



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA DEYSE DA SILVA

**MONITORAMENTO DA CARGA DE SURFACTANTE ANIÔNICO
ALQUILBENZENO LINEAR SULFONADO EM RELAÇÃO À DISPERSÃO DO
SARS-COV-2 NA CIDADE DO RECIFE**

Recife

2025

ANA DEYSE DA SILVA

**MONITORAMENTO DA CARGA DE SURFACTANTE ANIÔNICO
ALQUILBENZENO LINEAR SULFONADO EM RELAÇÃO À DISPERSÃO DO
SARS-COV-2 NA CIDADE DO RECIFE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Motteran

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Ana Deyse da.

Monitoramento da Carga de Surfactante Aniônico Alquilbenzeno Linear Sulfonado em Relação à Dispersão do SARS-CoV-2 na Cidade do Recife / Ana Deyse da Silva. - Recife, 2025.

58 p. : il., tab.

Orientador(a): Fabrício Motteran

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Alquilbenzeno Linear Sulfonado. 2. SARS-CoV-2. 3. Surfactante aniônico. 4. Produtos de cuidados pessoais. 5. Cromatografia líquida de alta eficiência. 6. Epidemiologia baseada nos esgotos. I. Motteran, Fabrício. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

ANA DEYSE DA SILVA

**MONITORAMENTO DA CARGA DE SURFACTANTE ANIÔNICO
ALQUILBENZENO LINEAR SULFONADO EM RELAÇÃO À DISPERSÃO DO
SARS-COV-2 NA CIDADE DO RECIFE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 24/07/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabrício Motteran
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Simone Machado Santos (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Idayana da Costa Marinho (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui foi uma jornada de desafios e superações, e não poderia deixar de expressar minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me dar força, sabedoria e serenidade para superar os desafios desta jornada. Sou grata pela oportunidade de aprender, crescer e concluir mais essa etapa da minha vida.

Aos meus pais, meu agradecimento mais profundo. Pela paciência, compreensão e, acima de tudo, por sempre acreditarem em meu potencial. Sou eternamente grata por todo o apoio incondicional e por me manterem com os pés no chão e os sonhos no lugar certo.

Aos meus colegas de faculdade, que compartilharam comigo experiências e que, ao longo dessa caminhada, tornaram alguns momentos mais leves.

Ao meu orientador, cuja orientação e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pela paciência e pelas valiosas contribuições ao longo de todo o processo, pela disposição em compartilhar seu conhecimento e por me conduzir com seriedade e sabedoria. Sem seu auxílio, este trabalho não teria alcançado a qualidade que se propôs.

Aos técnicos dos laboratórios, que com competência e prontidão me auxiliaram nas etapas experimentais, sempre com profissionalismo e disposição.

Aos professores que, ao longo de toda a minha trajetória acadêmica, contribuíram para a formação do meu pensamento crítico e científico. Suas aulas não apenas transmitiram conhecimento, mas também me inspiraram a continuar buscando sempre mais.

Por fim, ao meu bem, que foi meu apoio constante nos momentos de cansaço e incerteza. Obrigada por estar presente mesmo nos momentos em que eu só sabia falar sobre prazos, normas da ABNT e no quanto eu queria desistir. Agradeço por sua paciência, pelo apoio nos momentos mais desafiadores e, principalmente, por trazer leveza e alegria. Sua presença foi fundamental, obrigada por ser meu riso.

A todos, minha sincera gratidão.

“N3o importa o que acontea, continue a nadar.”

(Graham Walters)

RESUMO

Desde a descoberta do SARS-CoV-2, do seu alto potencial de transmissão e dos danos à população, medidas de proteção foram estimuladas em todo o mundo, como a lavagem das mãos. Este cenário incentivou a demanda por surfactantes utilizados para higienização, como os detergentes. Dos detergentes existentes, o de maior consumo mundial é o surfactante aniônico Alquilbenzeno Linear Sulfonado (LAS). Nesse contexto, havia a hipótese de que a concentração de LAS que chega às Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) tivesse aumentado, devido às medidas de prevenção e/ou ao excesso de higienização pessoal e de materiais contaminados em relação à COVID-19. Assim, o estudo teve como objetivo avaliar, na cidade do Recife, se há relação entre a carga viral de SARS-CoV-2 e a concentração de LAS em águas residuárias urbanas e de origem doméstica presentes nas ETEs. Entretanto, não houve uma relação direta entre a concentração de LAS e a carga viral de SARS-CoV-2 nas águas residuárias da cidade do Recife. Notou-se uma correlação negativa entre concentração de LAS, onde houveram picos de cargas virais e um aumento, quando a carga se torna menor.

Palavras-chave: Alquilbenzeno Linear Sulfonado; SARS-CoV-2; Surfactante aniônico; Produtos de cuidados pessoais; Cromatografia líquida de alta eficiência; Epidemiologia baseada nos esgotos

ABSTRACT

Since the discovery of SARS-CoV-2, its high transmission potential, and the harm it causes to the population, protective measures, such as handwashing, have been encouraged worldwide. This scenario has fueled demand for surfactants used for hygiene, such as detergents. Of the existing detergents, the most widely consumed worldwide is the anionic surfactant Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS). In this context, it was hypothesized that the concentration of LAS reaching Sewage Treatment Plants (STPs) had increased due to COVID-19 prevention measures and/or excessive personal hygiene and sanitation of contaminated materials. Therefore, the study aimed to assess, in the city of Recife, whether there is a relationship between the SARS-CoV-2 viral load and the concentration of LAS in urban and domestic wastewater present in STPs. However, there was no direct relationship between the LAS concentration and the SARS-CoV-2 viral load in Recife's wastewater. A negative correlation was noted between LAS concentration, where there were peaks in viral loads and an increase, when the load becomes lower.

Keywords: Linear alkylbenzene sulfonate; SARS-CoV-2; Anionic surfactant; Personal care products; High-performance liquid chromatography; Sewage-based epidemiology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Árvore Filogenética dos Coronavírus.....	15
Figura 2 – Número de casos de COVID-19 notificados à OMS.....	19
Figura 3 – Estrutura molecular do LAS.....	22
Figura 4 – Identificação espacial das ETEs.....	26
Figura 5 – Gráficos de correlações entre os índices de vulnerabilidade e casos de COVID-19.....	27
Figura 6 – Amostras de afluentes das ETEs para análises.....	29
Figura 7 – Preparação das amostras brutas para a cromatografia líquida.....	30
Figura 8 – Curva de quantificação.....	34
Figura 9 – Resíduos dos ajustes da curva cromatográfica da concentração de LAS em CLAE.....	34
Figura 10 – Soma das cargas virais detectadas nas três ETEs monitoradas.....	35
Figura 11 – Datas analisadas na elaboração dos mapas epidemiológicos e médias móveis.....	37
Figura 12 – M0207: ETE Mangueira, com coleta realizada em 02 de julho de 2021.....	38
Figura 13 – Comparação visual entre a Carga Viral e a Concentração de LAS.....	42
Figura 14 – Correlação entre a Carga Viral e a Concentração de LAS.....	43
Figura 15 – Localização das ETEs na cidade de Recife por Bacia Hidrográfica.....	45
Figura 16 – Densidade de Kernel para as médias móveis de duas semanas de concentração do SARS-CoV-2 por ETE.....	46
Figura 17 – Concentração viral de SARS-CoV-2 por unidade de tratamento.....	47
Figura 18 – Densidade de Kernel da concentração média de LAS.....	50
Figura 19 – Média das concentrações totais de LAS.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Indicadores da Covid-19 nas macrorregiões e Unidades Federativas do Brasil, até a 20ª Semana Epidemiológica de 2020.....	17
Tabela 2 – Distribuição geográfica e descrição dos pontos de monitoramento de Recife – PE.....	28
Tabela 3 – Considerações cromatográficas para quantificação do surfactante aniônico - LAS.....	31
Tabela 4 – Gradiente de eluentes do método empregado na análise do LAS por CLAE.....	32
Tabela 5 – Dados obtidos das injeções do surfactante aniônico LAS em CLAE de cada triplicata.....	33
Tabela 6 – Áreas cromatográficas relacionada as injeções de LAS da amostra M0207.....	38
Tabela 7 – Obtenção da concentração real de amostras de LAS na ETE Mangueira.....	39
Tabela 8 – Concentrações de LAS nas ETEs analisadas e suas médias	40
Tabela 9 – Concentração de LAS e de SARS-CoV-2 em médias móveis de duas semanas nas datas analisadas.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 SARS-COV-2: A CRISE SANITÁRIA GLOBAL DO SÉCULO XXI.....	15
2.2 SURFACTANTES ANIÔNICOS: HISTÓRIA, PROPRIEDADES, USO E IMPACTOS AMBIENTAIS.....	20
2.3 ALQUILBENZENO LINEAR SULFONADO (LAS).....	22
2.4 FERRAMENTAS GEOESPACIAIS: MAPAS EPIDEMIOLÓGICOS.....	23
3 OBJETIVOS.....	24
3.1 OBJETIVO GERAL.....	24
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
4 METODOLOGIA.....	25
4.1 PONTOS DE COLETA.....	25
4.2 IDENTIFICAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DAS AMOSTRAS AMBIENTAIS.....	28
4.3 PREPARO DAS AMOSTRAS DE LAS.....	30
4.4 DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO SURFACTANTE ANIÔNICO.....	30
4.5 AMOSTRAS AMBIENTAIS.....	35
4.6 CONCENTRAÇÃO DAS AMOSTRAS CONTENDO SURFACTANTE ANIÔNICO LAS.....	36
4.7 MAPAS EPIDEMIOLÓGICOS DOS PONTOS AMOSTRAIS.....	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1 DADOS GERADOS NA CROMATOGRAFIA.....	37
5.2 CONCENTRAÇÕES DE LAS E DA CARGA VIRAL DE SARS-CoV-2.....	42
5.3 MAPAS EPIDEMIOLÓGICOS E ANÁLISE DAS MÉDIAS MOVÉIS.....	44
6 CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

A COVID-19 é uma doença infecciosa causada pelo coronavírus SARS-CoV-2, identificado pela primeira vez em dezembro de 2019 na cidade de Wuhan, China. O vírus rapidamente se espalhou pelo mundo, resultando em uma pandemia global declarada pela Organização Mundial da Saúde (OMS), em março de 2020, como a sexta emergência de saúde pública de interesse internacional. O vírus é transmitido principalmente por gotículas respiratórias, de humano para humano, ou por contato direto, com um período médio de incubação estimado em 6,4 dias e um número básico de reprodução (R_0) entre 2,24 e 3,58 (Lai *et al.*, 2020). O epicentro inicial da infecção ocorreu na China, seguida pela Europa, EUA e Brasil. Na América Latina, o primeiro caso foi registrado em 26 de fevereiro de 2020, no estado de São Paulo, em um paciente que voltava de uma viagem à Itália entre os dias 9 e 21 de fevereiro. A incidência real de casos acometidos no território nacional é subestimada, apresentando incertezas no seu acompanhamento. Até 15 de setembro de 2020, o Brasil detinha 4,3 milhões de casos de COVID-19 confirmados e 132.297 mortes, tendo Pernambuco como um dos estados mais afetados do Brasil com 137.869 casos e 7.914 mortes (Magalhães *et al.*, 2020).

Antes da vacinação, a infecção poderia causar uma variedade de sintomas, desde leves e mais comuns, como febre e tosse, até graves, como dificuldade respiratória e complicações que podem levar à morte, as suas consequências são inúmeras e ainda não quantificáveis os efeitos de médio e longo prazo (Magalhães *et al.*, 2020). Algumas medidas de prevenção foram incentivadas em todo o mundo, como o confinamento nas residências, a utilização de luvas, máscaras e medidas de higienização como o uso do álcool em gel e a lavagem frequente das mãos e de qualquer item trazido de fora para sua residência. Nesse contexto, ocorreu o aumento da demanda pelo uso de álcool e produtos de higiene (Nogueira; Silva, 2020).

Os produtos de limpeza vêm sendo utilizados pela humanidade ao longo dos tempos. A maioria dos agentes limpantes possuem substâncias tensoativas, capazes de diminuir a tensão superficial da água e emulsionar óleos (formando suspensões) promovendo, assim, a limpeza de objetos. Com o crescente aumento

do desenvolvimento industrial, surgimento e aprimoramento de materiais, os agentes sofreram algumas alterações no decorrer da história (Bigardi *et al.*, 2003).

O Alquilbenzeno Linear Sulfonado (*Linear Alkylbenzene Sulfonate* - LAS) é o tensoativo sintético aniônico de maior produção mundial, dado o seu emprego na formulação de uma elevada percentagem de detergentes sintéticos. Da produção mundial do Alquilbenzeno Linear (*Linear Alkylbenzene* - LAB), mais de 99% é transformado em LAS por meio do processo de sulfonação.

Os valores padrão de aceitabilidade da concentração de LAS definidos pela Áustria e União Europeia são 0,27 mg/L em água ou 0,035 mg/kg de matéria seca em lodos de estação de tratamento de esgoto e sedimentos de rio. As concentrações típicas de LAS no efluente e afluente de sistemas de tratamento aeróbio variam de 1 a 21 mg/L e de 0,009 a 0,23 mg/L, respectivamente, e as remoções, entre 98,8% e 99,9% (Braga; Varesche, 2014). Já o acúmulo de Substâncias Ativas ao Azul de Metileno (MBAS), em águas superficiais de classe 1 a 3, salinas ou salobras e doces, não devem ultrapassar 0,2 e 0,5 mg/L de LAS, respectivamente, por determinação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (Brasil, 2005). Os valores da concentração do LAS são extremamente maiores quando o composto é mensurado em águas residuárias de lavanderia comercial, as quais utilizam surfactantes nos processos produtivos, tais valores podem variar de 12,7 a 1024 mg/L segundo estudo de Braga; Varesche, (2014). A legislação ambiental de determinados estados brasileiros estabelece um limite máximo de 2 mg/L para a concentração de surfactantes aniônicos totais em efluentes tratados provenientes de Estações de Tratamentos de Esgotos - ETEs condominiais (Silva, 2024).

Concentrações elevadas de LAS possuem efeito tóxico em animais aquáticos, tanto no macro quanto na microfauna. No meio ambiente o LAS pode provocar alteração na condução e absorção de oxigênio em organismos aquáticos, problemas na depuração natural ou artificial dos rios e lagos devido à formação das espumas e causar eutrofização, além das substâncias recalcitrantes presentes nos derivados do petróleo que podem se tornar tóxicas aos seres vivos. Ademais, o LAS é irritante para pele e olhos (Costa, 2022; Silva, 2024).

Segundo Silva *et al.* (2022), a análise da distribuição espacial associada às condições socioeconômicas da porcentagem dos casos confirmados da COVID-19, nos estados brasileiros, em especial Pernambuco, podem servir para fazer a

identificação de áreas inclinadas a um maior aumento de casos, ajudando o governo com programas de controles e medidas de contingência. A relação direta entre o baixo índice de desenvolvimento humano (IDH) e o número de casos acometidos se torna evidente, dessa maneira, as regiões Norte e Nordeste apresentam predominância nos casos dessas doenças (Desenvolvimento, 2016).

Portanto, o acompanhamento de áreas endêmicas principalmente em zonas especiais de interesse social (ZEIS) que possuem baixo IDH pode auxiliar no desenvolvimento de medidas de cunho público mais eficazes, podendo ainda correlacionar tais zonas com maiores ocorrências de casos de doenças emergentes como é o caso da COVID-19.

O Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgotos – INCT ETEs Sustentáveis, em colaboração com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, desenvolveu o projeto-piloto intitulado: “Detecção e Quantificação do Novo Coronavírus em Amostras de Esgoto nas Cidades de Belo Horizonte e Contagem”. O objetivo da iniciativa foi estabelecer uma rede nacional de vigilância ambiental, envolvendo diferentes unidades federativas, para monitorar as variações e a disseminação da carga viral do SARS-CoV-2 nos sistemas de esgotamento sanitário dos municípios participantes. Para o monitoramento epidemiológico na cidade de Recife-PE, foram analisadas amostras coletadas nas ETEs de municípios estratégicos baseadas na contribuição per capita de esgoto, na vazão média de água e nos índices de vulnerabilidade baseado no estudo estatístico desenvolvido pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Saniamento da UFPE.

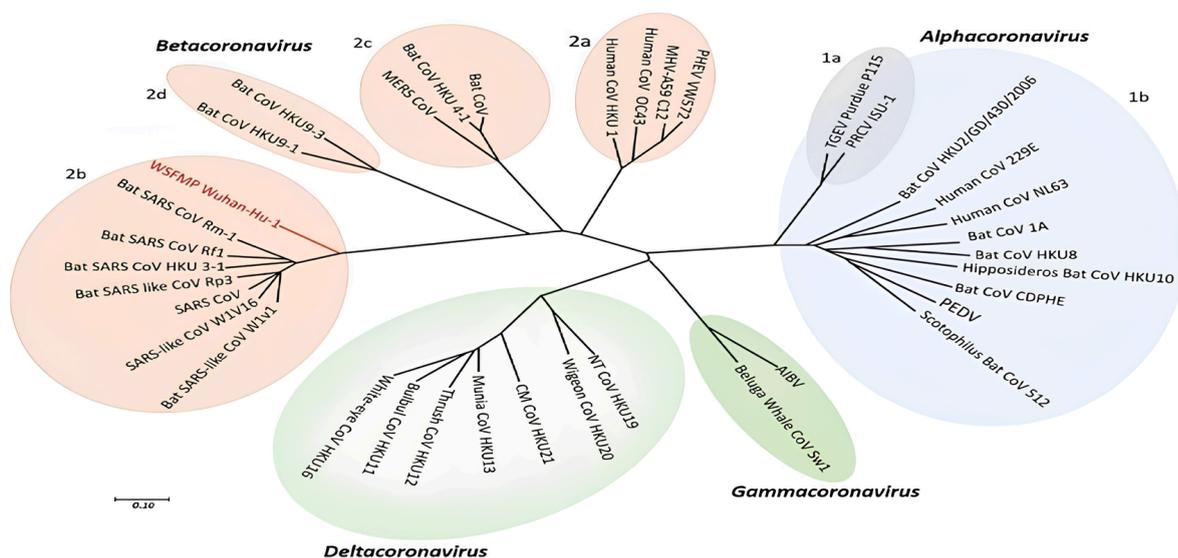
Dado exposto, este estudo se propõe a avaliar a correlação entre a concentração do SARS-CoV-2 e de LAS no esgoto doméstico da cidade do Recife, no período de maio a dezembro de 2021. A fim de saber se a concentração de LAS no efluente tem aumentado devido às práticas de medidas protetivas incentivadas para o controle da pandemia do novo coronavírus.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SARS-COV-2: A CRISE SANITÁRIA GLOBAL DO SÉCULO XXI

O SARS-CoV-2 é um vírus pertencente à família Coronaviridae, sendo o sétimo coronavírus identificado capaz de infectar seres humanos e causar infecções respiratórias. Entre esses, é o terceiro a estar associado a epidemias de grande impacto global, após o SARS-CoV, responsável pela Síndrome Respiratória Aguda Grave (SARS), e o MERS-CoV, causador da Síndrome Respiratória do Oriente Médio (MERS). Todos esses vírus pertencem à linhagem beta, um dos quatro subgrupos da família Coronaviridae, ao lado das linhagens alfa, gama e delta (Figura 1). Enquanto esses três vírus estão relacionados a quadros mais graves e potencialmente letais, outros coronavírus humanos, como HKU1, NL63, OC43 e 229E, geralmente provocam infecções leves do trato respiratório superior, semelhantes a resfriados comuns (Andersen *et al.*, 2020).

Figura 1 – Árvore Filogenética dos Coronavírus



Fonte: Moreira *et al.* (2022)

De acordo com Duarte (2020), a síndrome respiratória aguda grave 2 (SARS-CoV-2) foi oficialmente nomeada pelo Comitê Internacional de Taxonomia de Vírus (ICTV) como o agente etiológico da doença do coronavírus 2019 (COVID-19).

A doença teve seus primeiros casos reportados na cidade de Wuhan, província de Hubei, na China, no final de 2019, e rapidamente se disseminou globalmente devido à alta transmissibilidade do vírus, levando à caracterização de uma pandemia pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em março de 2020.

Em 30 de janeiro de 2020, a OMS declarou a COVID-19 como uma emergência de saúde pública de importância internacional e, em 11 de março de 2020, o surto foi oficialmente classificado como pandemia, levando os países à elaboração de planos de contingência para mitigar os impactos da crise sanitária (Souza *et al.*, 2021).

A rápida disseminação do SARS-CoV-2, aliada à sua alta taxa de contágio, desencadeou uma crise sanitária sem precedentes. Essa situação desafiou os sistemas de saúde em escala global e impactou diversas áreas da sociedade, como a economia, a educação e a saúde mental da população. Com o crescimento acelerado dos casos suspeitos, confirmados e das mortes, o epicentro da pandemia foi se deslocando ao longo do tempo. Inicialmente concentrado na China, o vírus logo se espalhou por países como Itália, Espanha, Reino Unido e Estados Unidos (EUA). Na América Latina, o Brasil rapidamente se destacou como um dos países mais afetados. Até 28 de setembro de 2020, haviam sido registrados 4.745.464 casos e 142.058 mortes, colocando o país em segundo lugar em números absolutos, atrás apenas dos EUA (Souza *et al.*, 2021).

Segundo Santos (2022), o vírus é transmitido por gotículas de saliva, contato com objetos contaminados e proximidade com pessoas infectadas. A infecção pode se manifestar de diferentes formas, desde casos assintomáticos até quadros graves, que podem evoluir para insuficiência respiratória e óbito — especialmente entre idosos e indivíduos com comorbidades pré-existentes. O período de incubação varia de 2 a 14 dias, com maioria dos casos surgindo até o quinto dia após a exposição.

Cavalcante *et al.* (2020) analisaram o Brasil e os países com os maiores números de casos confirmados e óbitos atribuídos à COVID-19, no período de 26 de fevereiro — data do primeiro caso confirmado no Brasil — até 16 de maio de 2020, referente à 20ª semana epidemiológica (SE 20), considerando os dados a partir do 50º caso ou óbito registrado em cada país. Ao final da SE 20, o Brasil ocupava a 4ª posição em número absoluto de casos confirmados (233.142), ficando atrás apenas dos Estados Unidos (1.443.397), da Rússia (262.843) e do Reino Unido (236.711). Já em relação aos óbitos confirmados, o Brasil ocupava a 6ª posição, com 15.633

mortes, sendo precedido pelos Estados Unidos (89.562), Reino Unido (34.636), Itália (31.908) e outros países com números superiores no período analisado.

Apesar de o maior número absoluto de casos estar concentrado na região Sudeste do Brasil, especialmente no estado de São Paulo (61.183), a região Norte apresentou as maiores taxas por milhão de habitantes de incidência (2.358,3) e mortalidade (156,6). Nesse contexto, o Amazonas destacou-se como o estado com a maior taxa de incidência (4.747,6), seguido pelo Amapá (4.533,4) e Roraima (2.816,3). Quanto à mortalidade, o Amazonas também liderou com a maior taxa (331,8), seguido pelo Ceará (176,7) e Pernambuco (152,9), conforme Tabela 1 (Cavalcante et al., 2020).

Tabela 1 – Indicadores da Covid-19 nas macrorregiões e Unidades Federativas do Brasil, até a 20ª Semana Epidemiológica de 2020

Região/Unidade da Federação	Casos N	Óbitos N	Taxa de incidência	Taxa de mortalidade	Total de municípios N	Municípios com casos confirmados		Municípios com óbitos confirmados	
						N	%	N	%
Norte	43.466	2.886	2.358,3	156,6	450	338	75,1	177	39,3
Rondônia	1.919	69	1.079,8	38,8	52	34	65,4	9	17,3
Acre	1.867	59	2.116,9	66,9	22	19	86,4	5	22,7
Amazonas	19.677	1.375	4.747,6	331,8	62	60	96,8	44	71
Roraima	1.706	49	2.816,3	80,9	15	15	100	6	40
Pará	13.184	1.199	1.532,5	139,4	144	138	95,8	86	59,7
Amapá	3.834	108	4.533,4	127,7	16	16	100	12	75
Tocantins	1.279	27	813,2	17,2	139	56	40,3	15	10,8
Nordeste	78.069	4.521	1.367,9	79,2	1.794	1.223	68,2	476	26,5
Maranhão	11.592	524	1.638,4	74,1	217	183	84,3	49	22,6
Piauí	2.085	65	637	19,9	224	105	46,9	28	12,5
Ceará	23.795	1.614	2.605,7	176,7	184	175	95,1	109	59,2
Rio Grande do Norte	3.004	136	856,6	38,8	167	110	65,9	35	21
Paraíba	4.063	183	1.011,2	45,5	223	135	60,5	35	15,7
Pernambuco	18.48	1.461	1.934,5	152,9	185	161	87	109	58,9

Tabela 1 - Continuação

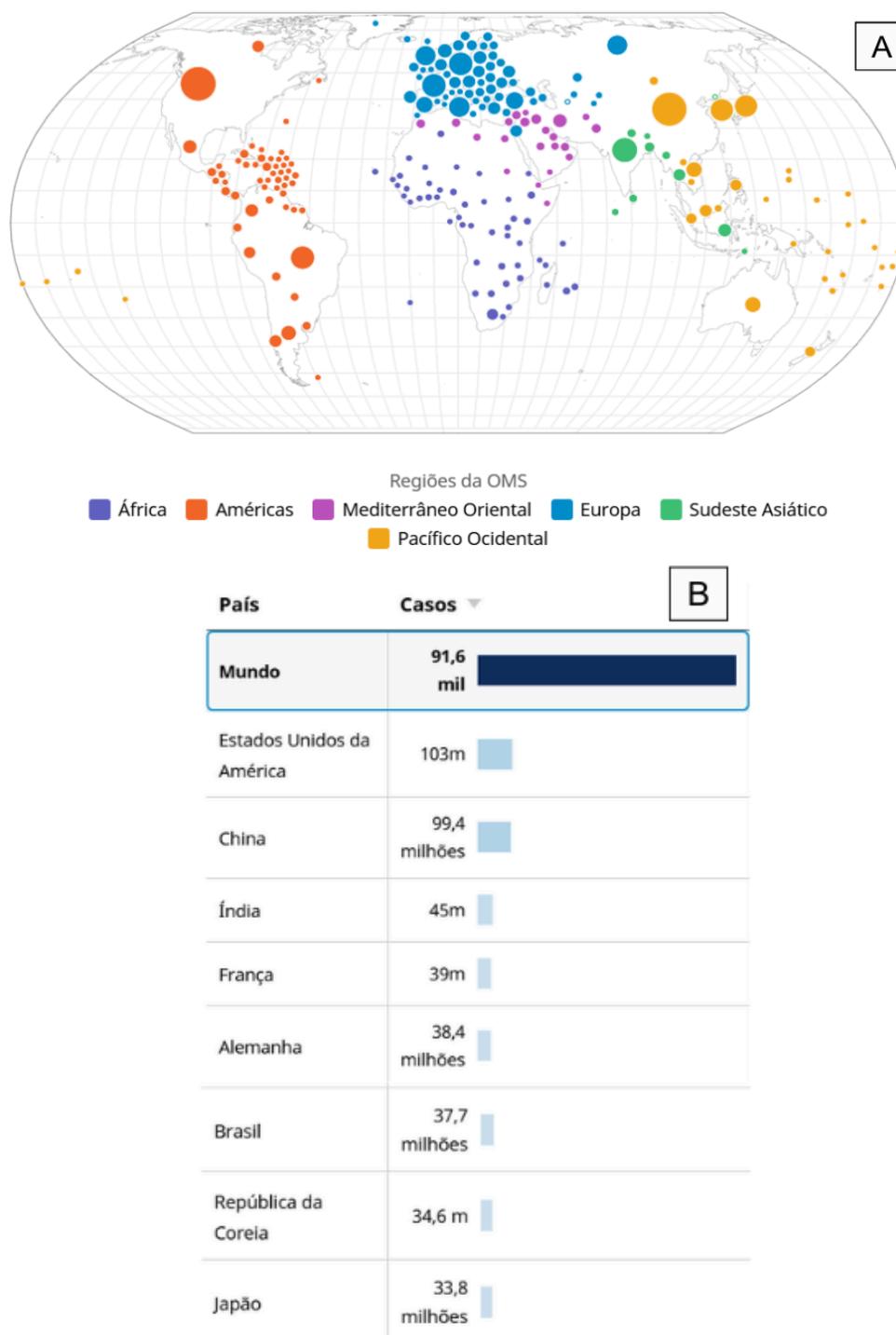
Região/Unidade da Federação	Casos N	Óbitos N	Taxa de incidência	Taxa de mortalidade	Total de municípios N	Municípios com casos confirmados		Municípios com óbitos confirmados	
						N	%	N	%
Sergipe	3.135	53	1.363,8	23,1	75	63	84	25	33,3
Bahia	8.314	286	559	19,2	417	209	50,1	47	11,3
Sudeste	93.853	7.723	1.062	87,4	1.668	936	56,1	372	22,3
Minas Gerais	4.474	150	211,3	7,1	853	317	37,2	71	8,3
Espírito Santo	6.595	271	1.641,1	67,4	78	70	89,7	31	39,7
Rio de Janeiro	21.601	2.614	1.251,1	151,4	92	89	96,7	58	63
São Paulo	61.183	4.6888	1.332,4	102,1	645	460	71,3	212	32,9
Sul	10.615	336	354,1	11,2	1.191	566	47,5	142	11,9
Paraná	2.242	123	196,1	10,8	399	176	44,1	46	11,5
Santa Catarina	4.678	81	652,9	11,3	295	167	56,6	40	13,6
Rio Grande do Sul	3.695	132	324,8	11,6	497	223	44,9	56	11,3
Centro-Oeste	7.139	167	438,1	10,2	467	177	37,9	49	10,5
Mato Grosso do Sul	508	15	182,8	5,4	79	36	45,6	7	8,9
Mato Grosso	851	27	244,2	7,7	141	58	41,1	14	9,9
Goiás	1.640	69	233,7	9,8	246	82	33,3	27	11
Distrito Federal	4.140	56	1.373	18,6	1	1	100	1	100
Brasil	233.14	15.63	1.109,4	74,4	5.57	3.240	58,2	1.216	21,8

Fonte: Modificado de Cavalcante *et al.* (2020).

Diante da gravidade da situação, intervenções não farmacológicas, como o distanciamento social e o *lockdown* foram implementadas e os esforços científicos intensificados para compreender a patogênese do vírus, desenvolver tratamentos eficazes e produzir vacinas rapidamente. No entanto, após a pandemia, a SARS-CoV-2 continua a representar um desafio global devido, à emergência de novas variantes que podem apresentar maior transmissibilidade e escape imunológico. Apesar da vacinação em massa ter reduzido hospitalizações e óbitos, surtos pontuais ainda ocorrem, especialmente em períodos de alta circulação viral e

grandes aglomerações, como festividades, feriados e eventos esportivos. Através da Organização Mundial da Saúde – OMS (*World Health Organization - WHO*) (2025), o total acumulado dos casos relatados nas últimas quatro semanas epidemiológicas (28 dias) até 11 de maio de 2025, estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Número de casos de COVID-19 notificados à OMS



Fonte: Painel da OMS COVID-19: Número de casos acumulados de COVID-19 notificados à OMS (2025). Identificação espacial dos casos (1A). Identificação cardinal dos casos (1B).

2.2 SURFACTANTES ANIÔNICOS: HISTÓRIA, PROPRIEDADES, USO E IMPACTOS AMBIENTAIS

Os tensoativos, também conhecidos como surfactantes, surgiram da necessidade de promover a higiene pessoal e a limpeza de ferimentos. Esses compostos orgânicos são anfifílicos, ou seja, possuem afinidade tanto com substâncias polares quanto apolares, permitindo a formação de espumas, emulsões e suspensões de partículas de sujeira, o que viabiliza a detergência e a remoção de impurezas de superfícies (Costa, 2022).

Inicialmente, a produção de surfactantes era baseada na fervura de gorduras animais com cinzas e água, resultando na saponificação das gorduras em ácidos graxos livres, posteriormente neutralizados. Com o crescimento populacional e a disseminação desses produtos, a produção de tensoativos se expandiu na Europa, no entanto, avanços químicos significativos ocorreram apenas em 1791, quando Nicolas Leblanc desenvolveu um método para a produção de soda cáustica (NaOH) em larga escala a partir do cloreto de sódio (NaCl). Embora eficiente, esse processo era caro e altamente poluente.

No final do século XIX, o método de Leblanc foi substituído pelo método de Ernest Solvay, que apresentou maior eficiência, melhor aproveitamento de subprodutos e pureza de aproximadamente 99,6%. Nesse período, também foi desenvolvido o primeiro surfactante sintético, conhecido como *turkey red oil*. Durante a Primeira Guerra Mundial, a escassez de gorduras impulsionou a busca por rotas sintéticas para a produção de surfactantes na Alemanha (Müzel, 2021).

Segundo Müzel (2021), no final da década de 1920 e início dos anos 1930, a sulfonação de álcoois de cadeias longas e a síntese de Alquilbenzeno Sulfonato (ABS) tornaram-se proeminentes, especialmente nos Estados Unidos. Com os avanços da química orgânica, novas classes de surfactantes foram desenvolvidas, incluindo derivados da taurina e alcanos sulfatos. Após a Segunda Guerra Mundial, o ABS consolidou-se no mercado, representando quase metade do consumo global de detergentes entre 1950 e 1965. No entanto, sua baixa biodegradabilidade resultou em impactos ambientais significativos, levando à substituição pelo LAS, que apresentava melhor degradação ambiental, elevada formação de espuma e boa solubilidade em água. Na década de 1980, aproximadamente 75% dos detergentes

sintéticos eram formulados à base de LAS, consolidando sua posição no mercado e impulsionando a indústria de surfactantes.

De acordo com Costa (2022), a classificação dos surfactantes é determinada pela composição de sua porção hidrofílica, podendo ser divididos em quatro categorias: aniônicos (carga negativa), catiônicos (carga positiva), não iônicos (grupo polar sem carga) e anfóteros (presença simultânea de cargas positiva e negativa na molécula). Os surfactantes aniônicos possuem uma cabeça polar de carga negativa, geralmente derivada de grupos sulfatos, carboxilatos e sulfonatos. O LAS é o principal representante dos alquil sulfonatos, destacando-se pelo seu alto poder detergente e baixa compatibilidade com a pele (Müzel, 2021).

De acordo com o último Panorama de Atualização emitido pela Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos (ABIHPEC, 2024), o Brasil ocupa a quarta posição entre os maiores consumidores mundiais desse setor, com um mercado avaliado em aproximadamente 26,9 bilhões de dólares. Esse elevado consumo reforça a necessidade de fiscalização e correta destinação dos resíduos gerados.

O descarte de surfactantes aniônicos em corpos hídricos gera efeitos tóxicos à fauna aquática, além de provocar a formação de espessas camadas de espuma na superfície da água, reduzindo a penetração da luz solar. Esse fenômeno compromete a autodepuração da água e impacta negativamente os organismos aquáticos. Embora existam mecanismos naturais de degradação, a elevada taxa de descarte supera a capacidade desses processos, tornando o tratamento da água mais complexo e oneroso (Silva, 2024).

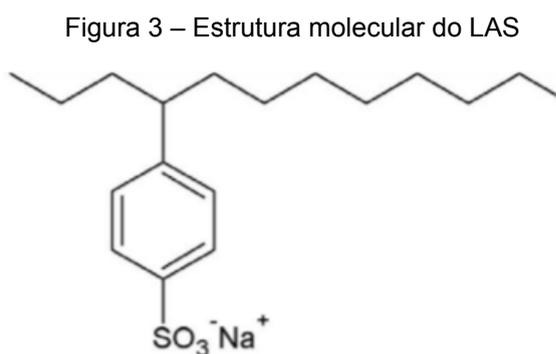
O monitoramento da concentração de surfactantes aniônicos é essencial, contudo, sua análise detalhada é um procedimento laboratorial complexo, especialmente para quantificações em baixas concentrações. Segundo Müzel (2021), esses processos exigem métodos de pré-concentração, como extração em fase sólida ou líquido-líquido, além da aplicação de técnicas cromatográficas e espectrométricas.

Essas técnicas são altamente eficazes na detecção de surfactantes em matrizes complexas, como efluentes aquáticos, permitindo a obtenção de faixas lineares de trabalho com alta precisão. No entanto, sua aplicação exige extensos estudos preliminares, incluindo a determinação das condições cromatográficas ideais, a seleção de agentes de derivatização e colunas de separação, além da

preparação adequada das amostras. Além disso, esses métodos requerem o uso intensivo de solventes orgânicos, equipamentos de alto custo e infraestrutura laboratorial apropriada para sua operação.

2.3 ALQUILBENZENO LINEAR SULFONADO (LAS)

O LAS é um composto orgânico amplamente utilizado em formulações industriais. Sua estrutura molecular consiste em uma cadeia linear alquílica, geralmente composta por 10 a 14 átomos de carbono (C10-C14), ligada a um anel benzênico sulfonado (SO_3^-), conforme ilustrado na Figura 3 abaixo (Costa, 2022; Silva, 2024).



Fonte: Costa (2022)

A cadeia alquílica apolar do LAS facilita sua biodegradação no ambiente, tornando-o menos persistente em comparação aos surfactantes ramificados. Simultaneamente, o grupo sulfonato confere caráter aniônico, promovendo alta solubilidade em água. Além disso, o composto reduz a tensão superficial da água, facilitando a remoção de sujeira e gorduras, além de gerar uma espuma estável, característica essencial em produtos de limpeza (Müzel, 2021).

A quantificação do tensoativo em efluentes é fundamental para monitorar seu impacto ambiental e sua concentração nos diferentes meios. Dentre os principais métodos de determinação, destacam-se a Espectrofotometria UV-Vis, a Cromatografia Gasosa (*Gas Chromatography* - GC) e a Cromatografia Líquida de Alta Eficiência - CLAE. A escolha do método mais adequado depende da estrutura e propriedades do analito, dos limites de detecção exigidos e da infraestrutura disponível no laboratório (Silva, 2024).

O CLAE é um dos métodos mais utilizados para a quantificação do LAS, permitindo a separação e identificação dos seus homólogos (C10-C13) com alta especificidade e sensibilidade. O método emprega colunas de fase reversa (C18, 250 mm x 4,6 mm x 5 µm) e eluição com misturas de solventes polares, como a acetonitrila-água e metanol-água. Para a análise, a amostra passa por um pré-tratamento, que inclui filtração, diluição e extração em fase sólida (SPE) ou líquido-líquido, seguido pela preparação da fase móvel, injeção da amostra, separação cromatográfica, detecção e quantificação por espectrofotometria UV-Vis ou fluorescência. As condições cromatográficas variam conforme a composição da amostra e o sistema utilizado. A curva de calibração é construída a partir de diferentes concentrações de LAS comercial padrão, permitindo a determinação precisa do analito (Costa, 2022; Silva, 2024).

2.4 FERRAMENTAS GEOESPACIAIS: MAPAS EPIDEMIOLÓGICOS

Os mapas epidemiológicos são instrumentos essenciais para a análise espacial em saúde pública, permitindo visualizar a distribuição geográfica de doenças, identificar áreas de risco e detectar padrões espaciais relevantes. Seu uso facilita a vigilância epidemiológica, o planejamento de intervenções e a formulação de políticas sanitárias baseadas em evidências georreferenciadas.

A adoção de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) amplifica a utilidade desses mapas ao integrar, manipular e analisar dados espaciais e não-espaciais. Plataformas como ArcGIS, QGIS e ferramentas web facilitam a produção de mapas temáticos, a análise de clusters e a elaboração de modelos preditivos. Por exemplo, em vigilância da dengue, estudos recentes mostram que GIS tornou-se um sistema multidimensional de apoio à decisão, incorporando dados climáticos, ambientais e demográficos para melhorar o controle e predição de surtos (Prakash, 2025).

Uma revisão sistemática também destaca o uso de GIS para mapeamento de doenças, avaliação de riscos, acessibilidade aos serviços de saúde e vigilância epidemiológica, reforçando sua relevância para a resiliência dos sistemas de saúde (Chandran e Roy, 2024).

Entre as técnicas espaciais aplicadas em SIG, o método de densidade de Kernel se destaca como um recurso eficaz para gerar mapas que representam a

intensidade de ocorrência dos eventos analisados (como casos de doenças). Segundo Souza *et al.* (2013), o estimador de densidade Kernel traça uma vizinhança circular em torno de cada ponto da amostra, definindo seu raio de influência. Em seguida, aplica uma função que varia de 1 no centro a 0 na borda. O valor final de cada célula é obtido pela soma dos Kernels sobrepostos, dividida pela área do raio de influência.

Esse método é amplamente utilizado na identificação de áreas com maior concentração de pontos de dados epidemiológicos, facilitando a priorização de intervenções.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Monitorar a concentração do surfactante aniônico Alquilbenzeno Linear Sulfonado (LAS) nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), de modo a correlacionar com os índices epidemiológicos do SARS-CoV-2 na cidade do Recife, por meio do mapeamento e coleta de dados da Secretaria Municipal de Saúde, unidades básicas de atendimento de saúde e hospitais de referência.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Correlacionar as cargas virais de SARS-CoV-2, obtidas durante o período pandêmico da cidade do Recife, com as concentrações de LAS nas ETEs;
- b) Verificar a correlação do uso do tensoativo aniônico como forma de prevenção e disseminação do vírus causador da COVID-19;
- c) Elaborar mapas contendo as informações virais encontradas em cada ponto de coleta durante o período estudado.

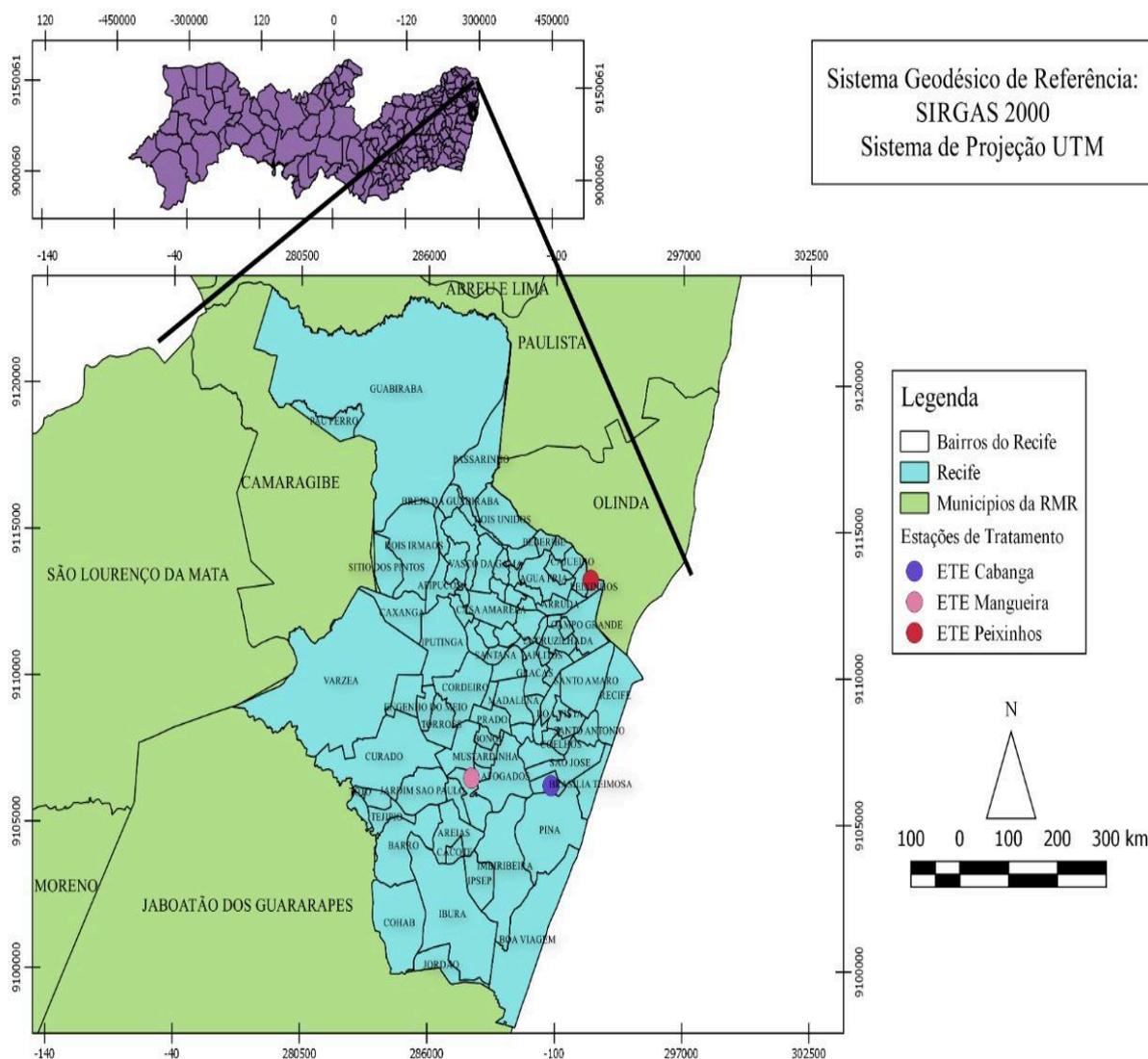
4 METODOLOGIA

O local onde foi realizada a pesquisa, durante o período de maio a dezembro de 2021, assim como outras informações consideradas essenciais para o desenvolvimento do presente estudo, estão apresentados nos tópicos a seguir.

4.1 PONTOS DE COLETA

Os pontos de coleta para o monitoramento da carga viral do SARS-CoV-2 na cidade do Recife, foram estipulados mediante as informações disponibilizadas nos relatórios da companhia de saneamento e dos órgãos de vigilância municipal e estadual. Por meio da contribuição *per capita* no esgoto, da constância na vazão média de água e dos índices de vulnerabilidade, as ETEs Peixinhos, Mangueira e Cabanga, foram determinadas para o plano de monitoramento da carga viral. O mapa com a identificação espacial das estações, Figura 4, foi elaborado a partir do software livre QGIS na versão 3.22.9 desktop, desenvolvido por uma comunidade global de voluntários e hospedado pelo *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), que oferece ferramentas de manipulação de dados espaciais e permite fazer análises detalhadas, além de edições e cruzamento de dados.

Figura 4 – Identificação espacial das ETEs



Nota: UTM:Sistema Universal Transversa de Mercator; RMR: Região Metropolitana do Recife

Através do estudo estatístico desenvolvido pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Saneamento da Universidade Federal de Pernambuco (LSA-UFPE), foi possível deferir os pontos de amostragem considerando o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), aplicando modelo similar para o cálculo do Índice de Vulnerabilidade, conforme a Equação 1.

$$IV_i = \frac{(i - (i_{min}))}{((i_{max}) - (i_{min}))} \quad (1)$$

Onde:

IV: índice de vulnerabilidade

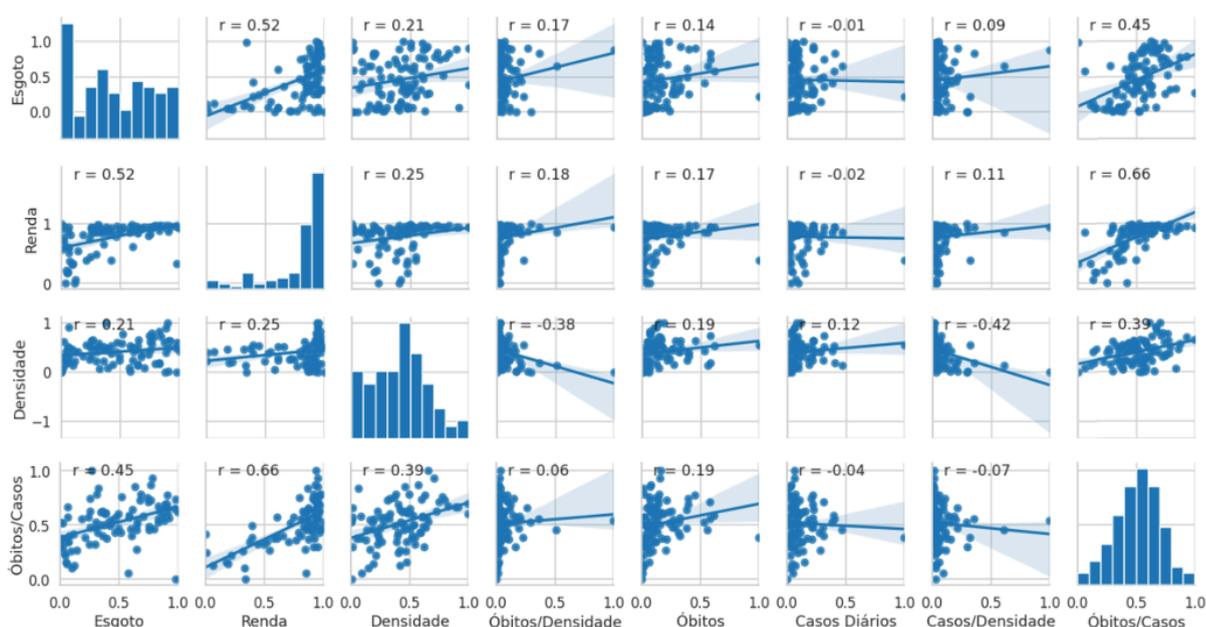
i: indicador considerado

(i) min: valor mínimo para a distribuição do indicador

(i) max: valor máximo para a distribuição do indicado

Como pode ser notado na Figura 5, alguns dados obtidos entre fevereiro e julho de 2020 em Recife foram utilizados no cálculo do IDH, como o percentual da coleta de esgoto, renda *per capita*, densidade demográfica e os óbitos/casos confirmados para os casos de COVID-19. Por meio da correlação foi possível observar que os dados de óbitos/casos perfilavam com os outros parâmetros apresentados acima.

Figura 5 – Gráficos de correlações entre os índices de vulnerabilidade e casos de COVID-19



Fonte: Rede Monitoramento Covid Esgotos, Boletim de Acompanhamento n° 10 (2022)

A partir dos parâmetros citados, foi possível identificar e justificar os pontos de coleta escolhidos, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição geográfica e descrição dos pontos de monitoramento de Recife – PE

Identificação do ponto	Descrição	População contribuinte (Nº de habitantes)	Justificativa para a escolha do ponto de monitoramento
ETE Peixinhos	Estação de Tratamento de Esgotos Peixinhos	286.000	Ponto correspondente a uma ampla área de esgotamento.
ETE Mangueira	Estação de Tratamento de Esgotos Mangueira	22.000	Ponto correspondente a uma ampla área de esgotamento.
ETE Cabanga	Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga	336.000	Ponto correspondente a uma ampla área de esgotamento.

Fonte: Adaptado da Rede Monitoramento Covid Esgotos, Boletim de Acompanhamento nº 10 (2022)

Segundo a Compesa ([20–]), o sistema de esgotamento sanitário Cabanga possui 214 km de rede coletora, 17 Estações Elevatórias de Esgoto (EEE) e, atualmente, atende cerca de 176.670 habitantes. O efluente tratado é lançado no Rio Jiquiá. Já a ETE Peixinhos recebe esgotos de diversos bairros da RMR, contando com 109 km de rede coletora, 13 EEE, beneficiando aproximadamente 314.500 habitantes. O tratamento é biológico secundário por filtração, com lançamento no Rio Beberibe.

A ETE Mangueira tem capacidade de 32 L/s e utiliza reatores anaeróbios de fluxo ascendente, com lançamento no Rio Tejipió. Não há dados disponíveis sobre sua rede coletora e estações elevatórias (Compesa, [20–]).

4.2 IDENTIFICAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DAS AMOSTRAS AMBIENTAIS

As amostras brutas foram entregues ao laboratório por meio da empresa BRK Ambiental e da Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa) coletadas com o auxílio de um amostrador automático, as quais foram acondicionadas em garrafas de propileno de 250 mL de volume e transportadas em caixas térmicas à 4°C. No primeiro momento foram catalogadas e organizadas todas as amostras de afluentes das ETEs coletadas e armazenadas sob refrigeração no LSA-UFPE (Figura 6).

Figura 6 – Amostras de afluentes das ETEs para análises



Fonte: Autora (2022)

Segundo Martins (2022), a metodologia de identificação do SARS-CoV-2 consistia na concentração das amostras brutas por um método modificado de filtração com membranas negativamente carregadas, eficiente na recuperação de RNA viral, de baixo custo e indicado para rotina na concentração de vírus entéricos em esgoto. Inicialmente eram adicionados 2,5 M de $MgCl_2$ a 250 mL de amostra, seguidos de acidificação com ácido acético 10 M até pH entre 3,5 e 3,0; a filtração foi realizada com membranas de éster de celulose (HAWP04700, Millipore; 0,45 μm , 47 mm), previamente embebidas em ácido acético 10 M, logo após, foram transferidas para tubos Eppendorf com 1,7 mL de Tampão Fosfato Salino (*Phosphate Buffer Saline* - PBS) e 0,3 g de microesferas de vidro (*glass beads*), sendo submetidas à disrupção em *bead-beater* (MP Biomedical, USA). Após centrifugação a 7000 rpm por 10 minutos à temperatura ambiente, o sobrenadante contendo o RNA viral foi coletado e armazenado a $-20\text{ }^{\circ}C$ até a extração do material genético, que se dava através do kit de preparo comercial Allprep PowerViral DNA/RNA do fabricante Quiagen® (Martins, 2022).

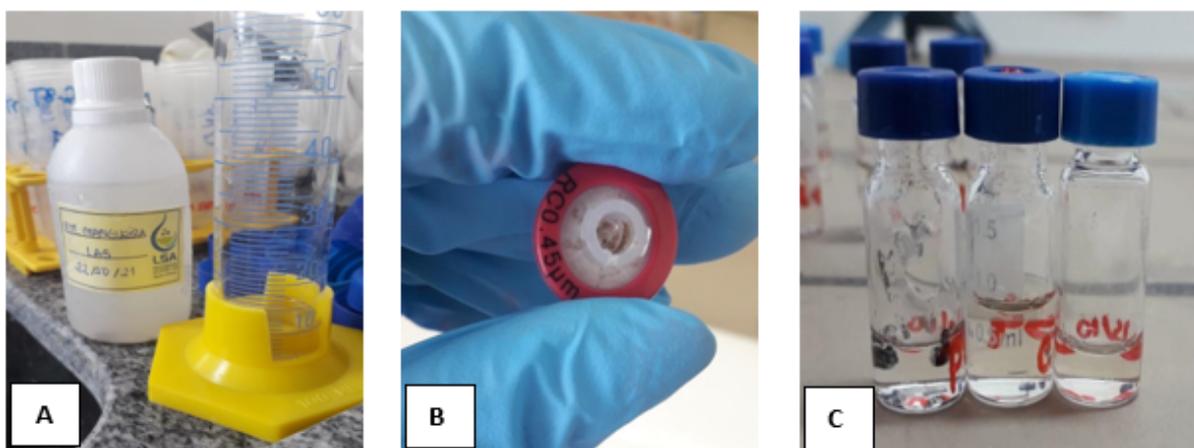
Para a metodologia de quantificação do LAS, foi utilizada a soma das cargas virais das três estações monitoradas, a ETE Peixinhos, ETE Mangueira e ETE Cabanga no período entre maio de 2021 e dezembro de 2022. A fim de evitar a degradação do detergente e perda do sinal analítico por cromatografia, as amostras foram congeladas até o início do preparo.

4.3 PREPARO DAS AMOSTRAS DE LAS

As amostras foram preparadas, Figura 7A, inicialmente pelo processo de concentração de alíquotas líquidas de 10 mL do material bruto, colocadas em tubos de polipropileno de fundo cônico modelo falcons de 50 mL. Concentrador de amostras da marca Genevac SP SCIENTIFIC, modelo EZ2.3 Elite, em pressão atmosférica de aproximadamente 1 mbar e temperatura constante de aproximadamente 60°C, foi utilizado para que o surfactante fosse analisado.

Para total evaporação das amostras, foram necessárias um total de 3 horas e 30 minutos no concentrador. Após o período informado, o soluto residual foi ressuscitado com 1 mL da solução água/metanol na proporção 65:35 (v:v) e filtrado em membrana de celulose com porosidade de 0,45 µm (Figura 7B). Por fim, as amostras foram acondicionadas em vials com volume total de 1 mL, Figura 7C, e congeladas em freezer -20°C (Costa, 2022).

Figura 7 – Preparação das amostras brutas para a cromatografia líquida



Fonte: Autora (2022). Separação do material bruto (5A), filtração do material do bruto em filtro de 0,45 µm (5B) e acondicionamento das amostras filtradas em vials (5C)

4.4 DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO SURFACTANTE ANIÔNICO

A técnica da cromatografia CLAE é amplamente utilizada para a determinação do LAS. A detecção anteriormente empregada utilizava uma fase móvel contendo acetonitrila como solvente orgânico combinada com água como solução aquosa,

solução de acetato de amônio a 0,01 M como par iônico e o uso da coluna cromatográfica C8 como fase estacionária.

A fim de obter os resultados da concentração do surfactante, foi feito o uso da CLAE baseado na metodologia desenvolvida e validada por Duarte *et al.* (2006). Após alguns procedimentos experimentais e estudos, as novas condições cromatográficas para a separação e quantificação dos homólogos do LAS, consistiam na mudança de certos parâmetros, em especial o uso de duas soluções como eluentes: A = perclorato de sódio a 0,075 g/L + água ultrapura e B = metanol puro (Tabela 3) tendo utilizado a coluna analítica da Merck em fase reversa (RP) Lichrospher®RPC18 de 250 mm x 4,6 mm (diâmetro interno) x 5 µm.

Tabela 3 – Considerações cromatográficas para quantificação do surfactante aniônico - LAS

Parâmetros Cromatográficos	
Coluna	C8
Injeção	100 µL
Fluxo	1.0 mL/min
Eluente A	Água + 0.075 g/L de Perclorato de sódio
Eluente B	Metanol puro
Tempo de equilibração	2,5 min
Temperatura da coluna	35° C
Temperatura do amostrador	5° C

Fonte: Autora (2022)

A variação do gradiente da fase móvel e do tempo de corrida cromatográfica foi estabelecido conforme descrito na Tabela 4. O gráfico percentual de A (%) em função do tempo (min) traz as proporções definidas para o eluente A e para o eluente B = 100% - A%. O eluente A foi previamente filtrado para preservar o cromatógrafo e evitar interferências. Durante a validação do método, verificou-se que tal filtração não influenciou no resultado.

Tabela 4 – Gradiente de eluentes do método empregado na análise do LAS por CLAE

Tempo (min)	Fluxo (mL/min)	%A	%B
0	1	50	50
18	1	23	77
19	1	23	77
20	1	50	50

Fonte: Autora (2022)

A partir dos parâmetros bem estabelecidos, foi possível realizar a curva de quantificação para o LAS. Tal curva foi realizada mediante solução de LAS em concentrações conhecidas de 2, 8, 16, 26, 40, 60 e 80 mg/L de LAS Padrão com composição representativa da mistura comercial, contendo 25,5% (m/m) de matéria ativa e percentual de 14,1%, 31,6%, 30,2% e 23% para os homólogos C10, C11, C12 e C13, respectivamente, obtidos com a CEPESA Química (San Roque, Espanha), preparadas em estoques com água ultrapura rodada no início, meio e fim da coleta dos dados, conforme Tabela 5, e possuidora da Equação 2 abaixo:

$$f_{(x)} = 2,75 * 10^{-3} * x + 5,48 * 10^{-4} \quad (2)$$

Onde:

f (x): curva de quantificação

x: concentração de LAS padrão (mg/L)

Tabela 5 – Dados obtidos das injeções do surfactante aniônico LAS em CLAE de cada triplicata

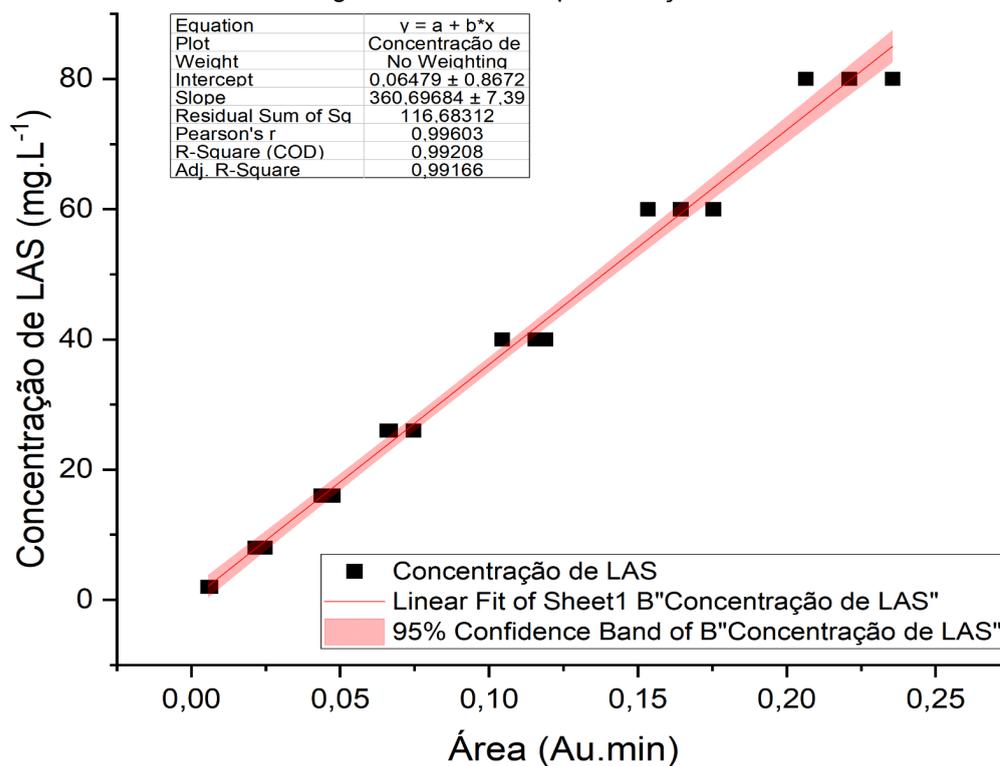
	Nº Injeção	CLAS80 (mg/L)	CLAS60 (mg/L)	CLAS40 (mg/L)	CLAS26 (mg/L)	CLAS16 (mg/L)	CLAS08 (mg/L)	CLAS02 (mg/L)
C10	1	0,021	0,015	0,010	0,007	0,004	0,002	1,37E-4
C11	1	0,063	0,047	0,032	0,020	0,013	0,006	0,001
C12	1	0,064	0,048	0,033	0,024	0,014	0,007	0,002
C13	1	0,049	0,035	0,025	0,015	0,010	0,005	0,002
C14	1	0,009	0,007	0,004	0,003	0,002	0,001	3,36E-4
C10	2	0,031	0,024	0,016	0,010	0,006	0,003	5,63E-4
C11	2	0,084	0,063	0,042	0,027	0,017	0,008	0,002
C12	2	0,072	0,054	0,037	0,023	0,015	0,007	0,002
C13	2	0,047	0,034	0,023	0,014	0,009	0,004	0,001
C14	2	0,001	0,001	0,001	4,04E-4	0,001	2,61E-4	3,13E-4
C10	3	0,026	0,019	0,016	0,009	0,005	0,003	5,60E-4
C11	3	0,073	0,055	0,042	0,024	0,015	0,008	1,68E-3
C12	3	0,068	0,051	0,036	0,021	0,014	0,008	2,67E-3
C13	3	0,048	0,035	0,022	0,012	0,010	0,005	1,22E-3
C14	3	0,005	0,004	3,43E-4	-7,98E-5	0,001	4,53E-4	2,47E-4

Fonte: Autora (2022)

Nota: As siglas CLAS80, CLAS60, CLAS40, CLAS26, CLAS16, CLAS08 e CLAS02 referem-se às soluções padrão de LAS nas concentrações de 80, 60, 40, 26, 16, 08 e 02 mg/L, respectivamente.

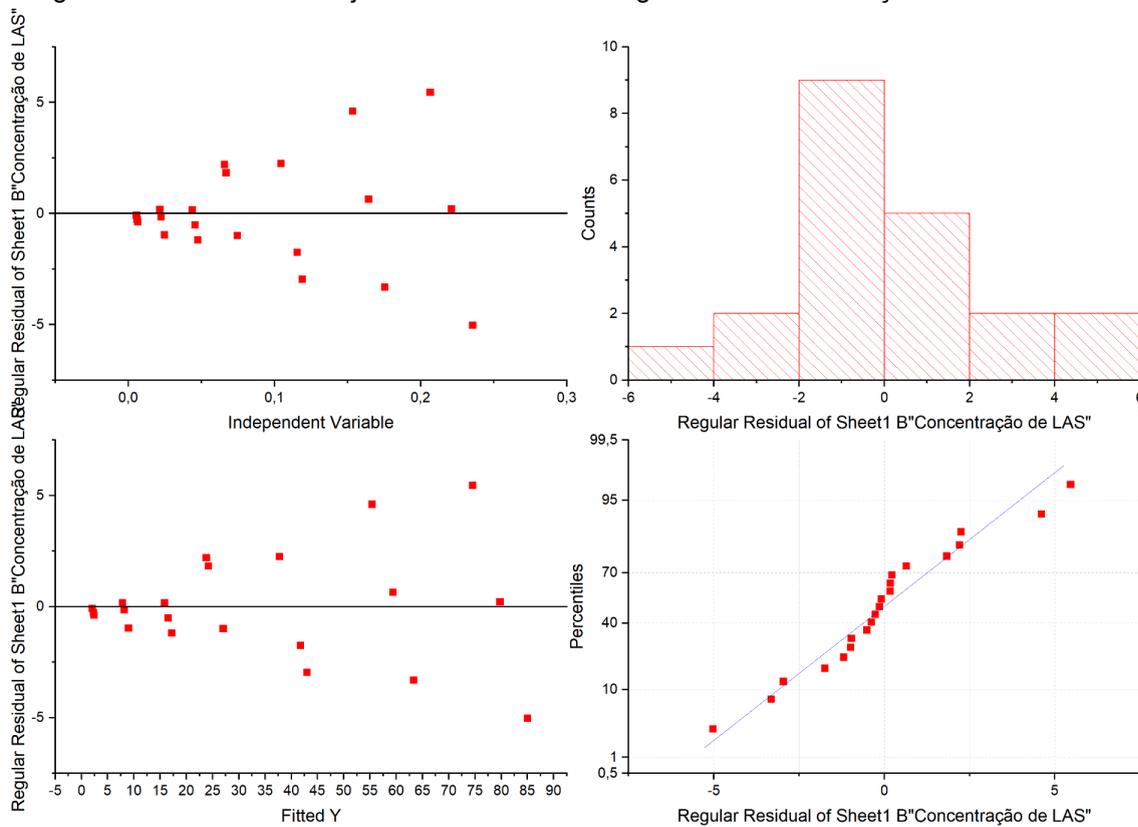
A falta de ajuste foi testada para as três repetições dos 7 pontos da curva, com o uso do software estatístico *Origin*, utilizado para análise e visualização de dados científicos e estatísticos, desenvolvido pela OriginLab Corporation com sede em Massachusetts, EUA, na versão Origin 2022b (9.95). Na Figura 8, temos a reta limite de quantificação da curva e na Figura 9, os padrões residuais que ajudam a verificar a validade de um da regressão no modelo de ajuste.

Figura 8 - Curva de quantificação



Fonte: Autora (2022)

Figura 9 – Resíduos dos ajustes da curva cromatográfica da concentração de LAS em CLAE

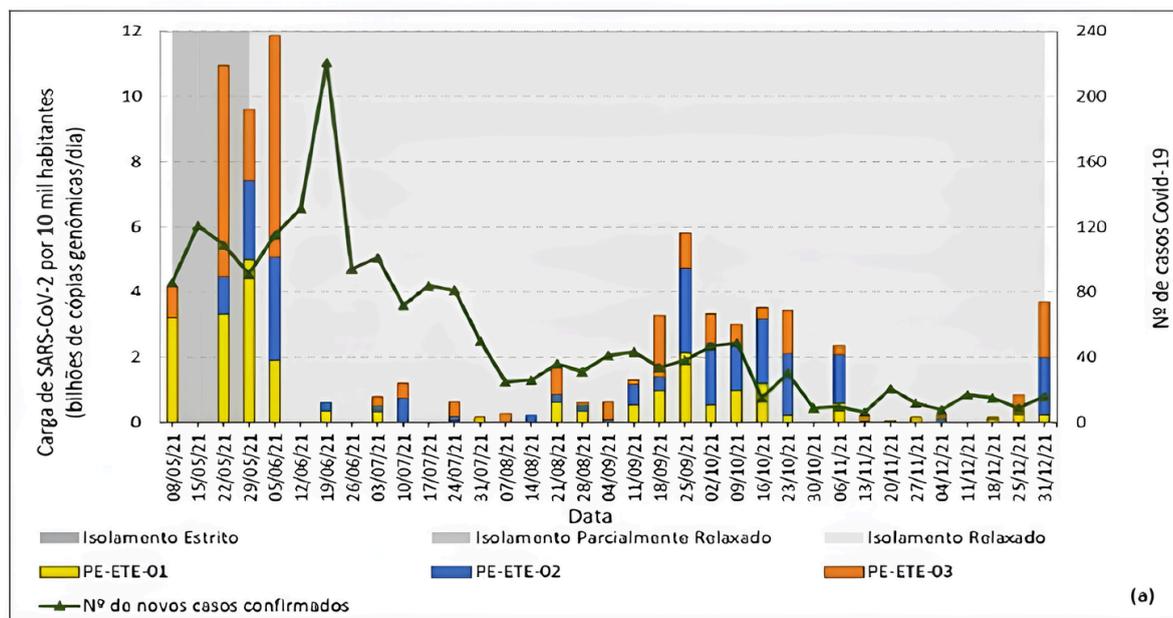


Fonte: Autora (2022)

4.5 AMOSTRAS AMBIENTAIS

Ao todo, foram analisadas 78 amostras ambientais provenientes das três estações de tratamento de esgoto, conforme o plano de monitoramento da carga viral. As amostras de LAS correspondem às semanas epidemiológicas indicadas no Boletim de Acompanhamento nº 10 da Rede de Monitoramento COVID Esgotos (ANA, 2022), abrangendo o período de 8 de maio a 31 de dezembro de 2021, como apresentado na Figura 10. A figura também exibe a carga de SARS-CoV-2, quantificada em bilhões de cópias genômicas por dia, representando o somatório das três estações.

Figura 10 – Soma das cargas virais detectadas nas três ETEs monitoradas



Fonte: Rede Monitoramento Covid Esgotos, Boletim de Acompanhamento nº 10 (2022)

Nota: PE-ETE-01: ETE Peixinhos; PE-ETE-02: ETE Mangueira; PE-ETE-03: ETE Cabanga

As 78 amostras ambientais brutas coletadas foram mantidas congeladas (-4°C), para evitar a degradação do tensoativo até o momento de serem concentradas. Após concentradas (fator de 10 vezes) as amostras foram analisadas por CLAE, as áreas dos picos cromatográficos foram processadas e convertidas com base na curva de calibração.

4.6 CONCENTRAÇÃO DAS AMOSTRAS CONTENDO SURFACTANTE ANIÔNICO LAS

Mediante o somatório das áreas dos picos referentes aos homólogos C10, C11, C12, C13 e C14 de cada amostra, foi possível fazer o levantamento das concentrações por meio da expressão de conversão dada pela Equação 3:

$$y = 360,70 * x + 0,07 \quad (3)$$

Onde:

y = concentração (mg/L);

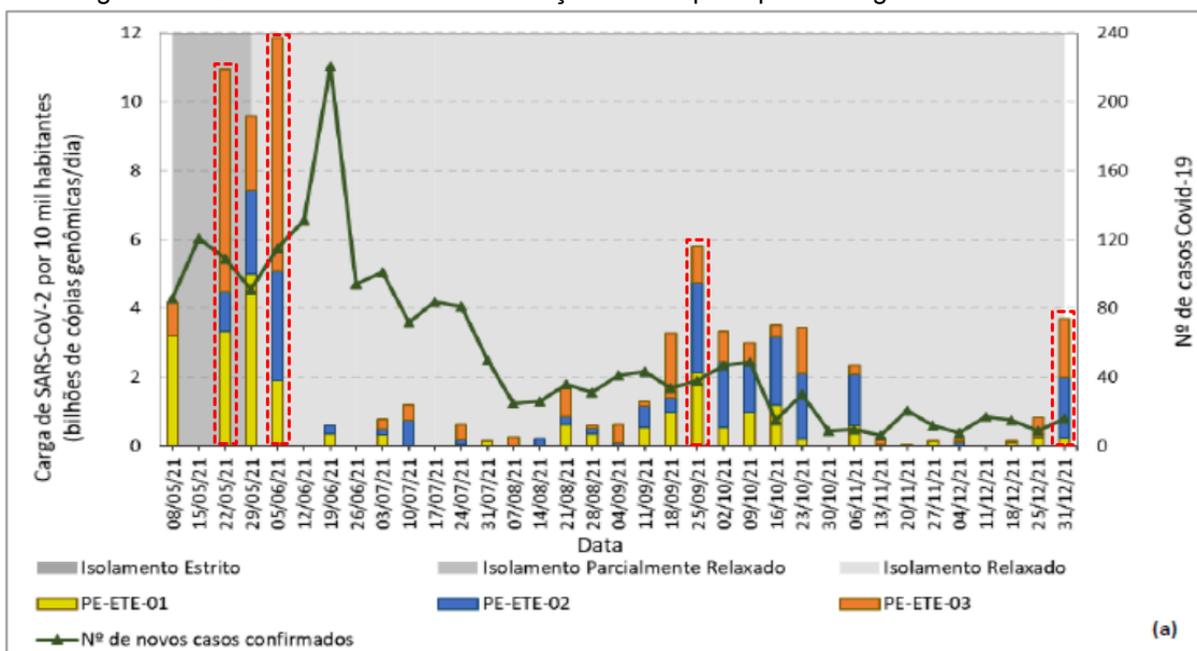
x = área.

Os valores obtidos por meio da Equação 3 são valores concentrados devido ao processo inicial do preparo das amostras (fator de 10 vezes), por isso foi necessário a divisão por 10 para achar o valor da concentração real do tensoativo (mg/L) em cada data analisada.

4.7 MAPAS EPIDEMIOLÓGICOS DOS PONTOS AMOSTRAIS

Para a elaboração dos mapas epidemiológicos, bem como no mapa de localização das estações de tratamento, foi utilizado o *software* QGIS, versão 3.22.9. Com caráter de estudo, optou-se pela análise de quatro datas representativas de picos de alta carga viral ao longo do ano de 2021, sendo elas: 22 de maio, 5 de junho, 25 de setembro e 31 de dezembro (Figura 11). A seleção dessas datas baseou-se tanto nos valores absolutos de carga viral detectados quanto na distribuição espacial dos pontos amostrados.

Figura 11 – Datas analisadas na elaboração dos mapas epidemiológicos e médias móveis



Fonte: Adaptado da Rede Monitoramento Covid Esgotos, Boletim de Acompanhamento n° 10 (2022).

Nota: Datas para geração de mapas destacados com retângulos em vermelho tracejado.

PE-ETE-01: ETE Peixinhos; PE-ETE-02: ETE Mangueira; PE-ETE-03: ETE Cabanga

Para uma análise espacial mais detalhada da distribuição das cargas virais, foi aplicada a estimativa de densidade por meio do método Kernel, contido na ferramenta Mapa de Calor do QGIS, para as datas selecionadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

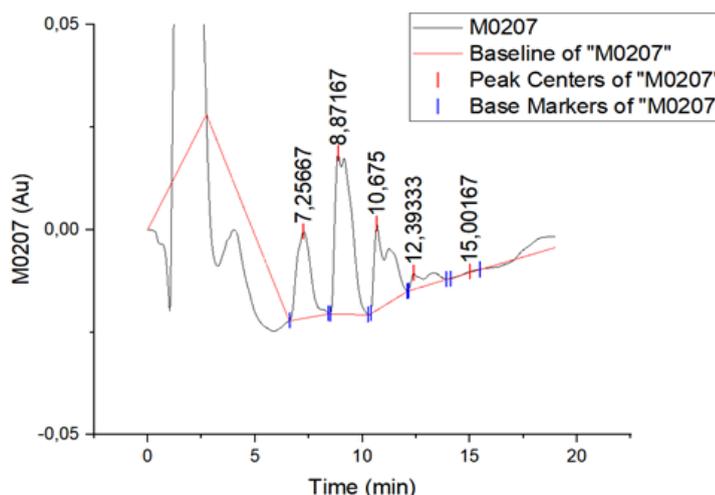
A seguir, são apresentados os resultados obtidos após o tratamento dos dados gerados por CLAE, bem como os mapas produzidos e os gráficos com as análises das relações entre as concentrações de LAS e a carga viral de SARS-CoV-2.

5.1 DADOS GERADOS NA CROMATOGRAFIA

Como método de identificação, as amostras foram nomeadas de acordo com a ETE de origem, seguida da data da coleta. Por exemplo, a amostra cifrada como M0207 refere-se à ETE Mangueira, com coleta realizada em 02 de julho de 2021.

Através do uso do *Origin* foi possível tratar os dados gerados no CLAE e extrair as áreas dos picos convertidas pela curva (Figura 8). No gráfico obtido pelo *software*, o tempo de retenção em minutos (eixo x), tempo que o composto leva para sair da coluna, foi relacionado com a intensidade do sinal em AU (Unidades de Absorbância), que mede a resposta do detector (eixo y), Figura 12.

Figura 12 – M0207: ETE Mangueira, com coleta realizada em 02 de julho de 2021



Fonte: Autora (2022)

O LAS é uma mistura de compostos químicos pertencentes a uma mesma função química, só que com diferentes quantidades de átomos de carbono em sua estrutura (C10 a C14). Quanto maior a cadeia, maior o tempo de retenção, ou seja, mais apolar e uma maior interação com a fase estacionária. A Tabela 6, fornece dados mais detalhados acerca da análise efetuada pelo *Origin* da amostra M0207.

Tabela 6 – Áreas cromatográficas relacionada as injeções de LAS da amostra M0207

Homólogo	Nº	Área	Área (% do total)	Tempo de Retenção (min)	Altura
C10	1	0,016	2,513	7,257	0,021
C11	2	0,034	5,429	8,872	0,039
C12	3	0,017	2,698	10,675	0,021
C13	4	0,004	0,577	12,393	0,004
C14	5	1,19E-4	0,019	15,002	2,98E-4

Fonte: Autora (2022)

Mediante resultado, nota-se que dentre os picos detectados, o segundo pico, com cerca de 5,43% da contribuição total da amostra, apresenta a maior quantidade relativa de área e altura, sugerindo uma maior concentração do homólogo C11.

As concentrações obtidas a partir do somatório das áreas dos picos correspondentes aos homólogos das amostras da ETE Mangueira datadas em 04 de junho, 18 de junho e 02 de julho de 2021, respectivamente, M0406, M1806 e M0207, e convertidas por meio da Equação 3, foram divididas por 10, resultando nos valores reais das concentrações do tensoativo, expressas em mg/L (Tabela 7).

Tabela 7 – Obtenção da concentração real de amostras de LAS na ETE Mangueira

Homólogos	M0406	M1806	M0207
C10	0,0093	0,0037	0,0158
C11	0,0217	0,0100	0,0342
C12	0,0052	0,0068	0,0170
C13	0,0039	0,0015	0,0036
C14	0,0006	2,97E-04	1,19E-04
Soma	0,0408	2,23E-02	7,08E-02
CLAS,conc (ml/L)	14,80	8,12	25,59
CLAS,real (mg/L)	1,48	0,81	2,56

Fonte: Autora (2022)

Ao analisar os valores obtidos para as amostras, observa-se que o homólogo C11 foi o mais predominante em todas elas, o que é característico de formulações comerciais de LAS. Por outro lado, o homólogo C14 apresentou os menores valores, o que é coerente com sua maior propensão à adsorção ambiental. Em relação às concentrações totais, a amostra M0207 apresentou o maior teor de LAS, com uma concentração real de 2,56 mg/L, seguida pelas amostras M0406 (1,48 mg/L) e M1806 (0,81 mg/L).

Conforme o procedimento descrito nas Tabelas 6 e 7, as análises das demais amostras coletadas foram realizadas, e os resultados estão apresentados na Tabela 8. Esta tabela reúne as datas de coleta, as concentrações reais por estação de tratamento (em mg/L), bem como a soma das concentrações das ETEs analisadas e

suas respectivas médias. Para as datas em que não foi possível identificar a coleta, os valores de concentração foram mantidos iguais aos anteriores.

Tabela 8 – Concentrações de LAS nas ETEs analisadas e suas médias

Data	ETE Peixinhos (mg/L)	ETE Mangueira (mg/L)	ETE Cabanga (mg/L)	Soma das três ETEs (mg/L)
08/05/21	1,42	2,87	1,28	5,57
15/05/21	2,55	2,87	0,91	6,33
22/05/21	3,68	2,87	0,54	7,09
29/05/21	3,79	0,90	0,32	5,01
05/06/21	0,61	1,48	0,76	2,85
12/06/21	1,04	0,81	0,98	2,83
19/06/21	1,04	0,81	0,98	2,83
26/06/21	0,95	2,56	1,69	5,20
03/07/21	0,95	2,56	1,69	5,20
10/07/21	1,20	2,56	1,73	5,49
17/07/21	1,20	2,56	1,73	5,49
24/07/21	0,95	0,85	1,69	3,49
31/07/21	2,40	3,25	0,47	6,12
07/08/21	1,29	2,67	1,26	5,22
14/08/21	0,98	2,14	0,80	3,91
21/08/21	0,86	1,98	1,08	3,92
28/08/21	1,51	3,56	1,66	6,74
04/09/21	1,51	3,56	1,66	6,74
11/09/21	1,74	3,75	-0,86	4,63
18/09/21	1,05	2,39	0,35	3,78
25/09/21	1,04	0,21	0,14	1,39
02/10/21	1,13	2,06	0,61	3,80
09/10/21	0,66	2,23	0,77	3,66
16/10/21	2,00	2,13	0,72	4,86
23/10/21	1,39	2,13	0,35	3,87
30/10/21	1,39	2,13	0,35	3,87
06/11/21	0,39	4,81	1,02	6,22
13/11/21	1,97	2,54	0,24	4,75

Tabela 8 - Continuação

Data	ETE Peixinhos (mg/L)	ETE Mangueira (mg/L)	ETE Cabanga (mg/L)	Soma das três ETEs (mg/L)
20/11/21	1,97	2,54	0,24	4,75
27/11/21	1,66	2,73	1,49	5,88
04/12/21	1,00	2,94	1,41	5,36
11/12/21	1,00	2,94	1,41	5,36
18/12/21	1,87	2,99	1,64	6,51
25/12/21	1,87	2,99	1,64	6,51
31/12/21	1,64	1,80	1,22	4,67
Média	1,48	2,40	0,98	4,85

Fonte: Autora (2022)

As ETEs analisadas neste estudo encontram-se distribuídas na Região Metropolitana do Recife, refletindo distintos contextos socioespaciais, os quais influenciam diretamente os padrões de concentração do LAS nas amostras.

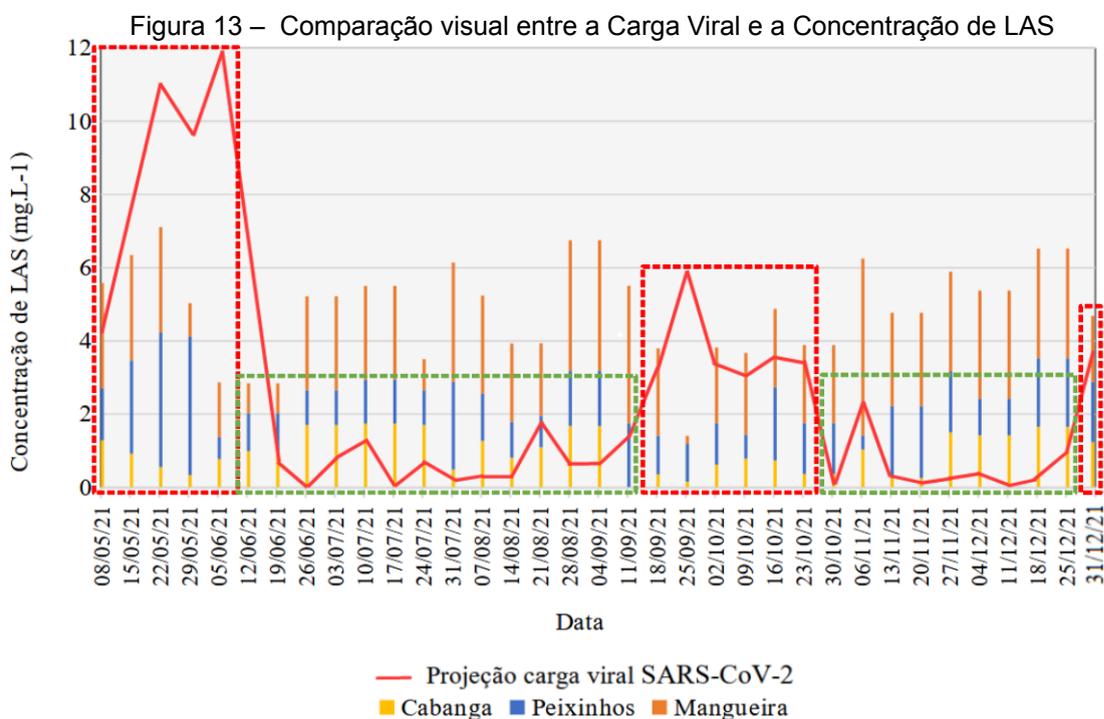
A ETE Mangueira, localizada no bairro da Mangueira, na região Centro-Sul do Recife, atende bairros como Areias, Afogados, Estância, Imbiribeira e Ipsep, cujos Índices de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) situam-se entre 0,63 e 0,72, faixa considerada de médio a baixo desenvolvimento, conforme o Atlas Brasil (2022). Esta estação apresentou a maior concentração média de LAS entre as unidades avaliadas, com valor de 2,40 mg/L, com destaque para os dias 28/08, 11/09, 06/11 e 18/12, e um desvio padrão de 0,93. Tal resultado pode estar relacionado a fatores como elevada densidade populacional, menor eficiência dos sistemas de esgotamento sanitário, maior uso comercial e doméstico de detergentes, além de aspectos hidrológicos e deficiências na coleta seletiva e manejo adequado de resíduos.

A ETE Peixinhos, por sua vez, está situada na região Norte de Olinda/Recife e atende bairros como Peixinhos e Sítio Novo, que apresentam IDHM entre 0,68 e 0,72 — também classificados como de nível médio a baixo (ATLAS BRASIL, 2022). A estação apresentou uma concentração média intermediária de LAS, de 1,48 mg/L, com variações mais estáveis ao longo do período de monitoramento e um desvio padrão de 0,75. Esse padrão pode estar relacionado à composição heterogênea das áreas atendidas, que abrangem zonas residenciais e regiões de uso industrial.

Por fim, a estação Cabanga está localizada na Zona Sul do Recife e é responsável pelo tratamento de esgoto proveniente de bairros como Cabanga e partes de Santo Amaro e Torre. As regiões abrangidas por esta ETE possuem IDHM variando entre 0,73 e 0,79, sendo, portanto, classificadas como de médio a alto desenvolvimento (ATLAS BRASIL, 2022). Esta unidade apresentou 0,98 mg/L de LAS, a menor concentração média entre as analisadas, com um desvio padrão de 0,62, o que pode ser atribuído à menor densidade populacional e à presença de uma infraestrutura urbana mais consolidada, o que auxilia na eficiência do sistema de coleta e tratamento de esgoto.

5.2 CONCENTRAÇÕES DE LAS E DA CARGA VIRAL DE SARS-CoV-2

O gráfico apresentado na Figura 13 mostra as concentrações do tensoativo ao longo das SEs identificando os períodos de maior e menor carga viral, juntamente com a projeção da soma das cargas virais de SARS-CoV-2 nas três estações.



Fonte: Autora (2022)

Nota: As caixas em vermelho indicam períodos de elevada carga viral, enquanto as destacadas em verde representam momentos de baixa carga viral.

dados sugerem que a utilização e o descarte desse surfactante mantiveram-se estáveis, com baixa correlação com as variações na carga viral.

A falta de correlação pode estar atrelada a diferentes fatores, como a fonte de emissão, pois o tensoativo é comumente encontrado em produtos de limpeza e a carga viral depende da prevalência de infecção viral na população, embora ambos estejam presentes nos esgotos, suas fontes e padrões de liberação são diferentes.

Segundo Petherick *et al.* (2020), o estado de Pernambuco agiu com rapidez, em meados de março lançou campanhas informativas e, no dia 18 do mesmo mês, disponibilizou um número de WhatsApp para orientações sobre a Covid-19, apenas 6 dias após os primeiros casos confirmados do vírus.

O governo municipal do Recife seguiu as diretrizes estaduais, em março, fechou escolas, comércios e proibiu aglomerações, seguindo as diretrizes do Decreto Nº 33.614 de 13 de abril de 2020 e, entre 16 e 31 de maio, adotou medidas mais rígidas de distanciamento, com fiscalização nas ruas e fechamento de estabelecimentos em desacordo, levando a população a permanecerem nas suas casas evitando e/ou diminuindo o contágio (Petherick *et al.*, 2020).

A fraca correlação também pode estar vinculada a interferência ambiental e operacional, onde fatores como a diluição por águas pluviais, a eficiência das ETEs, o horário da coleta e a degradação química ou biológica podem influenciar os dois indicadores de maneira independente.

Ademais, a baixa correlação linear não descarta a relação não-linear entre as variáveis, para isso, foi detectada as associações monotônicas pela correlação de Spearman, que mede a força e o sentido da relação entre duas variáveis, com base na ordem das observações, sendo aplicável a dados lineares e não lineares (Sousa, 2019). Com isso temos, o Coeficiente de Spearman em -0,20 e o valor de p (significância) em 0,26, levando a uma correlação monotônica fraca e negativa.

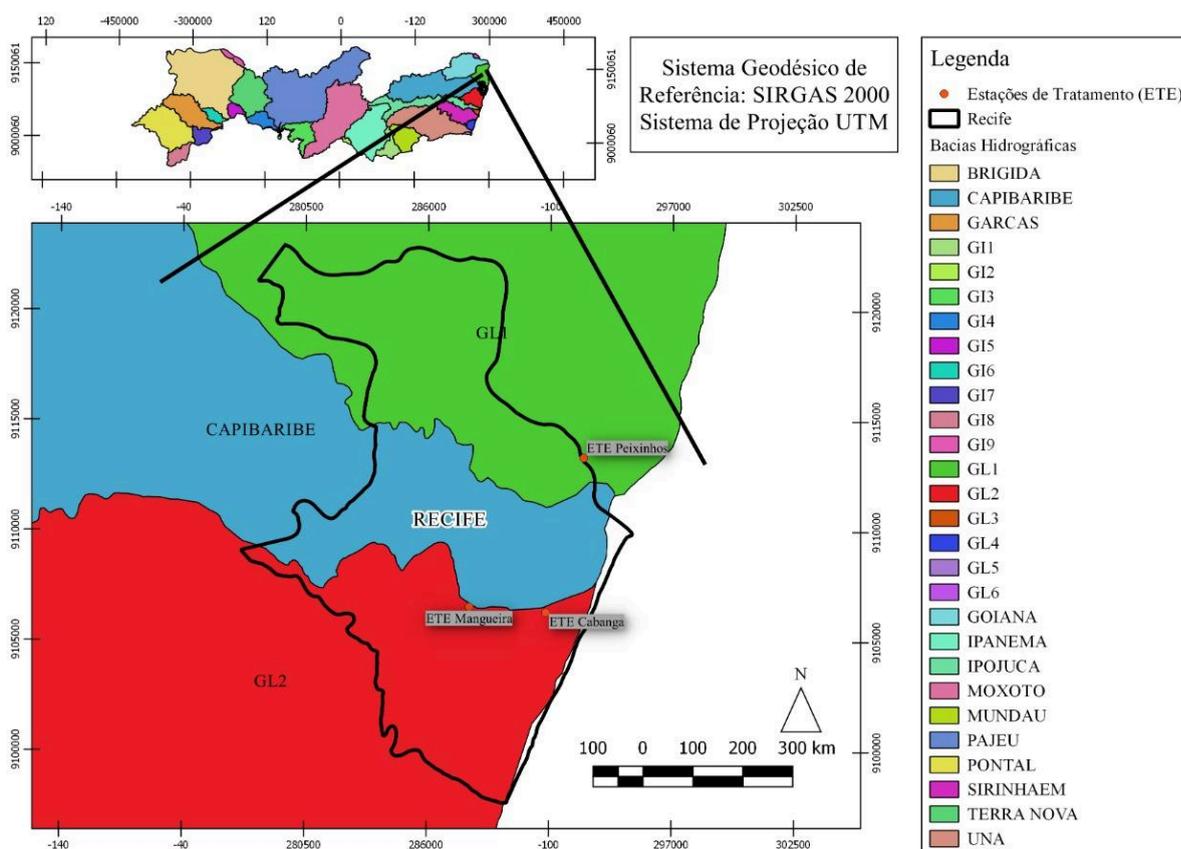
5.3 MAPAS EPIDEMIOLÓGICOS E ANÁLISE DAS MÉDIAS MOVÉIS

Os mapas cartográficos são ferramentas fundamentais no planejamento e gestão do saneamento ambiental, no monitoramento de poluentes, por permitirem a análise espacial integrada de dados ambientais, sanitários e epidemiológicos e na Epidemiologia Baseada em Esgoto (*Wastewater-Based Epidemiology - WBE*).

Quando aplicados no saneamento, possibilitam a identificação de áreas sem cobertura adequada, orientando intervenções e planejamento (Dias *et al.*, 2021). Na WBE, permitem associar cargas virais e químicas detectadas em efluentes às respectivas áreas de contribuição populacional, auxiliando para a vigilância epidemiológica e a resposta rápida a surtos (Hart; Halden, 2020). Já no monitoramento de poluentes, são utilizados para localizar fontes de contaminação e modelar a dispersão de substâncias em corpos hídricos e solos (Araújo, 2012).

Após a definição das datas de interesse, foi elaborada uma planilha contendo as coordenadas UTM de cada estação de tratamento analisada, juntamente com os valores das cargas virais quantificadas. Esses dados foram integrados ao *software* QGIS na versão 3.22.9, permitindo a plotagem dos pontos georreferenciados. A Figura 15 exibe a delimitação das Bacias Hidrográficas correlatas às área de estudo.

Figura 15 – Localização das ETEs na cidade de Recife por Bacia Hidrográfica



Fonte: Autora (2022)

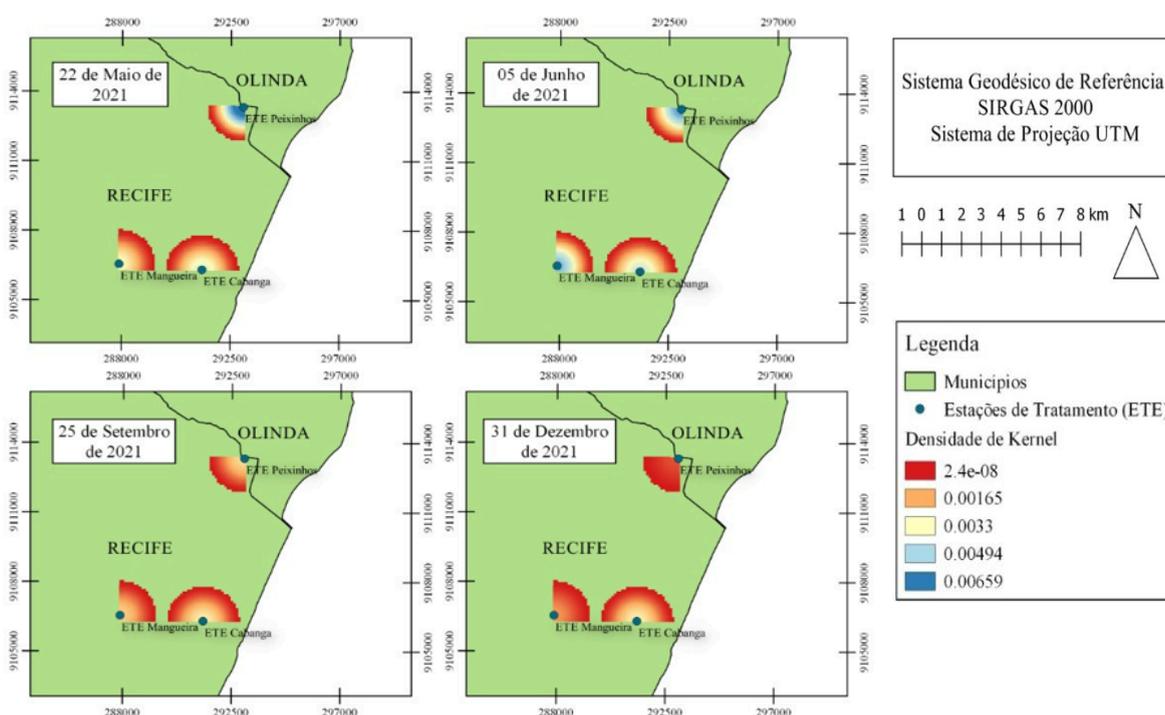
Nota: GI: Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores; GL: Grupo de Pequenos Rios Litorâneos;

UTM: Sistema Universal Transversa de Mercator

As bacias hidrográficas GL1, GL2 e CAPIBARIBE cobrem partes importantes do território do Recife, servindo como canais de escoamento para águas pluviais, esgotos domésticos e industriais, após tratamento pelas ETEs. Ressaltando que apenas um pouco mais de 40% da população de Recife é atendida por redes de captação de esgoto (Teixeira, 2021). Com isso, a localização das estações de tratamento influenciam diretamente na composição dos efluentes recebidos e regiões com infraestrutura de esgoto precária podem causar concentração irregular de LAS nos corpos hídricos.

Com base nas datas dos quatro picos de alta carga viral selecionados, foi possível analisar a série histórica das médias móveis de duas semanas das concentrações do SARS-CoV-2 em cada ETE monitorada. Dessa forma, é possível suavizar as variações nos dados, para tornar tendências mais visíveis. Utilizando a densidade de Kernel, com raio de influência de 1.500 metros permitindo uma análise espacial mais detalhada da distribuição da carga viral, observou-se, conforme ilustrado na Figura 16, que as maiores concentrações do SARS-CoV-2 por unidade ocorreram nos dias 22 de maio e 05 de junho de 2021, com destaque para a ETE Peixinhos.

Figura 16 – Densidade de Kernel para as médias móveis de duas semanas de concentração do SARS-CoV-2 por ETE



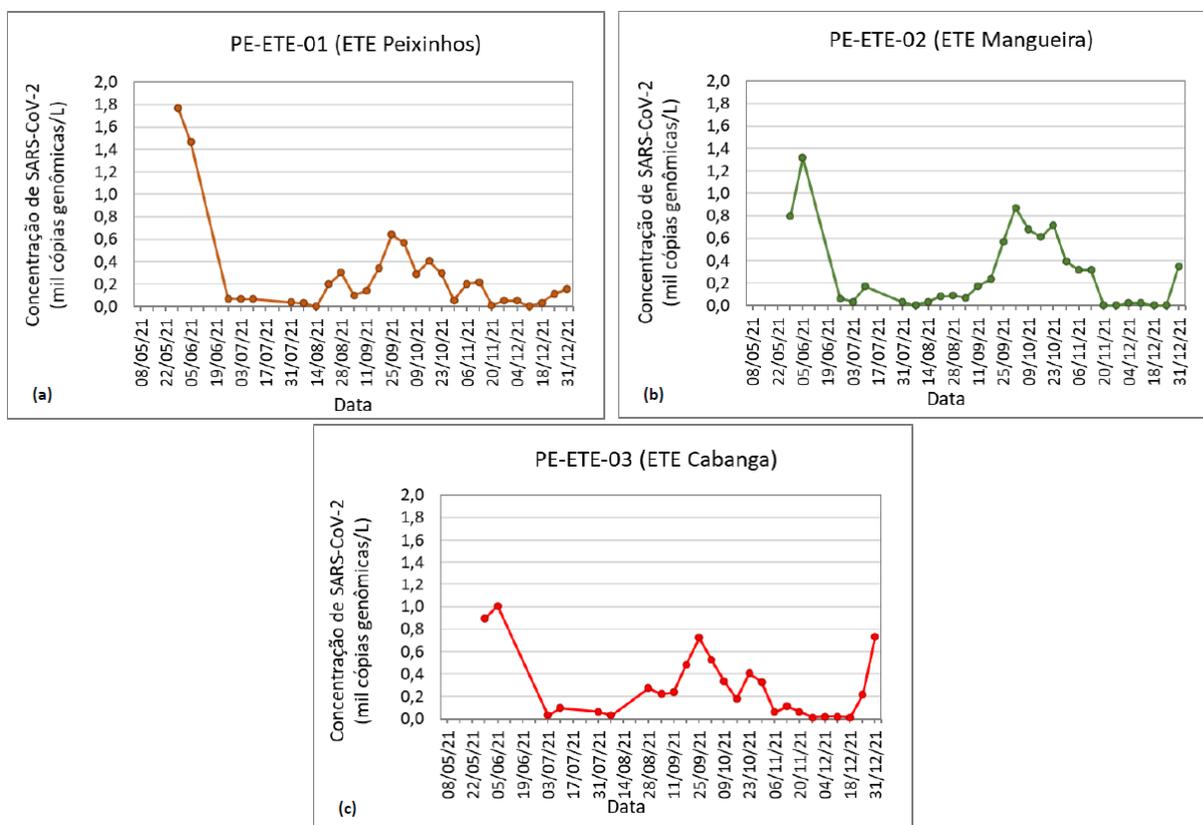
Fonte: Autora (2022)

A escala de densidade de Kernel neste mapa vai de $2,4e-08$ (vermelho) até 0,00659 (azul escuro), portanto, quanto mais azul, maior a densidade estimada.

A análise visual dos dados revela que, em 22 de maio, a ETE Peixinhos apresentou a maior concentração de carga viral, evidenciada pela predominância de tons azuis. Em contraste, as ETES Mangueira e Cabanga exibiram tonalidades mais claras, indicativas de concentrações inferiores. Na data de 5 de junho, observou-se um aumento expressivo da carga viral na ETE Mangueira, cuja densidade se equiparou à da ETE Peixinhos, refletindo um equilíbrio momentâneo entre as concentrações das duas estações. Em 25 de setembro, as três estações registraram concentrações reduzidas e relativamente homogêneas. Por fim, em 31 de dezembro, as ETES Mangueira e Peixinhos apresentaram as menores concentrações de carga viral, enquanto a ETE Cabanga manteve o maior valor relativo entre as três ETES.

As duas maiores concentrações de SARS-CoV-2 foram registradas no início do período avaliado, correspondendo às duas primeiras coletas, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Concentração viral de SARS-CoV-2 por unidade de tratamento



Fonte: Rede Monitoramento COVID Esgotos, Boletim de Acompanhamento nº 10, 2022. Unidade de Peixinhos (18a), unidade da Mangueira (18b) e unidade da Cabanga (18c)

Os picos de concentração de SARS-CoV-2 observados no início do período analisado podem estar relacionados a uma combinação de fatores epidemiológicos e ambientais, tais como: a permanência de indivíduos infectados em domicílio, o estágio inicial da campanha de vacinação, os decretos municipais com restrições de mobilidade e, ainda, a influência do regime hidrológico (chuvas e estiagem). A maior vazão dos sistemas de esgotamento sanitário no final do período chuvoso possivelmente contribuiu para a diluição do material genético viral, resultando em concentrações mais baixas nas amostras subsequentes.

Devido à limitação na disponibilidade de doses, o Plano Recife Vacina — elaborado e iniciado pela Prefeitura do Recife em janeiro de 2021 — estruturou ações de infraestrutura, logística e segurança voltadas à operacionalização da campanha de vacinação contra a COVID-19. Em função dessa escassez, a primeira fase da vacinação precisou ser segmentada em etapas (Gabinete de Imprensa, 2021).

Segundo a Secretaria de Saúde do Recife (2021), as primeiras doses foram destinadas a profissionais de saúde da linha de frente, idosos com 60 anos ou mais residentes em instituições de longa permanência, e pessoas com deficiência severa institucionalizadas com idade igual ou superior a 18 anos. Na etapa subsequente, foram implantados nove centros de vacinação e três pontos de atendimento no formato drive-thru, voltados à imunização de idosos com 85 anos ou mais, previamente cadastrados na plataforma Conecta Recife. Entre os meses de fevereiro e março, o processo de imunização avançou para trabalhadores da Atenção Básica em Saúde, idosos de faixas etárias decrescentes, pessoas com comorbidades e demais grupos prioritários. Até 19 de julho de 2021, seis meses após o início da campanha, aproximadamente 1,113 milhão de doses haviam sido aplicadas: mais de 826.500 pessoas receberam ao menos uma dose, e 346.811 haviam completado o esquema vacinal com duas doses ou a dose única, conforme o tipo de imunizante administrado (Secretaria de Saúde do Recife, 2021).

Embora o Plano de Vacinação tenha sido bem-sucedido, a cobertura vacinal ainda era limitada no período, favorecendo maior transmissão comunitária do SARS-CoV-2. Essa condição refletiu-se nas concentrações elevadas do vírus nas ETEs, devido à excreção de RNA viral por indivíduos infectados. Mesmo antes do *lockdown* total, a mobilidade populacional era suficiente para sustentar altos níveis

de carga viral no esgoto. Estudos demonstram que a carga viral em efluentes acompanha a incidência da COVID-19 e responde a variações nas medidas de controle sanitário (Randazzo *et al.*, 2020; Fongaro *et al.*, 2021; Martins, 2022).

Ao realizar uma comparação entre a concentração de LAS (mg/L) e de carga de SARS-CoV-2 (mil cópias/L), em médias móveis de duas semanas nas datas analisadas, temos a Tabela 9.

Tabela 9 – Concentração de LAS e de SARS-CoV-2 em médias móveis de duas semanas nas datas analisadas

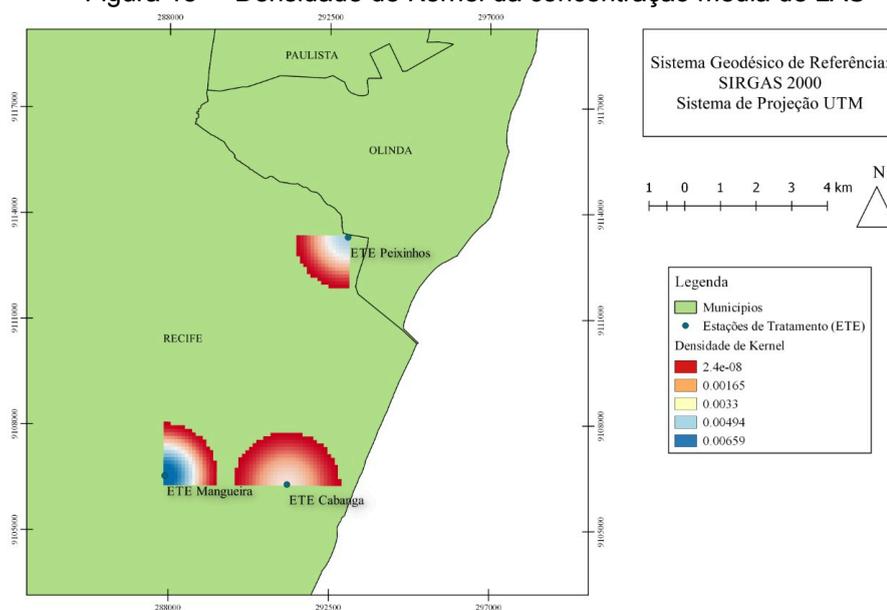
Data	Concentração de LAS				Carga de SARS-CoV-2			
	ETE Peixinhos (mg/L)	ETE Mangueira (mg/L)	ETE Cabanga (mg/L)	Soma das ETEs (mg/L)	ETE Peixinhos (mil cópias/L)	ETE Mangueira (mil cópias/L)	ETE Cabanga (mil cópias/L)	Soma das ETEs (mil cópias/L)
22/05/21	3,1	2,9	0,7	6,7	1,8	0,8	0,9	3,5
05/06/21	2,2	1,2	0,5	3,9	1,4	1,3	1,0	3,7
25/09/21	1,0	1,3	0,2	2,5	0,6	0,6	0,7	1,9
31/12/21	1,8	2,4	1,4	5,6	0,2	0,4	0,7	1,3

Fonte: Autora (2025)

Mediante análise das médias móveis, temos que a maior concentração de LAS nas datas analisadas, foi observada em 22 de maio de 2021, nesta mesma data, verificou-se também o segundo pico estudado de concentração do SARS-CoV-2, indicando uma coincidência entre os valores altos de LAS (6,7 mg/L) e carga viral (3,5 mil cópias genômicas/L). A partir desta data, os valores da carga viral oscilam ou se estabilizam em patamares baixos, independente das variações nas concentrações de LAS, ou seja, as variações ao longo do tempo não apresentam uma correlação evidente, reforçando a análise realizada anteriormente.

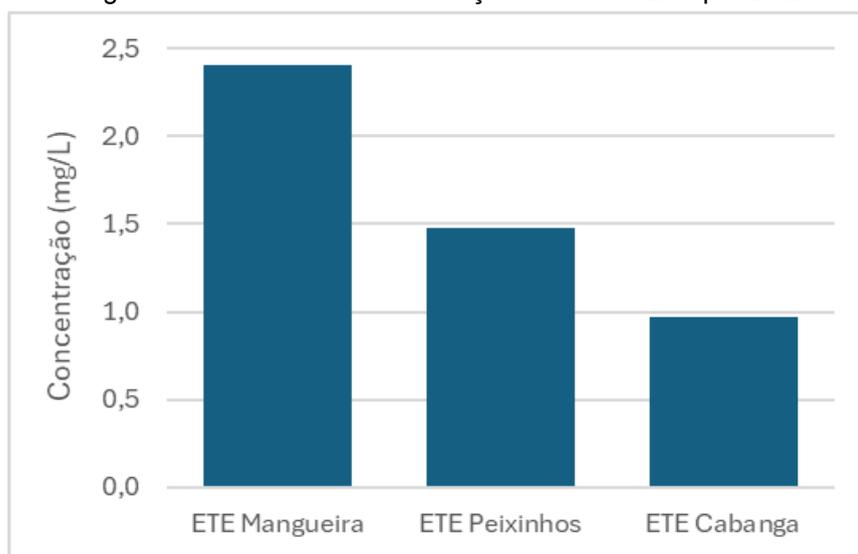
Utilizando as médias de concentração do tensoativo ao longo do período avaliado, Tabela 8, foi possível elaborar um mapa de densidade por Kernel (Figura 18) e um gráfico, Figura 19, permitindo identificar espacialmente a ETE com maior concentração média de LAS.

Figura 18 – Densidade de Kernel da concentração média de LAS



Fonte: Autora (2022)

Figura 19 – Média das concentrações totais de LAS por ETE



Fonte: Autora (2025)

Conforme apresentado nas Figuras 19 e 20, a ETE Mangueira registrou a maior densidade de tensoativo, refletindo a maior concentração média por área. Esta estação atende predominantemente comunidades de baixa renda, localizadas em bairros com menor acesso à infraestrutura de saneamento, elevada densidade populacional, baixo IDH e limitada conscientização quanto ao descarte adequado de resíduos — como Mangueira, San Martin e Areias. Nesses contextos, é comum o

uso mais intensivo de produtos de limpeza de baixo custo, frequentemente formulados com elevadas concentrações de LAS (Ying, 2006; Silva, 2019).

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos durante a realização deste projeto apontam que não há evidência estatística de correlação significativa entre a concentração de LAS e a carga viral de SARS-CoV-2, seja ela linear (via R^2) ou monotônica (via Spearman), nas amostras analisadas durante o período pandêmico de maio de 2021 a dezembro de 2021 na cidade do Recife.

A soma das concentrações de LAS das três ETEs variaram de 1,39 a 7,09 mg/L, com valores mais altos em algumas datas específicas, mas com certa estabilidade em torno de 3,5 a 6,5 mg/L. Já a carga viral (10^9 cópias/dia) apresentou uma variação muito mais irregular, oscilando de nulos (falta de dados) até valores acima de 11, com datas apresentando valores baixos intercaladas com picos elevados.

A concentração máxima de surfactante entre as ETEs analisadas foi registrada na ETE Mangueira, com 4,81 mg/L, em 06 de novembro de 2021. Essa unidade também apresentou a maior concentração média de todo o período monitorado, com valor de 2,40 mg/L e desvio padrão de 0,93, ultrapassando os limites definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005: 0,2 mg/L para águas salinas/salobras e 0,5 mg/L para águas doces (classes 1 a 3). Recomenda-se a adequação do processo de tratamento com foco na remoção de surfactantes, como tempo de retenção hidráulica e carga orgânica.

A análise das médias móveis nas datas selecionadas com altos valores da carga viral, indica que, em 22 de maio de 2021, ocorreu o maior pico da concentração de LAS (6,7 mg/L) e o segundo maior de SARS-CoV-2 (3,5 mil cópias genômicas/L). Após essa data, a carga viral apresentou oscilação (subida/queda), independentemente das oscilações nos níveis de LAS.

As análises realizadas não identificaram correlação estatística significativa entre a concentração de LAS e a carga viral de SARS-CoV-2 nos dados agregados das três ETEs em Recife-PE. Essa ausência de relação indica que o LAS não pode ser usado como indicador indireto ou preditor da carga viral de COVID-19 no esgoto.

A elaboração de mapas cartográficos para o monitoramento integrado de SARS-CoV-2 e compostos tóxicos como o LAS se mostra uma ferramenta promissora para subsidiar políticas públicas voltadas à gestão ambiental e ao controle epidemiológico no município, uma vez que foi possível mostrar informações virais do SARS-COV-2 sobre as ETEs. A integração de mapas cartográficos ao SIG amplia significativamente seu potencial analítico, ao viabilizar a incorporação e o cruzamento de dados ambientais, sanitários e epidemiológicos em um ambiente geoespacial unificado. Essa abordagem permite modelagens e simulações fundamentais para a compreensão das dinâmicas socioambientais e de saúde pública.

Recomenda-se, para estudos futuros: avaliar separadamente os dados por ETE para detectar padrões locais mascarados pela agregação; considerar outras variáveis contextuais (chuvas, vazões, consumo de água, indicadores epidemiológicos) e explorar possíveis correlações com outros compostos químicos ou biomarcadores que possam estar mais diretamente relacionados à saúde humana e à presença viral.

REFERÊNCIAS

ABIHPEC. Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos. **Panorama do Setor**. Disponível em: https://abihpec.org.br/site2019/wp-content/uploads/2023/01/Panorama-do-Setor_Atualizacao_16.01.24.pdf . Acesso em: 03 nov. 2024.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - INCT ETEs Sustentáveis: **Boletim de Acompanhamento N°10**. 2022. <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/acontece-na-ana/monitoramento-covid-esgotos/boletins-monitoramento-covid-esgotos/boletim-de-acompanhamento-no-10.pdf>/view. Acesso em: 03 nov. 2024.

ANDERSEN, K.G.; RAMBAUT, A.; LIPKIN, W.I.; HOLMES, E. C.; GARRY R. F. **The proximal origin of SARS-CoV-2**. *Nat Med* 26, 450–452 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0820-9>

(APAC), Agência Pernambucana de Águas e Clima. **INFORME METEOROLÓGICO: informe e previsão climática abril/2021**. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/uploads/Informe-Previsao-Climatica-Abril-2021.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2024.

ARAUJO, Ivan Roberto Santos. **SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR NA ÁREA DE ABRANGÊNCIA DO DISTRITO INDUSTRIAL DE BARCARENA-PA**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Ambientais, Universidade Federal do Pará – Ufpa, Belém - Pa, 2012.

ATLAS DE DESENVOLVIMENTO HUMANO DO BRASIL - ATLAS BRASIL (Pernambuco). PNUD, Ipea e a FJP. **Ranking IDHM**. 2021. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/ranking>. Acesso em: 24 maio 2025.

BERNA, J. L.; CASSANI, G.; HAGER, C.-D.; REHMAN, N.; LÓPEZ, I.; SCHOWANEK, D.; STEBER, J.; TAEGER, K.; WIND, T. **Anaerobic Biodegradation of Surfactants – Scientific Review. Tenside Surfactants Detergents**, dez. 2007. v. 44, n. 6, p. 312–347. Disponível em: <<http://www.hanser-elibrary.com/doi/abs/10.3139/113.100351>>

BIGARDI, T. A. R.; NUNES, A. T.; CARRA, L. P.; FADINI, P. **Destino de surfactantes aniônicos em ETE do tipo lagoa aerada seguida de lagoa de decantação**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2003. v. 8, n. 2, p. 45–48.

BONFIM, J. H.; SILVA, L. G.; GAVAZZA, S.; FLORENCIO, L.; KATO, M. T. **Remoção de alquilbenzeno linear sulfonado em esgoto doméstico tratado em reator UASB e lagoa de polimento**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 20 jun. 2016. v. 21, n. 2, p. 397–406. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522016000200397&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 29 jul. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução N° 357/2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: 2005. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em: 04 jul. 2024.

CAVALCANTE, J. R.; SANTOS, A. C.; BREMM, J. M.; LOBO, A. P.; MACÁRIO, E. M.; OLIVEIRA, W. K.; FRANÇA, G. V. A. COVID-19 no Brasil: evolução da epidemia até a semana epidemiológica 20 de 2020: evolução da epidemia até a semana epidemiológica 20 de 2020. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, [S.L.], v. 29, n. 4, p. 1-13, ago. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.5123/s1679-49742020000400010>.

COMPESA, Companhia Pernambucana de Saneamento (Pe). **Esgotamento Sanitário**. [20--]. Disponível em: <https://servicos.compesa.com.br/esgotamento-sanitario/>. Acesso em: 03 ago. 2025.

COSTA, Joelithon de Lima. **Avaliação da remoção de Alquilbenzeno Linear Sulfonado (LAS) em reator UASB em escala real e estudo da influência de diferentes aceptores de elétrons**, 2022. 114 f.: il., figs., tabs. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.

CHANDRAN A., ROY P. Aplicações de sistemas de informação geográfica e análise espacial na pesquisa em saúde indiana: uma revisão sistemática. **BMC Health Serv Res** 24 , 1448 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12913-024-11837-9>. Acesso em: 09 agosto 2025.

Desenvolvimento humano nas macrorregiões brasileiras : 2016. – Brasília: PNUD: IPEA: FJP, 2016. 55 p.: il., gráfs., mapas color. ISBN: 978-85-88201-31-6

DIAS, G. H.; SILVA, M. R. F. da; GRIGIO, A. M. Vulnerabilidade ambiental: uma abordagem sobre a exposição ao risco e a degradação ambiental em Mossoró/RN – Brasil/ Environmental vulnerability: an approach to risk exposure and environmental degradation in Mossoró/RN - Brazil. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 17199–17216, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n2-377. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/24936>. Acesso em: 01 jun. 2025.

DUARTE, I.C.S., OLIVEIRA, L.L., BUZZINI, A.P., ADORNO, M.A.T., VARESCHE, M.B.A. **Development of a Method by HPLC to Determine LAS and its Application in Anaerobic Reactors**. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 17, n. 7, p. 1360-1367, 2006.

DUARTE, Iolanda Cristina Silveira. **Caracterização Microbiológica da Remoção e Degradação de Alquilbenzeno Linear Sulfonado (LAS) em Reatores Anaeróbios com Biofilme e Células Planctônicas**. 202 f. Tese de Doutorado - Curso de Engenharia, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2006.

DUARTE, P. M. COVID-19: Origem do novo coronavírus/ COVID-19: Origin of the new coronavirus. **Brazilian Journal of Health Review**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 3585–3590, 2020. DOI: 10.34119/bjhrv3n2-187.

FERREIRA, Henrique dos Santos. **Clima Urbano e Dengue em Recife: Influência Climática Sobre a Formação Das Epidemias**, 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/18688/1/FERREIRA%2c%20H.%20S._Disserta%c3%a7%c3%a3o_FINAL.pdf. Acesso em: 29 jul. 2024.

FONGARO, G.; STOCO, P. H.; SOUZA, D. S. M.; GRISARD E. C.; MAGRI, M. E.; ROGOVSKI, P.; SCHÖRNER, M.; BARAZZETTI, F. H.; CHRISTOFF, A. P.; OLIVEIRA, L. F. V.; BAZZO, M. L.; WAGNER, G.; HERNÁNDEZ, M.; LÁZARO, D. R. (2021). The presence of SARS-CoV-2 RNA in human sewage in Santa Catarina, Brazil, November 2019. **Science of The Total Environment**, 778, 146198. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146198>

GABINETE DE IMPRENSA (Recife). Prefeitura do Recife. **Prefeitura lança Plano Recife Vacina**. 2021. Disponível em: <https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/18/01/2021/prefeitura-lanca-plano-recife-vacina#:~:text=Esse%20formato%20permite%20a%20manuten%C3%A7%C3%A3o,estima da%20em%20165%20mil%20pessoas..> Acesso em: 31 maio 2025.

HART, Olga E., HALDEN, Rolf U. Computational analysis of SARS-CoV-2/COVID-19 surveillance by wastewater-based epidemiology locally and globally: Feasibility, economy, opportunities and challenges. **Science of The Total Environment**, Volume 730, 2020, 138875, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138875>.

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – INCT ETEs Sustentáveis. **Boletim De Apresentação: Rede Monitoramento Covid Esgotos**. [S. L.]: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/acontece-na-ana/monitoramento-covid-esgotos/boletins-monitoramento-covid-esgotos/boletim-de-apresentacao_rede-monitoramento-covid-esgotos.pdf. Acesso em: 04 jul. 2024.

SANTOS, Isadora Sabrina Ferreira dos . **Covid-19 no Estado de Pernambuco: Análise da Mortalidade** / Isadora Sabrina Ferreira dos Santos. - Vitória de Santo Antão, 2022. 46 p. : il., tab.

LAI, Chih-Cheng; SHIH, Tzu-Ping; KO, Wen-Chien; TANG, Hung-Jen; HSUEH, Po-Ren. Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) and coronavirus disease-2019 (COVID-19): The epidemic and the challenges. **International Journal Of Antimicrobial Agents**, Tainan, v. 55, n. 3, n.p, fev. 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105924>. Acesso em: 01 set. 2024.

MACEDO, T. Z.; OKADA, D. Y.; DELFORNO, T. P.; BRAGA, J. K.; SILVA, E. L.; VARESCHE, M. B. A.. **The comparative advantages of ethanol and sucrose as co-substrates in the degradation of an anionic surfactant: microbial community selection.** *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00449-015-1424-5>>.

MAGALHÃES, J. J. F.; MENDES, R. P. G.; SILVA, C. T. A.; SILVA, S. J. R.; GUARINES, K. M.; PENA, L. Epidemiological and clinical characteristics of the first 557 successive patients with COVID-19 in Pernambuco state, Northeast Brazil, *Travel Medicine and Infectious Disease*. **Travel Medicine And Infectious Disease**, Recife, v. 38, n.p, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2020.101884>. Acesso em: 01 set. 2024

MIRANDA, Livia Izabel Bezerra de; BORBA, Tuanni Rachel; VELASCO, Thais; CAMPOS, Aline Castilho Alves. **As Metrôpoles e a Covid-19: Dossiê Nacional Volume II.** 2021. Livro Eletrônico. Disponível em: https://www.observatoriodasmetrolopes.net.br/wp-content/uploads/2022/02/Dossi-e-COVID_v3_comISBN.pdf. Acesso em: 29 jul. 2024.

MOREIRA; J. G.; HUZIWARA, J. C. A.; REIS, K. C. D. P.; LÄCZYNSKI, L. O. O.; MOREIRA, M. A. C. Análise da Propagação de Vírus Emergentes Influenciada por Fatores de Comportamento Humano e Ações Antrópicas. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamago**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 112–137, 2022. DOI: 10.19180/2177-4560.v16n12022p112-137. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/boletim/article/view/15941..> Acesso em: 15 abr. 2025.

MÜZEL, Felipe de La Rua. **Desenvolvimento de metodologia ambientalmente amigável para análise de surfactantes aniônicos em produtos de higiene pessoal** / Felipe de La Rua Müzel. – Araraquara : [s.n.], 2021 108 f. : il. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, 2021.

NOGUEIRA, José Vagner Delmiro; SILVA, Carolina Maria da. Conhecendo a Origem do SARS-COV-2 (COVID 19). **Revista Saúde e Meio Ambiente – RESMA**, Três Lagoas, v. 11, n. 2, p. 115-124, agosto/dezembro. 2020. ISSN: 2447-8822

PETHERICK, Anne; GOLDSZMIDT, Rafael; KIRA, Beatriz; BARBERIA, Lorena. **As medidas governamentais adotadas em resposta ao Covid-19 no Brasil atendem aos critérios da OMS para flexibilização de restrições?** BSG Working Paper Series, Blavatnik School of Government. Oxford, UK: University of Oxford. 2020

PRAKASH Nayak P., PAI B. J. e GOVINDAN S. **Aproveitando o sistema de informações geográficas para a vigilância da dengue: uma revisão de escopo.** *Trop Med Health* 53 , 102 (2025). <https://doi.org/10.1186/s41182-025-00783-9>. Acesso em: 09 agosto 2025.

RANDAZZO, W., TRUCHADO, P., CUEVAS-FERRANDO, E., SIMÓN, P., ALLENDE, A., & SÁNCHEZ, G. (2020). SARS-CoV-2 RNA in wastewater anticipated COVID-19 occurrence in a low prevalence area. **Water Research**, 181, 115942. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115942>

SECRETARIA DE SAÚDE (Recife). Prefeitura do Recife. **Recife completa um mês de imunização contra a covid-19 com mais de 70 mil doses aplicadas**. 2021. Disponível em: https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/19/02/2021/recife-completa-um-mes-de-imunizacao-contra-covid-19-com-mais-de-70-mil-doses?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 31 maio 2025.

SECRETARIA DE SAÚDE (Recife). Prefeitura do Recife. **Recife completa seis meses de vacinação contra covid-19**. 2021. Disponível em: https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/19/07/2021/recife-completa-seis-meses-de-vacinacao-contra-covid-19?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 31 maio 2025.

SEPLAG, Secretaria de Planejamento e Gestão. Covid19 em Dados: recife 2021. Recife 2021. Disponível em: <https://dados.seplag.pe.gov.br/apps/corona.html#mapas>. Acesso em: 29 jul. 2024.

SILVA, C. F. A.; SILVA, M. C.; SANTOS, A. M.; RUDKE, A. P.; BONFIM, C. V.; PORTIS, G. T.; JUNIOR, P. M. A.; COUTINHO, M. B. S.. Spatial analysis of socio-economic factors and their relationship with the cases of COVID-19 in Pernambuco, Brazil. **Tropical Medicine And International Health**, Recife, v. 27, n. 4, p. 397-407, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/tmi.13731>. Acesso em: 01 set. 2024.

SILVA, Luiz Galdino da. **Determinação e Remoção do Alquilbenzeno Linear Sulfonado (LAS) de Esgoto Doméstico em Reatores Híbridos Sequenciais Anaeróbico e Aeróbico** / Luiz Galdino da Silva. - Recife, 2024. 75p.: il. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Tecnologia e Geociências, Pós Graduação em Engenharia Civil, 2024.

SILVA, M. T.; GOMES, F. P. Detergentes e poluição de águas: análise da carga de LAS em esgoto doméstico no Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 27, n. 3, p. 245-258, 2019. DOI: 10.11606/1678-6897.2019.01404.

SOUZA, A. S. R.; AMORIM M. M. R.; MELO, A. S. O.; DELGADO, A. M.; FLORÊNCIO, A. C. M. C. C.; OLIVEIRA, T. V.; LIRA, L. C. S.; SALES, L. M. S.; SOUZA, G. A.; MELO, B. C. P.; MORAIS, I.; KATZ, L. General aspects of the COVID-19 pandemic. **Revista Brasileira de Saúde Materno Infantil**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 29-45, fev. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9304202100s100003>.

SOUSA, Áurea (2019). **Coefficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman. O que medem e em que situações devem ser utilizados?**. «Correio dos Açores: Matemática», 21 de Março de 2019, p. 19.

SOUZA, N. P.; SILVA, E. M. G. C.; TEIXEIRA, M. D.; LEITE, L. R.; REIS, A. A.; SOUZA, L. N.; JUNIOR, F. W. A.; RESENDE, T. A. **Aplicação do estimador de densidade Kernel em unidades de conservação na Bacia do Rio São Francisco para análise de focos de desmatamento e focos de calor.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. Anais... Paraná: INPE, 2013. p. 4958-4965.

TEIXEIRA, S., F.; MELO, G., V.; DA LUZ, G., C., B.; CAMPOS, S., S. Coleta e tratamento de esgoto dos municípios de grande porte da Região Metropolitana do Recife: ameaça à saúde pública. **Brazilian Journal of Health Review**, Curitiba, v. 4, n. 2, p. 4391-4400, 2021.

VALLE, D.; NACIF PIMENTA, D.; AGUIAR, R. **Zika, dengue e chikungunya: desafios e questões.** **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, jun. 2016. v. 25, n. 2, p. 1–2. Disponível em: <http://www.iec.pa.gov.br/template_doi_ess.php?doi=10.5123/S1679-49742016000200419&scielo=S2237-96222016000200419>.

World Health Organization 2023 data.who.int, **WHO Coronavirus (COVID-19) dashboard > Cases [Dashboard]**. <https://data.who.int/dashboards/covid19/cases>

YING, Guang-Guo. Fate, behavior and effects of surfactants and their degradation products in the environment. **Environment International**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 417-431, abr. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2005.07.004>