando amostras semanais de 28 estações de tratamento de esgoto. A pesquisa permitiu a identificação de uma diversidade genômica significativa, com 152 linhagens do vírus detectadas, algumas das quais foram identificadas no esgoto até dois meses antes de serem registradas em amostras clínicas (LAMBA et al., 2023). O estudo também destacou a utilidade da vigilância baseada em esgoto para informar políticas públicas, como o reforço do uso de máscaras em áreas com alta carga viral.

Diversos trabalhos destacam a importância da EBE como estratégia metodológica para reduzir desigualdades no acesso à vigilância epidemiológica, atuando como um complemento às estratégias convencionais de notificação e testagem (SANTOS et al., 2021). Tais ações reforçam o potencial da EBE como ferramenta descentralizada e adaptável às realidades locais, comprovando sua aplicabilidade em países em desenvolvimento com infraestrutura sanitária deficiente e heterogênea. Esses resultados reforçam a validade da EBE para a vigilância epidemiológica, podendo melhorar o monitoramento de doenças em regiões com poucos recursos e infraestrutura deficiente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa evidenciou o potencial da EBE como ferramenta de apoio para monitorar a COVID-19 em Santarém, atuando como um sistema complementar

em um cenário marcado por baixos índices de testagem. A análise das amostras de esgoto coletadas entre abril e dezembro de 2023 revelou a presença consistente do vírus SARS-CoV-2 na população do município de Santarém, incluindo momentos em que o registro oficial de casos não representava a real dinâmica epidemiológica na cidade.

É importante reconhecer as limitações enfrentadas durante a pesquisa como a interrupção das coletas em pontos de maior cobertura, o que impactou a abrangência dos resultados. Além disso, dados mais detalhados, como a distribuição de casos por bairro, permitiriam uma compreensão ainda mais precisa e refinada do contexto estudado.

A detecção viral no esgoto antecipou ou acompanhou o aumento de casos notificados ao longo das semanas, corroborando a capacidade da EBE como um sistema de alerta precoce e identificação de locais mais vulneráveis. Essa descoberta reforça a necessidade de implementação de medidas preventivas direcionadas, a fim de mitigar a propagação do vírus.

Importante ressaltar que a EBE pode ser aplicada não apenas para o monitoramento da COVID-19, mas também para outras doenças infecciosas de relevância epidemiológica, como influenza, dengue e até mesmo patógenos resistentes a antimicrobianos. A ampliação dessa abordagem em Santarém poderia transformar o sistema de esgoto em uma ferramenta de vigilância em saúde pública mais abrangente, permitindo respostas mais ágeis e eficientes diante de surtos e epidemias. No entanto, para que isso seja possível, é fundamental o estabelecimento de parcerias entre instituições de pesquisa, gestores públicos e empresas de saneamento, garantindo a continuidade dos estudos e a integração dos dados gerados às políticas locais de saúde.

Por fim, é essencial destacar que investimentos em saneamento básico são indispensáveis para a saúde da população e para a implementação eficaz da EBE em Santarém e região. A universalização do acesso à água tratada e a coleta e tratamento adequado de esgoto são medidas urgentes para garantir a saúde pública e fortalecer as estratégias de vigilância epidemiológica na região norte.

7 REFERÊNCIAS

- AGUIAR-OLIVEIRA, M. L. et al. Wastewater-Based Epidemiology (WBE) and Viral Detection in Polluted Surface Water: A Valuable Tool for COVID-19 Surveillance —A Brief Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 24, p. 9251, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph17249251>. Acesso em: 10 jul. 2024.
- AHMED, W. et al. SARS-CoV-2 RNA monitoring in wastewater as a potential early warning system for COVID-19 transmission in the community: A temporal case study. **Science of the Total Environment**, v. 761, p. 144216, 20 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144216>. Acesso em: 15 mar. 2024.
- ANDERSEN, Kristian G.; RAMBAUT, Andrew; LIPKIN, W. Ian; HOLMES, Edward C.; GARRY, Robert F. The proximal origin of SARS-CoV-2. *Nature Medicine*, v. 26, p. 450-455, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0820-9>. Acesso em: 10 out. 2024.
- ASTUTI, I.; YSRAFIL. Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2): An overview of viral structure and host response. **Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews**, v. 14, p. 407-412, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2020.04.020>. Acesso em: 10 out. 2024.
- BARBOSA, M. R. F. et al. One-year surveillance of SARS-CoV-2 in wastewater from vulnerable urban communities in metropolitan São Paulo, Brazil. **Journal of Water and Health**, v. 20, n. 2, p. 471-490, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wh.2022.210>. Acesso em: 10 out. 2024.
- BELMONTE-LOPES, R. et al. 20-Month monitoring of SARS-CoV-2 in wastewater of Curitiba, in Southern Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 76687-76701, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27926-x>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- BERTELS, X. et al. Factors influencing SARS-CoV-2 RNA concentrations in wastewater up to the sampling stage: A systematic review. **Science of the Total Environment**, v. 820, p. 153290, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153290>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- BIVINS, A. et al. Wastewater-based epidemiology: Global collaborative to maximize contributions in the fight against COVID-19. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 13, p. 7754-7757, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02388>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Infoms: Coronavírus, 2020. Disponível em: https://infoms.saude.gov.br/extensions/covid-19_html/covid-19_html.html. Acesso em: 7 dez. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. Sinan: Sistema de Informação de Agravos de Notificação. Disponível em: <https://portalsinan.saude.gov.br/calendario-epidemiologico?layout=edit&id=173>. Acesso em: 7 dez. 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Esgotamento Sanitário - 2021. Brasília - DF: SNS/MDR, 2021.

BUENO, R. F. et al. Wastewater-based epidemiology: A Brazilian SARS-CoV-2 surveillance experience. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 3, p. 108298, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108298>. Acesso em: 10 abr. 2025.

BUSTIN, S. A.; NOLAN, T. RT-qPCR testing of SARS-CoV-2: A primer. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 21, n. 8, p. 3004, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms21083004>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CABRAL, A. D. et al. Padronização de método de concentração e extração de ácidos nucleicos em amostras de esgoto sanitário: uma ferramenta de baixo custo para ser utilizada na vigilância epidemiológica de SARS-CoV-2. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, p. 1-6, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200370>. Acesso em: 7 dez. 2024.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos et al. Monitoramento do esgoto como ferramenta de vigilância epidemiológica para controle da COVID-19: estudo de caso na cidade de Belo Horizonte. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, p. 691-699, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200243>. Acesso em: 10 out. 2024.

CUI, J.; LI, F.; SHI, Z. L. Origin and evolution of pathogenic coronaviruses. **Nature Reviews Microbiology**, v. 17, n. 3, p. 181–192, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0118-9>. Acesso em: 10 abr. 2024.

CUNHA, Alynekézia Feitoza et al. Estudo da eficiência físico-química em estações compactas de tratamento de efluentes em condomínios residenciais na cidade de Santarém, PA. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 10, p. e7071-e7071, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv22n10-062>. Acesso em: 10 jul. 2024

DO NASCIMENTO MONTE, Christiane et al. A influência antrópica na qualidade da água do rio Tapajós, na cidade de Santarém-PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 6, p. 3695-3710, 2021.

DE OLIVEIRA, Tiago Mendonça; ARAÚJO, Ana Carolina Oliveira. Consequências da subnotificação dos casos de COVID-19 para a saúde pública no Brasil. **InterAmerican Journal of Medicine and Health**, v. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.31005/iajmh.v3i0.150>. Acesso em: 12 nov. 2024.

DENG, Xianding et al. Genomic surveillance reveals multiple introductions of SARS-CoV-2 into Northern California. **Science**, v. 369, n. 6503, p. 582-587, 2020.

FARAONE, Julia N. et al. Neutralization escape of Omicron XBB, BR.2, and BA.2.3.20 subvariants. **Cell Reports Medicine**, v. 4, n. 5, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2023.101049>. Acesso em: 15 jul. 2024.

FARIA, Nuno R. et al. Genomics and epidemiology of the P.1 SARS-CoV-2 lineage in Manaus, Brazil. **Science**, v. 372, n. 6544, p. 815-821, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.abh2644>. Acesso em: 15 jan. 2025.

FEHR, A. R.; PERLMAN, S. Coronaviruses: an overview of their replication and pathogenesis. In: MAIER, H.; BICKERTON, E.; BRITTON, P. (ed.). **Coronaviruses. New York: Humana Press**, 2015. (Methods in Molecular Biology, v. 1282). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2438-7_1. Acesso em: 10 abr. 2025.

FERNANDES, J. da S. Epidemiologia Baseada Em Esgoto (EBE) - Análise atual e perspectivas futuras. **Revista Eletrônica Multidisciplinar de Investigação Científica**, Brasil, v. 2, n. 5, 2023. DOI: 10.56166/remici.2023.7.v2n5.6.47. Disponível em: <https://remici.com.br/index.php/revista/article/view/134>. Acesso em: 10 dez. 2024.

FONGARO, Gislaine et al. The presence of SARS-CoV-2 RNA in human sewage in Santa Catarina, Brazil, November 2019. **Science of The Total Environment**, v. 778, p. 146198, 2021.

GRUBAUGH, N. D. et al. Tracking virus outbreaks in the twenty-first century. **Nature Microbiology**, v. 4, p. 10–19, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41564-018-0296-2>. Acesso em: 11 abr. 2025.

GUEDES, Marco Antônio Barros et al. COVID-19 em Santarém-PA: investigação epidemiológica e implicações para a saúde pública. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 16, n. 10, p. e5773–e5773, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/cuadv16n10-022>. Acesso em: 10 dez. 2024.

HARVEY, W. T.; CARABELLI, A. M.; JACKSON, B. et al. SARS-CoV-2 variants, spike mutations and immune escape. **Nature Reviews Microbiology**, v. 19, p. 409-424, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00573-0>. Acesso em: 10 dez. 2024

HAQUE, Rehnuma et al. Monitoring SARS-CoV-2 variants in wastewater of Dhaka City, Bangladesh: approach to complement public health surveillance systems. **Human Genomics**, v. 17, n. 1, p. 58, 2023.

HE, X. et al. Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19. **Nature Medicine**, v. 26, p. 672-675, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0869-5>. Acesso em: 10 abr. 2025.

HELLMER, M. et al. Detection of Pathogenic Viruses in Sewage Provided Early Warnings of Hepatitis A Virus and Norovirus Outbreaks. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 80, n. 22, p. 6771-6781, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/AEM.01981-14>. Acesso em: 12 abr. 2025.

HUANG, Chaolin et al. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. **The Lancet**, v. 395, n. 10223, p. 497-506, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30183-5). Acesso em: 12 nov. 2024.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Ranking do saneamento do Instituto Trata Brasil de 2024 (SNIS 2022). São Paulo: Instituto Trata Brasil; GO Associados, 2024. Disponível em: <https://www.tratabrasil.org.br/ranking-do-saneamento>. Acesso em: 18 jan. 2025.

KAMPF, Günter et al. Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents. *Journal of Hospital Infection*, v. 104, n. 3, p. 246-251, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.01.022>. Acesso em: 18 jan. 2025.

KITAJIMA, Masaaki et al. SARS-CoV-2 in wastewater: State of the knowledge and research needs. **Science of the Total Environment**, v. 739, p. 139076, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139076>. Acesso em: 15 jan. 2025.

KORBER, Bette et al. Spike mutation pipeline reveals the emergence of a more transmissible form of SARS-CoV-2. **bioRxiv**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1101/2020.04.29.069054>. Acesso em: 22 fev. 2025.

LADEIRA, P. R. S. de; ISAAC, C.; FERREIRA, M. C. Reação em cadeia da polimerase da transcrição reversa em tempo real. **Revista de Medicina, São Paulo**, v. 90, n. 1, p. 47-51, 2011. <https://doi.org/10.11606/issn.1679-9836.v90i1p47-51>. Acesso em: 22 fev. 2024.

LAHOZ, Rodrigo Augusto Lazzari; DUARTE, Francisco Carlos. Saneamento básico e direito à saúde: considerações a partir do princípio da universalização dos serviços públicos. **Revista de Estudos Constitucionais, Hermenêutica e Teoria do Direito (RECHTD)**, v. 7, n. 1, p. 62-69, 2015.

LAMBA, Sanjay et al. SARS-CoV-2 infection dynamics and genomic surveillance to detect variants in wastewater – a longitudinal study in Bengaluru, India. **The Lancet Regional Health - Southeast Asia**, v. 11, 100151, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lansea.2023.100151>. Acesso em: 18 set. 2024.

MA, Qiuyue et al. Global percentage of asymptomatic SARS-CoV-2 infections among the tested population and individuals with confirmed COVID-19 diagnosis: a systematic review and meta-analysis. **JAMA Network Open**, v. 4, n. 12, p.e2137257-e2137257, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2021.37257>. Acesso em: 20 out. 2024.

MARENGO, Jose A.; CUNHA, Ana P.; ESPINOZA, Jhan-Carlo; FU, Rong; SCHÖNGART, Jochen et al. The drought of Amazonia in 2023-2024. **American Journal of Climate Change**, v. 13, n. 3, p. 567-597, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ajcc.2024.133026>. Acesso em: 10 abr. 2025.

MARTIN, J. et al. Tracking SARS-CoV-2 in sewage: evidence of changes in virus variant predominance during COVID-19 pandemic. **Viruses**, v. 12, n. 10, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4915/12/10/1144>. Acesso em: 11 abr. 2025.

MARTINS, Renan Moura. Detecção e vigilância do vírus SARS-CoV-2 em Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de São José do Rio Preto. 2022. 150 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/235792>. Acesso em: 15 jul. 2024.

MCALOON, C. et al. Incubation period of COVID-19: a rapid systematic review and meta-analysis of observational research. **BMJ Open**, v. 10, e039652, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-039652>. Acesso em: 11 abr. 2025.

MEDEMA, G. et al. Presence of SARS-Coronavirus-2 RNA in sewage and correlation with reported COVID-19 prevalence in the early stage of the epidemic in The Netherlands. **Environmental Science & Technology Letters, New York**, v. 7, n. 7, p. 511-516, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00357>. Acesso em: 25 fev. 2025.

MEDEMA, Gertjan et al. Implementation of environmental surveillance for SARS-CoV-2 virus to support public health decisions: opportunities and challenges. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 17, p. 49-71, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.09.006>. Acesso em: 20 mar. 2025

MENDES, G. M. et al. Monitoramento da carga viral de SARS-CoV-2 em águas residuais na cidade de Goiânia: epidemiologia baseada em esgoto e um sistema de alerta precoce para COVID-19. **Química Nova**, v. 45, n. 10, p. 1197- 1204, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170933>. Acesso em: 23 jul. 2024.

OLIVEIRA, Josciane Carneiro; HENRIQUE, Israel Nunes; DA SILVA LESS, Diani Fernanda. Caracterização do Sistema de Esgotamento Sanitário do Município de Santarém, Pará. **Engenharia Urbana em Debate**, v. 2, n. 1, p. 279-292, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.59550/engurbdebate.v2i1.59>. Acesso em: 15 jul. 2024.

ORELLANA, Jesem Douglas Yamall et al. Excesso de mortes durante a pandemia de COVID-19: subnotificação e desigualdades regionais no Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 37, e00259120, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-311X00259120>. Acesso em: 15 dez. 2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Declaração do Diretor-Geral da OMS na coletiva de imprensa sobre COVID-19 — 11 de março de 2020. Genebra: OMS, 2020. Disponível em: https://www.who.int/news-room/speeches/item/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19_11-march-2020. Acesso em: 12 fev. 2025.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Genomic sequencing of SARS-CoV-2: a guide to implementation for maximum impact on public health. World Health Organization, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240018440>. Acesso em: 20 mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Global guidance for environmental surveillance of poliovirus circulation. Genebra: World Health Organization, 2022. (WHO/Polio/22.04). Disponível em: https://polioeradication.org/wp-content/uploads/2016/07/WHO_V-B_03.03_eng.pdf. Acesso em: 20 mar. 2025.

ORIVE, Gorka; LERTXUNDI, Unax; BARCELO, Damia. Early SARS-CoV-2 outbreak detection by sewage-based epidemiology. **Science of The Total Environment**, v. 732, p. 139298, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139298>. Acesso em: 20 mar. 2025.

PEACCIA, Jordan et al. Measurement of SARS-CoV-2 RNA in wastewater tracks community infection dynamics. **Nature Biotechnology**, v. 38, p. 1164-1167, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0684-z>. Acesso em: 26 mar. 2025.

PLATTO, S. et al. History of the COVID-19 pandemic: Origin, explosion, worldwide spreading. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, v. 538, p. 14-23, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2020.10.087>. Acesso em: 26 mar. 2025.

POLO, David et al. Making waves: wastewater-based epidemiology for COVID-19 – approaches and challenges for surveillance and prediction. **Water Research**, v. 186, p. 116404, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116404>. Acesso em: 20 jan. 2025.

RANDAZZO, Walter et al. SARS-CoV-2 RNA in wastewater anticipated COVID-19 occurrence in a low prevalence area. **Water Research**, v. 181, p. 115942, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115942>. Acesso em: 15 fev. 2025.

RIBEIRO, P. C. C. et al. Águas residuais como um indicador de alerta para COVID-19: monitoramento de evento de massa em uma cidade da Amazônia Legal no Norte do Brasil. **Saúde E Meio Ambiente: Revista Interdisciplinar**, v. 12, p. 179-191, 2023. <https://doi.org/10.24302/sma.v12.4705>. Acesso em: 24 jan. 2025.

ROCHMAN, N.D. et al. Ongoing global and regional adaptive evolution of SARS-CoV-2. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 118, n. 29, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.2104241118>. Acesso em: 24 jan. 2025

RODRIGUES, R. F. T. et al. Análise da concentração de Covid-19 em efluentes na região metropolitana do Rio de Janeiro como ferramenta de gestão de saneamento e saúde. In: III SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA (SINGEURB), 2021, Maceió. Anais [...] Porto Alegre: ANTAC, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.46421/singeurb.v3i00.1065>. Acesso em: 7 dez. 2024.

ROLLEMBERG, Silvio; DE BARROS, Amanda Nascimento; DE LIMA, João Pedro Machado. Avaliação da contaminação, sobrevivência e remoção do coronavírus em sistemas de tratamento de esgoto sanitário. **Revista Tecnologia**, v. 41, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5020/23180730.2020.10849>. Acesso em: 15 jul. 2024.

SANTA-MARIA, M. C. et al. Spatiotemporal Surveillance of SARS-CoV-2 in the Sewage of Three Major Urban Areas in Peru: Generating Valuable Data Where Clinical Testing Is Extremely Limited. **ACS ES&T Water**, v. 2, n. 12, p. 2144-2157, dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsestwater.2c00065>. Acesso em: 21 nov. 2024.

SANTARÉM (PA). PREFEITURA MUNICIPAL. Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico de Santarém - PA: 2020 - 2023. Santarém, PA: Prefeitura Municipal, 2019.

SANTOS, Thales Felício de Oliveira. Determinação do padrão espaço-temporal de propagação da covid-19 com base no monitoramento do sars-cov-2 no esgoto de Belo Horizonte. 2022. 150 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/50890>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SILVA, F. C. da et al. Correlação entre saneamento básico e vulnerabilidade à pandemia de COVID-19 no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220145>. Acesso em: 7 dez. 2024.

SINGHAL, T. A Review of Coronavirus Disease-2019 (COVID-19). **The Indian Journal of Pediatrics**, v. 87, p. 281-286, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12098-020-03263-6>. Acesso em: 9 dez. 2024.

SODRÉ, Fernando F. et al. Epidemiologia do esgoto como estratégia para monitoramento comunitário, mapeamento de focos emergentes e elaboração de sistemas de alerta rápido para COVID-19. **Química Nova**, v. 43, n. 4, p. 515- 519, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170545>. Acesso em: 14 jan. 2025.

SOUZA E SOUZA, Luís Paulo et al. Presença do novo coronavírus (SARS-CoV-2) nos esgotos sanitários: apontamentos para ações complementares de vigilância à saúde em tempos de pandemia. **Vigilância Sanitária em Debate**, v. 8, n. 3, p. 132-138, 2020. Disponível em: <https://visaemdebate.incqs.fiocruz.br/index.php/visaemdebate/article/view/1624>. Acesso em: 8 dez. 2024.

TEGALLY, Houriiyah et al. Emergence and rapid spread of a new severe acute respiratory syndrome-related coronavirus 2 (SARS-CoV-2) lineage with multiple spike mutations in South Africa. **medRxiv**, p. 2020.12.21.20248640, 2020. Disponível em: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.12.21.20248640v1>. Acesso em: 25 fev. 2025.

TERMINAL Hidroviário de Santarém registra aumento de 15% na movimentação durante o período de festas de fim de ano. G1 Santarém e região, Santarém, 30 dez. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/pa/santarem-regiao/noticia/2024/12/30/terminal-hidroviario-de-santarem-registra-aumento-de-15percent-na-movimentacao-durante-o-periodo-de-festas-de-fim-de-ano.ghtml>. Acesso em: 08 jan. 2025.

THOMPSON, Janelle R. et al. Making waves: wastewater surveillance of SARS-CoV-2 for population-based health management. **Water Research**, v. 184, p. 116181, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116181>. Acesso em: 15 mar. 2025.

VOLZ, E. et al. Assessing transmissibility of SARS-CoV-2 lineage B.1.1.7 in England. **Nature**, v. 593, n. 7858, p. 266-269, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03470-x>. Acesso em: 18 set. 2024.

WADE, Matthew J. et al. Understanding and managing uncertainty and variability for wastewater monitoring beyond the pandemic: lessons learned from the United Kingdom national COVID-19 surveillance programmes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 424, p. 127456, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127456>. Acesso em: 20 nov. 2024.

WALLS, Alexandra C. et al. Structure, function, and antigenicity of the SARS-CoV-2 spike glycoprotein. **Cell**, v. 181, n. 2, p. 281-292.e6, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.02.058>. Acesso em: 15 mar. 2025.

WANG, Bing et al. Asymptomatic SARS-CoV-2 infection by age: a global systematic review and meta-analysis. **The Pediatric Infectious Disease Journal**, v. 42, n. 3, p. 232-239, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/INF.0000000000003791>. Acesso em: 22 mar. 2025

WANG, Qihui et al. Structural and functional basis of SARS-CoV-2 entry by using human ACE2. **Cell**, v. 181, n. 4, p. 894-904.e9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.03.045>. Acesso em: 9 dez. 2024.

WILDER, Maxwell L. et al. Co-quantification of crAssphage increases confidence in wastewater-based epidemiology for SARS-CoV-2 in low prevalence areas. **Water Research X**, v. 11, p. 100100, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2021.100100>. Acesso em: 15 abr. 2025.

WU, Yongjian et al. Prolonged presence of SARS-CoV-2 viral RNA in faecal samples. **The Lancet Gastroenterology & Hepatology**, v. 5, n. 5, p. 434-435, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2468-1253\(20\)30083-2](https://doi.org/10.1016/S2468-1253(20)30083-2). Acesso em: 20 mar. 2025.

WURTZER, S. et al. Several forms of SARS-CoV-2 RNA can be detected in wastewaters: Implication for wastewater-based epidemiology and risk assessment. **Water Research**, v. 198, p. 117183, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117183>. Acesso em: 20 mar. 2025.

XAGORARAKI, I.; O'BRIEN, E. Wastewater-Based Epidemiology for Early Detection of Viral Outbreaks. In: O'BANNON, D. J. (Ed.). **Women in Water Quality**. p. 75-99. Springer Nature Switzerland AG, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17819-2_5. Acesso em: 08 jan. 2025.

XU, Xiaoqing et al. Wastewater genomic sequencing for SARS-CoV-2 variants surveillance in wastewater-based epidemiology applications. **Water Research**, v. 244, p. 120444, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120444>. Acesso em: 20 mai. 2025.

XU, Y. et al. Characteristics of pediatric SARS-CoV-2 infection and potential evidence for persistent fecal viral shedding. **Nature Medicine**, v. 27, p. 502-505, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0817-4>. Acesso em: 12 abr. 2025.

ZHANG, W. et al. Molecular and serological investigation of 2019-nCoV infected patients: implication of multiple shedding routes. **Emerging Microbes & Infections**, v. 9, n. 1, p. 386-389, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/22221751.2020.1729071>. Acesso em: 11 abr. 2025.

ZHOU, P. et al. A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin. **Nature**, v. 579, p. 270-273, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2012-7>. Acesso em: 11 abr. 2025.

ZHU, Y. et al. Early warning of COVID-19 via wastewater-based epidemiology: Potential and bottlenecks. **Science of The Total Environment**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145124>. Acesso em: 11 abr. 2025.