

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Thales Felício de Oliveira Santos

**DETERMINAÇÃO DO PADRÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE
PROPAGAÇÃO DA COVID-19 COM BASE NO MONITORAMENTO DO
SARS-COV-2 NO ESGOTO DE BELO HORIZONTE**

Belo Horizonte
2022

Thales Felício de Oliveira Santos

**DETERMINAÇÃO DO PADRÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE PROPAGAÇÃO DA
COVID-19 COM BASE NO MONITORAMENTO DO SARS-COV-2
NO ESGOTO DE BELO HORIZONTE**

Versão final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Orientador: Cesar Rossas Mota Filho

Coorientador: Gilvan Ramalho Guedes

Belo Horizonte

2022

S237d 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 [recurso eletrônico] / Thales Felício de Oliveira Santos. – 2022.
1 recurso online (81 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: César Rossas Mota Filho.
Coorientador: Gilvan Ramalho Guedes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Saneamento - Teses. 3. Esgotos - Belo Horizonte (MG) - Teses. 4. COVID-19 (Doença) - Epidemiologia - Teses. I. Mota Filho, César Rossas. II. Guedes, Gilvan Ramalho. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[NOME DA UNIDADE]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [XXXX]

FOLHA DE APROVAÇÃO

Determinação do Padrão Espaço-temporal de Propagação da Covid-19 Com Base No Monitoramento do Sars-cov-2
No Esgoto de Belo Horizonte

THALES FELÍCIO DE OLIVEIRA SANTOS

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Cesar Rossas Mota Filho

Prof. Gilvan Ramalho Guedes

Prof. Marcos Von Sperling

Prof. Ramiro Gonçalves Etchepare

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profª. Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima

Prof. Cesar Rossas Mota Filho

Coordenadora

Orientador

Belo Horizonte, 17 de junho de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Cesar Rossas Mota Filho, Professor do Magistério Superior**, em 20/06/2022, às 10:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Von Sperling, Professor do Magistério Superior**, em 20/06/2022, às 11:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gilvan Ramalho Guedes, Subcoordenador(a)**, em 20/06/2022, às 12:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ramiro Gonçalves Etchepare, Usuário Externo**, em 20/06/2022, às 12:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 30/08/2022, às 10:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1527317** e o código CRC **DD550773**.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a todas as boas energias vindas do universo que me permitiram enfrentar com sabedoria, paciência e resiliência todos os desafios encontrados.

À minha família, em especial por sempre acreditar em mim e me dar força, mesmo nos momentos em que parecia não haver mais como continuar. À minha mãe Patrícia, pelo seu carinho e amor incondicional. À minha irmã Talita, por me mostrar sempre os melhores caminhos a serem seguidos. Às minhas tias Custódia, Luiza, Fátima e Rose, por serem meu porto seguro. Ao meu pai Felício, por me apoiar em todas as decisões e por me incentivar sempre que foi preciso. Aos meus afilhados Pedro e Henrique, por trazerem alegria e orgulho para minha vida. À minha avó Lourdes, por seu amor matriarcal. E àqueles que não estão mais aqui, minha Tia Imaculada, minha Avó Conceição e meu Avó José, a saudade é diária, e essa vitória seria melhor com vocês aqui pertinho de mim.

Aos professores César e Gilvan, por aceitarem a parceria nesse estudo e que sempre trouxeram grandes contribuições para que o trabalho se tornasse de grande relevância.

Aos amigos que o mestrado me trouxe, Lorena, Alcino e Mateus, pelo forte auxílio em cada segundo deste mestrado; não teria conseguido sem ter vocês comigo nesse processo.

À Copasa, à Secretaria de Saúde de Belo Horizonte e ao INCT ETEs Sustentáveis, pela disponibilização de informações que foram cruciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus grandes amigos e companheiros de vida, pela amizade, afeto e companheirismo e pelos momentos de descontração que aquecem a alma. Em especial à Ana Cláudia, Cristiano, Eulálio, Laís, Lorena, Lucas, Mari e Regis, pela amizade resistente aos anos e à distância, pelos incontáveis momentos de troca e por nunca me deixarem desistir.

À banca examinadora, pelo aceite do convite e pela leitura crítica e cuidadosa do trabalho.

Aos professores do PPGSMARH, que contribuíram para a minha formação pessoal e

profissional.

À Capes, pela disponibilização da bolsa de pesquisa, por alguns meses durante o Mestrado.

“O esperto vence com úlcera no estômago. O bobo não percebe que venceu.”

Das vantagens de ser bobo, de Clarice Lispector

RESUMO

No enfrentamento da pandemia de Covid-19 causada pelo vírus SARS-CoV-2 houve desafios importantes, como o baixo número de testes clínicos para o diagnóstico da doença e a existência de indivíduos contaminados assintomáticos, que dificultam o conhecimento da quantidade real de infectados. Nesse contexto, o monitoramento do SARS-CoV-2 em sistemas de esgotamento sanitário apresenta-se como uma metodologia capaz de fornecer robustez aos sistemas de vigilância epidemiológica e ambiental. A presente pesquisa teve como objetivo possibilitar um melhor entendimento da circulação do vírus SARS-CoV-2 em Belo Horizonte (BH), tendo como base o monitoramento da concentração viral no sistema de esgotamento sanitário do município. Foi realizado o estudo do comportamento da carga viral no esgoto em diferentes pontos da cidade e não apenas nas estações de tratamento de esgoto, o que é uma estratégia muito importante para conseguir refletir como a pandemia afetou de maneiras distintas as diferentes regiões de BH e como foi a evolução da pandemia ao longo do período de estudo, entre abril de 2020 e janeiro de 2021, em cada uma dessas regiões. Para isso, este estudo utilizou dados provenientes da Secretaria Municipal de Saúde de Belo Horizonte, da Copasa, do Projeto-piloto: “Detecção e quantificação do novo coronavírus em amostras de esgoto na cidade de Belo Horizonte” e do Projeto Rede Monitoramento Covid Esgoto. Dessa forma, a utilização de dados semanais da concentração viral permitiu compreender, medir e comparar o padrão espaço-temporal da distribuição da propagação das infecções nas diferentes sub-bacias de Belo Horizonte – uma informação fundamental para gestores decidirem sobre intervenção localizada de medidas não farmacológicas de enfrentamento à doença. Ao estudar como ocorreu a disseminação da COVID-19 na área de estudo, utilizando ferramentas como o Índice de *Hoover Locacional*, o Índice de Prevalência Relativa e análises espaço-temporais, como a análise do centro geográfico da concentração, este trabalho contribui com informações para adoção de melhores estratégias no enfrentamento de pandemias similares, bem como na geração de ferramentas analíticas que facilitem o controle de futuros agravos semelhantes. O estudo também contribui ao confirmar que a pandemia afetou de forma mais intensa e por mais tempo regiões mais vulneráveis e que a carga viral pode antecipar o aumento da confirmação dos casos confirmados e o aumento da taxa de ocupação dos leitos de UTI e enfermaria para a COVID-19. Sendo assim, foi confirmada a eficácia do monitoramento a partir do esgoto no enfrentamento da pandemia ocasionada pela COVID-19, se concretizando como uma ferramenta muito relevante para a vigilância epidemiológica, que foi capaz de confirmar que regiões com situações mais desfavoráveis foram mais afetadas pela COVID-19, no período em estudo, na cidade de Belo Horizonte.

Palavras-chave: Epidemiologia baseada no esgoto, COVID-19, análise espaço temporal, medidas não-farmacológicas.

ABSTRACT

The world has faced important challenges due to the Covid-19 pandemic caused by the SARS-CoV-2 virus, such as inadequate clinical tests for the diagnosis of the disease and the existence of asymptomatic infected individuals, which make it difficult to determine the actual number of infected people. In this context, the monitoring of SARS-CoV-2 in sanitary sewage systems can be a methodology capable of providing robustness to epidemiological and environmental surveillance systems. The present research aimed to better understand the circulation of the SARS-CoV-2 virus in Belo Horizonte, based on the monitoring of its SARS-CoV-2 concentrations and loads in the local sanitary sewage system. Given the rapid and widespread spread of COVID-19 in Brazil, associated with the utterly inadequate clinical testing of its population, the proposed study contributes to the understanding of the circulation of SARS-CoV-2 in Brazilian metropolitan regions by using indirect estimation methods that consider at the same time the spatial and temporal patterns of contagion. This research uses secondary data from the Municipal Health Department of Belo Horizonte, Copasa, the pilot project: “Detection and quantification of the new coronavirus in sewage samples in the city of Belo Horizonte”, and the Project Brazilian Network for Covid Monitoring in Sewage. This project is extremely relevant because the monitoring of sewage included not only the entry and exit of treatment plants (WWTPs), but also included monitoring of sewage in a regionalized manner, at representative points of different social strata of the population. This is an appropriate strategy for countries such as Brazil, since monitoring sewage only in ETEs is not enough to identify the magnitude of virus circulation in a large metropolis, such as Belo Horizonte. Furthermore, it is very important to monitor the sewage generated by the part of the population that lives in more vulnerable areas, whose sewage, for the most part, does not reach the ETEs, either due to the absence of collection networks or the lack of interconnection of collection networks. to the ETEs. Thus, the use of weekly viral concentration data makes it possible to understand, measure and compare the spatio-temporal pattern of the distribution of the spread of infections in the different sub-basins of Belo Horizonte - essential information for managers to decide on localized intervention of non-pharmacological measures. of confrontation. By studying how the disease spread in the study area, using tools such as the Hoover Location Index, the Relative Prevalence Index and spatio-temporal analyses, this work contributes with information for the adoption of better strategies to face similar pandemics, as well in the generation of analytical tools that facilitate the confrontation of future similar problems.

Keywords: Wastewater-Based Epidemiology, COVID-19, spatio-temporal analysis, non-pharmacological measure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Possíveis rotas de transmissão fecal-oral do SARS-CoV-2.....	23
Figura 2 - Diferenciação da reposta de análises clínicas comuns e individuais e da epidemiologia do esgoto	23
Figura 3 - Uma abordagem estruturada para epidemiologia baseada no esgoto (EBE) utilizada como vigilância comunitária da COVID-19.	27
Figura 4 - Monitoramento quantitativo de SARS-CoV-2 em amostras de águas residuárias na região de Paris.....	31
Figura 5 - Correlações de Spearman entre a concentração viral no esgoto /dados clínicos e variáveis demográficas em 11 bacias hidrográficas de Boston.	32
Figura 6 - Correlação entre concentração viral nas águas residuais e gastos domésticos médios com produtos farmacêuticos.	33
Figura 7 - Representação da média móvel do excesso de óbitos por causas naturais e dos óbitos por COVID-19, em Belo Horizonte, entre a 10 ^a e a 43 ^a semana epidemiológica de 2020.....	35
Figura 8 - Taxas de mortalidade padronizadas por 100 mil habitantes por causas naturais, por faixas etárias e por todas as idades, em Belo Horizonte, entre a 10 ^a e a 43 ^a semana epidemiológica de 2020.....	36
Figura 9 - Índice de Prevalência Relativa (IPR) para diferentes regiões de Belo Horizonte em três períodos distintos durante a pandemia.	39
Figura 10 - A e B. Centro geográfico da COVID-19 ponderado por casos (A) e por óbitos (B) por semana epidemiológica.	41
Figura 11 - Propagação de casos e mortes por COVID-19.	42
Figura 12 - Evolução das cargas de RNA do SARS-CoV-2 no esgoto (soma das cargas virais no afluente das estações de tratamento de esgoto Arrudas e Onça).....	45
Figura 13 - Área de estudo.....	49
Figura 14 - Área de estudo indicando os pontos de amostragem e as sub-bacias classificadas segundo o IVS	49
Figura 15 - IVS para as sub-bacias localizadas na bacia sanitária Arrudas classificadas em função de suas populações.....	62
Figura 16 - IVS para as sub-bacias localizadas na bacia sanitária Onça classificadas em função de suas populações.....	63
Figura 17 – Carga viral (nº de cópias/d. 100 mil habitantes) por SE.	64
Figura 18 - Superfície contínua da carga viral entre 2020 e 2021.Obs.: SE sem análises estão na cor cinza.	65
Figura 19 - Evolução do centro geográfico da pandemia em Belo Horizonte, tendo como base o monitoramento do esgoto.....	67
Figura 20 - Evolução do centro geográfico da pandemia nas bacias sanitárias Onça e Arrudas, tendo	

como base o monitoramento do esgoto.	68
Figura 21 - Boxplot – IPR para as sub-bacias sanitárias Arrudas entre a SE 20 de 2020 e a SE 4 de 2021.	69
Figura 22 - Boxplot – IPR para as sub-bacias sanitárias Arrudas entre a SE 20 de 2020 e a SE 4 de 2021.	70
Figura 23 - Número de semanas com IPR maior do que 1 e classificação de cada sub-bacia segundo o IVS.	72
Figura 24 - Índice de Hoover Locacional por Semana Epidemiológica.	74
Figura 25 - Carga Viral e Rt por Semana Epidemiológica. A esquerda: Carga viral para cada uma das ETES. A direita: Rt.	75
Figura 26 - Taxa de ocupação no sistema de saúde para Covid-19 e a carga viral.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Peso de cada indicador utilizado no cálculo do índice de vulnerabilidade à saúde (IVS).....	34
Tabela 2 - Identificação das sub-bacias.....	50
Tabela 3 – Dados das cargas virais (cópias de SARS-CoV-2. 10^{-9} /d) móveis para cada duas semanas epidemiológicas e R_t , entre as SE 21/2020 e 38/2020.....	54
Tabela 4 - Dados das cargas virais (cópias de SARS-CoV-2. 10^{-9} /d) móveis para cada duas semanas epidemiológicas e R_t , entre as SE 39/2020 e 04/2021.....	54
Tabela 5 - População residente nas sub-bacias do Arrudas, estimada para 2022 – Belo Horizonte, Minas Gerais.....	57
Tabela 6 - Reclassificação de cada sub-bacia segundo IVS.....	63
Tabela 7 - Número de semanas com valores de IPR maior do que 1 para cada sub-bacia. .	71
Tabela 8 - Capacidade preditiva do esgoto em prever casos positivos para a COVID-19.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS

BH	Belo Horizonte
Copasa	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
COVID-19	Coronavirus Disease
EBE	Epidemiologia Baseada no Esgoto
ETE	Estação de tratamento de esgoto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IHL	Índice de Hoover Locacional
IPR	Índice de Prevalência Relativa
IVS	Índice de Vulnerabilidade em Saúde
HAV	Vírus da Hepatite A
HRN	Hospital Risoleta Neves
OMS	Organização Mundial de Saúde
PBH	Prefeitura de Belo Horizonte
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
Rt	Número médio de transmissão por infectado
SARS	Síndrome Respiratória Aguda Grave
SBA	Sub-bacia Sanitária Arrudas
SBO	Sub-bacia Sanitária Onça
SE	Semana Epidemiológica
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UTI	Unidades de Terapia Intensiva

SUMÁRIO

Sumário

SUMÁRIO	15
1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	21
2.1. Objetivo geral.....	21
2.2. Questões e objetivos específicos.....	21
3 REVISÃO DA LITERATURA	22
3.1. Rotas de transmissão do vírus SARS-CoV-2.....	22
3.2. Epidemiologia Baseada no Esgoto (EBE).....	24
3.3. Monitoramento epidemiológico da COVID-19 em sistemas de esgotamento sanitário.....	26
3.4. Indicadores auxiliares.....	33
3.4.1. Índice de Vulnerabilidade em Saúde.....	33
3.4.2. Índice de Prevalência Relativa.....	37
3.4.3. Número médio de transmissão por infectado (Rt).....	40
3.5. Padrão espaço-temporal de propagação de COVID-19 no Brasil.....	40
3.6. Monitoramento nas sub-bacias sanitárias de Belo Horizonte.....	43
3.7. Primeiras medidas de enfrentamento à Covid-19 em Belo Horizonte.....	45
4 METODOLOGIA	48
4.1. Área de estudo.....	48
4.2. Coleta de dados e confecção de mapas.....	52
4.3. Índice de Vulnerabilidade em Saúde.....	58
4.4. Índice de Prevalência Relativa.....	59
4.5. Análises estatísticas.....	60
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1. Mapeamento e evolução da carga viral.....	61
5.1.1. Índice de Vulnerabilidade em Saúde.....	62
5.1.2. Carga viral por semana epidemiológica.....	64
5.1.3. Evolução do centro geográfico com base na carga viral.....	66
5.1.4. Índice de Prevalência Relativa.....	68
5.2. Padrão de disseminação espaço-temporal.....	73
5.3. Relação entre a carga viral, a ocupação dos leitos de UTI e o índice de transmissão viral.....	74
6. CONCLUSÃO	78
7. RECOMENDAÇÕES	79
REFERÊNCIAS	80

fatores que interferem no distanciamento social também são apontados pela literatura, como as diferenças nas condições de habitação entre as pessoas de maior e menor renda (MENEZES, 2021; TAVARES, 2021). Além desses, alguns fatores ambientais e sanitários são relevantes, como o acesso à água tratada, já que outra medida essencial no enfrentamento desse agravo é a higienização das mãos e das superfícies. Dessa forma, é importante estudar as relações entre esses aspectos da população e sua relação com a disseminação da doença, de forma a fornecer embasamento para futuras tomadas de decisões no enfrentamento de outras pandemias ou do ressurgimento de novos focos da COVID-19.

Segundo a Fundação João Pinheiro (2020), a densidade domiciliar e a densidade por dormitório são alguns aspectos dos domicílios que se destacam nesse período de pandemia, e que também têm relação com o ambiente e a saúde. Uma alta concentração de pessoas em um mesmo domicílio, especialmente em dormitórios, prejudica o distanciamento e o isolamento social - medidas preventivas recomendadas no enfrentamento da COVID-19. Um alto nível de densidade domiciliar somada à ausência ou inadequação dos serviços de saneamento básico propiciam um ambiente de vulnerabilidade da população. Esse aspecto, aliados ao déficit de alguns serviços de saneamento básico, principalmente de esgotamento sanitário e coleta de resíduos sólidos, estão presentes na realidade de grande parcela da população brasileira e causam frequentes agravos à saúde da população. A intersecção dessa situação desfavorável com a pandemia da COVID-19 certamente pode ter agravado esse cenário, aprofundando as desigualdades e aumentando o número de casos e de óbitos da doença.

Uma das propriedades mais importantes das epidemias é sua disseminação espacial, característica que depende principalmente das rotas de transmissão, do nível de infecciosidade e das estratégias de controle (GROSS *et al.*, 2020). Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e estatísticas espaciais podem ser utilizados como fonte de informações para o monitoramento e controle da epidemia por meio de informações científicas, encontrar correlações espaciais com outras variáveis e identificar dinâmicas de transmissão (XIONG *et al.*, 2020). Um dos primeiros trabalhos publicados, que faz uso do SIG para a análise espacial da COVID-19, foi o de GUAN *et al.* (2020).

Um outro estudo contemporâneo ao anterior e também realizado na China determinou a distribuição dos casos de COVID-19 e sua correlação com a migração da população de Wuhan nos estágios iniciais da epidemia, o que é de grande importância para alerta precoce e prevenção

de futuros surtos (CHEN *et al.*, 2020). HUANG *et al.* (2020) analisaram as características epidemiológicas da COVID-19, as medidas de controle tomadas, seus efeitos em relação à pandemia e sua distribuição espaço-temporal. Um resultado notável foi a identificação de um número significativo de pessoas que entraram em Wenzhou vindo da província de Hubei, o que explica por que esta cidade foi a primeira fora do epicentro onde o confinamento foi adotado.

A utilização de SIG tem se consolidado na área de saúde pública e se tornado uma ferramenta robusta de conhecimento multidisciplinar (CHIARAVALLOTI-NETO, 2016). LAI *et al.* (2004), por exemplo, utilizaram SIG para estudar a distribuição geográfica do surto de SARS-CoV de 2003 em Hong Kong. Os pesquisadores mapearam os endereços residenciais de 1.709 casos confirmados de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SARS), analisando e acompanhando a evolução da propagação ao longo de um período de 16 semanas, o que permitiu caracterizar a localização e duração dos precursores da epidemia, bem como a sua evolução regional. Eles concluíram que os métodos de SIG são úteis e viáveis durante surtos de doenças altamente infecciosas porque permitem a adição de informações geoespaciais, avançando na análise epidemiológica (LAI *et al.*, 2004).

Outros estudos evidenciaram a existência de tendências espaço-temporais significativas que podem servir como apoio para a identificação de *hotspots* de COVID-19, que podem ser usadas como um prelúdio para o que acontecerá em um próximo futuro a partir do monitoramento da presença do SARS-CoV-2 no esgoto (WUTZER *et al.*, 2020). Em Madrid, a presença e a evolução do SARS-CoV-2 nas águas residuárias mostraram uma forte conexão com as taxas de incidência de 14 dias com infecção ativa e hospitalizações relatadas de COVID-19 (LASTRA *et al.*, 2022). Estudos realizados na Índia durante o ano de 2021, indicaram que em novembro, mês em que houve maior pico da carga viral no esgoto, houve também o maior número de indivíduos infectados. Essa observação claramente corrobora a vantagem da vigilância de esgoto em nível comunitário, o que poderia ajudar na prestação de um melhor atendimento clínico (THARAK *et al.*, 2022). Pesquisas feitas em Sicília, na Itália, também confirmaram que a detecção do RNA viral de SARS-CoV-2 no esgoto pode fornecer um bom retrato da tendência da COVID-19 em uma comunidade, fornecendo dados valiosos em tempo real sobre a disseminação viral em uma unidade espacial, exigindo, portanto, menos recursos do que testes de diagnóstico individuais (MATHERI *et al.*, 2022).

De uma forma geral, existem lacunas quanto ao conhecimento sobre as características de

transmissão do SARS-CoV-2 em um contexto de condições socioeconômicas desfavoráveis, com parcela da população vivendo em condições precárias de habitação e saneamento, sem acesso a água tratada e em situação de elevado índice de aglomeração (WERNECK *et al.*, 2020). Visando conhecer a dinâmica de transmissão do vírus, um dos objetivos desse estudo foi analisar a dinâmica da concentração viral do SARS-CoV-2 a partir do monitoramento do esgoto das sub-bacias sanitárias de Belo Horizonte, demonstrando a importância de uso de dados alternativos para a análise da dinâmica da pandemia em contextos de testagem limitada para rastreamento e monitoramento dos casos, bem como conhecer se e como a COVID-19 afetou as diferentes regiões de BH. Uma outra contribuição do estudo foi validar o uso da EBE para predição do estresse do sistema de saúde, caracterizado pelo aumento da carga viral previamente ao aumento das taxas de ocupação dos leitos de UTI e enfermagem.

A pandemia de COVID-19 destacou o papel dos gestores municipais, estaduais e federais no controle de disseminação do vírus, visto que as políticas locais são fundamentais na definição das medidas de distanciamento social e na gestão da capacidade do sistema (MORAES, 2020; HARZHEIM *et al.*, 2020). Nos primeiros 80 dias da pandemia da COVID-19 no Brasil, Belo Horizonte (BH) se destacou como uma das capitais com uma das melhores performances de controle da doença (ANDRADE *et al.*, 2020; PARREIRAS, 2020; ALVES, 2020). Esse resultado relativamente satisfatório da cidade já foi observado anteriormente no caso da gripe espanhola, em meados de 1918 (STARLING, 2020).

Em função dos fortes impactos da disseminação da COVID-19 no Brasil, entende-se que o estudo proposto tem grande potencial de trazer contribuições para o entendimento da circulação do novo coronavírus na região de estudo e, com isso, fornecer subsídios para as autoridades da área da saúde estabelecerem ações complementares (eventualmente prioritárias) de redução dos níveis de transmissão da doença. E também apresentar a informações à população, para que a mesma, munida de informações científicas, possa se orientar através desses dados.

Esse estudo será relevante ao fornecer outro recurso valioso para pesquisadores que aplicam SIG e análise espacial para estudar a COVID-19 e também para demonstrar a importância de uso de dados alternativos para a análise da dinâmica da pandemia em contextos de testagem limitada para rastreamento e monitoramento da doença.

Em suma, o estudo em questão tem relevância ao trazer contribuições para o entendimento da circulação viral, além de servir como embasamento teórico para enfrentamento de futuras pandemias que podem vir a ocorrer, seja por coronavírus ou outros agentes infecciosos.

2

3 OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Possibilitar um melhor entendimento da propagação espaço-temporal da COVID-19 em Belo Horizonte no primeiro ano da pandemia, entre os meses de abril de 2020 e janeiro de 2021, com base no monitoramento da presença do SARS-CoV-2 no esgoto das sub-bacias sanitárias do município, e de sua capacidade de antecipação de surtos e estresse no sistema de saúde local.

2.2 Questões e objetivos específicos

Questões	Objetivos específicos
1) Com base no monitoramento da presença do SARS- CoV-2 em amostras de esgoto das sub-bacias sanitárias de Belo Horizonte, como se dá a evolução da concentração viral ao longo do tempo na área em estudo?	Mapear a evolução da concentração do SARS-CoV-2 ao longo do tempo na área de estudo através de dados do monitoramento do coronavírus em amostras de esgoto.
2) Existe alguma relação entre a vulnerabilidade em saúde das regiões em estudo e o aumento da concentração viral no esgoto?	Identificar em quais regiões o índice de prevalência relativa (IPR) indicou que aquela sub-bacia foi um <i>hotspot</i> para a COVID-19, relacionando-o com o Índice de Vulnerabilidade em Saúde (IVS) de cada sub-bacia.
3) Como ocorreu a distribuição da concentração viral em cada uma das regiões monitoradas?	Identificar o comportamento espaço-temporal do aumento da concentração viral de SARS-CoV-2 nas diferentes sub-bacias através da análise do comportamento do centro geográfico e do índice de <i>Hoover</i> locacional.
4) Com base em dados da Secretaria Municipal de Saúde de Belo Horizonte, a concentração viral no esgoto consegue antecipar o número na taxa de ocupação de leitos de internação em UTI/enfermaria para a COVID-19?	Avaliar se a concentração viral é capaz de antever estresse no sistema de saúde (mensurado pela variação na taxa de ocupação de leitos de UTI/enfermaria).

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Rotas de transmissão do vírus SARS-CoV-2

A rápida propagação é uma característica preocupante da COVID-19, que se dá pelo contato pessoa a pessoa e com potencial de permanecer presente em objetos inanimados e superfícies por 24 horas ou mais (BRASIL, 2020). De acordo com Oliveira *et al.* (2021), o tempo de resistência do SARS-CoV-2 em águas residuárias é de 1,2 dia a uma temperatura de 24°C. Saber por quanto tempo o SARS-CoV-2 pode permanecer viável nas águas residuárias é essencial para avaliar os riscos à saúde pública associados à água contaminada.

A velocidade e a capacidade de disseminação da COVID-19 trazem diversos obstáculos à saúde pública, dificultando a tomada de decisões das autoridades em suas diversas esferas, níveis e ramos de governo. O que ocorre é uma corrida contra o tempo; a busca da Ciência por tratamentos ou outros tipos de soluções que reduzam a curva de contaminação da doença se depara com o desafio da elevação exponencial do número de casos e de pacientes hospitalizados e do número de óbitos. A rápida disseminação do vírus é agravada pela probabilidade de contágio por pessoas que ainda estão nos primeiros dias de contaminação do vírus (latentes), ou até mesmo por aqueles que se encontram contaminados pelo vírus, mas não manifestam seus sintomas (assintomáticos) (CARDOSO *et al.*, 2020).

O agente etiológico da COVID-19, o vírus SARS-CoV-2, tem sua transmissão a partir de gotículas respiratórias e vias de contato (WHO, 2020). O vírus utiliza a enzima conversora de angiotensina ACE2 como receptor na entrada nas células humanas (XU *et al.*, 2020) e o RNA mensageiro ACE2 é altamente expresso no sistema gastrointestinal (HARMER *et al.*, 2002). Foi reportada a detecção de SARS-CoV-2 viável nas fezes de pacientes com COVID-19 (WANG *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2020) e o RNA viral foi encontrado no esgoto (MEDEMA *et al.*, 2020; AHMED *et al.*, 2020).

Algumas rotas de transmissão do vírus, propostas por alguns autores, envolvem a água agindo como um agente indireto para a transmissão viral; a água servindo como um agente de higiene doméstica e pessoal de forma a evitar a infecção; a ausência de água facilitando a transmissão do vírus ou superfícies atuando de forma passiva para a transmissão do vírus (FEACHEM *et al.*, 1983, WHITE *et al.*, 1972). A figura 1 ilustra um marco inicial proposto por HELLER *et al.*

(2020) para a possibilidade da transmissão fecal-oral do vírus, com base no conhecimento dos trajetos ambientais citados anteriormente das doenças de veiculação ambiental e no que se sabe a respeito do potencial de persistência e infecciosidade por SARS-CoV-2.

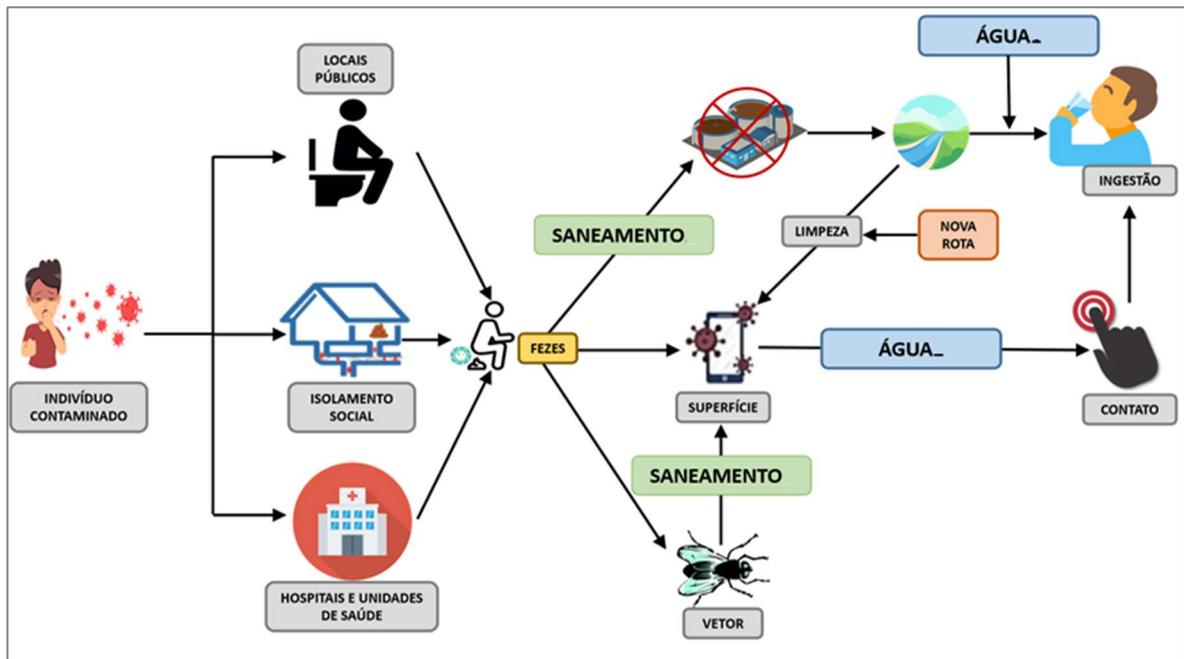


Figura 1 - Possíveis rotas de transmissão fecal-oral do SARS-CoV-2.

Fonte: adaptada de HELLER *et al.*, 2020.

Dor de garganta, tosse, febre, dificuldade para respirar e, em casos graves, pneumonia são alguns dos sintomas mais comuns da doença, sendo que esses sintomas podem variar entre as diferentes variantes; alguns pacientes também apresentam quadros de diarreia. Um estudo publicado pela revista científica *Lancet Gastroenterology and Hepatology* reportou a presença de RNA viral em fezes de portadores do SARS-CoV-2 (WU *et al.*, 2020). Pacientes com amostras fecais positivas (cerca de 50% do total) apresentaram resultados fecais que permaneceram positivos para o RNA do SARS-CoV-2 por uma média de 11 dias após as amostras do trato respiratório dos pacientes terem sido negativas, indicando a replicação ativa do vírus no trato gastrointestinal. A principal rota de transmissão da COVID-19 é a respiratória. No entanto, logo nos primeiros meses da pandemia foi encontrado material genético do SARS-CoV-2 em amostras de fezes de indivíduos infectados em estudos realizados na China e nos Estados Unidos, persistindo a positividade nas fezes por uma média de 7 a 14 dias (CHEN *et al.*, 2020 e KUJAWSKI *et al.*, 2020).

O SARS-CoV-2 começou também a ser encontrado em amostras de esgotos sanitários a partir de meados de abril e maio de 2020, conforme relatado em estudos na Alemanha (WESTHAUS

et al., 2020), Brasil (PRADO *et al.*, 2020), Chile (AMPUERO *et al.*, 2020), Índia (ARORA *et al.*, 2020), Japão (HATA *et al.*, 2020), República Tcheca (MLEJNKOVA *et al.*, 2020) e Turquia (ALPASLAN *et al.*, 2020), indicando novos desafios a serem enfrentados. Dessa forma, as ferramentas do monitoramento da presença do coronavírus no esgoto sanitário são importantes no sentido de somar esforços aos mecanismos de vigilância em saúde (SOARES *et al.*, 2020).

4.2 Epidemiologia Baseada no Esgoto (EBE)

As águas residuais constituem uma matriz complexa que contém uma ampla gama de marcadores químicos e biológicos das atividades humanas. Relacionar as concentrações de alguns desses materiais em águas residuárias ao uso, consumo ou taxas de exposição em escala populacional pode fornecer informações qualitativas ou quantitativas importantes sobre uma população dentro de uma determinada bacia sanitária. Apesar de existir relatos da metodologia anteriormente, a epidemiologia baseada no esgoto, do inglês *Wastewater-Based Epidemiology* – WBE, foi sistematizada por DAUGHTON e JONES-LEPP (2001) e implementada em 2005 para rastrear tanto o uso de cocaína e outras drogas ilícitas (ZUCCATO *et al.*, 2005; ZUCCATO *et al.*, 2008) quanto identificar oseltamivir durante a pandemia de gripe de 2009 (REDDY, 2010; SINGER *et al.*, 2013). A abordagem baseia-se na suposição de que qualquer substância excretada por humanos é estável em águas residuárias e pode ser utilizada para calcular a concentração original excretada pela população contribuinte. Esse mesmo conceito pode ser útil para a vigilância de vírus (BERCHENKO *et al.*, 2017).

A utilização do esgoto para fornecer informações sobre uma população foi utilizada na Espanha para estudar o uso de drogas em 4 localidades na Espanha e em 2 pontos em Portugal. Neste mesmo estudo foi identificado um alto consumo de anfetaminas no País Basco (ESTÉVEZ-DANTA *et al.*, 2022). Em Reykjavik, Islândia, a EBE foi usada para estimar o uso de cannabis na cidade, o que revelou um aumento do uso de cocaína e anfetaminas de 2017 a 2019. E ainda constataram mudanças nos padrões de uso de drogas durante a pandemia de COVID-19 (LÖVE *et al.*, 2022). Já um estudo utilizando a EBE na China demonstrou diferentes tendências temporais de consumo para nove drogas ilícitas ou não em um município chinês. De acordo com os resultados desta pesquisa, as tendências do consumo diário de drogas parecem ser estáveis ao longo da semana. A observação de uma ~~tendência de queda de longo prazo do uso de metanfetamina e cetamina possivelmente reflete~~

os fortes controles contra as duas principais drogas (metanfetamina e cetamina) na China nos últimos anos (ZHENG *et al.*, 2021).

Nesse sentido, essas publicações neste campo de estudo têm focado o uso da EBE no uso de produtos farmacêuticos, drogas ilícitas, tabaco e álcool. No entanto, muitas outras aplicações potenciais estão surgindo e podem contribuir com conhecimento sobre a saúde humana, exposição a produtos químicos industriais, doenças infecciosas ou patógenos e resistência a antibióticos (CHOI *et al.*, 2018).

Nesse contexto, a EBE pode fornecer informações agregadas da população, e identificar regiões onde a concentração viral é aumentada (PECCIA *et al* 2020). Isso resulta em um conjunto de dados menos tendencioso ao identificar indivíduos sintomáticos e assintomáticos, particularmente quando a testagem em massa da população é limitada (MURAKAMI *et al.*, 2020). Assim, quando usado em conjunto com dados de testes clínicos, a EBE tem o potencial de ser uma importante ferramenta para tomadas de decisão em saúde pública.

Na Figura 2, pode-se observar a estrutura da EBE e de que forma a metodologia se diferencia quando se trata de indivíduos isolados em uma comunidade em geral.

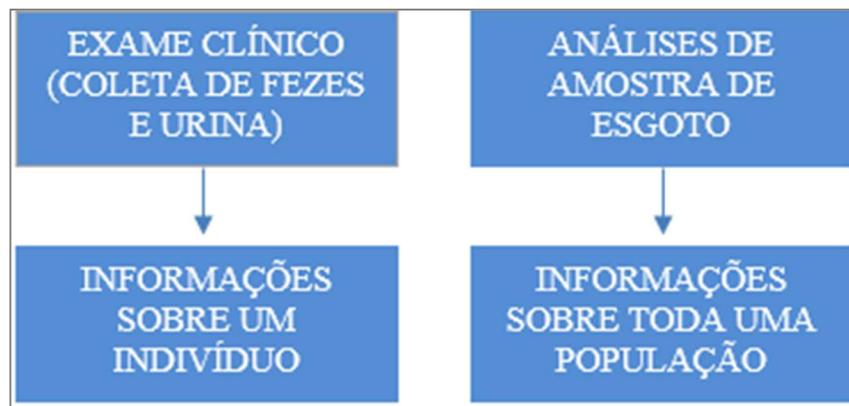


Figura 2 - Diferenciação da reposta de análises clínicas comuns e individuais e da epidemiologia do esgoto.

Fonte: AMBRÓSIO *et al.*, 2021.

HELLMÉR *et al.* (2014) investigaram a presença de vírus patogênicos em efluentes domésticos das cidades de Ryaverket, Gotemburgo, na Suécia, a fim de analisar se a presença desses microrganismos poderia ser utilizada como aviso prévio de surtos. Em Cingapura foi realizado um estudo que se utilizava de técnicas moleculares a fim de detectar e caracterizar adenovírus, astro vírus, enterovírus, norovírus e HAV (Vírus da Hepatite A) em efluentes

sanitários (AW *et al.*, 2010). Dessa forma, a EBE se configura como uma estratégia alternativa, rápida e que já foi utilizada em algumas partes do mundo para estimar a exposição de populações e comunidades a patógenos caracterizados, no geral, por fragmentos de seus genes (AMBRÓSIO *et al.*, 2021).

4.3 Monitoramento epidemiológico da COVID-19 em sistemas de esgotamento sanitário

De acordo com POLO *et al.* (2020), a presença de RNA viral de alguns vírus em águas residuárias, independente da infecciosidade viral, constitui uma ferramenta de diagnóstico indireto do nível da população infectada e de tendências de aumento ou diminuição do número de infectados. Segundo os mesmos autores, independentemente do vírus SARS-CoV-2 no esgoto ser infeccioso ou não, o uso das concentrações de partículas virais nas águas residuárias como uma ferramenta epidemiológica é possível para a estimativa da prevalência da COVID-19 em uma população. Amostras individuais do esgoto representam um retrato instantâneo e limitado da infecção na população, enquanto uma estratégia de amostragem longitudinal estruturada como parte de um programa integrado da EBE pode ser uma ferramenta preditiva adicional muito relevante para lidar com a pandemia de COVID-19 (conforme Figura 3).

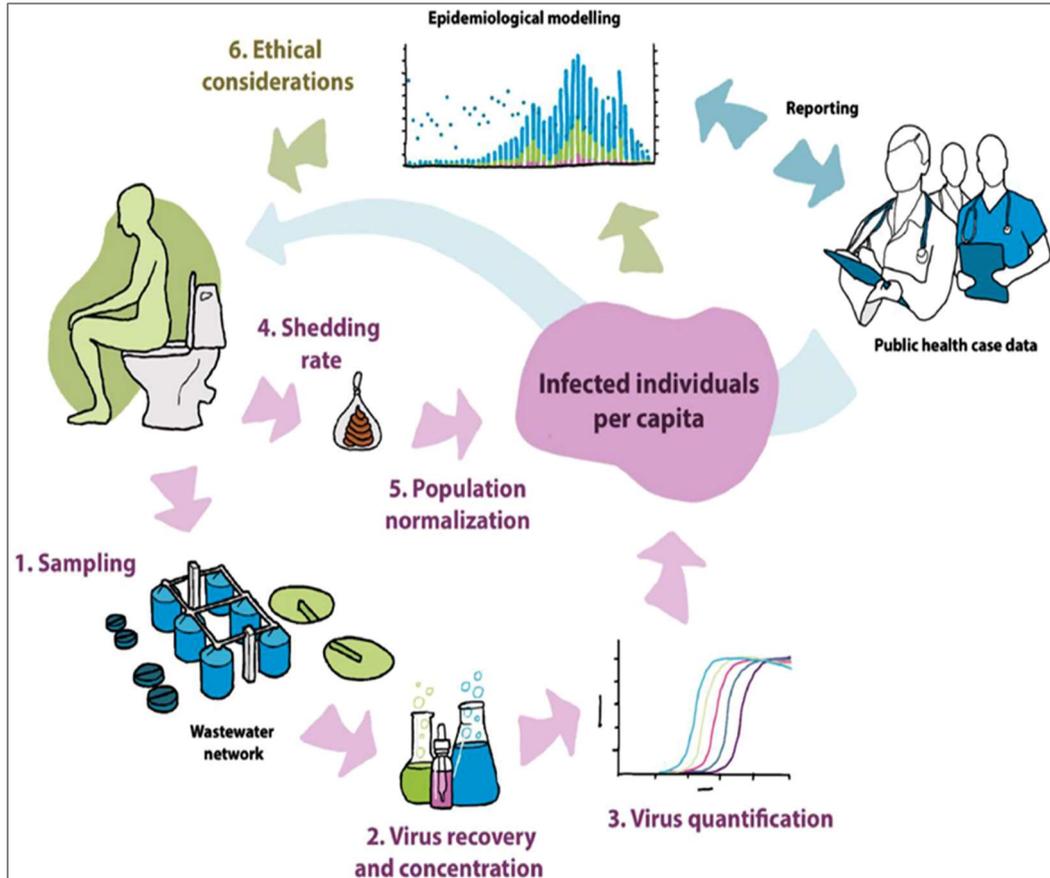


Figura 3 - Uma abordagem estruturada para epidemiologia baseada no esgoto (EBE) utilizada como vigilância comunitária da COVID-19.

Os fatores destacados sinalizam a importância de como as amostras de águas residuais devem ser coletadas (1), processadas e concentradas (2) para fornecer dados exatos o suficiente para combinar com dados de contribuição para normalização da população. A quantidade de indivíduos infectados pode ser estimada com base nas concentrações de RNA SARS-CoV-2 em águas residuais (3), da carga viral per capita (4) e da população contribuinte (5). Esses dados são então mesclados com dados de casos de saúde pública para modelagem epidemiológica com precisão suficiente para fazer previsões em escala comunitária. As questões éticas (6) também devem ser consideradas para evitar má interpretação da média dos dados de monitoramento a partir do esgoto.

Fonte: POLO *et al.* (2020).

As medidas de controle não farmacológicas, como o distanciamento social e a adoção de medidas de higiene, importantes na mitigação da COVID-19, necessitam de ferramentas que possibilitem mapear a doença, assim como analisar riscos e propor ações em saúde pública, com objetivo de identificar regiões críticas e estruturação do sistema de vigilância epidemiológica no Brasil. Nesse cenário, o uso do geoprocessamento mostra-se um eficiente instrumento para a análise territorial, com desenho da distribuição de casos que considerem os aspectos ambientais, demográficos, clínicos, epidemiológicos e geográficos. (AKUTSU, 2020).

O uso de ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG) é uma maneira extremamente eficaz de se trabalhar com dados geográficos. O SIG faz uso do banco de dados, ou seja, das informações alfanuméricas atreladas às estruturas de informações trabalhadas, englobando definições e abordagens de outras ciências e os elementos geridos para responder demandas para gerenciamento do território de forma mais célere e eficaz (OLAYA, 2011). Dessa maneira, o uso de SIG possui habilidades de junção e apresentação espacial dos dados em forma de modelos digitais, aplicações de análise espacial, gerando informações ou dados derivados, gestão e representação dos dados em mapas, gráficos e figuras capazes de dar suporte à análise científica para tomada de decisão e planejamento territorial (MIRANDA, 2015).

Em um pequeno recorte da literatura, foram encontradas várias pesquisas publicadas em caráter de urgência na tentativa de divulgar, espacializar e explicar as métricas do comportamento de transmissão e proliferação, tanto em nível local quanto global, considerando a distribuição dos intervalos seriais, período de incubação e risco de disseminação internacional (BOGOCH *et al.*, 2020; BOULOS AND GERAGHTY, 2020; ZHAO *et al.*, 2020). A divulgação dos registros de doenças, geograficamente espacializados em tempo real, favorecem a comunicação e avaliação do risco de contágio e disseminação, especialmente durante períodos de pandemia (BOULOS AND GERAGHTY, 2020; BROWNSTEIN AND GERAGHTY, 2009; XU AND KRAEMER, 2020).

Sendo assim, a espacialização de ocorrências e de focos epidemiológicos é essencial nas medidas de enfrentamento, contenção e controle de agravos de saúde. Uma determinante que prejudica a detecção do SARS-CoV-2 na população é a possibilidade de casos assintomáticos da doença e de infectados que apresentam apenas sintomas mais leves ou até mesmo não específicos. Logo, a confirmação se dá somente depois de serem reportados os casos clínicos ou quando é possibilitada a testagem em massa da população, o que não é realidade na maioria dos países, impedindo um monitoramento mais rápido e completo. Tal janela temporal desde a infecção até a detecção é um dos determinantes para se alcançar o controle da disseminação do vírus. Ademais, com a possibilidade da reinfeção pelo vírus, a velocidade de monitoramento faz-se ainda mais relevante (DAUGHTON, 2020).

Segundo SOARES *et al.* (2020), o monitoramento a partir do esgoto demonstrou-se menos oneroso e mais rápido em comparação com a testagem clínica. No entanto, a utilização de tal metodologia deve ser feita em conjunto com os testes clínicos. Logo, indica-se um

monitoramento em duas etapas, no qual a EBE pode ser realizada para estimar a carga viral na população e os testes clínicos servirão para identificar os indivíduos infectados nos locais críticos diagnosticados pela ferramenta da EBE.

Neste cenário, a vigilância epidemiológica de águas residuárias oferece uma abordagem complementar para a vigilância de doenças clínicas ao agregar informações de saúde em nível populacional (SIMS *et al.*, 2020). Além disso, esta ferramenta fornece uma amostra imparcial da população infectada, incluindo indivíduos assintomáticos e pré-sintomáticos (aqueles que são sintomáticos, mas ainda não foram confirmados clinicamente), além dos indivíduos que podem ter a doença mas não procuraram atendimento médico (DAUGHTON, 2020).

Uma variação temporal da presença de RNA de SARS-CoV-2 no esgoto foi estudada por um período de cinco meses em Jaipur, Índia. Este estudo reportou uma aplicação bem-sucedida do acompanhamento de SARS-CoV-2 em 9 sistemas de esgoto em Jaipur, que atendiam entre 60 a 70% da rede de esgoto de Jaipur. Foi constatado nessa pesquisa que as taxas de detecção positiva do RNA de SARS-CoV-2 nas águas residuais de todas as ETEs aumentaram junto com os casos clínicos ao longo do tempo. Um total de 72 amostras (43,9%) do total de 164 amostras testadas no estudo foram positivas, com pelo menos dois resultados de RT-PCR positivos visando quatro genes SARS-CoV-2, como E, RdRp, N e gene ORF1ab. Este sistema de epidemiologia baseada no esgoto é essencial na prática em um contexto indiano, onde os recursos são escassos em termos de gerenciamento e diagnóstico de doenças. Conforme demonstrado por este estudo, uma lacuna de 14 a 20 dias de aviso pode ser suficiente para tomar as ações necessárias para impedir a propagação da próxima onda de COVID-19. Essa descoberta foi apoiada pela relação entre a mudança percentual no nível de concentração gênica de SARS-CoV-2 e casos confirmados de COVID-19, que seguiram uma tendência semelhante na escala temporal com uma distância de tempo de entre 1 a 2 semanas (DUVALLET *et al.*, 2022). Já no estado de Michigan, Estados Unidos, a variante Delta foi detectada nas águas residuárias dos dois maiores municípios amostrados mais de 12 dias antes dos primeiros casos clínicos Delta relatados nesses municípios (JARVIE *et al.*, 2022). Esses estudos recentes mostraram que a vigilância epidemiológica do esgoto pode detectar a presença de SARS-CoV-2 antes de se espalhar em uma população ou no estágio inicial de propagação do vírus. E ainda, reforçam o potencial de se utilizar a ferramenta da vigilância epidemiológica do esgoto para fornecer um aviso prévio de surtos emergentes - bem como a possibilidade de modelagem e quantificação aprimoradas para entender a relação entre

concentrações virais em águas residuárias e infecções ativas na população (LODDER *et al.*, 2020).

Assim, diante de um momento pandêmico, a capacidade de monitorar rapidamente a propagação de doenças é essencial para a sua prevenção, intervenção e controle. Entretanto, a capacidade dos sistemas de vigilância é ainda muito limitada frente ao surgimento de novos organismos infecciosos e com ressurgimento de infecções outrora controladas. Dessa forma, o monitoramento de partículas virais em esgotos é considerado uma ferramenta promissora para complementar sistemas de vigilância sanitária e subsidiar sistemas de alerta precoce para surtos de diversas doenças. Ademais, é possível acompanhar tendências espaciais e temporais, produzir resultados em tempo quase-real e gerar informações sobre toda uma população através dessa ferramenta (SIMS *et al.*, 2020).

Wurtzer *et al.* (2020) relataram a presença de RNA viral em amostras de esgoto e identificaram a relação entre o RNA viral no esgoto e o número de casos da COVID-19. Esses mesmos autores fizeram a análise de amostras de esgotos brutos e tratados provenientes das três maiores estações de tratamento de esgoto (ETE) de Paris entre os meses de março e abril de 2020. Em tais estudos todas as amostras de esgoto bruto tiveram resultados positivos para a presença de SARS-CoV-2. Em seguida, os autores compararam o nível médio de genomas de SARS-CoV-2 em amostras de águas residuárias ao longo do tempo com o número de óbitos confirmados de COVID-19 em Paris e na França. Nesta comparação, encontrou-se um aumento de unidades do genoma em águas residuárias brutas precedendo o aumento do número de casos fatais observados em nível regional e nacional. Este estudo demonstrou ainda que a contaminação de águas residuárias e a detecção do genoma viral ocorreram antes do início do crescimento exponencial da epidemia, conforme mostrado na Figura 4.

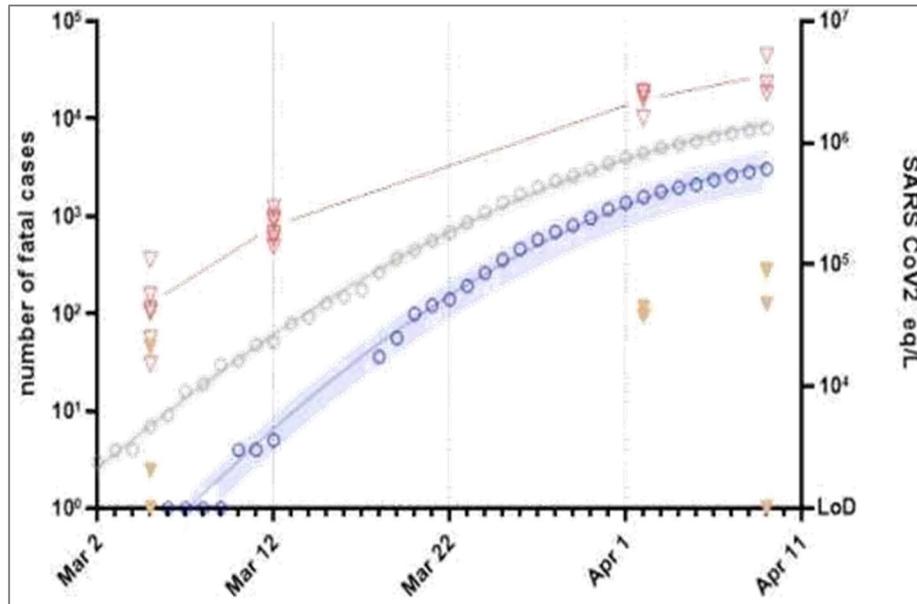


Figura 4 - Monitoramento quantitativo de SARS-CoV-2 em amostras de águas residuárias na região de Paris.

Quantificação de genomas de SARS-CoV-2 em esgoto bruto (triângulos vermelhos invertidos abertos) ou esgoto tratado (triângulos laranjas invertidos completos) de 3 ETEs na área parisiense. Os números de casos fatais de COVID-19 na França (em cinza) ou na área parisiense (círculo aberto em azul escuro). As curvas gaussianas foram ajustadas nos dados ($R^2 > 0,98$) para modelar a área parisiense onde faltava informação.

Fonte: WURTZER *et al.*, 2020.

Para entender quais fatores estão associados a uma heterogeneidade microgeográfica das concentrações de SARS-CoV-2 em amostras de esgoto, uma pesquisa realizada em Massachusetts, EUA, investigou 38 diferentes variáveis demográficas. Os autores do estudo demonstraram que os níveis virais em águas residuárias não se correlacionaram fortemente com o tamanho da população. No entanto, as concentrações virais no esgoto possuíam uma correlação melhor com gastos domésticos médios com saúde e com a renda familiar, conforme a figura 4. A análise mostrou que o aumento de novos casos clínicos para os bairros foi fortemente correlacionados com renda, tamanho da família, idade, gastos com saúde e raça/etnia (WU *et al.*, 2021).

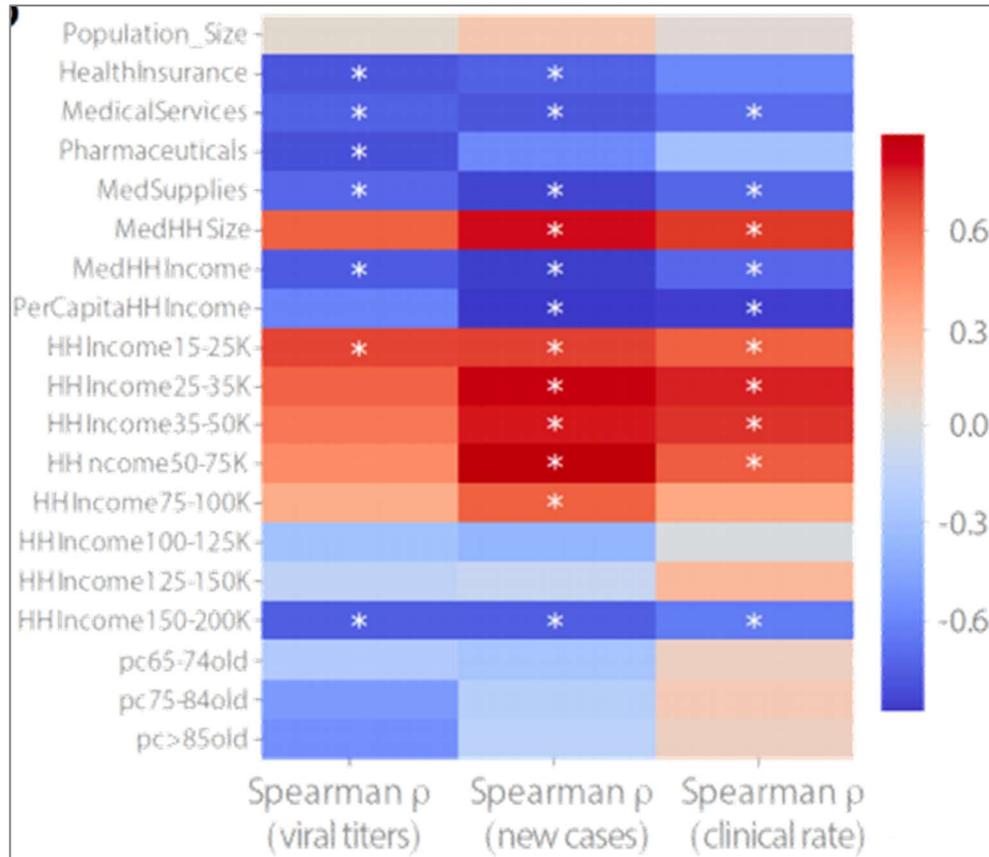


Figura 5 - Correlações de Spearman entre a concentração viral no esgoto /dados clínicos e variáveis demográficas em 11 bacias hidrográficas de Boston.

*p-valor significativo com TFP (Taxa de falso positivo) <0,1. pc: porcentagem, HH: agregado familiar, Ave: média, Med: mediana. MedHHIncome, PerCapitaHHIncome: Renda domiciliar mediana e per capita. HHIncome15-25K: porcentagem da população com renda familiar entre 15 e 25 mil em todo o ano. HealthInsurance, MedicalServices, Pharmaceuticals, MedSupplies: despesas médias das famílias com seguro saúde, serviços médicos, produtos farmacêuticos e suprimentos médicos. MedHHSize: tamanho médio da família. pc0-5old: porcentagem de indivíduos de 0 a 5 anos Population: tamanho da população da bacia.

Fonte: WU *et al.*, 2020.

Neste mesmo estudo foi evidenciado o fato de que muitas dessas variáveis são correlacionadas umas com as outras. Tendências semelhantes também foram encontradas para taxas dos casos clínicos cumulativos, conforme a figura 6. Assim, a vigilância epidemiológica em nível de bairro reflete a heterogeneidade na incidência de doenças e prevalência em subpopulações específicas e é consistente com relatórios anteriores de que a pandemia COVID-19 está afetando de forma mais agressiva bairros com populações socioeconomicamente desfavorecidas (FORTUNA, 2020).

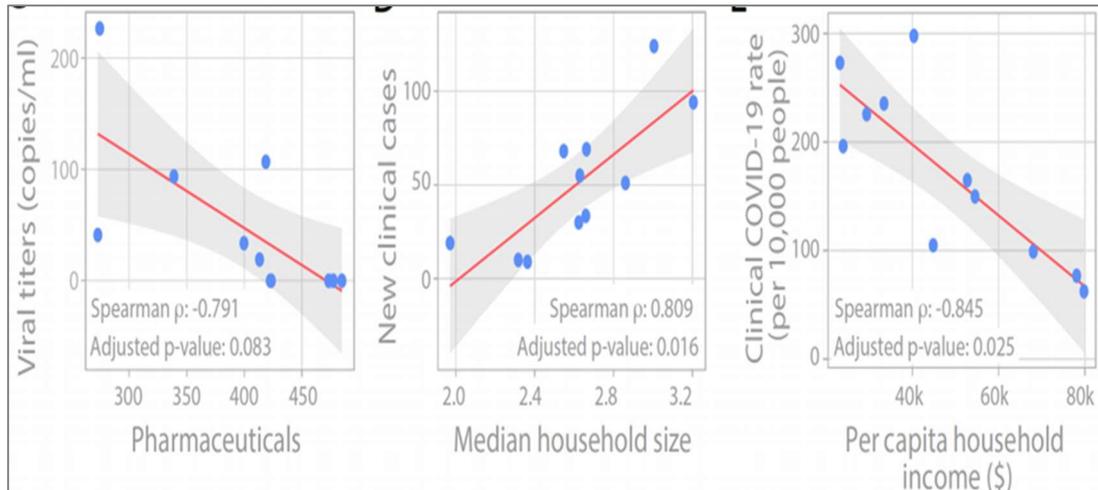


Figura 6 - Correlação entre concentração viral nas águas residuais e gastos domésticos médios com produtos farmacêuticos. Meio: Correlação entre novos casos COVID-19 e número de moradores por domicílio. À direita: Correlação entre a taxa COVID-19 acumulada clinicamente relatada por 10.000 pessoas e renda familiar per capita. A linha sólida vermelha é o ajuste de regressão linear. Área cinza: intervalo de confiança de 95% do erro padrão do ajuste.
Fonte: WU *et al.*, 2020.

Ao contrário de outros microrganismos, como bactérias, os vírus não se multiplicam fora das células hospedeiras. Portanto, os vírus em águas residuárias podem representar as concentrações excretadas pela população humana correspondente (CARDUCCI *et al.*, 2020). Dessa forma, monitorar mudanças temporais nas concentrações virais em amostras de águas residuais comunitárias pode ser usado não apenas para determinar a verdadeira extensão da infecção na população, mas também o surgimento de novas cepas virais e a detecção precoce de novos surtos virais (DAUGHTON, 2020).

4.4 Indicadores auxiliares

4.4.1 Índice de Vulnerabilidade em Saúde

Uma análise dos componentes ligados às condições de vida e saúde da população pode auxiliar na descrição de um perfil da população e orientar na definição de políticas públicas e de ações prioritárias para melhorias nas condições de vida e saúde (PAIM, 1997). Segundo BUSS e PELLEGRINI (2007), as condições de vida e trabalho das pessoas se encontram diretamente atreladas com o estado de saúde daqueles indivíduos. Informações como renda, educação, trabalho, lazer e acesso a serviços de saneamento básico podem ser tão influentes no quadro de saúde de uma população quanto fatores tidos como causas diretas de agravos. Por isso a importância de explorar o impacto das condições socioeconômicas desfavoráveis na qualidade e no estilo de vida e nas condições de saúde. Nesse contexto surge o índice de Vulnerabilidade em Saúde, o qual é uma combinação de variáveis socioeconômicas em um

indicador síntese, utilizado pela Secretaria Municipal de Saúde/PBH para apontar áreas prioritárias para intervenção e alocação de recursos.

Ao associar essas diferentes variáveis, o IVS evidencia as condições desfavoráveis de acesso a serviços básicos da população, como de saúde e saneamento, no perfil epidemiológico de grupos sociais distintos e propicia a identificação de áreas com condições socioeconômicas desfavoráveis dentro do espaço urbano delimitado. Além de ser um indicador de acesso rápido e de fácil entendimento, o IVS é uma ferramenta importante no redesenho de uma rede de assistência e promoção do desenvolvimento de populações, em diversas escalas geográficas de atuação. No município de Belo Horizonte, ele é utilizado como uma das muitas formas de compreensão das realidades locais para nortear políticas públicas de saúde e priorizar alocação de recursos (SMSA, 2012).

Os dados utilizados nos cálculos do IVS são derivados do último Censo Brasileiro (2010), e os pesos relativos utilizados no cálculo foram definidos pelo Processo de Hierarquia Analítica, conforme apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 - Peso de cada indicador utilizado no cálculo do índice de vulnerabilidade à saúde (IVS).

Indicador	Peso
Abastecimento de água inadequado	0,424
Saneamento inadequado	0,375
Deposição final inadequada de resíduos sólidos	0,201
Moradores por domicílio	0,073
Analfabetismo	0,283
Renda <i>per capita</i> até 0,5 salário mínimo	0,288
Renda média dos chefes de família	0,173
Percentual da população negra e indígena	0,185

Fonte: PBH, 2018.

Regiões com alto Índice de Vulnerabilidade de Saúde (IVS) são consideradas vulneráveis, pois são dominadas por áreas densamente povoadas e com acesso inadequado a saneamento, saúde e outros serviços públicos básicos (SCALZARETTO, 2020).

Estudo realizado por PASSOS *et al.*(2021) ratifica o pressuposto de um maior número de

óbitos por causas naturais e por COVID-19 em populações com maior vulnerabilidade na cidade de Belo Horizonte em 2020 e, em especial, entre idosos. No intervalo amostrado, a COVID-19 é apontada como sendo uma das principais causas do excesso de óbitos por razões naturais, como mostra a sobreposição entre as médias móveis da mortalidade por causas naturais e por COVID-19 no município (Figura 6). Em uma realidade de testagem limitada dos casos positivos da doença, bem como de ausência de padronização da certificação de mortes, o excesso de mortalidade é a ferramenta sugerida para garantir aos gestores de saúde um indicador de confiança da magnitude da pandemia por englobar as influências diretas e indiretas na mortalidade da população.

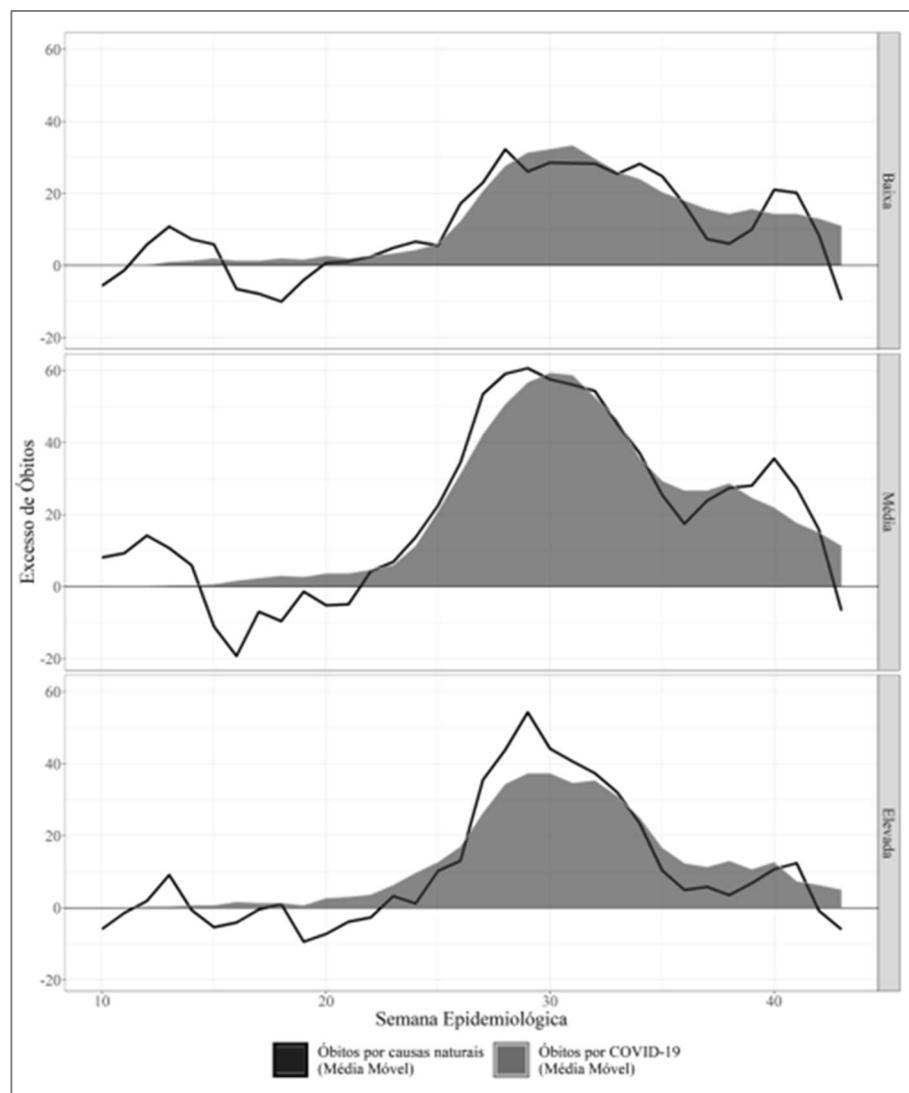


Figura 7 - Representação da média móvel do excesso de óbitos por causas naturais e dos óbitos por COVID-19, em Belo Horizonte, entre a 10ª e a 43ª semana epidemiológica de 2020.

Fonte: PASSOS *et al.*, 2020.

Os setores censitários com vulnerabilidade média a elevada representaram um excedente de

16,1% de óbitos por causas naturais em Belo Horizonte entre a 10^a e 43^a semana epidemiológica de 2020, conforme a Figura 8. No entanto, o número de mortes por COVID-19 foi motivado por uma parcela menor do excedente de óbitos por causas naturais nas áreas de elevada vulnerabilidade em relação às outras áreas. Tal fato indica uma provável subnotificação de COVID-19 nessas regiões, provavelmente em função da desigualdade de acesso aos serviços de saúde e aos testes diagnósticos (PASSOS *et al.*, 2020).

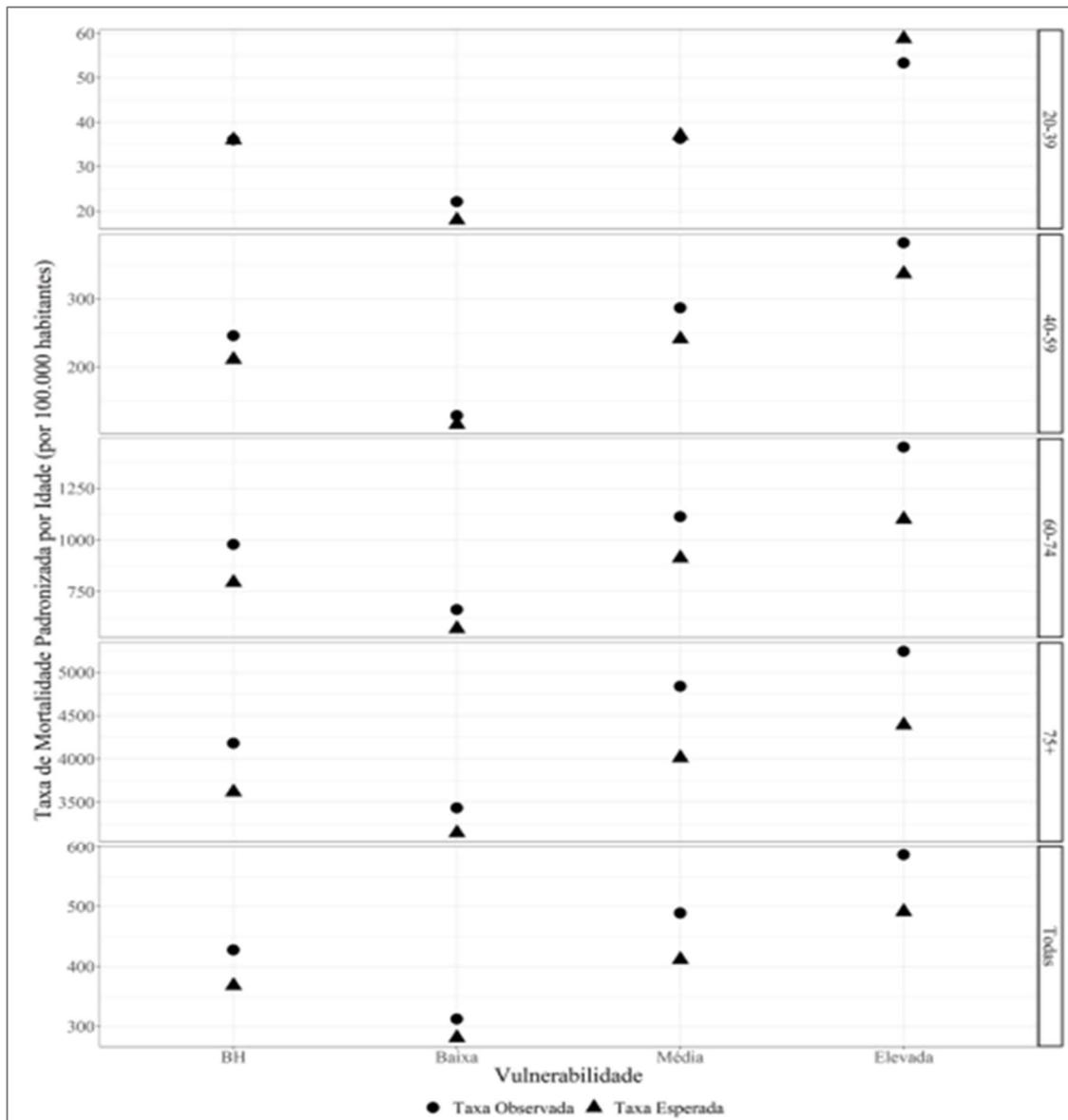


Figura 8 - Taxas de mortalidade padronizadas por 100 mil habitantes por causas naturais, por faixas etárias e por todas as idades, em Belo Horizonte, entre a 10^a e a 43^a semana epidemiológica de 2020.

Fonte: PASSOS *et al.*, 2020.

Outra hipótese é da provável ocorrência de um aumento de mortes naturais por outras causas naturais como consequência indireta da pandemia nas áreas de maior vulnerabilidade social.

A análise por grupos etários mostra que, no período sob exame, houve aumento consistente

da mortalidade observada em relação à esperada, com maiores diferenças entre os óbitos com mais de 60 anos de idade e nos setores de maior vulnerabilidade (PASSOS *et al.*, 2021).

4.4.2 Índice de Prevalência Relativa

Estimar com precisão o número de casos de COVID-19 com base apenas em dados de esgoto pode ser problemático devido à ampla variabilidade intrínseca de alguns parâmetros necessários para converter as concentrações de RNA de SARS-CoV-2 em esgoto para o número de casos (MOTA *et al.*, 2021). Por exemplo, o número de cópias do genoma viral excretadas por grama de fezes pode variar de 10^3 a 10^7 (ZANETI *et al.*, 2020). Outro fator limitante nesta estimativa é que a população pode ter se contaminado em outro local, como no local de trabalho. Esse efeito é minimizado quando se fala de uma estimativa agregada no nível da RMBH, mas se agrava no nível municipal, pois há muita pendularidade entre as cidades da RMBH por motivo de trabalho, estudo e lazer (QUEIROZ, 2021). Para contornar essa limitação e identificar pontos de acesso dentro da cidade, foi proposta a avaliação de dados com base no Índice de Prevalência Relativa (IPR) em função da concentração de RNA SARS-CoV-2 no esgoto para cada uma das regiões amostradas. O IPR é definido como a razão da prevalência regional (com base nas concentrações de RNA do SARS-CoV-2 determinadas em cada região monitorada) sobre a prevalência no esgoto (com base nas concentrações de RNA do SARS-CoV-2 determinadas na entrada da estação de tratamento daquela sub-bacia) (MOTA *et al.*, 2021).

Os cálculos do IPR levam em consideração o decaimento estimado do RNA do SARS-CoV-2 à medida que passa pelo sistema de esgotamento sanitário (AHMED *et al.*, 2020). Uma região com IPR superior a 1 tem uma concentração de SARS-CoV-2 no esgoto superior à concentração média naquela bacia sanitária e, portanto, pode ser considerada um *hotspot*. Dependendo das incertezas relacionadas à determinação de alguns dos fatores que podem afetar o IPR (como o regime de amostragem e armazenamento e o protocolo de quantificação de RNA), o nível de alerta para regiões de preocupação pode ser definido em valores superiores a 1 para evitar prognósticos excessivamente alarmistas baseados apenas no esgoto (MOTA *et al.*, 2021).

De acordo com MOTA *et al.* (2021), as regiões com maior vulnerabilidade em saúde apresentaram indicativos de que foram as mais atingidas pela pandemia. Por exemplo, as regiões mais vulneráveis nas sub-bacias de esgoto Arrudas e Onça apresentaram persistentemente altos valores de IPR. No período anterior ao agravamento da pandemia, em

2020, a prevalência mediana de COVID-19 na região SBO-08 (Interceptor Córrego Terra Vermelha) era quase três vezes a prevalência média no esgoto da sub-bacia Onça, a qual está inserida. No período compreendendo as semanas epidemiológicas 25 a 28 do ano de 2020 a prevalência média da COVID-19 na região SBA-07 (Interceptor Córrego Cardoso) foi quase quatro vezes a prevalência média no esgoto da sub-bacia Arrudas. Ambas as regiões são classificadas como de média a extremamente vulnerável. Regiões com baixo IVS foram menos afetadas pela pandemia no período amostrado, com valores de IPR abaixo de 1 durante a maior parte do período de monitoramento. Os autores concluíram que os dados do IPR provaram ser particularmente relevantes como ferramenta de alerta precoce, pois ajudaram a identificar regiões com prevalência de COVID-19 relativamente alta antes do agravamento da pandemia que afetou toda a cidade.

A figura 9 mostra os valores de IPR determinados para cada uma das 15 regiões monitoradas em três períodos distintos durante a pandemia: semanas epidemiológicas 20 e 24 (antes do agravamento da pandemia); 25 e 28 (inclui o início do período de agravamento); e 29 e 32 (continuação do período de agravamento e início do período de atenuação). Além disso, a figura 9 mostra o Índice de Vulnerabilidade em Saúde – IVS, para cada uma das regiões amostradas.

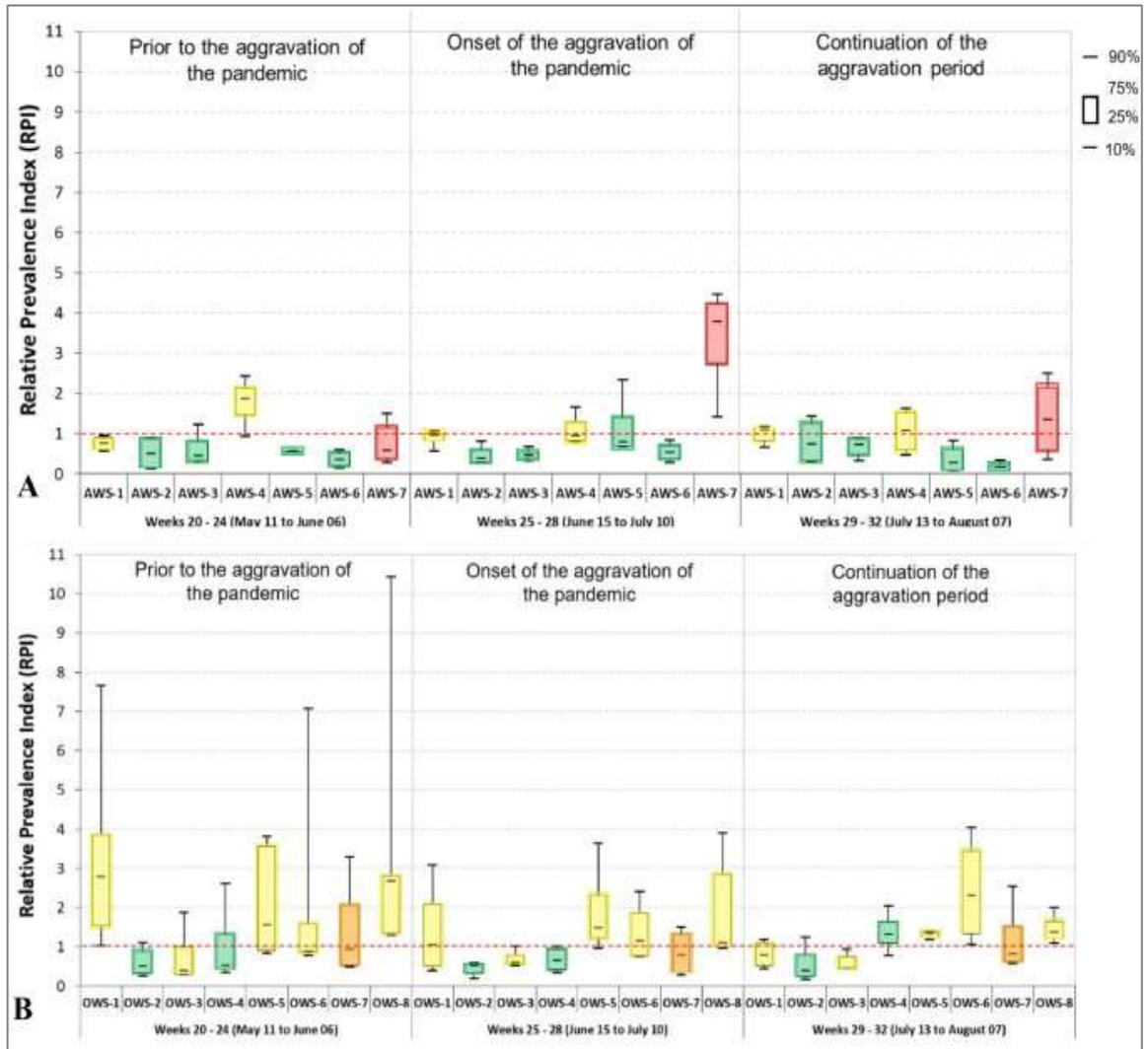


Figura 9 - Índice de Prevalência Relativa (IPR) para diferentes regiões de Belo Horizonte em três períodos distintos durante a pandemia.

IPR é a prevalência de COVID-19 em cada região em relação à prevalência naquela mesma bacia: (A) Arrudas; (B) Onça. Uma região com IPR de 1 tem prevalência semelhante à do restante daquela mesma bacia. O Índice de Vulnerabilidade em Saúde (IVS) de cada região é indicado em cores: vermelho: extremamente vulnerável; laranja: muito vulnerável; amarelo: vulnerável; e verde: não vulnerável.

Fonte: MOTA *et al.*, 2021.

Regiões com alto IVS são consideradas vulneráveis pois são dominadas por ocupações não planejadas, com más condições de vida caracterizadas por domicílios densamente povoados e com pouco acesso a saneamento, saúde e outros serviços públicos básicos (SCALZARETTO, 2020).

4.4.3 Número médio de transmissão por infectado (R_t)

O número médio de transmissão por infectado, denominado R_t , é capaz de expressar a velocidade instantânea com que um vírus se propaga na população, indicando a aceleração ou desaceleração do contágio de uma doença. Dessa forma, é um indicador instantâneo e representa o número médio de pessoas infectadas que cada indivíduo contaminado foi capaz de contaminar, ou seja, uma vez contaminada para quantas pessoas ela transmitiu o vírus. Quando tal índice é maior que 1, em média cada indivíduo infectado foi capaz de transmitir a doença para mais de uma pessoa. Se é menor do que é 1, cada vez menos indivíduos se infectam e o número de novos casos diminui. Para o monitoramento da pandemia em Minas Gerais, a equipe da Secretaria Estadual de Saúde do Estado trabalha com a média móvel dos últimos sete dias, já que as oscilações diárias no quantitativo de casos são corrigidas com o uso da média móvel (SES – MG, 2022).

Ao possibilitar que se projete a demanda hospitalar futura, esse indicador ainda agrega o uso de medicamentos e equipamentos e até o espaço nos cemitérios para receber corpos. É importante também para planejar períodos de quarentena e sua flexibilização (FAPESP, 2022).

4.5 Padrão espaço-temporal de propagação de COVID-19 no Brasil

Nesse contexto, a heterogeneidade no seu padrão de disseminação imprime à dinâmica da pandemia no Brasil comportamento em aspectos geográficos e demográficos que trazem repercussão para a organização do serviço de saúde e para os rumos da vigilância da doença. Dessa forma, o conhecimento do padrão espaço-temporal da distribuição é importante para avaliar o impacto do avanço da pandemia, além de agregar informações que podem ser utilizadas nas tomadas de decisão na contenção da doença. Diante dessa complexidade da pandemia e de suas diferentes configurações espaciais, estudos de escala com grande detalhamento, que buscam avaliar o aumento da COVID-19 em maior ou menor escala geográfica, podem trazer grandes contribuições para o enfrentamento da presente ou de futuras pandemias (LEAL *et al.*, 2020).

Segundo Castro *et al.* (2021), em todas as unidades da federação demorou menos de um mês entre o primeiro caso e a primeira morte; apenas 11 dias no Amazonas e 21 em São Paulo. As curvas epidemiológicas para o Brasil possuem padrões distintos de notificação inicial, propagação e contenção da COVID-19 por autoridades da área da saúde. À medida que estados

e municípios impuseram medidas restritivas em momentos distintos, a mobilidade populacional facilitou a circulação do vírus e atuou como desencadeador da disseminação da doença.

Para entender e comparar como os casos e óbitos da COVID-19 se espalharam pelo Brasil, Castro *et al.* (2021) calcularam o centro geográfico da pandemia no país. As trajetórias do centro geográfico da pandemia por semana epidemiológica mostram que após o início da pandemia em São Paulo, tanto os casos (Figura 10 A) quanto os óbitos (Figura 10 B) deslocaram-se progressivamente para o norte do país até a semana epidemiológica 20 (a partir de 10 de maio de 2020), quando o número de casos começou a diminuir no Amazonas e no Ceará, mas ganhou força no Rio de Janeiro e em São Paulo novamente. Comparando as trajetórias em cada estado, os autores calcularam a razão entre a distância que o centro percorre a cada semana e a distância entre a capital e o município mais distante. Em oito estados, a proporção média semanal de óbitos foi maior do que os casos, sugerindo um movimento mais rápido do foco das mortes do que o número de casos. Esses estudos não consideraram as influências das variantes.

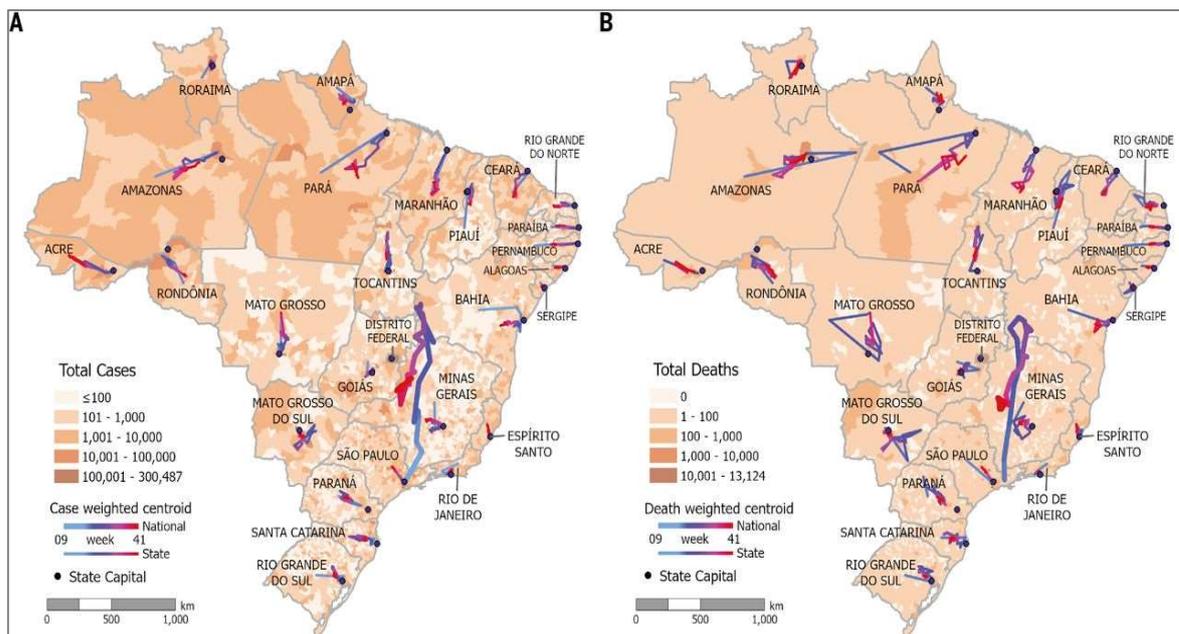


Figura 10 - A e B. Centro geográfico da COVID-19 ponderado por casos (A) e por óbitos (B) por semana epidemiológica.

Fonte: CASTRO *et al.*, 2021.

Para medir quantitativamente a intensidade da disseminação de casos e mortes de COVID-19 ao longo do tempo, Castro *et al.* (2021) utilizaram o índice de Hoover locacional (IHL). Valores de IHL próximos a 100 indicam concentração em poucos municípios, enquanto valores

próximos de zero sugerem dispersão mais homogênea da doença. Se a contenção da doença for eficaz, espera-se que o IHL decaia lentamente, permanecendo relativamente alto ao longo do tempo, já que valores altos do IHL indicam uma concentração da variável em uma região. Além disso, se as medidas forem eficazes para evitar o colapso do sistema hospitalar, espera-se um IHL maior para óbitos em comparação aos casos. A Figura 11 mostra o IHL para os estados brasileiros e uma tendência clara de rápida disseminação para casos e óbitos até cerca da semana 30 (19 a 25 de julho de 2020). O padrão, no entanto, variou entre os estados. Na primeira semana com eventos notificados, Amazonas, Roraima e Amapá apresentaram IHL <50 tanto para casos quanto para óbitos. Isso sugere circulação não detectada do vírus antes das notificações iniciais (ou seja, quando a notificação começou, já havia uma grande fração da população infectada) ou introduções rápidas e múltiplas do vírus imediatamente seguidas de rápida propagação espacial.

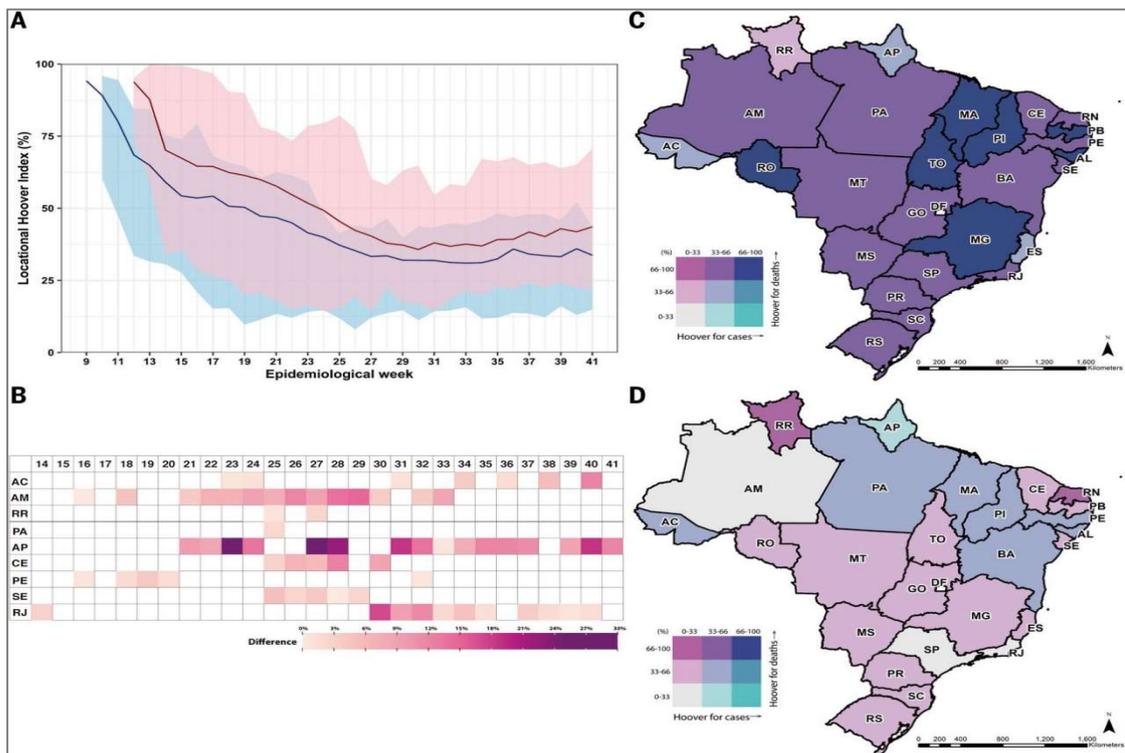


Figura 11 - Propagação de casos e mortes por COVID-19.

- (A) IHL para casos (linha azul) e óbitos (linha vermelha) por semana epidemiológica. A área ao redor de cada curva indica o índice máximo e mínimo observado entre os estados. (B) Estados e semanas em que o IHL dos casos foi maior do que o IHL dos óbitos, indicando uma disseminação mais rápida dos óbitos. (C e D) Mapa bivariado do IHL para casos e óbitos na semana epidemiológica 14 (C) e semana epidemiológica 41 (D).

Fonte: CASTRO *et al.*, 2021.

4.6 Monitoramento nas sub-bacias sanitárias de Belo Horizonte

Os estudos epidemiológicos baseados no esgoto, com sua vasta riqueza de informações e aplicabilidade, permitem investigar a prevalência e incidência de diversas doenças, fornecendo um banco de dados que indica os padrões gerais das causas, comportamento de doenças e seus fatores de risco. Além do mais, pontuam as demandas reais dos problemas pela descrição detalhada, tornando possível criar mecanismos para prevenir, reduzir ou até eliminar a exposição a alguns fatores de forma mais eficaz, intervindo de modo direto na elaboração das políticas públicas em saúde (MAISEL *et al.*, 2015).

Nesse sentido, o monitoramento da presença e quantificação do SARS-CoV-2 em amostras de esgoto bruto provenientes das sub-bacias sanitárias foi realizado pelo Projeto-piloto: “Detecção e quantificação do novo coronavírus em amostras de esgoto nas cidades de Belo Horizonte e Contagem”, fruto de acordo firmado entre a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto (INCT ETEs Sustentáveis - UFMG), em parceria com o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e a Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais (SES-MG). Através de seus Boletins de acompanhamento semanais divulgaram os resultados encontrados em tal monitoramento.

Os resultados das amostras de esgotos coletadas no período de 14 de abril de 2020 a 24 de março de 2021 estão acessíveis no Painel Dinâmico Monitoramento COVID Esgotos (*Dashboard*), permitindo uma visão mais aprofundada da evolução espacial e temporal da ocorrência do novo coronavírus nas amostras de esgoto coletadas na área em estudo. Esses resultados foram utilizados como base de dados da presente pesquisa.

Devido às limitações nos dados de testes de COVID-19, as autoridades de Belo Horizonte planejaram suas ações de controle da pandemia com base em dados de ocupação de leitos de COVID-19 coletados em hospitais locais e centros de saúde municipais e na taxa efetiva de transmissão (Rt). Da mesma forma, Mota *et al.* (2021) coletaram e avaliaram dados que não dependem de testes de COVID-19, incluindo o número de pessoas que procuram atendimento de saúde com sintomas de COVID-19. Medidas de bloqueio parcial foram introduzidas preventivamente para conter a propagação do vírus a partir de 18 de março de 2020 (semana epidemiológica 12), quando um decreto municipal ordenou o fechamento de todos os serviços não essenciais. Essas restrições foram parcialmente levantadas em 25 de maio de 2020 (semana epidemiológica 22), quando praticamente todo o setor de comércio foi autorizado a abrir novamente. O relaxamento das restrições ocorreu em 8 de junho de 2020 (semana

epidemiológica 24), quando estabelecimentos, principalmente os propensos à aglomeração, permaneceram fechados, incluindo escolas, bares, restaurantes e cinemas. O levantamento das restrições resultou no agravamento da pandemia a partir da semana 25, conforme demonstrado pelo aumento no número de ocupações de leitos hospitalares locais de COVID-19, no número de indivíduos que procuram atendimento de saúde com sintomas de COVID-19 e no total de SARS-CoV-2 carga em esgoto, conforme a figura 8. Na semana 26, o número total de leitos hospitalares de UTI e enfermaria ocupados por pacientes com COVID-19 atingiu, respectivamente, 85% e 69% dos leitos de COVID-19 disponíveis localmente. Como resultado, medidas rígidas de isolamento foram restabelecidas na semana 27 (29 de junho de 2020).

O número cumulativo de quatro semanas de indivíduos que procuram atendimento de saúde com sintomas de COVID-19 e a carga de RNA SARS-CoV-2 no esgoto seguiram tendências semelhantes conforme a Figura 12, com aumentos acentuados nas semanas 24 a 26, seguidos por surtos e diminuí posteriormente nas semanas 27 a 32. A comparação com base em um período de quatro semanas foi realizada porque a disseminação do vírus nas fezes pode ocorrer por até 4 semanas após o início dos sintomas respiratórios em casos leves a graves (ZHENG *et al.*, 2020). O baixo número de casos confirmados observado no mesmo período destaca a escassez e inadequação dos dados de testes clínicos locais. O monitoramento de esgoto pode detectar indivíduos sintomáticos e assintomáticos (LA ROSA *et al.* 2020) que podem excretar o vírus nas fezes, mas não são testados e, portanto, não estão incluídos nas estatísticas oficiais.

Estudos relatados por MICHAEL-KORDATOU *et al.* (2020) reforçam ainda que o esgoto é uma fonte de informação sobre saúde e hábitos humanos e pode ser transformado em uma fonte segura de informações importantes no tocante à saúde pública e que pode ser utilizado como instrumento para refinar a resposta da saúde pública a uma pandemia causada por um patógeno, por exemplo. As autoridades de saúde pública podem ainda usar essas informações para otimizar sua resposta e ajudá-las a avaliar quando e como começar a ampliar ou retroceder políticas e recomendações para o controle de um agravo. Entre os vários métodos de avaliação e vigilância de saúde pública e doenças infecciosas, a EBE oferece vantagens significativas para enfrentar obstáculos enfrentados por outras técnicas comumente aplicadas, como o fornecimento confiável de tendências espaço-temporais no comportamento humano, dando informações quase em tempo real e dados populacionais mais completos, incluindo pessoas assintomáticas e aquelas com sintomas leves ou semelhantes a outras infecções virais comuns a um custo relativamente baixo.

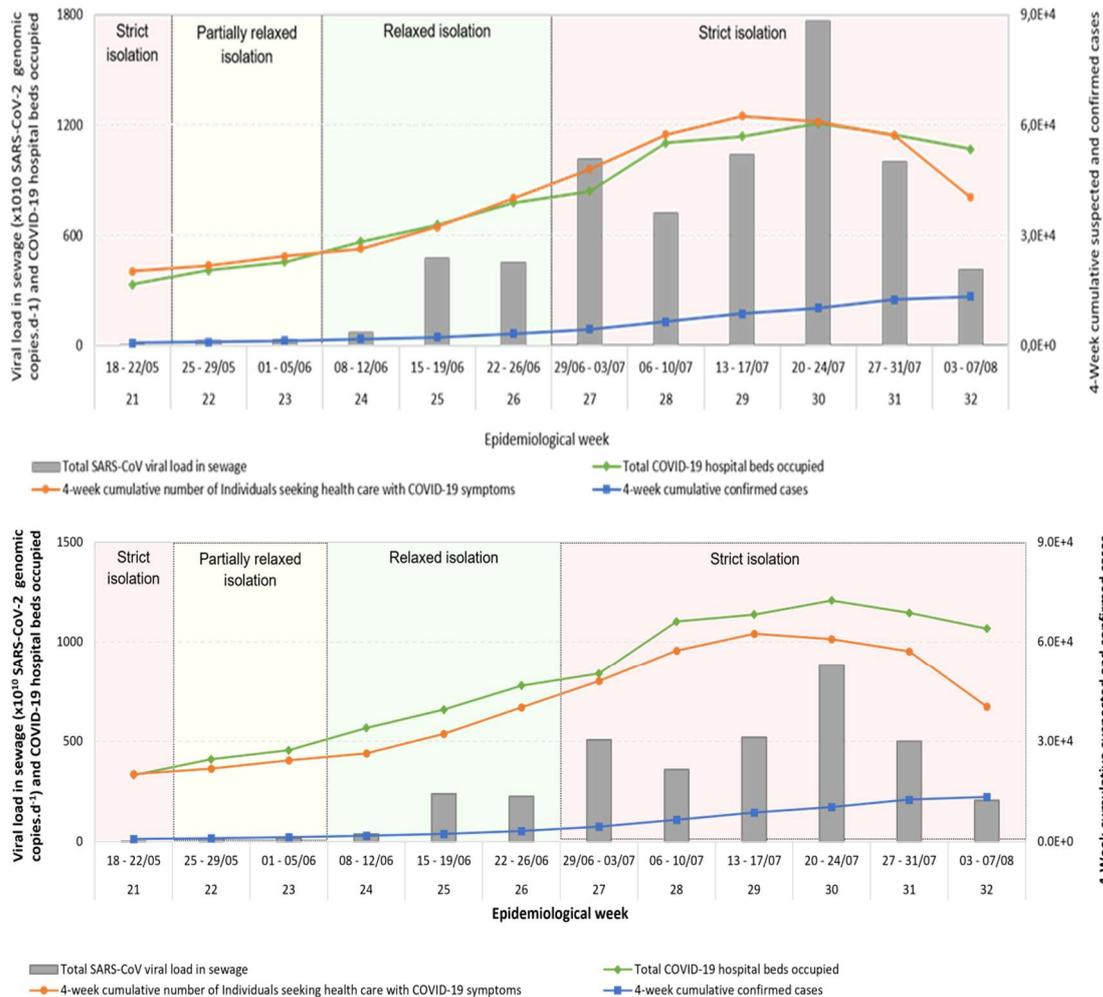


Figura 12 - Evolução das cargas de RNA do SARS-CoV-2 no esgoto (soma das cargas virais no afluente das estações de tratamento de esgoto Arrudas e Onça).

Ocupação de leitos hospitalares de COVID-19, 4 semanas de casos confirmados e 4 semanas de número cumulativo de Evolução das cargas de RNA do SARS-CoV-2 no esgoto (soma das cargas virais no afluente das estações de tratamento de esgoto Arrudas e Onça), ocupação de leitos hospitalares de COVID-19, 4 semanas de casos confirmados e 4 semanas de número cumulativo de indivíduos que procuram atendimento de saúde com sintomas de COVID-19 em Belo Horizonte.

Fonte: MOTA *et al.*, 2021.

4.7 Primeiras medidas de enfrentamento à Covid-19 em Belo Horizonte

No dia 06 de fevereiro de 2020, o governo federal sancionou a Lei no 13.979/2020, que dispõe sobre as medidas de enfrentamento à COVID-19 a serem adotadas pelas autoridades no âmbito de suas competências, tais como: a) isolamento dos casos confirmados e suspeitos; b) quarentena; c) restrição de mobilidade; d) realização compulsória de procedimentos, e e) dispensa temporária de licitação para a compra de bens, insumos e serviços de saúde destinados ao combate ao novo coronavírus.

Em conformidade à Lei, MG decretou estado de emergência em saúde pública (Decreto nº 113, de 12/03/2020), quatro dias após a confirmação do primeiro caso. Em 15 de março, foi instituído o comitê responsável pelo acompanhamento do quadro epidemiológico da doença e delineamento das medidas para o enfrentamento da pandemia. Cinco dias depois, com a confirmação de transmissão comunitária no estado, o governador decretou estado de calamidade pública (Decreto nº 47.891, de 20/03/2020). Entre as principais medidas adotadas, destacam-se a suspensão das atividades não essenciais e de aulas presenciais; a criação de leis para a abertura de crédito especial destinados a programas de saúde; o uso obrigatório de máscara em locais públicos; benefícios temporários à prestação de assistência alimentar às famílias de estudantes da rede pública.

Em Belo Horizonte, a primeira medida implementada foi a inauguração do Centro Especializado em COVID-19, uma unidade inteiramente dedicada ao atendimento de pacientes com sintomas de doenças respiratórias. No dia 17 de março, um dia após a confirmação do primeiro caso na cidade, a Prefeitura de Belo Horizonte (PBH) declarou emergência em saúde pública e criou o comitê de Enfrentamento à Epidemia da COVID-19, responsável pelo acompanhamento da curva de contaminação e pelas medidas de saúde pública no município (Decreto nº 17.298/2020). As primeiras medidas de distanciamento social foram adotadas na mesma semana, com o cancelamento das aulas na rede municipal de ensino e a suspensão de eventos públicos e privados com potencial de aglomeração.

A paralisação do comércio e outras atividades não essenciais teve início no dia 20 de março (Decreto nº 17.304/2020). Outras medidas preventivas, como o fechamento dos parques municipais e desinfecção de pontos estratégicos da cidade, foram realizadas. Para aumentar a capacidade de resposta dos sistemas de saúde, além da criação de dois centros especializados para COVID-19, determinou-se o cancelamento dos procedimentos médicos eletivos, a ampliação dos serviços de saúde *on-line* e a abertura de contratação temporária de médicos e enfermeiros. Em relação às medidas de proteção social e econômica, a prefeitura realizou a distribuição de cestas básicas às famílias de estudantes da rede pública e a comunidades tradicionais e promoveu o acolhimento emergencial da população em situação de rua e de grupos vulneráveis com suspeita ou confirmação da doença. Com o avanço no número de casos, ao final do mês de abril algumas medidas se tornaram mais rigorosas, como a restrição de mobilidade intermunicipal e o uso obrigatório de máscara em locais públicos.

Embora as medidas de enfrentamento ao novo coronavírus foram sendo adotadas de forma descentralizada, observou-se a convergência entre as decisões tomadas pela capital e pelos municípios da RMBH, que decretaram Emergência em saúde pública a partir da segunda quinzena de março e adotaram medidas de distanciamento social, variando em grau de rigidez e temporalidade. A partir da segunda quinzena de abril e início de maio, todos os municípios da RMBH passaram a exigir o uso obrigatório de máscaras. Além das medidas de prevenção, alguns municípios também adotaram ações importantes de infraestrutura e apoio social e econômico aos cidadãos.

Ao final de abril de 2020, MG começou a entrar em nova fase. O programa “Minas Consciente – retomando a economia do jeito certo”, adotado em 23 de abril, criou critérios para a reabertura progressiva no Estado, orientando prefeitos quanto à adoção de protocolos sanitários que garantam a proteção da população à exposição viral. O programa setoriza as atividades em quatro “ondas”, a partir de uma matriz de risco que considera aspectos econômicos e da rede assistencial. A adesão ao programa ficou a cargo dos prefeitos, que são responsáveis pela regulamentação das atividades econômicas locais e devem considerar a realidade de sua Macrorregião de saúde. Desde então, muitos municípios da RMBH deram início à reabertura parcial das atividades não essenciais.

A primeira etapa de flexibilização das atividades econômicas e, por conseguinte, início do afrouxamento do isolamento social, começou a ocorrer no dia 25/05/2020 por efeito do Decreto nº 17.361/2020, de 22/05/2020. No dia 08 de junho de 2020, BH deu início à segunda etapa de flexibilização do comércio. Mais duas etapas de flexibilização, previstas até a reabertura total da economia, foram condicionadas aos indicadores epidemiológicos, que puderam sugerir progressão, permanência ou regressão das fases.

5 METODOLOGIA

5.1 Área de estudo

Em relação ao sistema público de saúde, Belo Horizonte (BH) se destaca na oferta de serviços de média e alta complexidade. Relativamente a outras capitais, BH apresenta elevada cobertura da Estratégia de Saúde da Família (ESF) e possui tradição e bom desempenho na gestão do sistema de saúde (PARRA, 2019).

A área de estudo contemplada pelos projetos de monitoramento do SARS-CoV-2 nos esgotos de BH, a qual foi utilizada como base de dados para o presente estudo, compreendeu não apenas a coleta de amostras de esgoto na entrada e na saída das ETEs da área de estudo, como vem sendo reportado na maior parte dos estudos divulgados até o momento (AHMED *et al.*, 2020; MEDEMA *et al.*, 2020, 2020; WU *et al.*, 2020; WURTZER *et al.*, 2020), mas também monitorou o esgoto de forma regionalizada, em pontos representativos de diferentes estratos sociais da população e também de alguns *hotspots*, a exemplo dos hospitais de referência para tratamento da COVID-19. Essa é considerada a estratégia mais adequada para países como o Brasil, uma vez que o monitoramento do esgoto apenas nas ETEs não é suficiente para identificar a magnitude da circulação do vírus na cidade como um todo. Além disso, é muito importante acompanhar o esgoto gerado pela parte da população que vive em áreas mais vulneráveis, cujos esgotos muitas vezes não chegam às ETEs, seja em decorrência da ausência de redes coletoras ou da falta de interligação das redes coletoras às ETEs.

A área de estudo (Figura 13 e 14) engloba os sistemas de esgotamento sanitário inseridos nas bacias hidrográficas dos Ribeirões Arrudas e Onça, os quais envolvem todo o município de Belo Horizonte. Este estudo contemplou 15 pontos de amostragem, sendo 7 deles na Sub-bacia do Ribeirão Arrudas e 8 na Sub-bacia do Ribeirão Onça, conforme a Tabela 2. Tais pontos são representativos do esgoto gerado pela população e pelos hospitais de referência para o tratamento da COVID-19 de Belo Horizonte. O recorte temporal estabelecido foi entre as Semanas Epidemiológicas nº 20 de 2020 e nº 04 de 2021.

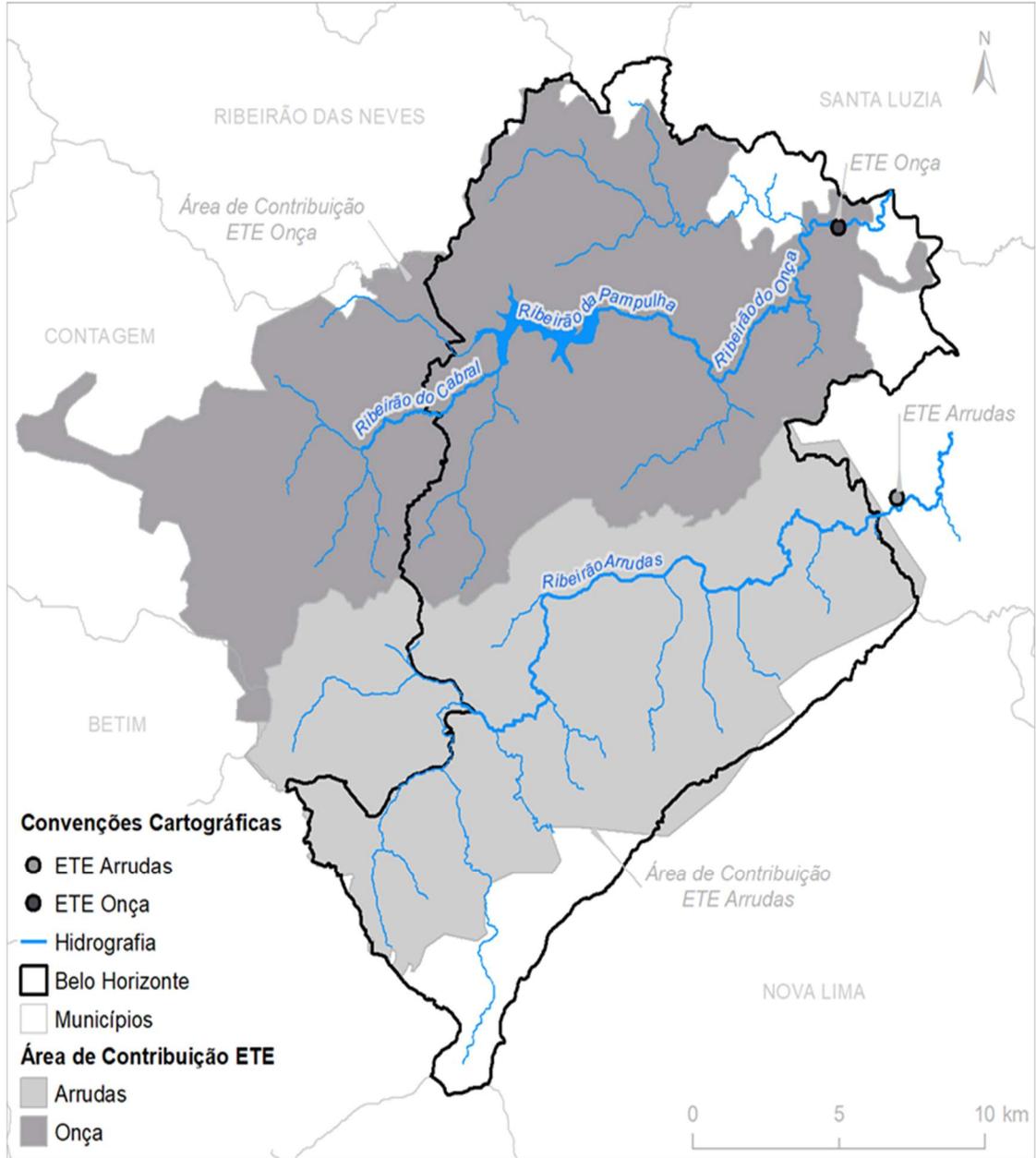


Figura 13 - Área de estudo.

Fonte: Elaborado a partir de dados da PBH (2022) e INCT ETEs Sustentáveis (2022).

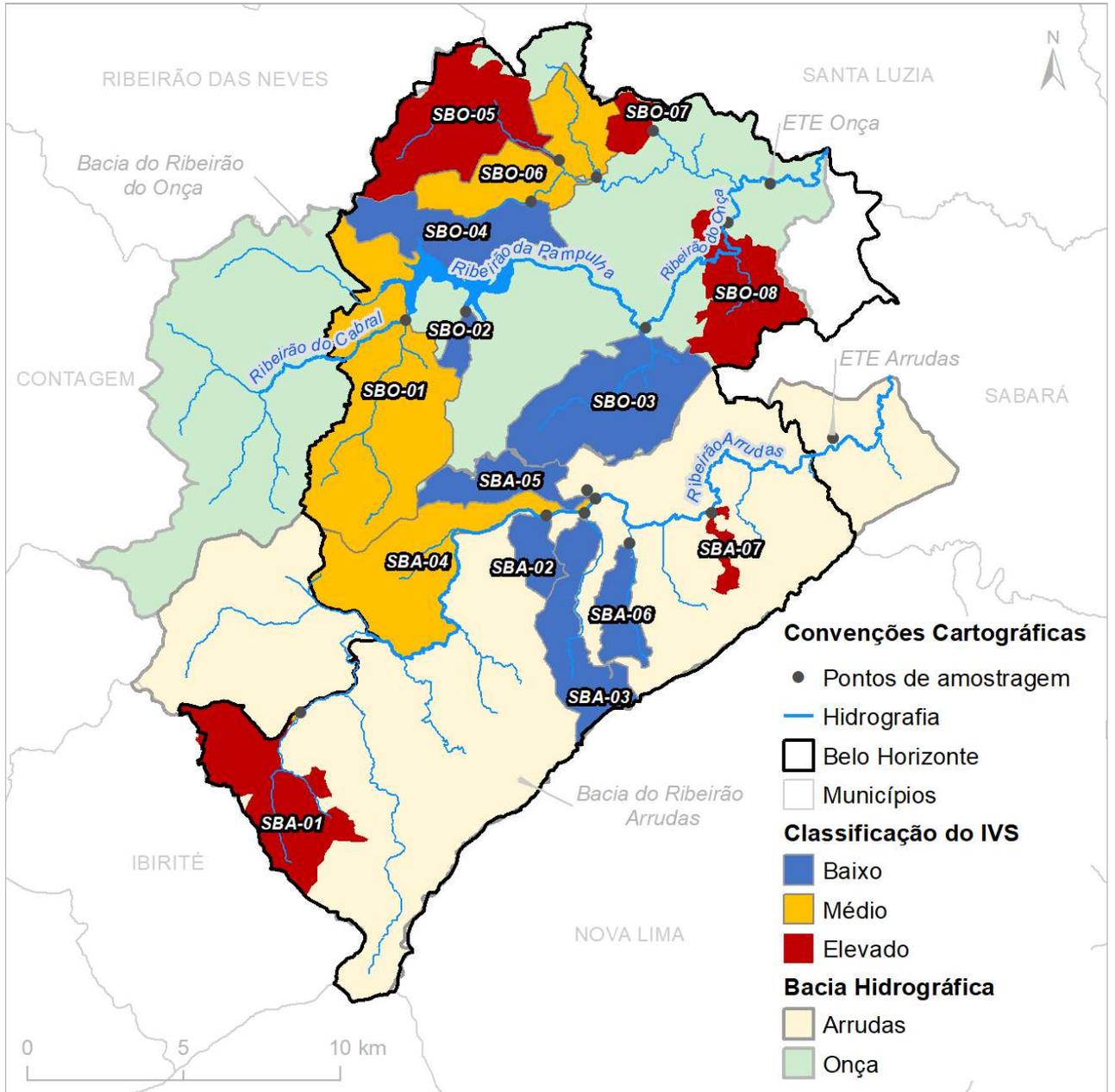


Figura 14 - Área de estudo indicando os pontos de amostragem e as sub-bacias classificadas segundo o IVS.

Fonte: Elaborado a partir de dados da PBH (2022) e INCT ETEs Sustentáveis (2022).

Tabela 2 - Identificação das sub-bacias.

SUB-BACIA	IDENTIFICAÇÃO	PRINCIPAIS BAIRROS
SBA-01	Córrego Jatobá	Lindéia, Regina, Tirol, Jatobá
SBA-02	Córrego Pintos	Grajaú, Salgado Filho, Gutierrez, Nova Suíssa, Estrela Dalva, Buritis
SBA-03	Córrego Leitão	Belvedere, São Bento, Santa Lúcia, Luxemburgo, Santo Antonio, Cidade Jardim, Lourdes, parte área central
SBA-04	Ribeirão Arrudas (Margem Esquerda)	Carlos Prates, Minas Brasil, Padre Eustáquio, Coração Eucarístico, João Pinheiro, Gameleira
SBA-05	Córrego Pastinho	Jardim Montanhês, Alto dos Caiçaras, Caiçara-Adelaide, Monsenhor Messias, Pedro II, Santo André, Carlos Prates, Bonfim
SBA-06	Córrego Acaba Mundo	Sion, Santo Antônio, Savassi, Funcionários
SBA-07	Córrego Cardoso	Vila Cafezal, Paraíso, Santa Efigênia
SBO-01	Córregos Ressaca/Sarandi	Nova Pampulha, Xangrilá, Braunas, Dom Bosco, Sarandi, Serrano, Alípio de Melo, Santa Terezinha, Paquetá
SBO-02	Córregos Mergulhão/Tijuco	Ouro Preto, Bandeirantes, Paquetá
SBO-03	Córrego Cachoeirinha	Dom Joaquim, Fernão Dias, União, São Paulo, Sagrada Família, Cidade Nova, Santa Cruz, São João Batista, Palmares, Nova Floresta, Renascença, São Cristóvão, Nova Esperança, Aparecida, Ermelinda, Nova Cachoeirinha, Cachoeirinha, Ipiranga
SBO-04	Córrego Santa Amélia	Itapoã, Jardim Atlântico, Leblon, Copacabana, Santa Amélia, Santa Branca
SBO-05	Córrego Vilarinho (montante HRN)	Nova América, Jardim dos Comerciantes, Europa, Minas Caixa, Venda Nova, Rio Branco, São João Batista, Piratininga
SBO-06	Córrego Vilarinho (jusante HRN) / Isidoro	Nova América, Jardim dos Comerciantes, Europa, Minas Caixa, Venda Nova, Rio Branco, São João Batista, Piratininga, Juliana, Vila Clóris, Hospital Risoleta Neves
SBO-07	Córrego Terra Vermelha	Zilah Spósito, Frei Leopoldo, Etelvina Carneiro, Jaqueline
SBO-08	Córrego Gorduras	São Marcos, Goiânia, Maria Goretti, Dom Silvério, Lajedo

Fonte: INCT ETEs Sustentáveis, 2020.

5.2 Coleta de dados e confecção de mapas

Este estudo é uma análise epidemiológica retrospectiva, do tipo observacional, predominantemente analítico, de dados secundários. O período do estudo foi dividido em semanas epidemiológicas, seguindo o critério do Ministério da Saúde, e para estar em sintonia com as bases de dados utilizadas. Foi realizado um levantamento de dados secundários provenientes do IBGE, da Secretaria Municipal de Saúde de Belo Horizonte, da Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA e do Projeto-piloto: “Detecção e quantificação do novo coronavírus em amostras de esgoto nas cidades de Belo Horizonte e Contagem”. A matriz bruta de dados obtida foi trabalhada no *software* Microsoft Office Excel 2019, de forma a ser compilada para ser utilizada nos *softwares* Arc GIS 10.5 e R i386 4.0.2. A análise incluiu também o processamento de dados da base georreferenciada das cartas digitais do IBGE. Dessa forma foram feitas análises da distribuição geográfica da presença do vírus SARS-CoV-2 na área de estudo e também da comparação entre esses resultados e indicadores como o Rt, IVS, IPR e IHL.

Os dados provenientes do Projeto-piloto: “Detecção e quantificação do novo coronavírus em amostras de esgoto nas cidades de Belo Horizonte e Contagem” compreendiam informações da Concentração e Carga Viral para a área em estudo durante as semanas epidemiológicas 16/2020 (4/04/2021) e 12/2021 (24/03/2021). Os dados foram apresentados nas variáveis N1 (nº cópias/mL) e Carga Viral N1 (nº cópias/d). Os dados referentes a Carga Viral N1 que foram utilizados nas análises deste trabalho são apresentados nas Tabelas 3 e 4. Em função da grande quantidade de dados faltantes no começo e no final do período de amostragem do projeto, optou-se por fazer um recorte temporal entre a semana epidemiológica 20/2021 até a semana 04/2021, excluindo as semanas 52 e 53 de 2020, uma vez que nessas semanas apenas foram analisadas apenas as cargas virais das ETES Onça e Arrudas, e não houve análises das SB nessas semanas. Cabe ressaltar ainda que os dados necessários para a realização do estudo foram obtidos exclusivamente de fontes secundárias contendo dados oficiais que são de domínio público, não contendo qualquer identificação de pacientes. Assim, todos os números garantem a confidencialidade dos mesmos e o sigilo necessário para a realização do estudo.

Tabela 3 – Dados das cargas virais (cópias de SARS-CoV-2. 10⁻⁹ /d) móveis para cada duas semanas epidemiológicas e Rt, entre as SE 21/2020 e 38/2020.

	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
SBA-01	0.0	7.1	8.6	12.1	119.4	170.0	286.5	407.7	343.9	0.0	0.0	422.0	274.8	221.9	188.7	80.7	119.3	183.7
SBA-02	0.0	0.0	1.7	1.5	12.1	38.2	106.1	94.6	54.0	107.1	158.9	172.0	187.2	133.9	93.8	66.1	31.2	0.0
SBA-03	0.0	3.9	7.2	6.7	22.6	78.9	198.8	210.0	277.8	332.7	228.9	209.2	139.6	203.1	0.0	0.0	65.2	39.8
SBA-04	0.0	0.0	8.7	15.3	80.4	112.4	108.0	131.3	223.7	250.8	148.0	137.7	333.0	310.4	125.3	82.4	63.6	111.4
SBA-05	0.0	0.0	0.0	0.0	105.3	140.5	88.3	104.6	61.9	30.3	93.9	95.5	69.1	62.2	229.8	254.0	42.8	642.1
SBA-06	0.0	0.0	0.0	1.3	25.7	102.9	101.4	88.6	91.4	101.8	123.7	59.8	33.8	78.2	61.7	158.2	238.7	103.7
SBA-07	0.0	0.0	1.2	0.8	48.2	103.0	66.8	86.8	135.2	73.4	29.7	56.7	51.9	27.8	53.5	51.9	72.7	63.0
ETE-ARRUDAS	40.4	109.9	123.3	157.6	1042.4	2296.0	3466.3	3712.3	4324.6	9575.8	8829.3	3256.5	2003.0	1029.6	1752.0	1513.4	926.0	1295.3
SBO-01	1.3	7.4	99.1	116.6	172.0	359.3	268.1	133.6	139.5	210.4	261.8	164.0	94.4	86.5	88.6	113.2	74.9	20.7
SBO-02	0.0	0.0	0.3	0.3	1.0	3.7	4.5	9.0	15.7	9.7	6.7	12.6	8.9	15.9	25.3	16.8	11.3	10.4
SBO-03	0.0	0.0	12.6	22.0	274.5	350.6	306.6	398.5	582.9	532.4	333.2	0.0	0.0	0.0	347.6	237.0	52.4	68.2
SBO-04	0.0	1.4	3.0	7.7	26.2	65.2	110.5	152.1	154.4	194.6	318.6	276.9	110.1	82.0	84.5	198.8	185.2	14.4
SBO-05	5.0	4.7	11.7	23.1	161.2	421.3	436.4	384.3	0.0	0.0	455.2	378.1	137.5	228.1	335.4	242.4	269.4	241.0
SBO-06	5.9	9.5	42.4	72.8	219.6	584.4	1189.5	1045.3	1580.6	1791.5	912.1	996.9	905.0	870.8	884.4	501.3	578.3	478.4
SBO-07	0.0	0.0	2.3	3.6	4.7	18.9	29.2	40.0	53.1	92.6	83.2	23.0	32.3	29.0	15.3	19.5	31.1	25.2
SBO-08	3.1	4.4	23.9	57.2	126.5	308.5	221.2	102.7	278.4	279.7	352.1	340.9	140.7	136.2	118.2	58.5	99.9	126.1
ETE-ONÇA	18.5	37.6	166.5	361.3	1636.4	2224.8	3683.3	4747.5	4265.1	4126.5	4673.5	3631.7	1713.3	1801.7	2021.4	1827.6	1098.3	645.0
ETE-ARRUDAS	40.4	109.9	123.3	157.6	1042.4	2296.0	3466.3	3712.3	4324.6	9575.8	8829.3	3256.5	2003.0	1029.6	1752.0	1513.4	926.0	1295.3
Rt	1.046	1.073	1.095	1.154	1.173	1.117	1.127	1.126	1.069	1.017	0.998	0.957	0.884	0.924	0.976	0.969	0.974	0.941

Fonte: INCT ETEs Sustentáveis (2021) e Secretaria Municipal de Saúde (2021).

Tabela 4 - Dados das cargas virais (cópias de SARS-CoV-2. 10⁻⁹ /d) móveis para cada duas semanas epidemiológicas e Rt, entre as SE 39/2020 e 04/2021.

	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	1	2	3	4
SBA-01	115.4	86.6	65.6	57.1	107.9	254.2	179.3	6.7	358.9	675.8	507.0	473.2	849.9	566.3	338.6	1362.4	1050.9
SBA-02	0.0	31.2	128.9	122.2	10.0	52.1	120.3	131.0	312.1	709.5	841.7	550.4	503.4	1263.6	1000.2	461.5	468.2
SBA-03	14.3	52.2	85.6	98.8	189.6	307.7	0.0	0.0	603.2	735.3	752.9	1282.2	961.9	864.5	2543.6	2198.3	1472.3
SBA-04	128.6	138.4	98.4	60.2	248.9	307.4	0.0	0.0	223.5	656.5	1103.2	908.8	817.4	781.4	543.5	624.7	549.4
SBA-05	660.0	29.2	42.2	33.4	23.7	29.3	95.4	117.0	71.0	42.8	86.4	584.8	834.2	632.6	457.3	160.3	74.3
SBA-06	29.5	43.7	90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	282.9	840.7	1467.1	1551.4	893.5	342.5	304.4	844.1	783.9
SBA-07	10.4	11.2	13.6	0.0	0.0	9.1	3.5	3.3	12.4	114.2	285.5	0.0	0.0	465.4	452.6	66.9	57.0
ETE-ARRUDAS	1643.6	3047.5	2262.9	949.9	1477.5	3064.2	4929.0	6943.0	7768.8	12524.3	14618.8	11317.5	14348.3	15539.3	14006.9	10736.1	7147.3
SBO-01	43.6	94.8	78.1	82.5	196.4	242.5	215.1	171.1	314.8	958.4	1219.2	988.7	1134.4	824.9	471.4	515.8	561.6
SBO-02	10.8	8.0	20.0	44.6	61.1	39.4	11.0	14.3	14.2	47.5	54.1	19.1	83.2	307.9	293.0	371.4	320.5
SBO-03	114.6	1160.6	1135.9	299.5	482.2	322.1	323.1	465.9	304.2	951.5	932.4	1198.2	1592.1	959.1	1290.5	1181.8	486.9
SBO-04	22.9	50.0	40.9	33.1	77.7	113.0	124.6	110.2	375.5	453.5	0.0	0.0	919.7	219.6	929.0	1329.4	563.4
SBO-05	620.3	707.5	205.5	206.1	245.4	301.8	275.5	461.1	1299.6	1037.0	2116.9	2469.9	1256.8	1142.7	522.1	553.2	0.0
SBO-06	617.7	843.6	325.4	415.4	509.1	641.0	693.0	440.5	1116.2	1009.9	144.2	384.0	372.1	1661.5	3045.5	1396.6	2514.6
SBO-07	22.3	32.5	14.8	10.4	9.7	18.5	18.6	12.4	36.6	30.6	6.4	22.1	22.1	23.5	81.8	65.4	16.4
SBO-08	132.5	148.6	133.5	127.7	230.6	227.9	102.1	151.7	492.1	623.1	442.9	498.5	539.4	1509.3	1389.4	726.7	676.9
ETE-ONÇA	1209.3	3009.2	2638.0	938.9	4107.1	7258.3	5520.0	2983.9	3246.3	4249.4	6427.7	10909.3	12814.6	11367.5	13069.8	11347.2	7337.0
ETE-ARRUDAS	1643.6	3047.5	2262.9	949.9	1477.5	3064.2	4929.0	6943.0	7768.8	12524.3	14618.8	11317.5	14348.3	15539.3	14006.9	10736.1	7147.3
Rt	0.970	0.970	0.976	1.025	0.966	0.902	0.947	1.009	1.059	1.096	1.053	1.052	1.064	1.009	1.062	1.047	0.997

Fonte: INCT ETEs Sustentáveis (2021) e Secretaria Municipal de Saúde (2021).

O Rt disponibilizado pela PBH compreendeu dados diários para todo o período amostrado. No entanto, foi utilizada a média móvel do Rt para cada sete dias das semanas epidemiológicas, de forma a suavizar eventuais interferências ocasionadas pela flutuação dos dados.

As bases cartográficas referentes à divisão geopolítica do município de Belo Horizonte, contendo suas divisas e as principais hidrografias, foram adquiridas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Outros dados georreferenciados foram obtidos a partir de bases de dados disponibilizadas pela equipe do Projeto-piloto: “Detecção e quantificação do novo coronavírus em amostras de esgoto nas cidades de Belo Horizonte e Contagem” e pela PBH. Os formatos consistem em arquivos tipo matriz (*raster*) e vetor (*shapefile*), compatíveis com o *software* de manipulação empregado no estudo, o ArcGIS 10.4.1. Esses arquivos compreendiam as áreas de cada uma das sub-bacias estudadas, bem como os pontos de coleta das amostras de esgoto de cada uma das sub-bacias nas Bacias Sanitárias do Onça e Arrudas.

A PBH disponibilizou os *shapefiles* dos setores censitários de todo o município de Belo Horizonte classificados quanto ao IVS e que também continham informações da população de cada setor censitário para o ano de 2010, ano do último censo demográfico realizado. Para contornar a defasagem temporal da população de cada setor censitário, foi realizada uma estimativa da população utilizando dados sobre o número de instalações ligadas à rede de esgoto. Tais informações foram fornecidas pela Copasa. Como cada ligação corresponde a uma economia, esses valores foram multiplicados pela quantidade de moradores por domicílio. Dessa forma, foi estimada a população de cada setor censitário para 2022, conforme a equação 1.

$$P_{2022} = D \times MLR \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: P_{2022} = População estimada para 2022

D = Número de domicílios para cada setor censitário

MLR = Média de moradores por domicílio (ligação a rede de esgotamento sanitário), que segundo o Censo IBGE 2010 é de 3,11 hab/domicílio.

A população estimada para cada uma das sub-bacias é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5- População residente nas sub-bacias do Arrudas, estimada para 2022 – Belo Horizonte, Minas Gerais

SUB- BACIA	POPULAÇÃO ESTIMADA 2022	SUB- BACIA	POPULAÇÃO ESTIMADA 2022
SBA-01	149062	SBO-01	274690
SBA-02	47166	SBO-02	14775
SBA-03	91589	SBO-03	215482
SBA-04	190266	SBO-04	88610
SBA-05	64460	SBO-05	164148
SBA-06	76558	SBO-06	144583
SBA-07	18656	SBO-07	20317
		SBO-08	120495

Fonte: Copasa (2022); DESA/UFMG (2022); IBGE (2022)

Realizou-se um pré-tratamento dos dados, cuja primeira etapa consistiu na transformação dos referenciais geodésicos e sistemas de projeção, conforme parâmetros oficiais adotados no Brasil (UFRGS, 2005). Assim, todas as bases foram padronizadas para o Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul (SIRGAS 2000), projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), fuso 23, zona K. Em seguida, todas as bases de dados foram delimitadas para área de estudo. Em alguns casos, mais de uma base compuseram determinado aspecto, o que exigiu ferramentas de união e exclusão de feições repetidas. Ao final, para cada aspecto foram selecionadas as bases necessárias ao mapeamento.

Para a representação da distribuição espaço-temporal da COVID-19 foi utilizado o centroide de cada sub-bacia como amostra para interpolação. Este centroide continha um atributo com a população para cada setor censitário contido naquela sub-bacia. Para a realização da análise de difusão foi necessário primeiramente que a base cartográfica de unidade espacial, no caso os setores censitários, seja transformada do formato poligonal para o pontual, através dos centroides. Desta maneira, para a realização deste processo utilizou-se, no *software* Arc GIS, a ferramenta de *Feature > Feature to point*, onde foram extraídos esses centroides. Em seguida, realizou-se a interpolação dos dados utilizando-se o método geostatístico do Inverso da Distância Ponderada (Inverse Distance Weighting - IDW), que estima medidas desconhecidas de um campo contínuo para locais onde não há medidas disponíveis (LONGLEY, *et al.* 2013).

Para a análise da difusão espacial e temporal utilizaram-se as cargas virais ponderadas pela

população estimada para 2022, através de dados fornecidos pela Copasa com o número de interligações ligadas à sua rede para cada setor censitário e do número médio de moradores por domicílio. Como citado

anteriormente, esse dado foi interpolado por meio da técnica Inverso da Distância Ponderada (do inglês, *Inverse Distance Weighed*). A técnica cria uma superfície em formato matricial (*raster*) em que cada pixel incorpora o valor ponderado dos pontos (no caso as semanas) dos vizinhos em relação direta ao inverso da distância. Consideram-se, assim, os valores estimados para cada ponto em função da distribuição de um peso inversamente proporcional à distância dos pontos amostrais e os pontos a serem estimados, de forma com que os valores mais próximos dos pontos têm maior influência do que os valores mais afastados. Criou-se, assim, uma superfície em que os efeitos de difusão espacial são ressaltados continuamente com a variação das semanas, possibilitando visualizar o fenômeno temporal e espacialmente.

Para auxiliar também no entendimento da circulação do vírus em Belo Horizonte foi feita a identificação do centro geográfico da pandemia na área em estudo para cada semana epidemiológica no período em análise. A identificação desse centro geográfico foi realizada utilizando a distribuição da carga viral na área de estudo, definida usando a ferramenta *ArcToolbox > Spatial Statistics Tools > Measuring Geographic Distributions > Mean Center*, no ArcGIS. O centro geográfico foi calculado tomando o centroide de cada sub-bacia como um conjunto de pontos de entrada que, em combinação, foram usados para encontrar o centroide normalizado pela população de cada sub-bacia. Em seguida, as localizações dos centroides das sub-bacias foram ponderadas com a carga viral, produzindo um centroide geográfico para cada semana epidemiológica com base na carga viral obtida através do monitoramento da concentração viral do SARs-CoV-2. O caminho percorrido pela carga viral foi mapeado para mostrar o deslocamento do centroide epidêmico em Belo Horizonte com base no monitoramento do esgoto.

5.3 Índice de Vulnerabilidade em Saúde

O Índice de Vulnerabilidade em Saúde foi formulado pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH, 2018). O índice é uma combinação de variáveis socioeconômicas em um indicador síntese, utilizado pela Secretaria Municipal de Saúde/PBH para apontar áreas prioritárias para intervenção e alocação de recursos. Dessa forma, o IVS incorpora indicadores socioeconômicos (moradores por domicílio, analfabetismo, renda, cor da pele e etnia) e indicadores de saneamento (acesso à água adequada, saneamento básico e municipal, coleta e

destinação de resíduos sólidos).

O IVS tem representado um instrumento importante para planejamento e avaliação das políticas de saúde na SMSA, que permite maior justiça social, quando conjugado a outras estratégias. Os resultados obtidos mostraram associação importante com indicadores classicamente relacionados às condições socioeconômicas, demonstrando a sua capacidade de discriminar as desigualdades do adoecer e morrer no território. Sendo um indicador simples e de fácil compreensão, o IVS é uma ferramenta importante no redesenho de uma rede de atenção à saúde e promoção social, em diversas escalas geográficas. Em Belo Horizonte, ele tem servido como uma das muitas formas de compreensão das realidades locais (PBH, 2018).

O IVS é dividido em quatro classes (extremamente vulnerável, muito vulnerável, vulnerável e não vulnerável). Para cada setor censitário temos um IVS. Dessa forma, para a região monitorada foi apresentado o percentual da população em cada uma dessas classes. Cada região foi agrupada nas seguintes faixas, denominada Índice de Vulnerabilidade em Saúde Reclassificado (IVS rec):

- IVS rec - Baixo: Se $0\% < \text{IVS (Extremamente Vulnerável + Vulnervável)} < 20\%$;
- IVS rec - Médio: Se $20\% < \text{IVS (Extremamente Vulnerável + Vulnervável)} < 40\%$;
- IVS rec – Elevado: Se $\text{IVS (Extremamente Vulnerável + Vulnervável)} > 40\%$;

A classe final de cada região amostrada (apresentada neste estudo) corresponde à classe dominante em termos de população em cada sub-bacia. Todos os dados usados nos cálculos do IVS foram derivados do último Censo Brasileiro (2010) e disponibilizados pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH, 2018).

5.4 Índice de Prevalência Relativa

As concentrações de SARS-CoV-2 em esgoto determinadas em laboratório, através do Projeto-piloto: “Detecção e quantificação do novo coronavírus em amostras de esgoto nas cidades de Belo Horizonte e Contagem”, são expressas como o número de cópias do genoma viral por litro de esgoto. Isso pode ser determinado com base na população de indivíduos infectados que excretam partículas virais e na população atendida pela rede de esgoto. Nesse contexto, MOTA *et al.* (2020) sugerem o uso do Índice de Prevalência Relativa (IPR) de cada região monitorada, que é calculado em função da Equação 2.

$$IPR = \frac{C_i}{CSTP} \quad (\text{Equação 2})$$

Dessa forma, C_i é a concentração do genoma viral determinada em cada região monitorada (cópias de RNA.L⁻¹) e CSTP é a concentração do genoma viral determinada para todo o esgoto (entrada das ETEs; cópias de RNA.L⁻¹). Sendo assim, regiões com IPR superior a 1 tem prevalência de COVID-19 maior do que a prevalência média no esgoto do restante da bacia e podem ser consideradas *hotspots*.

Para a comparação do IPR dividido por bacia por mês de 2020 até 2021 foi utilizado o método Boxplot, ou seja, baseado nas referências de valores mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil, mediana e outliers da base de dados para demonstrar a variabilidade dos meses em relação ao IPR encontrados na bacia hidrográfica. No boxplot a parte central do gráfico contém os valores que estão entre o primeiro quartil e o terceiro quartil. As hastes inferiores e superiores se estendem, respectivamente, do primeiro quartil até o menor valor, limite inferior, e do terceiro quartil até o maior valor.

Trazendo esse índice para o estudo em questão, pode-se acompanhar e entender melhor a circulação do vírus na área de estudo, assim como identificar os pontos críticos e verificar se, e como, a pandemia afetou desigualmente as diversas regiões do município de Belo Horizonte.

4.5. Análises estatísticas

Com o objetivo de se obter uma melhor compreensão e visualização dos resultados, foram realizados a partir dos conjuntos de estudos, a análise descritiva e a aplicação de *boxplot*, a fim de mensurar e comparar os meses entre si. A análise descritiva foi realizada sobre as características de cada mês em sua respectiva bacia hidrográfica e teve como principal objetivo sumarizar e explorar o comportamento do Índice de Prevalência Relativa (IPR), além da evolução da carga viral na área em estudo. A análise descritiva foi elaborada através de tabelas de frequências, tabelas de proporção e medidas de resumo numérico. Para comparação da situação de cada bacia, foi executado o *boxplot* com o objetivo de visualizar a distribuição e valores discrepantes (*outliers*) dos dados, fornecendo assim um meio complementar para desenvolver uma perspectiva sobre o caráter dos dados. Por fim, todas essas análises foram feitas por meio do software estatístico *R* em conjunto à plataforma principal de dados Excel.

Para medir quantitativamente a intensidade da propagação da concentração viral no esgoto do

SARS-CoV-2 em relação à população utilizou-se o índice de Hoover locacional (IHL). Valores de IHL próximos a 100 indicam concentração em poucas áreas, enquanto aqueles perto de zero sugerem uma distribuição mais homogênea. Se as medidas de contenção foram eficazes, então espera-se uma lenta e progressiva diminuição do IHL, permanecendo relativamente alto ao longo do tempo.

O índice é calculado como:

$$IHL = 50 \sum \left| \frac{Psb}{\Sigma Psb} - \frac{Qsbt}{\Sigma Qsbt} \right|$$

(Equação 3)

Onde Psb é a população na sub-bacia sb , que é a mesma para todo o período, e $Qsbt$ é a carga viral de SARS-CoV-2 na sub-bacia sb , na semana epidemiológica t (ROGERSON, 2012).

Foi realizada ainda a comparação entre os dados obtidos a partir do esgoto e informações do sistema de saúde, como a taxa de transmissão da doença (R_t) e a taxa de ocupação dos leitos de UTI e enfermaria para a COVID-19, tal análise pode auxiliar a confirmação da EBE fornecer informações preditivas do estresse do sistema público de saúde.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram distribuídos em três tópicos, separados de forma a facilitar a organização dos mesmos, embora tenha havido um intercâmbio de informações entre eles para subsidiar as discussões. O primeiro foi dedicado ao mapeamento do comportamento da carga viral de SARS-CoV-2 na área de estudo, entre as SE 20/2020 e SE 04/2021, através de dados do monitoramento do novo coronavírus em amostras de regiões pré-definidas do sistema de esgotamento sanitário de Belo Horizonte. O segundo correspondeu à identificação do padrão de disseminação espaço-temporal da concentração viral de SARS-CoV-2 nas diferentes sub-bacias, através da utilização da ferramenta IHL. No terceiro foi abordado se a concentração viral consegue prever um estresse no sistema público de saúde (dados de internação em leitos de UTI/enfermaria).

6.1 Mapeamento e evolução da carga viral

O presente tópico foi subdividido em outros quatro: 1) do índice de vulnerabilidade em saúde; 2) da carga viral por semana epidemiológica; 3) da evolução do centro geográfico com base na carga viral; 4) do índice de prevalência relativa. Cumprir destacar que no primeiro houve uma

etapa preliminar de classificação das sub-bacias com base no índice de vulnerabilidade em saúde, uma vez que os resultados de tal etapa subsidiaram a análise dos resultados obtidos da carga viral e do IPR propriamente dito.

6.1.1 Índice de Vulnerabilidade em Saúde

Conforme citado na seção 4.3, a categoria “IVS elevado” é a soma do SC com IVS muito ou extremamente vulnerável. As Figuras 15 e 16 apresentam a porcentagem de cada categoria por sub-bacia, para as bacias sanitárias Arrudas e Onça. A classificação das sub-bacias se faz relevante, pois a partir desse enquadramento podem-se fazer algumas inferências quando da discussão dos resultados referentes ao comportamento da dinâmica da pandemia em Belo Horizonte, tendo como base as análises obtidas através do estudo da concentração viral do SARS-CoV-2 no esgoto das bacias sanitárias do município.

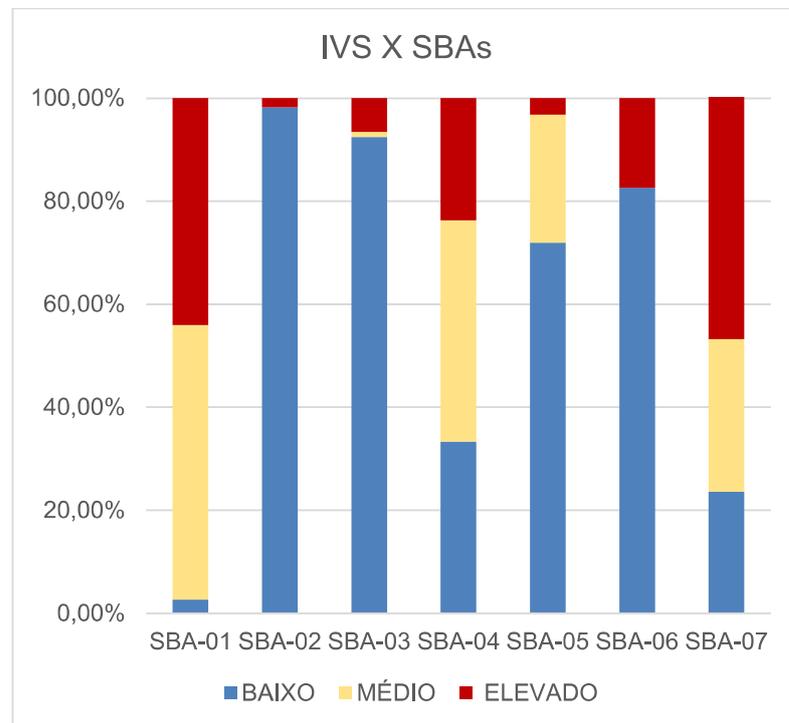


Figura 15 - IVS para as sub-bacias localizadas na bacia sanitária Arrudas classificadas em função de suas populações.

Fonte: Elaborado a partir de dados do IBGE (2022); Secretaria Municipal de Saúde (2022).

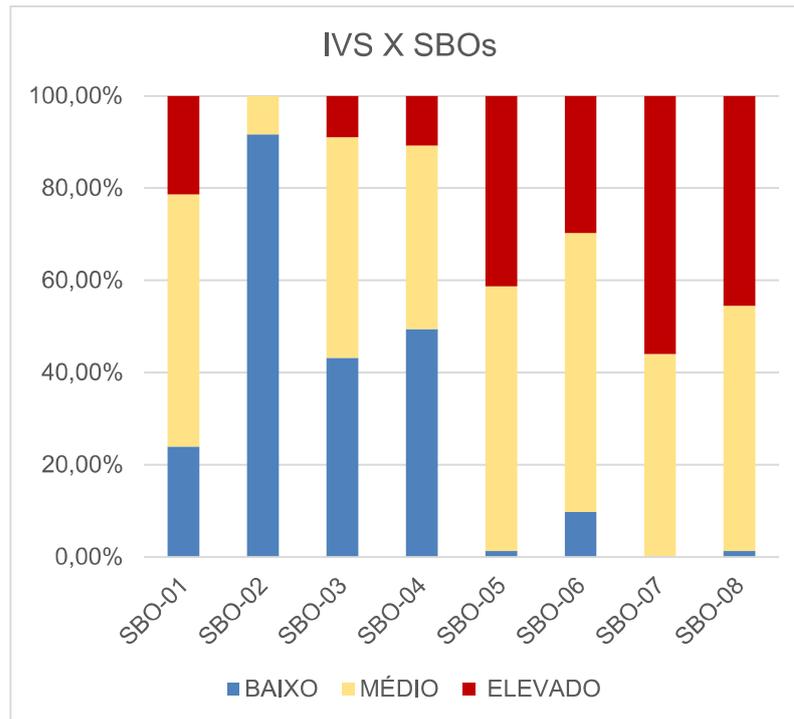


Figura 16 - IVS para as sub-bacias localizadas na bacia sanitária Onça classificadas em função de suas populações.

Fonte: Elaborado a partir de dados do IBGE (2022); Secretaria Municipal de Saúde (2022).

Cada sub-bacia foi reclassificada conforme o seguinte critério:

- % IVS Elevado > 40%: Muito Vulnerável;
- 20% < % IVS Elevado < 40%: Vulnerável;
- % IVS Elevado < 20%: Pouco vulnerável.

Dessa forma, o enquadramento das sub-bacias segundo o IVS é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Reclassificação de cada sub-bacia segundo IVS.

Sub-bacia	% IVS Elevado	Reclassificação
SBA-01	44,0%	Muito vulnerável
SBA-02	1,8%	Pouco vulnerável
SBA-03	6,6%	Pouco vulnerável
SBA-04	23,7%	Vulnerável
SBA-05	3,2%	Pouco vulnerável
SBA-06	17,4%	Pouco vulnerável
SBA-07	52,6%	Muito vulnerável
SBO-01	21,3%	Vulnerável
SBO-02	0,0%	Pouco vulnerável
SBO-03	8,9%	Pouco vulnerável
SBO-04	10,8%	Pouco vulnerável
SBO-05	41,3%	Muito vulnerável
SBO-06	29,7%	Vulnerável

SBO-07	55,9%	Muito vulnerável
SBO-08	45,5%	Muito vulnerável

Fonte: Elaborado a partir de dados do IBGE (2022); Secretaria Municipal de Saúde (2022).

A classificação das sub-bacias quanto ao IVS é importante no embasamento das discussões das análises de como a carga viral se deu de formas distintas nas regiões, principalmente, quando se refere à regiões classificadas com diferentes IVS. A partir da reclassificação das sub-bacias quanto ao IVS pode-se estudar se a pandemia afetou mais fortemente regiões com maior índice de vulnerabilidade. Tendo como base a reclassificação realizada, na bacia sanitária do Arrudas a SBA-01 e SBA-07 são pontos de atenção, devido ao seu alto percentual de IVS. Já na bacia sanitária do Onça, a SBO-05, SBO-07, SBO-08 apresentaram maiores IVS.

6.1.2 Carga viral por semana epidemiológica

Na Figura 17 é apresentada a carga viral média móvel de cada duas semanas, normalizada pela população estimada para 2022 para cada uma das sub-bacias para o período em estudo. A tabela indica que a evolução da carga viral se deu diferentemente em cada uma das sub-bacias, e que o pico se deu em diferentes momentos para cada uma das sub-bacias, apesar dos picos se concentrarem logo no começo de 2021, período pós-festas de final de ano.

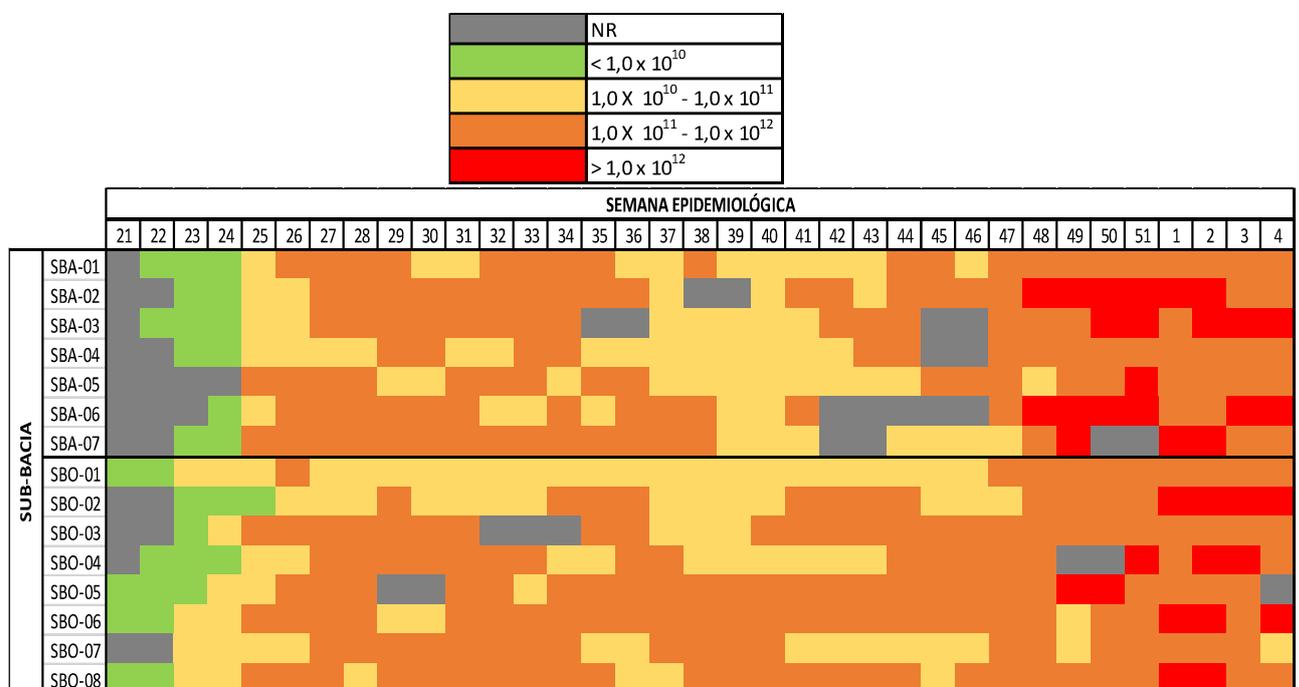


Figura 17 – Carga viral (nº de cópias/d. 100 mil habitantes) por SE.

Fonte: Elaborado a partir de dados do INCT ETEs Sustentáveis (2021), IBGE (2022) e Copasa (2022).

De acordo com esses resultados obtidos é possível observar que não existe um padrão definido para a disseminação da pandemia na área em estudo quando se utiliza apenas a carga viral. Foi realizada ainda a transformação das cargas virais obtidas a partir do monitoramento do esgoto em uma superfície contínua para toda a área de estudo, conforme a Figura 18.

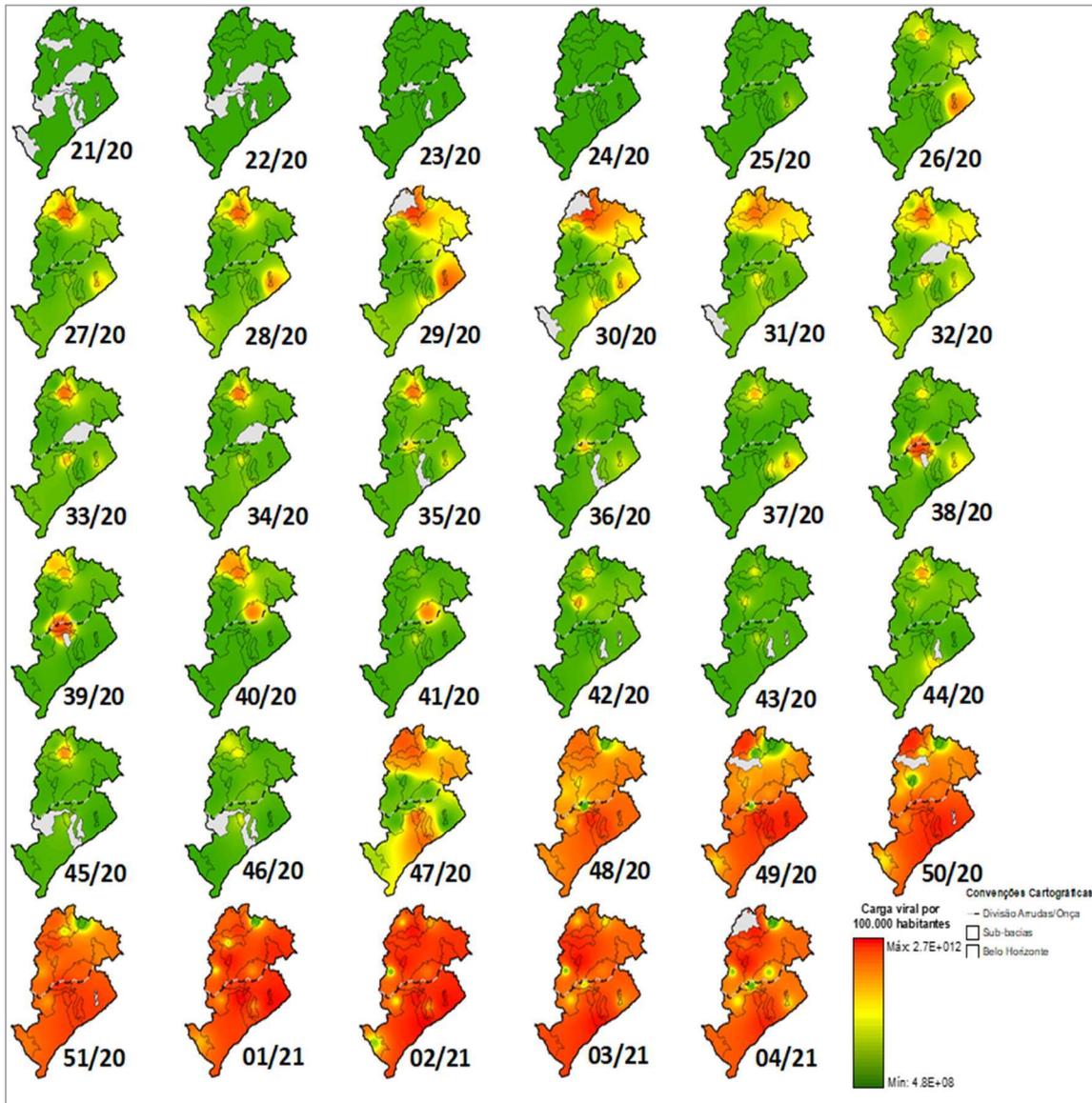


Figura 18 - Superfície contínua da carga viral entre 2020 e 2021. Obs.: SE sem análises estão na cor cinza.

Fonte: Elaborado a partir de dados do INCT ETEs Sustentáveis (2021), IBGE (2022) e Copasa (2022).

A partir deste mapeamento da concentração viral a partir dessa superfície contínua, gerada por meio das cargas virais ponderadas pela população estimada para 2022, é possível verificar que os primeiros pontos mais atingidos em Belo Horizonte pela COVID-19 foi a região norte da

cidade, principalmente entre as SE 27/2020 e SE 35/2020. A região central foi mais atingida entre as SE 38/2020 e SE 41/2020. Houve ainda um espalhamento, quase que geral, do SARS-CoV-2, tendo como base o monitoramento do esgoto, a partir da SE 48/2020 até a SE 04/2021, conforme apresentado acima. Os dados da Figura 17 mostram que de fato a pandemia se inicia em regiões mais vulneráveis. Este padrão da circulação do vírus no município pode ter sido, principalmente, devido a alguns fatores como o fato das medidas não farmacológicas de distanciamento social e de restrições de atividades não essenciais afetar diferentemente as regiões de BH, devido às singularidades de cada região.

6.1.3 Evolução do centro geográfico com base na carga viral

Para entender melhor e comparar como a COVID-19 se espalhou em Belo Horizonte, foi calculado o centro geográfico (CG) da epidemia com base nas cargas virais encontradas no esgoto de Belo Horizonte. Trajetórias do CG por semana epidemiológica mostram que nas primeiras semanas do estudo foram encontradas maiores cargas virais na região norte, na Bacia Sanitária do Córrego Onça, deslocando-se progressivamente em direção ao sul. No entanto, é importante observar que o CG esteve na maior parte do período de estudo alocado na Bacia Sanitária do Córrego Onça. Mesmo com a sua evolução no sentido sul da região, encerra-se na região central de Belo Horizonte, conforme apresentado na Figura 19.

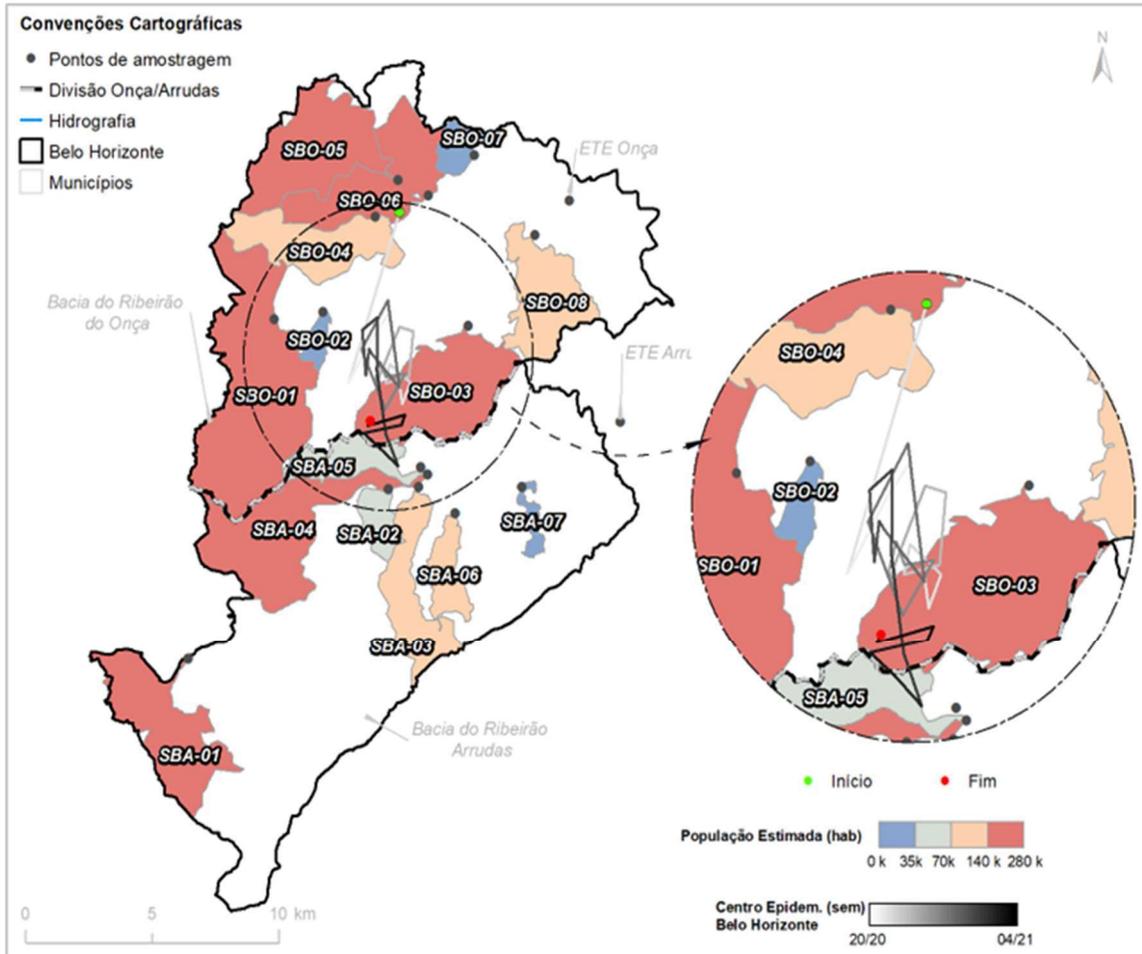


Figura 19 - Evolução do centro geográfico da pandemia em Belo Horizonte, tendo como base o monitoramento do esgoto.

Quando analisado o centro geográfico para cada uma das Bacias Sanitárias do Onça e Arrudas, a dinâmica da evolução foi diferente para cada uma das regiões (Figura 20). Na bacia sanitária do Onça, o centro geográfico se encontrava na SBO-06 (interceptor Córrego Vilarinho (jusante Hospital Risoleta Neves/ Isidoro)) nas primeiras semanas em estudo, que tem como principais bairros Nova América, Jardim dos Comerciários, Europa, Minas Caixa, Venda Nova, Rio Branco, São João Batista, Piratininga, Juliana, Vila Clóris e Hospital Risoleta Neves. Em seguida, desloca-se levemente em direção ao sudoeste e termina próximo à SBO-04 (Interceptor Córrego Santa Amélia), que tem como principais bairros Itapoã, Jardim Atlântico, Leblon, Copacabana, Santa Amélia, Santa Branca. O centro geográfico estar localizado em uma região não significa que aquela região é mais afetada naquele momento, mas sim que, tendo como base o restante daquela bacia, a concentração viral tinha uma maior tendência próximo àquele ponto.

Na Bacia Sanitária do Córrego Arrudas, o centro geográfico se encontrava na região sudoeste de Belo Horizonte no começo do período em estudo, próximo a SBA-01 (Interceptor Córrego

Jatobá), que tem como principais bairros Lindéia, Regina, Tirol, Jatobá. Durante as semanas monitoradas, o centro geográfico se desloca em sentido nordeste e vai até a SBA-03 (Interceptor Córrego Leitão), que tem como principais bairros Belvedere, São Bento, Santa Lúcia, Luxemburgo, Santo Antônio, Cidade Jardim e Lourdes.

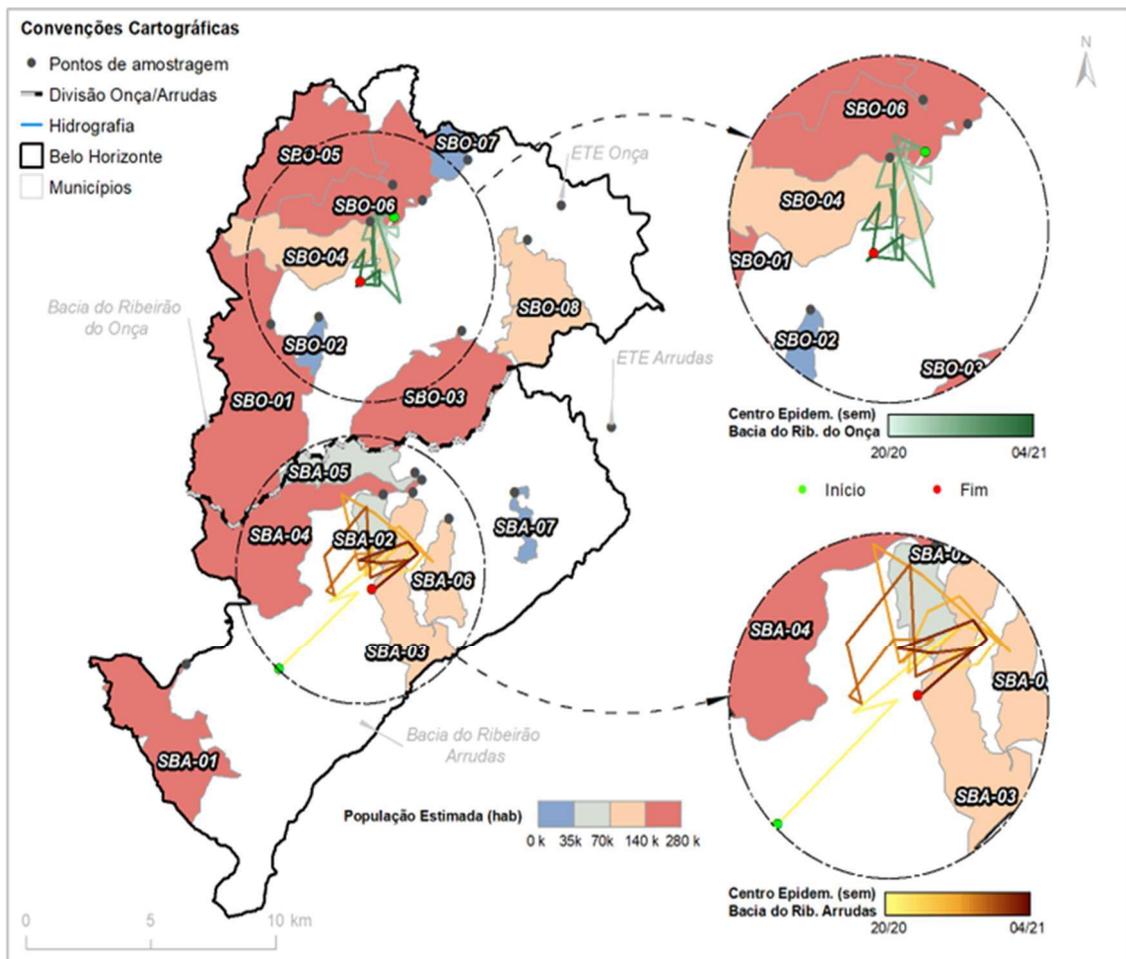


Figura 20 - Evolução do centro geográfico da pandemia nas bacias sanitárias Onça e Arrudas, tendo como base o monitoramento do esgoto.

6.1.4 Índice de Prevalência Relativa

No *boxplot* referente à bacia do Arrudas é possível observar que as sub-bacias com IVS elevado e médio tiveram maiores valores de IPR durante o período em análise. Esse resultado indica que regiões mais vulneráveis tiveram maior tendência de ser um *hotspot* para a COVID-19, ou seja, foram afetadas por mais momentos durante o recorte temporal amostrado, conforme a Figura 21.

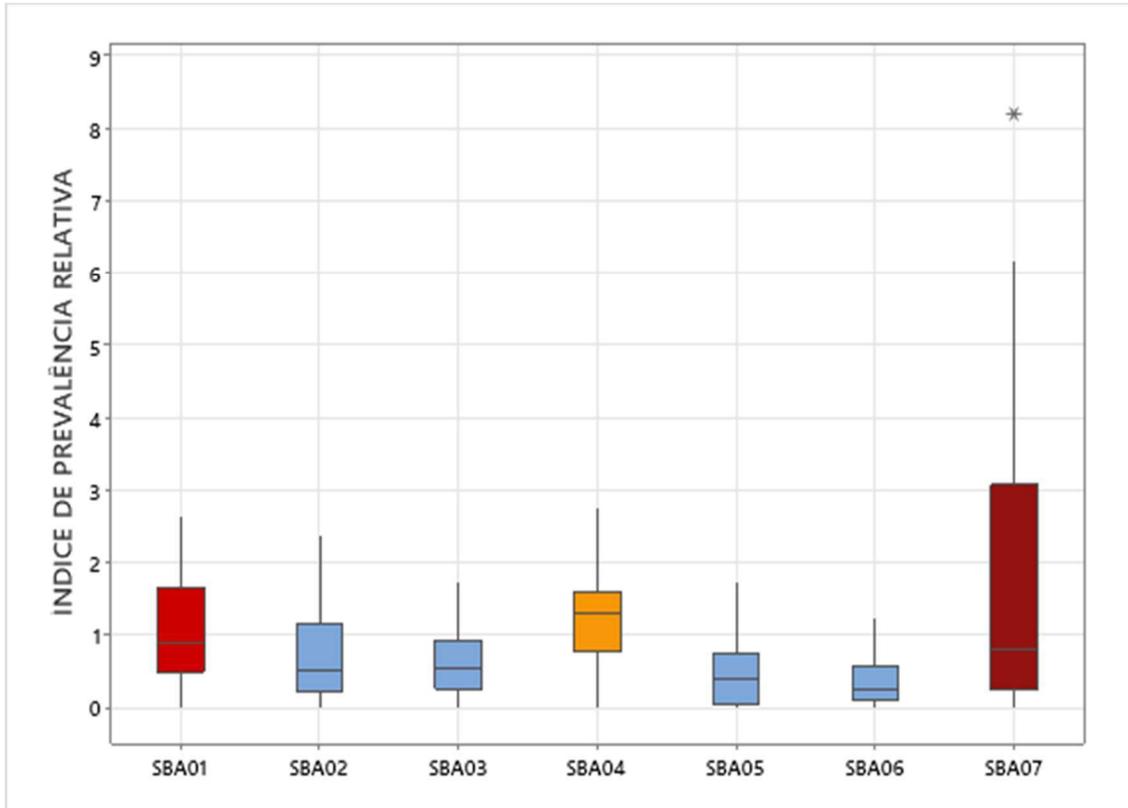


Figura 21 - Boxplot – IPR para as sub-bacias sanitárias Arrudas entre a SE 20 de 2020 e a SE 4 de 2021.

Vermelho: IVSrec Elevado. Amarelo: IVSrec médio. Azul: IVSrec baixo.

Fonte: Elaborado a partir de dados do INCT ETEs Sustentáveis.

O mesmo padrão se repete quando se analisa a bacia hidrográfica Onça, conforme a Figura 22, as regiões com IVS baixo possuem menores valores de IPR, indicando que no período em estudo essas regiões foram menos afetadas pela COVID-19.

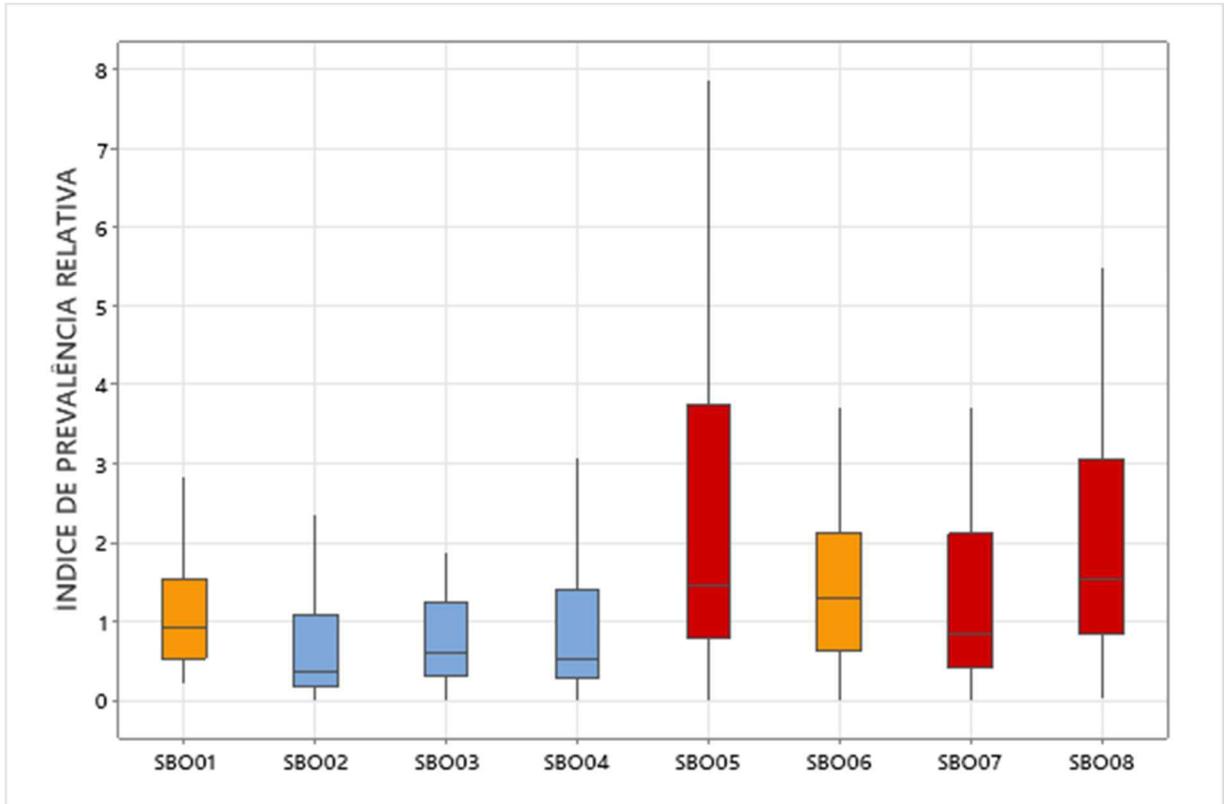


Figura 22 - Boxplot – IPR para as sub-bacias sanitárias Arrudas entre a SE 20 de 2020 e a SE 4 de 2021.

Vermelho: IVSrec Elevado. Amarelo: IVSrec médio. Azul: IVSrec baixo.

Fonte: Elaborado a partir de dados do INCT ETEs Sustentáveis.

A Tabela 7 mostra o número de vezes em que cada uma das 15 regiões monitoradas tiveram valores de IPR maiores do que 1, indicando que naquele momento aquela sub-bacia era um *hotspot* para a COVID-19. Além disso, a figura 23 mostra o IVS para cada uma das regiões amostradas. Os dados mostram que as regiões mais vulneráveis foram as mais atingidas pela pandemia. Por exemplo, as regiões mais vulneráveis das bacias hidrográficas Arrudas (SBA-1, SBA-4 e SBA-7) e Onça (SOB-1, SBO-5, SBO-6, SBO-7 e SBO-8) apresentaram maiores números de semanas com IPR maior do que 1. Os dados também revelaram que as regiões com IVS baixo foram menos afetadas pela pandemia (SBO-2, SBO-3, SBO-4, SBA-2, SBA-3, SBA-5 e SBA-6), com valores de IPR abaixo de 1 durante a maior parte do período de monitoramento. Os dados do IPR mostraram-se particularmente relevantes como ferramenta de alerta precoce, pois ajudaram a identificar regiões com prevalência relativamente alta de COVID-19 antes do agravamento da pandemia que afetou toda a cidade.

Tabela 7 - Número de semanas com valores de IPR maior do que 1 para cada sub-bacia.

	Nº DE SEMANAS COM IPR >1
SBA01	18
SBA02	12
SBA03	10
SBA04	25
SBA05	9
SBA06	9
SBA07	16
SBO01	18
SBO02	12
SBO03	11
SBO04	13
SBO05	22
SBO06	19
SBO07	17
SBO08	24

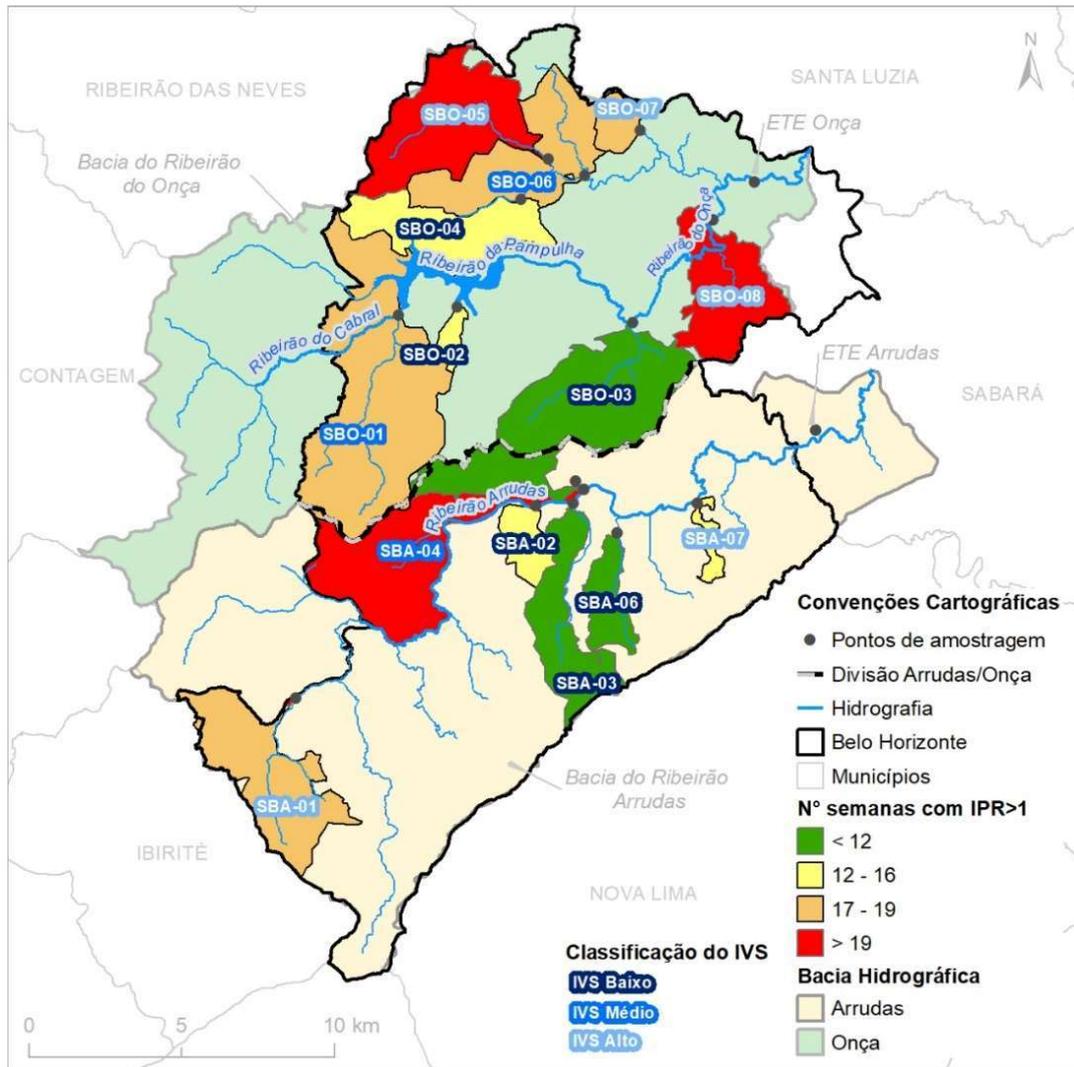


Figura 23 - Número de semanas com IPR maior do que 1 e classificação de cada sub-bacia segundo o IVS.

As regiões com maior vulnerabilidade (IVS médio ou alto) apresentaram um maior número de semanas com IPR maior do que 1, ou seja, essas regiões permaneceram por um período mais longo sendo afetadas mais agressivamente pela pandemia, do que quando comparado com o restante daquela mesma bacia que estava inserida, todas com IPR > 1 por no mínimo 16 semanas. Isso reforça ainda a teoria de que a pandemia afetou mais fortemente aquelas regiões mais vulneráveis, e que certamente possuem menores índices de acesso a serviços de saúde e saneamento básico e menores tendências a adesão ao isolamento social. Essas regiões mais vulneráveis ainda contam, por exemplo, com domicílios com um número maior de moradores por cômodo, o que dificulta o isolamento e distanciamento social, que é uma medida essencial no controle de disseminação da doença, implicando então numa maior disseminação da doença.

Já as sub-bacias com baixo IVS sempre apresentaram IPR > 1 por no máximo 12 semanas, ou seja, permaneceram por um período crítico (*hotspot* para a COVID-19), a partir da presença do

SARS-CoV-2 no esgoto, menor do que nas regiões com maior vulnerabilidade. Como as medidas de isolamento social e restrição das atividades foram tomadas para toda a cidade de Belo Horizonte, uma hipótese para esse menor período crítico seria que as medidas não-farmacológicas de controle da COVID-19, tiveram uma maior adesão nas regiões menos vulneráveis, refletindo então em cargas virais menores nessas regiões.

O resultado alcançado para a análise reportada neste mesmo tópico reforça estudos de PASSOS *et al.* (2021), que indica que o local de moradia em Belo Horizonte também se mostrou fator preponderante. A taxa média de mortalidade foi de 292,3 por 100 mil residentes entre idosos (60 anos ou mais). As taxas foram de 179,2, no setor de baixa vulnerabilidade, 353,6 (média) e 472,6 (vulnerabilidade elevada e muito elevada). Essas diferenças se mantêm entre idosos de 60-74 e 75 anos ou mais. Os números mais que dobram na comparação entre setores de baixa e elevada vulnerabilidade, o que vai de encontro, quando é analisado a permanência de valores maiores que 1 para o IPR.

5.2. Padrão de disseminação espaço-temporal

Para medir quantitativamente a intensidade da disseminação da COVID-19 ao longo do tempo com base no monitoramento do esgoto, foi utilizado o Índice de *Hoover* Locacional (IHL). A Figura 24 mostra o IHL para Belo Horizonte e uma tendência clara de ampla disseminação da COVID-19 desde o início do período de estudo. Nos períodos em que ocorreram o relaxamento das medidas de isolamento social pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, como entre as semanas 22 e 27, há uma tendência de queda do Índice de *Hoover* Locacional, indicando um maior espalhamento da doença. Em períodos que foram autorizadas apenas atividades essenciais, como entre as semanas 27 e 32, ocorre uma elevação do IHL, indicando uma contenção da doença e concentração em determinadas áreas durante esse período. Para auxiliar na análise dos dados referentes ao monitoramento do esgoto e da saúde, foram inseridas informações sobre os principais estágios de funcionamento das atividades em Belo Horizonte.

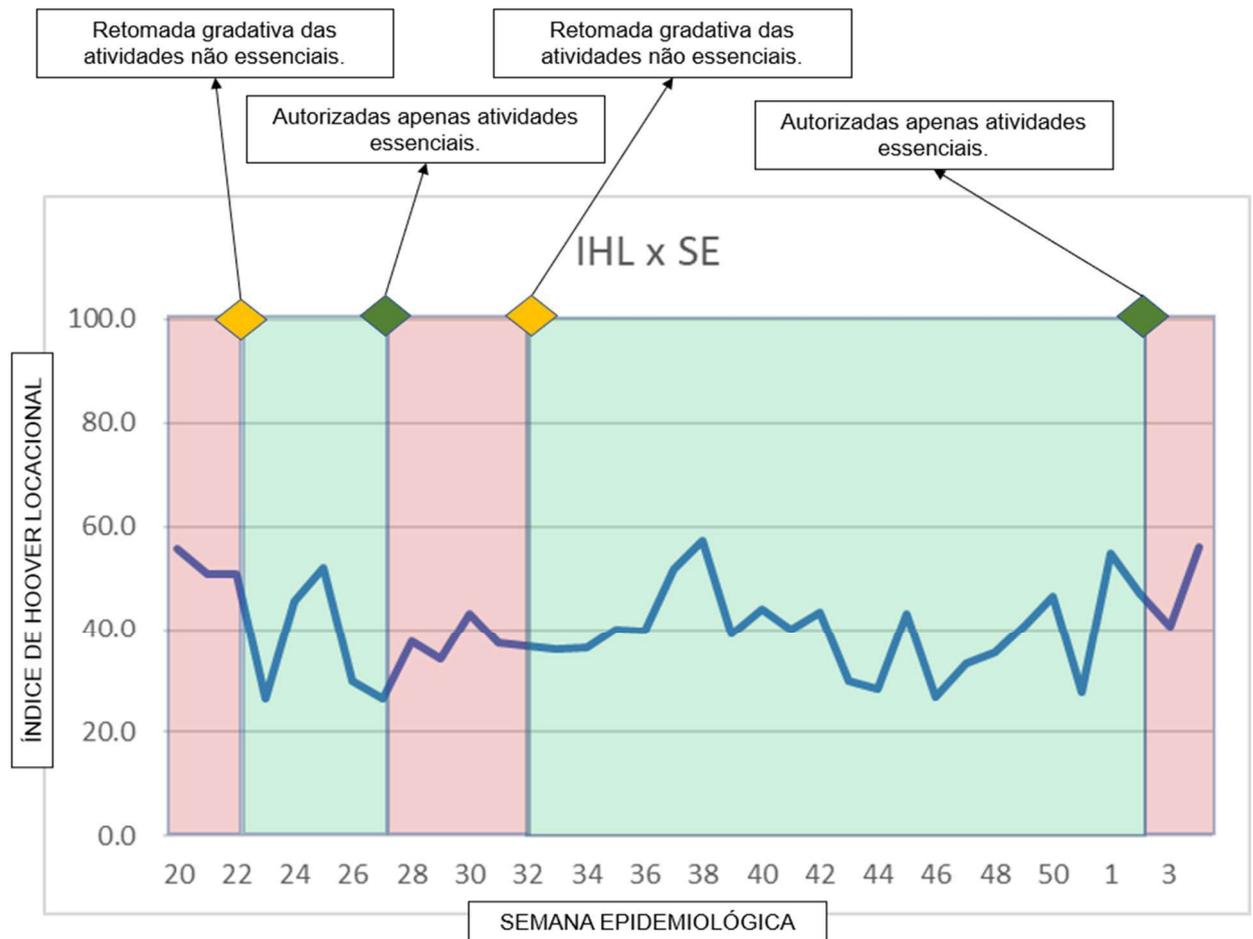


Figura 24 - Índice de Hoover Locacional por Semana Epidemiológica.

Linha azul: Índice de Hoover Locacional (IHL).

Fonte: IHL calculado com base em dados provenientes do INCT ETEs Sustentáveis (2022).

Já na maior janela temporal de liberação gradativa das atividades não essenciais, durante as SE 32 de 2020 e 2 de 2021, não é possível identificar um padrão para o IHL, o qual teve oscilações de comportamento (aumento e diminuição) girando em torno de $IHL = 40$. Uma possível explicação para esse fato é que as medidas de isolamento afetam as diferentes regiões da cidade de formas distintas, devido ao padrão de atividades econômicas predominantes distintas em cada uma das regiões.

A flexibilização da política de distanciamento impôs novos desafios para o município, que pôde ser confirmada pelo IHL. Após a primeira retomada gradativa das atividades não essenciais - na SE 22 - refletiu na queda do IHL, indicando um maior espalhamento das cargas virais no sistema de esgotamento sanitário monitorado.

5.3. Relação entre a carga viral, a ocupação dos leitos de UTI e o índice de transmissão viral

O monitoramento da concentração viral também se mostrou uma ferramenta importante de *early-warning*, conforme a Figura 25. O aumento das cargas virais que chegavam às ETEs Arrudas e Onça antecederam em algumas semanas o aumento do índice R_t , número médio de transmissão por infectado, importante indicativo do agravamento da pandemia. O aumento da carga viral entre as SE 29 e 30 de 2020 antecedeu o agravamento do número de casos, confirmados pelo aumento do R_t , entre as semanas 33 e 35 de 2020. Da mesma forma, o aumento da carga viral entre as SE 42 e 43 de 2020 antecedeu outro aumento significativo do R_t , que ocorreu entre as SE 45 e 48 de 2020. Outros estudos demonstraram tal efeito, conforme apresentado na tabela 8.

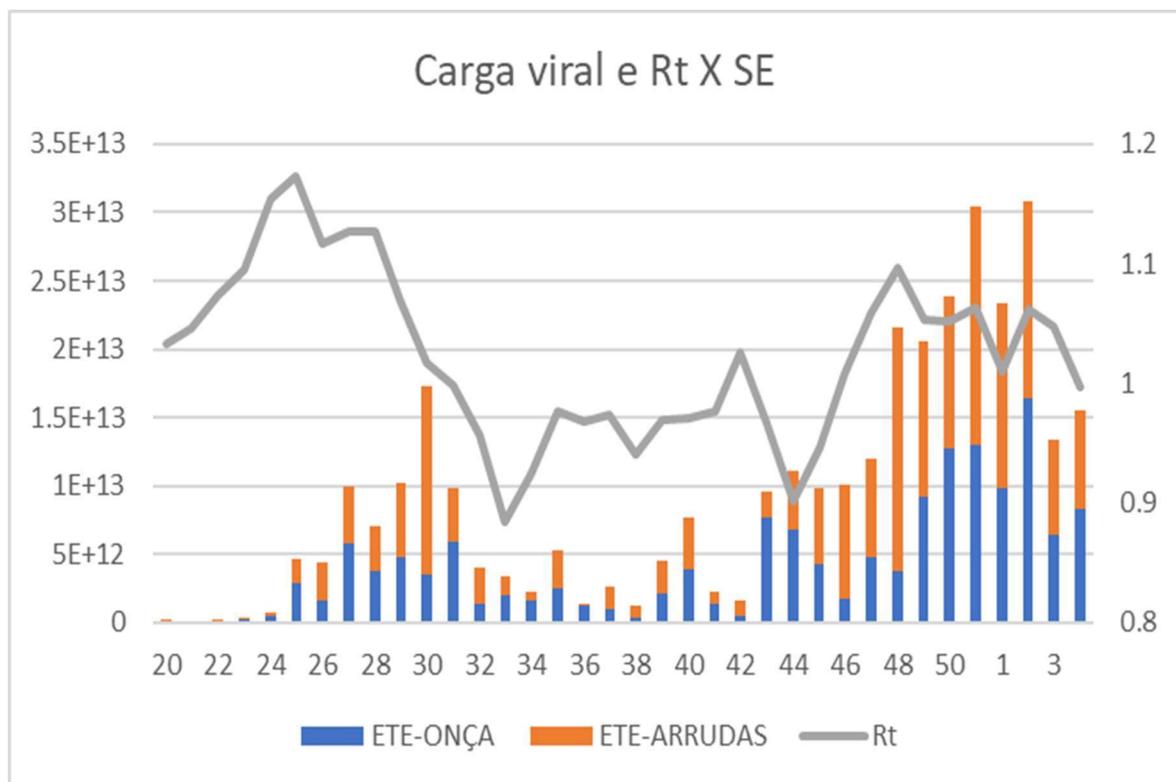


Figura 25 - Carga Viral e R_t por Semana Epidemiológica. A esquerda: Carga viral para cada uma das ETEs. A direita: R_t .

Portanto, o monitoramento do SARS-CoV-2 mostrou que os dados gerados no monitoramento do esgoto podem ser usados como importante ferramenta epidemiológica em Belo Horizonte, capaz de gerar alertas precoces para o aumento da carga viral na população, que permitiria as autoridades de saúde implementar medidas de controle da pandemia, e também que a própria população tome medidas preventivas, antes do aumento descontrolado dos casos e potencialmente evitando o colapso do sistema de saúde.

Os dados gerados a partir do esgoto também podem ser relacionados ao índice de ocupação de leitos de UTI e de enfermaria, conforme a figuras 26, sendo um indicador auxiliar que pode

prever e auxiliar no controle do colapso do sistema de saúde. Na figura 26 também é possível notar que os picos nas cargas virais no esgoto estão quase sempre prevendo em algumas semanas os picos nas taxas de internação nos leitos de UTI e enfermaria para a COVID-19.

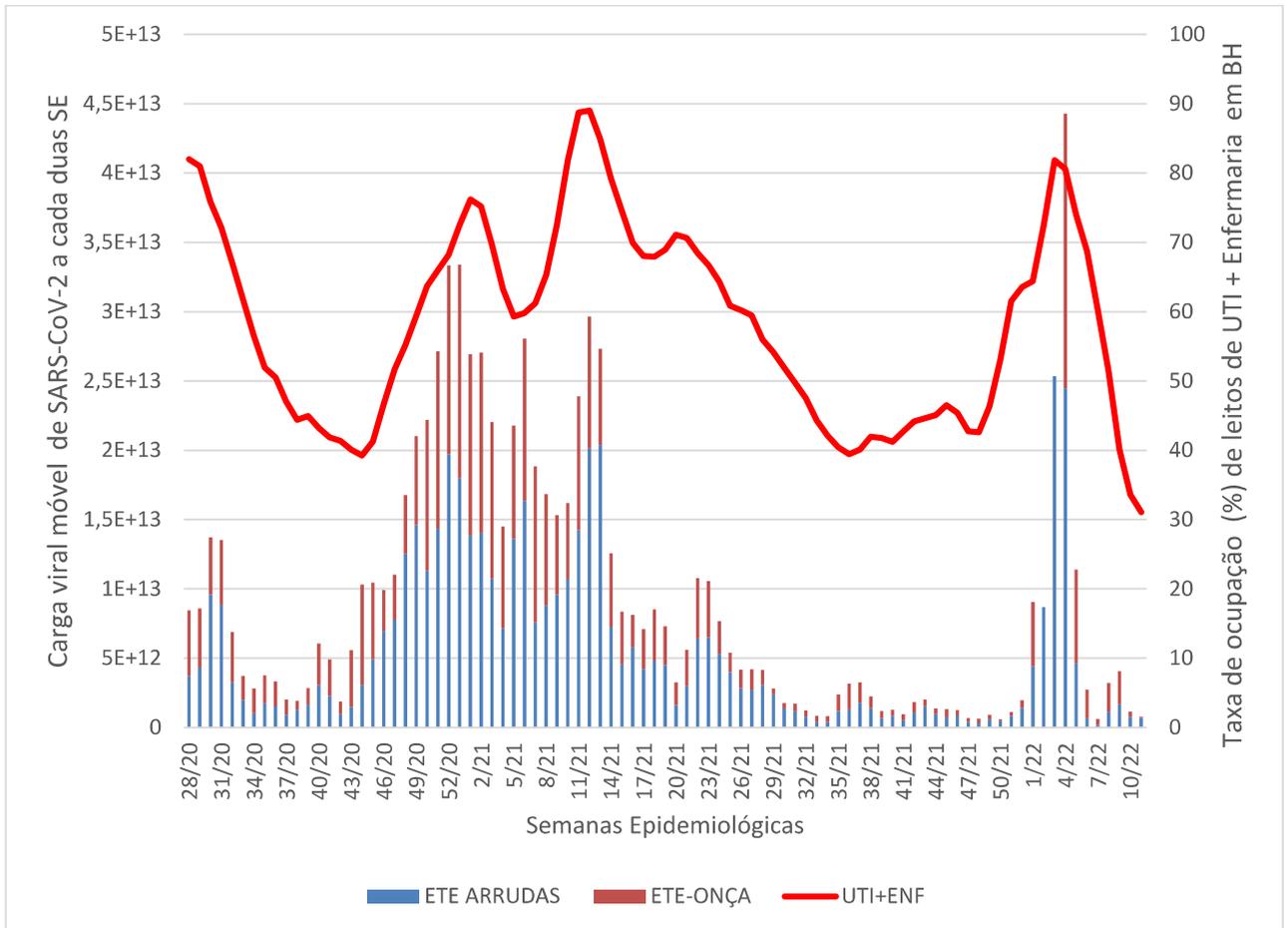


Figura 26 - Taxa de ocupação no sistema de saúde para Covid-19 e a carga viral.

Essas análises reforçam a importância da EBE como uma ferramenta de extrema importância no enfrentamento, não só da pandemia de COVID-19, como também no enfrentamento de outros agravos que sejam passíveis de serem rastreados através de águas residuárias.

Tendo como base uma análise visual do gráfico apresentado na Figura 25, as cargas virais no esgoto acompanharam os picos de ocupação das taxas de ocupação dos leitos para a COVID-19 bem como também da queda dessas mesmas taxas. E em alguns momentos a carga viral pôde, não só acompanhar, como também prever/antecipar esse estresse do sistema hospitalar em algumas semanas. O que vai ao encontro de outros estudos que também comprovaram que o esgoto pode prever o aumento do número de casos positivos, conforme a tabela 8.

Tabela 8 - Capacidade preditiva do esgoto em prever casos positivos para a COVID-19.

Local	Capacidade preditiva do esgoto	Fonte
Gandhinagar, Índia	14 dias	Kumar <i>et al.</i> , 2021
Connecticut, Estados Unidos	6-8 dias	Pecia <i>et al.</i> , 2020
Holanda	6 dias	Medema <i>et al.</i> , 2020
Paris, França	8 dias	Wurtzer <i>et al.</i> , 2021
Ottawa, Canadá	6-14 dias	D'Aoust <i>et al.</i> , 2021
Madrid, Espanha	3-11 dias	Lastra <i>et al.</i> , 2022

Assim como nesses estudos citados na tabela anterior, em Belo Horizonte, a carga viral no esgoto pôde antecipar informações sobre o número de casos de COVID-19, refletido no estresse do sistema hospitalar.

6. CONCLUSÃO

Esta dissertação foi elaborada visando trazer contribuições sobre a aplicação da epidemiologia baseada no esgoto no enfrentamento da pandemia ocasionada pelo SARS-CoV-2 em meados de 2019/2020. Nesse sentido, o monitoramento do esgoto mais próximo à população foco, tendo como base a análise do esgoto em diferentes pontos através do monitoramento em nível das sub-bacias estabelecidas e não só nas ETEs, proporcionou um estudo do comportamento do espalhamento e circulação viral em uma metrópole brasileira.

Os resultados gerados e as análises realizadas sugeriram que a pandemia de COVID-19 na cidade de Belo Horizonte atingiu diferentemente as regiões do município no período entre Abril de 2020 e Janeiro de 2021. A região Norte foi primeiramente afetada pelo vírus, seguida, posteriormente, pela região central da cidade. Quando analisadas separadamente, na bacia sanitária Onça a região norte foi afetada primeiramente, seguindo em direção a região centro-norte de BH. Já na bacia sanitária Arruda, o centro geográfico da carga viral começou na região centro-sul e seguiu em direção à região sudeste.

Uma contribuição deste trabalho se deve justamente a esta análise em um nível mais localizado de como ocorreu o aumento ou diminuição nas diferentes regiões a nível municipal, possibilitando entender e auxiliar o enfrentamento de agravos semelhantes. Nesse sentido, a EBE aplicada ao monitoramento viral auxilia no manejo de curvas de contágio, detecção de comunidades com alta taxa de pacientes infectados e até mesmo pode auxiliar na avaliação de eficácia vacinal. Os dados gerados através dessa ferramenta podem ser interpretados e utilizados pelos sistemas de saúde pública para contribuir em mapas de probabilidade de infecção e no manejo de recursos e isolamento de regiões com altas cargas virais detectadas, fornecendo importantes modelos epidemiológicos. Além disso, os dados aqui fornecidos e a metodologia implementada podem contribuir ativamente para o desenvolvimento de estudos futuros de monitoramento ambiental para SARS-CoV-2 e outros microrganismos patogênicos.

7. RECOMENDAÇÕES

O presente estudo tem limitações importantes que devem ser reconhecidas. Algumas sub-bacias da área de estudo não tiveram análises da concentração e carga viral de SARS-CoV-2 no esgoto em alguns pontos do tempo, o que pode ocultar alguns picos na concentração viral, por exemplo, impedindo um retrato menos real da circulação viral. Outra limitação se deve ao fato da periodicidade semanal das análises e do recorte temporal do estudo, pois um maior número de amostras possibilitaria uma melhor interpretação dos dados e maior confiabilidade na aplicação estatística de métodos inferenciais de séries temporais. Somada a isso, as sub-bacias não abrangiam toda a área territorial de Belo Horizonte, o que limita a análise espacial. Foi preciso, nesse caso, a utilização de interpolação espacial para que padrões espaciais cobrindo todo o território pudessem ser detectados. Outra restrição deste estudo foi a falta de informações atualizadas de variáveis socioeconômicas no nível do setor censitário, o que enriqueceria muito o estudo. De 2010 para 2022 houve um intenso processo de transformação do espaço metropolitano, alterando provavelmente a localização das vulnerabilidades sociais identificadas.

Futuros trabalhos podem explorar mais detalhadamente o aspecto de alerta precoce como indicador não apenas de picos de infecções de doenças, mas também de estresse no sistema hospitalar. Utilizando testes de causalidade de *Granger* pode ser possível testar como a carga viral pode diagnosticar, significativamente, a ocorrência futura de um aumento relativo na taxa de ocupação de leitos de COVID-19. Dessa forma, é importante destacar também que em futuras análises é viável o estudo mais aprofundado sobre qual a real capacidade antecipatória da carga viral no esgoto prever um estresse no sistema de saúde. Uma outra sugestão para posteriores estudos seria cruzar informações socioeconômicas, quando houver a atualização do Censo do IBGE, com dados obtidos a partir do monitoramento a partir do esgoto.

REFERÊNCIAS

- AHMED, N. ANGEL, J. EDSON, *et al.* First confirmed detection of SARS-CoV-2 in untreated wastewater in Australia: a proof of concept for the wastewater surveillance of COVID-19 in the community. *Sci. Total Environ.* (2020), 10.1016/j.scitotenv.2020.138764.
- AKUTSU R.C.C.A., Distribuição espacial da COVID-19 no Brasil e associação entre infraestrutura de saneamento básico utilizando o Sistema de Informação Geográfica, UNB, 2020.
- ALVES, J. E. D. Diário da Covid-19: BH, a grande cidade que menos sofre com o coronavírus. Projeto Colabora.
- AMBROSIO, H. T. M. J.; BARROS FILHO, M. A. C. Como o esgoto pode retratar o cenário de contaminações pela COVID-19?. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.3, p.145-154, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0014>.
- AMPUERO, M.; VALENZUELA, S.; VALIENTE-ECHEVERRIA, F.; SOTORIFO, R.; BARRIGA, G. P.; CHNAIDERMAN, J.; ROJAS, C.; GUAJARDO-LEIVA, S.; DIEZ, B.; GAGGERO, A. SARS-CoV-2 Detection in Sewage in Santiago, Chile - Preliminary results.
- ANDRADE, M. V., NORONHA, K., TURRA, C. M., GUEDES, G., CIMINI, F., RIBEIRO, L. C., ... & SILVA, J. A. D. (2020). Os primeiros 80 dias da pandemia da COVID-19 em Belo Horizonte: da contenção à flexibilização. *Nova Economia*, 30, 701-737
- ARORA, S.; NAG, A.; SETHI, J.; RAJVANSHI, J.; SAXENA, S.; SHRIVASTAVA, S. K.; GUPTA, A. B. Sewage surveillance for the presence of SARS-CoV-2 genome as a useful wastewater based epidemiology (WBE) tracking tool in India
- AW, T.; GIN, K.-H.. Environmental surveillance and molecular characterization of human enteric viruses in tropical urban wastewaters. *Journal of Applied Microbiology*, v.109, p.716-730, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04701.x>
- BAR OR, I.; YANIV, K.; SHAGAN, M.; OZER, E.; ERSTER, O.; MENDELSON, E.; MANNASSE, B.; SHIRAZI, R.; KRAMARSKY-WINTER, E.; NIR, O.; ABU-ALI, H.; RONEN, Z.; RINOTT, E.; LEWIS, Y. E.; FRIEDLER, E. F.; PAITAN, Y.; BITKOVER, E.; BERCHENKO, Y.; KUSHMARO, A. Regressing SARS-CoV-2 sewage measurements onto COVID-19 burden in the population: a proof-of-concept for quantitative environmental surveillance.
- BERCHENKO, Y., MANOR, Y., FREEDMAN, L. S., KALINER, E., GROTTTO, I., MENDELSON, E., & HUPPERT, A. (2017). Estimation of polio infection prevalence from environmental surveillance data. *Science translational medicine*, 9(383), eaaf6786.
- BEZERRA A.C.V., SILVA C.E.M., SOARES F.R.G., SILVA J.A.M. Fatores associados ao comportamento da população durante o isolamento social na pandemia de COVID-19. *Cien Saude Colet* 2020; 25(Supl. 1):2411-2421.
- ~~BOGOCH I. I.; WATTS, A.; THOMAS BACHLI, A.; HUBER, C.; KRAEMER, M. U. G.;~~

KHAN, K. Pneumonia of unknown etiology in Wuhan, China: potential for international spread via commercial air travel. *J Travel Med*, p. 1-3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1093/jtm/taaa008>.

BOULOS, M. N. K AND GERAGHTY, E. M. Geographical tracking and mapping of acute respiratory syndrome coronavirus 2 around the world: how 21st century GIS technologies are supporting the global fight against outbreaks and epidemics. *International Journal of Health Geographics*, v. 18, n. 19, p. 1- 18, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12942-020-00202-8>.

BRASIL, Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Análise em Saúde e Vigilância de Doenças não Transmissíveis. Manejo de corpos no contexto do novo coronavírus COVID-19. [Brasília (Brasil): Ministério da Saúde; 2020b.

BRASIL. Ministério da Saúde. Disponível

em: <https://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2020/fevereiro/13/plano-contingencia-coronavirus-COVID19.pdf>. Acesso em: 08/01/2021.

BROWNSTEIN, J.S.; FREIFELD, C.; MADOFF, L.C. Digital Disease Detection - Harnessing the Web for Public Health Surveillance. *N. Engl. J. Med*, n. 360, p. 2153-2157, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJMp0900702>.

BUSS, P.M. & PELELGRINI, F. A Saúde e seus Determinantes Sociais. *Rev. Saúde Coletiva*. 2007;

17(1):77-93.

CARDOSO, Philipe Valente; SEABRA, Vinícius da Silva; BASTOS, Isabele Braz; COSTA, Evelyn de Castro Porto. A importância da análise espacial para tomada de decisão: um olhar sobre a pandemia de covid-19. *Revista Tamoios, São Gonçalo (RJ)*, ano 16, n. 1, Especial COVID-19. pág. 125-137, maio 2020. <https://doi.org/10.12957/tamoios.2020.50440>.

CARITI, F., TUÑAS CORZON, A., FERNANDEZ-CASSI, X., GANESANANDAMOORTHY, P., ORT, C., JULIAN, T. R., & KOHN, T. (2022). Wastewater Reveals the Spatiotemporal Spread of SARS-CoV-2 in the Canton of Ticino (Switzerland) during the Onset of the COVID-19 Pandemic. *ACS ES&T Water*.

CARDUCCI, A., FEDERIGI, I., LIU, D., THOMPSON, J. R., & VERANI, M. (2020). Making waves: coronavirus detection, presence and persistence in the water environment: state of the art and knowledge needs for public health. *Water research*, 179, 115907.

CASTRO M.C., KIM S., BARBERIA L., RIBEIRO A.F., GURZENDA S., RIBEIRO K.B., ABBOTT E., BLOSSOM J., RACHE B., SINGER B.H. Spatiotemporal pattern of COVID-19 spread in Brazil. *Science*. 2021;372(6544):821-826. DOI: 10.1126/science.abh1558.

CHEN, Z. L., ZHANG, Q., LU, Y., GUO, Z. M., ZHANG, X., ZHANG, W. J., ... & LU, J. H. (2020). Distribution of the COVID-19 epidemic and correlation with population emigration from Wuhan, China. *Chinese medical journal*, 133(9), 1044.

~~CHIARAVALLOTI-NETO, F. O geoprocessamento e saúde pública. Arquivos de Ciências da~~

Saúde, v. 23, n. 4, p. 1-2, 2016.

CHOI, P. M., TSCHARKE, B. J., DONNER, E., O'BRIEN, J. W., GRANT, S. C., KASERZON, S. L., MUELLER, J. F. (2018). Wastewater-based epidemiology biomarkers: past, present and future. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 105, 453-469.

DAUGHTON AND JONES-LEPP, 2001. C.G. DAUGHTON, T.L. JONES-LEPP. Pharmaceuticals and personal care products in the environment : scientific and regulatory issues LK- In ACS symposium series ; 791 TA - TT - Am. Chem. Soc. (2001).

DAUGHTON, C. The international imperative to rapidly and inexpensively monitor community-wide Covid-19 infection status and trends. *Science of The Total Environment*, v.23, n.726, p.138149, 2020.

D'AOUST, P. M., GRABER, T. E., MERCIER, E., MONTPETIT, D., ALEXANDROV, I., NEAULT, N., ... & DELATOLLA, R. (2021). Catching a resurgence: Increase in SARS-CoV-2 viral RNA identified in wastewater 48 h before COVID-19 clinical tests and 96 h before hospitalizations. *Science of The Total Environment*, 770, 145319.

DE OLIVEIRA, L. C., TORRES-FRANCO, A. F., LOPES, B. C., DA SILVA SANTOS, B. S. Á., COSTA, E. A., COSTA, M. S., ... & MOTA, C. R. (2021). Viability of SARS-CoV-2 in river water and wastewater at different temperatures and solids content. *Water research*, 195, 117002.

EMPINOTTI, V.L; BUDDS, J.; AVERSA, M. Governance and water security: the role of the water institutional framework in the 2013–15 water crisis in São Paulo, Brazil. *Geoforum*, 98 (2018), pp. 46-54, 10.1016/j.geoforum.2018.09.022.

ESTÉVEZ-DANTA, A., BIJLSMA, L., CAPELA, R., CELA, R., CELMA, A., HERNÁNDEZ, F., ... & QUINTANA, J. B. (2022). Use of illicit drugs, alcohol and tobacco in Spain and Portugal during the COVID-19 crisis in 2020 as measured by wastewater-based epidemiology. *Science of the Total Environment*, 155697.

FLAMINI, V., TOSCANI, F., & MASRI, D. A. (2021). The Short-Term Impact of COVID-19 on Labor Markets, Poverty and Inequality in Brazil.

FJP – Fundação João Pinheiro, 2020. Acesso em 15/01/2021. Disponível em: http://novosite.fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2020/05/22.05_Inf_NEP_Saneamento_05_2020.pdf.

FRANCH-PARDO, I.; NAPOLETANO, B.M.; ROSETE-VERGES, F.; BILLA, L. Spatial analysis and GIS in the study of COVID-19. A review, *Science of The Total Environment*, Volume 739, 2020 .140033, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140033>.

GUAN, W. J., NI, Z. Y., HU, Y., LIANG, W. H., OU, C. Q., HE, J. X., ... & ZHONG, N. S. (2020). Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China. *New England journal of medicine*, 382(18), 1708-1720.

~~GROSS, B., ZHENG, Z., LIU, S., CHEN, X., SELA, A., LI, J., HAVLIN, S. (2020). Spatio-~~

temporal propagation of COVID-19 pandemics. *EPL (Europhysics Letters)*, 131(5), 58003.

HARMER, M. GILBERT, R. BORMAN, K.L. Clark Quantitative mRNA expression profiling of ACE 2, a novel homologue of angiotensin converting enzyme. *FEBS Lett.*, 532 (2002), pp. 107-110.

HARZHEIM, E. et al. Federal actions to support and strengthen local efforts to combat COVID-19: Primary Health Care (PHC) in the driver's seat. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 25, p. 2.493-2.497, 2020.

HELLER, L; MOTA, CR; GRECO, DB. COVID-19 faecal-oral transmission: Are we asking the right questions? *Science of The Total Environment*, v.729, 2020.

HATA, A., HONDA, R., & WATANABE, T. (2020). wastewater-based epidemiology can overcome representativeness and stigma issues related to COVID-19. *Environmental science & technology*, 54(9), 5311-5311.

HELLMÉR, M.; PAXÉUS, N.; MAGNIUS, L.; ENACHE, L.; ARNHOLM, B.; JOHANSSON, A.; BERGSTRÖM, T.; NORDER, H.. Detection of pathogenic viruses in sewage provided early warnings of hepatitis a virus and norovirus outbreaks. *Appl. Environ. Microbiol.*, v.80, n.21, p.6771-6781, 2014. DOI:<http://doi.org/10.1128/AEM.01981-14>.

HUANG, H., WANG, Y., WANG, Z., LIANG, Z., QU, S., MA, S., ... & LIU, X. (2020). Epidemic features and control of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wenzhou, China. *China* (3/3/2020).

IBGE. Atlas de Saneamento. Rio de Janeiro :Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2011.

INCT ETEs Sustentáveis, Nota técnica: Contribuição para a elaboração de planos de monitoramento da ocorrência do novo coronavírus no esgoto. Belo Horizonte, 2020.

JARVIE, M. M., REED, M., SOUTHWELL, B., WRIGHT, D., & NGUYEN, T. N. T. RT-ddPCR Wastewater Monitoring of COVID-19 Across the Eastern Upper Peninsula of Michigan. Available at SSRN 4090302.

LAI, P.C.; KWONG, K. Spatial Analysis of the 2008 Influenza Outbreak of Hong Kong. In: Taniar, D. et al. (Hrsg): *Computational Science and Its Applications – Iccsa 2010*.

LASTRA, A., BOTELLO, J., PINILLA, A., URRUTIA, J. I., CANORA, J., SÁNCHEZ, J., ... & FLORES, J. (2022). SARS-CoV-2 detection in wastewater as an early warning indicator for COVID-19 pandemic. Madrid region case study. *Environmental research*, 203, 111852.

LEAL, T.S., LEÃO, O.R. M., BARROS, R. S., & REZENDE, P. O. B. (2020). Dinâmica espaço-temporal na disseminação da COVID-19 em Niterói (RJ): Uma contribuição geográfica na fase inicial da pandemia. *Revista Tamoios*, 16(1).

LONGLEY, P. A et al. *Sistemas e ciência da Informação geográfica*. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

- LÖVE, A. S. C., ÁSGRÍMSSON, V., & ÓLAFSDÓTTIR, K. (2022). Illicit drug use in Reykjavik by wastewater-based epidemiology. *Science of the total environment*, 803, 149795.
- KUMAR, M., JOSHI, M., PATEL, A. K., & JOSHI, C. G. (2021). Unravelling the early warning capability of wastewater surveillance for COVID-19: A temporal study on SARS-CoV-2 RNA detection and need for the escalation. *Environmental research*, 196, 110946.
- MAISEL BA, OLIVEIRA DA, FERREIRA CAS, LUCATO JJ. Perfil epidemiológico das internações em uma unidade pediátrica do Sistema Único de Saúde. *Fisioterapia Brasil*. 2015 jul;16(16):9-24.
- MATHERI, A.N., BELAID, M., NJENGA, C.K.. Water and wastewater digital surveillance for monitoring and early detection of the COVID-19 hotspot: industry 4.0. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* (2022). <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03982-7>.
- MEDEMA, G., HEIJNEN, L., ELSINGA, G., ITALIAANDER, R., & BROUWER, A. (2020). 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*, 7(7), 511-516.
- MENEZES, N., KOMATSU, B., & ROSA, J. (2021). Reducing poverty and inequality during the coronavirus outbreak: The emergency aid transfers in Brazil. *Policy Paper*, 54.
- MICHAEL-KORDATOU I, KARAOLIA P, FATTA-KASSINOS D. Sewage analysis as a tool for the COVID-19 pandemic response and management: the urgent need for optimised protocols for SARS-CoV-2 detection and quantification. *J Environ Chem Eng*. 2020 Oct;8(5):104306. doi: 10.1016/j.jece.2020.104306. Epub 2020 Jul 27. PMID: 32834990; PMCID: PMC7384408.
- MLEJNKOVA, H.; SOVOVA, K.; VASICKOVA, P.; OCENASKOVA, V.; JASIKOVA, L.; JURANOVA, E. Preliminary Study of Sars-Cov-2 Occurrence in Wastewater in the Czech Republic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 15, p. 5508, jan. 2021.
- MIRANDA, J. I. *Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas*. 4. ed, Brasília –DF: Embrapa, 2015.
- MORAES, R. F. COVID-19 e medidas legais de distanciamento social: isolamento social, descentralização e análise do período de 11 a 24 e maio de 2020. (Boletim 4). Ipea, 2020(a).
- MOTA, C. R., BRESSANI-RIBEIRO, T., ARAÚJO, J. C., LEAL, C. D., LEROY-FREITAS, D., MACHADO, E. C., ... & CHERNICHARO, C. A. (2021). Assessing spatial distribution of COVID-19 prevalence in Brazil using decentralised sewage monitoring. *Water research*, 202, 117388. MURAKAMI, M.,
- NARDI, S. M. T et al. Geoprocessamento em Saúde Pública: fundamentos e aplicações. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, v. 72, n. 3, p. 185-91, 2013.
- OLAYA, V. Sistema de Información Geográfica. Versión 1.0, 2011. Disponível em: ftp://ftp.chu.es/cidira/profs/ripbaiza/Libro_SIG.pdf. Acesso em: 22/01/2021.

PAIM, J. S. Abordagens teórico-conceituais em estudos de condições de vida e saúde: notas para reflexão em ação. In: barata Rb, editor. Condições de vida e situação de saúde. Rio de Janeiro: AbRASCO;1997. p. 7,30.

PARRA, R. D. V. Regulação assistencial: promoção da equidade no acesso às internações hospitalares de urgência no âmbito do Sistema Único de Saúde de Minas Gerais. 74 p. Monografia de conclusão de Curso (Especialização em Administração Pública Planejamento e Gestão Governamental) - Fundação João Pinheiro, Escola de Governo Professor Paulo Neves de Carvalho, 2019.

PARREIRAS, M. Minas lidera no controle da COVID-19; BH é vice-líder entre capitais. Estado de Minas Gerais, 2020.

PASSOS, V. M. D. A., BRANT, L. C. C., PINHEIRO, P. C., CORREA, P. R. L., MACHADO, I. E., SANTOS, M. R., ... & MALTA, D. C. (2021). Maior mortalidade durante a pandemia de COVID-19 em áreas socialmente vulneráveis em Belo Horizonte: implicações para a priorização da vacinação. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, 24.

PECCIA, J., ZULLI, A., BRACKNEY, D. E., GRUBAUGH, N. D., KAPLAN, E. H., CASANOVAS-MASSANA, A., ... & OMER, S. B. (2020). SARS-CoV-2 RNA concentrations in primary municipal sewage sludge as a leading indicator of COVID-19 outbreak dynamics. *MedRxiv*.

PBH – Prefeitura de Belo Horizonte 2018. Índice de vulnerabilidade da saúde (2018). <http://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo>. Acesso em 20/01/2021.

POLO, D., QUINTELA-BALUJA, M., CORBISHLEY, A., JONES, D. L., SINGER, A. C., GRAHAM, D. W., & ROMALDE, J. L. (2020). Making waves: Wastewater-based epidemiology for COVID-19—approaches and challenges for surveillance and prediction. *Water Research*, 186, 116404.

PRADO, T.; FUMIAN, T. M.; MANNARINO, C. F.; MARANHÃO, A. G.; SIQUEIRA, M. M.; MIAGOSTOVICH, M. P. Preliminary results of SARS-CoV-2 detection in sewerage system in Niterói municipality, Rio de Janeiro, Brazil. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, v. 115, p. e200196, 2020

QUEIROZ, S. L. Mobilidade dos trabalhadores na região metropolitana de Belo Horizonte: uma perspectiva de idade, período e dos padrões de seletividade espacial por modo de transporte. Tese (Doutorado em Demografia) – Cedeplar/UFMG, Belo Horizonte, 2021. Disponível em <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/39006/1/Tese_Sarah_Queiroz.pdf>.

REDDY, D. (2010). Responding to pandemic (H1N1) 2009 influenza: the role of oseltamivir. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 65(suppl_2), ii35-ii40.

ROGERSON, P. A. The Hoover index of population concentration and the demographic components of change: An article in memory of Andy Isserman. *Int. Reg. Sci. Rev.* 36, 97–114 (2012).

~~SARAIVA SOARES AF, NUNES BCR, COSTA FCR, SILVA LFM, SOUZA E SOUZA LP.~~

Sewage-based epidemiology and covid19 in Brazil: a necessary discussion. Int JDev Res. 2020;10(6):36476- 82.<https://doi.org/10.37118/ijdr.18991.06.2020>

SCALZARETTO, N. Mapping the Covid-19 spread in Brazilian favelas. 2020.

SES – MG, Secretaria Estadual de Saúde do estado de Minas Gerais, 2022. Disponível em: <https://coronavirus.saude.mg.gov.br/noticias/124-taxa-de-contagio-e-um-dos-indicadores-para-avaliar-situacao-da-covid-19-em-minas>. Acesso em: 03/03/2022.

SHAH, S., GWEE, S. X. W., NG, J. Q. X., LAU, N., KOH, J., & PANG, J. (2022). Wastewater surveillance to infer COVID-19 transmission: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 804, 150060.

SIMS, N.; Kasprzyk-Hordern, B.; *Environ. Int.* 2020, 139, 105689. Epidemiologia do esgoto como estratégia para monitoramento comunitário, mapeamento de focos emergentes e elaboração de sistemas de alerta rápido para COVID-19.

SINGER, A., & WRAY, R. (2020). Detection and survival of SARS-coronavirus in human stool, urine, wastewater and sludge.

SMSA - Secretaria Municipal de Saúde de belo horizonte. Gerência de Epidemiologia e Informação. Índice de Vulnerabilidade à Saúde 2003. Disponível em <http://www.pbh.gov.br/smsa/biblioteca/gabinete/risco2003.pdf>. Acessado em: 04/01/2022.

SOARES, A. F. S.; NUNES, B. C. R.; COSTA, F. C. R.; SILVA, L. F. DE M.; SOUZA, L. P. S. E. Modelagem ambiental para COVID-19 (SARS-CoV-2) em sistemas de esgotamento sanitário como instrumento auxiliar nas ações de saúde pública. *Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde*, 24 jun. 2020.

STARLING, H. O ano em que Belo Horizonte enfrentou a peste. UFMG. Notícias. Opinião. 16 abr. 2020.

TAVARES, F. F., & BETTI, G. (2021). The pandemic of poverty, vulnerability, and COVID-19: evidence from a fuzzy multidimensional analysis of deprivations in Brazil. *World Development*, 139, 105307.

THARAK, A., KOPPERI, H., HEMALATHA, M., KIRAN, U., CG, G., MOHARIR, S., ... & MOHAN, S. V. (2022). Longitudinal and Long-Term Wastewater Surveillance for COVID-19: Infection Dynamics and Zoning of Urban Community. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5), 2697.

VILLELA, D. A. M. The value of mitigating epidemic peaks of COVID-19 for more effective public health responses. *Rev. Soc. Bras. Med. Trop.* v. 53, e20200135, p. 1-2, 2020. <https://doi.org/10.1590/0037-8682-0135-2020>.

UNICEF - United Nations Children's Fund. The Impact of COVID-19 on Food Security and Nutrition, 2020.

WANG, W.; XU, Y.; GAO, R. Detection of SARS-CoV-2 in Different Types of Clinical Specimens. *JAMA* (2020), [10.1001/jama.2020.3786](https://doi.org/10.1001/jama.2020.3786).

WERNECK G.L., CARVALHO M.S. A pandemia de Covid-19 no Brasil: crônica de uma crise sanitária anunciada. *Cad Saude Publica*. 2020;36(5):e00068820. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-311X00068820>.

WESTHAUS, S.; WEBER, F.-A.; SCHIWY, S.; LINNEMANN, V.; BRINKMANN, M.; WIDERA, M.; GREVE, C.; JANKE, A.; HOLLERT, H.; WINTGENS, T.; CIESEK, S. Detection of SARS-CoV-2 in raw and treated wastewater in Germany – Suitability for COVID-19 surveillance and potential transmission risks. *Science of The Total Environment*, v. 751, p. 141750, jan. 2021.

WHO, Water, sanitation, hygiene and waste management for the COVID-19 virus: Epidemiologia do esgoto como estratégia para monitoramento comunitário, mapeamento de focos emergentes e elaboração de sistemas de alerta rápido para COVID-19. 2020.

WOLFARTH, B. R. Análise epidemiológica espacial, temporal e suas relações com as variáveis ambientais sobre a incidência da malária no período de 2003 a 2009 em 4 municípios do estado do Amazonas, Brasil. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Clima e ambiente do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA e da Universidade Estadual do Amazonas – UEA. Brasil, Manaus, p.11 6. (2011).

WU, C. GUO, L. TANG, Z. HONG, *et al.* Prolonged presence of SARS-CoV-2 viral RNA in faecal samples. *Lancet Gastroenterol. Hepatol.*, 5 (2020), pp. 434-435, 10.1016/S2468-1253(20)30083-2.

WU, F. *et al.* SARS-CoV-2 titers in wastewater foreshadow dynamics and clinical presentation of new COVID-19 cases, 2021. medRxiv. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.06.15.20117747v2>.

WURTZER, Y.; GUO, C.; TANG, L.; HONG, Z.; DONG, X. *et al.* Prolonged presence of SARS-CoV-2 viral RNA in faecal samples. *The Lancet Gastroenterology and Hepatology*, 2p., 2020. DOI:[https://doi.org/10.1016/S2468-1253\(20\)30083-2](https://doi.org/10.1016/S2468-1253(20)30083-2).

WURTZER, S., MARECHAL, V., MOUCHEL, J. M., & MOULIN, L. (2021). Time course quantitative detection of SARS-CoV-2 in Parisian wastewaters correlates with COVID-19 confirmed cases. MedRxiv.

XIONG, Y., WANG, Y., CHEN, F., & ZHU, M. (2020). Spatial statistics and influencing factors of the novel coronavirus pneumonia 2019 epidemic in Hubei Province, China.

XU, B.; KRAEMER M. U. G. Open access epidemiological data from COVID-19 outbreak. *The Lancet: Infectious Diseases*, Published: February 19, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30119-5](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30119-5).

XU, L. ZHONG, J. DENG, *et al.* High expression of ACE2 receptor of 2019-nCoV on the epithelial cells of oral mucosa. *Int. J. Oral Sci.*, 12 (2020), p. 8, 10.1038/s41368-020-0074-x.

ZAPAROLLI, D. FAPESP - Pesquisa do Estado de São Paulo, 2020. Edição 293. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-desafio-de-calculas-o-r/> . Acesso em: 04/01/2022.

ZANETI, R. N., GIRARDI, V., SPILKI, F. R., MENA, K., WESTPHALEN, A. P. C., DA COSTA COLARES, E. R., ... & ETCHEPARE, R. G. (2021). Quantitative microbial risk assessment of SARS-CoV-2 for workers in wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*, 754, 142163.

ZHAO, S.; LIN, Q.; RAN, J.; MUSA, S. S.; YANG, G.; WANG, W.; LOU, Y.; GAO, D.; YANG, L.; HE, D.; WANG, M. H. Preliminary estimation of the basic reproduction number of novel coronavirus (2019-nCoV) in China, from 2019 to 2020: A data-driven analysis in the early phase of the outbreak. *International Journal of Infectious Diseases*, n. 92, p. 214-217, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.01.050>.

ZHENG, Q., REN, Y., WANG, Z., LIU, J., ZHANG, Y., LIN, W., ... & THAI, P. K. (2021). Assessing patterns of illicit drug use in a Chinese city by analyzing daily wastewater samples over a one-year period. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 125999.

ZUCCATO, E., CHIABRANDO, C., CASTIGLIONI, S., CALAMARI, D., BAGNATI, R., SCHIAREA, S., & FANELLI, R. (2005). Cocaine in surface waters: a new evidence-based tool to monitor community drug abuse. *Environmental Health*, 4(1), 1-7.

ZUCCATO, E., CHIABRANDO, C., CASTIGLIONI, S., BAGNATI, R., & FANELLI, R. (2008). Estimating community drug abuse by wastewater analysis. *Environmental health perspectives*, 116(8), 1027-1032.
