



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

SEBASTIAN FELIPE CASTELLANOS BUITRAGO

**RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO E
LOCALIZAÇÃO DE ARMAZÉNS PARA O TRANSPORTE DE CARGA: ANÁLISE
DE VULNERABILIDADE DA POPULAÇÃO**

FORTALEZA

2025

SEBASTIAN FELIPE CASTELLANOS BUITRAGO

RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO E
LOCALIZAÇÃO DE ARMAZÉNS PARA O TRANSPORTE DE CARGA: ANÁLISE DE
VULNERABILIDADE DA POPULAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (UFC) como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento/Operação de Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini

Co-orientador: Prof. Dr. Francisco Gildemir Silva

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B948r Buitrago, Sebastian Felipe Castellanos.

Relação entre concentrações de material particulado e localização de armazéns para o transporte de carga: análise de vulnerabilidade da população / Sebastian Felipe Castellanos Buitrago. – 2025.
95 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoni.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Gildemir Ferreira Da Silva.

1. Material Particulado. 2. Transporte Urbano de Carga. 3. Inequidade. 4. Vulnerabilidade. I. Título.
CDD 388

SEBASTIAN FELIPE CASTELLANOS BUITRAGO

RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO E
LOCALIZAÇÃO DE ARMAZÉNS PARA O TRANSPORTE DE CARGA: ANÁLISE DE
VULNERABILIDADE DA POPULAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (UFC) como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento/Operação de Sistemas de Transportes.

Aprovada em: 13/06/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Gildemir Ferreira Da Silva (Co-orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Ana Margarita Larrañaga
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Francisco Moraes de Oliveira Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, amigos, sociedade e a todos os momentos que me permitiram chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço à Instituição GCUB-MOB e a CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Quero agradecer à minha família por sempre me apoiar em meus objetivos, apesar da distância eles estão sempre presentes, obrigado Bere, Liz, Nico, Vale, Antonio, Chiquitin e Luna.

Agradeço ao Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini, pela excelente orientação. Ao Prof. Dr. Francisco Gildemir Silva pela ajuda na coorientação, e aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dra. Ana Margarita Larrañaga e Prof. Francisco Moraes de Oliveira Neto pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos e familiares que sempre me apoiam e alegam meus dias, é impossível nomear todas as pessoas que fazem parte deste caminho chamado vida, mas gostaria mencionar a Santiago, Juliana, Líbia, Esther, aos meus professores e amigos da Colômbia (Pablo, Juan, Mateo, Jonathan, Daniela, Airam, Patricia, Anderson) e aos meus amigos no Brasil (Alisson, Ana, Eduarda, Henrique, Guilena, João, Iane, Laura, Levi, Lucas, Mayane, Yenny)

Aos professores do Petran, ao grupo de pesquisa Trama e aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, aprendizados, críticas e sugestões recebidas. Agradeço também ao Brasil e à Colômbia por me permitirem compartilhar essas duas culturas incríveis, à sociedade que, por meio de seus impostos, torna a pesquisa possível, à equipe de limpeza, às pessoas do RU e a todas as pessoas que são indispensáveis para o funcionamento das sociedades.

“Há boas evidências, de que índices mais elevados de privação e posição econômica baixa geralmente estão associados a níveis mais altos de poluentes, como material particulado...”

(FAIRBURN et al., 2019, p. 3127)

RESUMO

O Transporte Urbano de Carga (TUC) desempenha papel fundamental na garantia da disponibilidade de produtos para a população. Contudo, sua execução está associada a externalidades, como a emissão de poluentes, e a fenômenos como o espraiamento logístico, que se caracteriza pela localização de armazéns em zonas periféricas, que são áreas frequentemente habitadas por populações vulneráveis. Além disso, A justiça ambiental tem sido um tema de interesse crescente na pesquisa mundial. Seu estudo pode ser aplicado na diminuição das diferenças sociais a exposições de poluentes. Destaca-se que falta ainda um maior desenvolvimento de pesquisas no contexto latino-americano, inclusive da descrição de como é e diferença entre grupos mais vulneráveis quanto a exposição a poluentes. Para trazer à tona essa linha de investigação para a América Latina, o objetivo desse trabalho é analisar a interrelação entre a localização dos atacados utilizados para o Transporte Urbano de Carga (TUC) e de que forma essa decisão logística se relaciona com a concentração de poluentes (Material particulado – PM_{2.5}) em uma cidade de grande porte no Brasil. De forma paralela, busca-se estudar como esse fenômeno impacta nas comunidades urbanas.

O método delineado consiste na obtenção dos dados de poluentes, localização de atacados e dados de vulnerabilidade social. Analisa-se a relação entre as variáveis selecionadas de forma temporal e espacial. Para os atacados, utiliza-se uma base de dados com informações precisas sobre a localização histórica em toda a cidade. Em relação ao PM_{2.5}, foi desenvolvido um modelo de *machine learning* calibrado com dados de uma estação de monitoramento presente em oito pontos da cidade entre 2020 e 2023. Este modelo foi posteriormente utilizado para projetar para toda a cidade utilizando dados de satélites. A vulnerabilidade social foi medida por meio de um índice baseado em três variáveis: o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), o número de atendimentos hospitalares por doenças respiratórias e o cadastro no Sistema Nacional de Pessoas Vulneráveis (CadÚnico). A análise é realizada de forma espacial (bairros e hexágonos) e temporal (mensalmente, de 2000 a 2023). Como nem todas as bases de dados estão disponíveis para o período completo, foram empregados modelos complementares, como *backcasting*. A análise busca explorar a relação entre as variáveis selecionadas de maneira temporal e espacial, utilizando indicadores clássicos como Moran e LISA, bem como índices de séries temporais, como o índice de concentração e de cointegração.

Os resultados alcançados mostram que há uma relação entre o TUC, a concentração de PM_{2.5} e a vulnerabilidade social em alguns bairros principalmente da zona oeste da cidade. Adicionalmente, a concentração do TUC aumentou em áreas específicas, e existem indícios da relação temporal entre a concentração do TUC e a localização das populações vulneráveis, ressaltando a necessidade de políticas públicas para uma distribuição mais equitativa das atividades logísticas, principalmente na zona oeste da cidade. Espera-se que os resultados possam ser aplicados a diferentes contextos, além de oferecer uma contribuição metodológica relevante para a análise de dados em nível local.

Palavras-chave: material particulado; transporte urbano de carga; inequidade; vulnerabilidade.

ABSTRACT

Urban Freight Transportation (UFT) plays a fundamental role in ensuring the availability of products for the population. However, its execution is associated with externalities, such as the emission of pollutants, and phenomena such as logistical sprawl, which is characterized by the location of warehouses in peripheral zones, which are areas often inhabited by vulnerable populations. Furthermore, environmental justice has been a topic of growing interest in global research. Its study can be applied to reducing social differences in exposure to pollutants. It is noteworthy that there is still a lack of further research in the Latin American context, including the description of what the difference is between the most vulnerable groups in terms of exposure to pollutants. In order to bring this line of research to Latin America, the aim of this work is to analyze the interrelationship between the location of wholesalers used for Urban Freight Transport (UFT) and how this logistical decision relates to the concentration of pollutants (Particulate Matter - PM_{2.5}) in a large city in Brazil. In parallel, the aim is to study how this phenomenon impacts on urban communities.

The method outlined consists of obtaining data on pollutants, wholesale locations and social vulnerability data. The relationship between the selected variables is analyzed both temporally and spatially. A database with precise information on historical locations throughout the city is used for the attack sites. With regard to PM_{2.5}, a machine learning model calibrated with data from a monitoring station present at eight points in the city between 2020 and 2023 was developed. This model was then used to project the entire city using satellite data. Social vulnerability was measured using an index based on three variables: the Human Development Index (HDI), the number of hospital visits for respiratory diseases and registration in the National System for Vulnerable People (CadÚnico). The analysis is carried out spatially (neighborhoods and hexagons) and temporally (monthly, from 2000 to 2023). As not all databases are available for the entire period, complementary models such as backcasting were used. The analysis seeks to explore the relationship between the selected variables in a temporal and spatial manner, using classic indicators such as Moran and LISA, as well as time series indices such as the concentration and cointegration index.

The results show that there is a relationship between UFT, PM_{2.5} concentration and social vulnerability in some neighborhoods, mainly in the western part of the city. In addition, the concentration of UFT increased in specific areas, and there is evidence of a temporal relationship between the concentration of UFT and the location of vulnerable populations, highlighting the need for public policies for a more equitable distribution of logistics activities, especially in the west of the city. It is hoped that the results can be applied to different contexts, as well as offering a relevant methodological contribution to data analysis at a local level.

Keywords: particulate matter; urban freight transport; inequality; vulnerability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ano de cada artigo	24
Figura 2 - Pontos da estação de monitoramento.....	37
Figura 3 - exemplo Pixel aerossol QGIS.....	41
Figura 4 - Distância ao mar	43
Figura 5 - Localização dos atacados última década, Fonte: Autor.....	49
Figura 6 - Quantidade de atacados – hexágonos (dez/2000).....	50
Figura 7 - Evolução histórica da quantidade de atacados na cidade	50
Figura 8 - Evolução temporal da quantidade de atacados	51
Figura 9 - Evolução temporal da quantidade de atacados sem Centro, Aldeota e Maraponga	52
Figura 10 - Valores reais e modelados de PM2.5.....	53
Figura 11 - Importância de cada variável no modelo	54
Figura 12 - Evolução temporal da concentração de PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – previsão do modelo.....	55
Figura 13 - quantidade de PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) por hexágono – mês amostral - modelado.....	56
Figura 14 - Quantidade de PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – hexágono sem dunas.....	57
Figura 15 - IDH 2010	57
Figura 16 - Quantidade de hospitalizações fastmedic e HU - 2023	58
Figura 17 - Quantidade de atendimentos Fastmedic e HU – hexágonos – mês amostral	59
Figura 18 Resultados <i>backasting</i> – exemplo hexágono 235	59
Figura 19 - Número de pessoas inscritas no CadÚnico por bairro, Fonte: Autor	60
Figura 20 - Número de pessoas inscritas no CadÚnico - hexágonos	60
Figura 21 - Evolução temporal do índice de vulnerabilidade social	61
Figura 22 - IVS hexágonos – mês amostral.....	62
Figura 23 - Evolução temporal das variáveis conjuntas.....	63
Figura 24 - Variáveis sem Centro, Maraponga e Aldeota	64
Figura 25 - Evolução temporal e espacial variáveis - hexágonos	64
Figura 26 - I de Moran.....	65
Figura 27 - Lisa Univariado	66
Figura 28 - LISA bivariado	67
Figura 29 - Lisa Bivariado - zoom	69
Figura 30 - Análise de uso do solo	70
Figura 31 - Comparação variáveis e uso do solo.....	71
Figura 32 - Índice HHI	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estrutura da dissertação.....	20
Quadro 2 - Metodologia de análise da literatura	21
Quadro 3 - Artigos com Revisão de literatura.....	26
Quadro 4 - Artigos transporte de carga e poluentes	27
Quadro 5 - Artigos impacto da geração de poluentes do transporte na sociedade	28
Quadro 6 - Artigos transporte de carga, sociedade e poluentes	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação dos modelos de <i>Machine Learning</i>	53
Tabela 2 - Correlações variáveis saúde	64
Tabela 3 - Correlações variáveis	65
Tabela 4 - Valor p – teste ADF	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TUC	Transporte Urbano de Carga
PM	Material Particulado
PM2.5	Material Particulado 2.5
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NO _x	Óxidos de nitrogênio
SUS	Sistema Único de Saúde
IVS	Índice de vulnerabilidade social
SEUMA	Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
HU	Hospital universitário
I de Moran	Índice de Moran
HHI	Índice Herfindahl-Hirschman

LISTA DE SÍMBOLOS

\$	Dólar
%	Porcentagem
§	Seção
©	Copyright
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização.....	15
1.2	Conceitos empregados para o desenvolvimento do estudo	17
1.3	Objetivos.....	19
1.4	Estrutura da pesquisa	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Análise da literatura.....	22
2.2	Seleção da literatura.....	23
2.3	Metodologias complementares	23
2.4	Análise dos artigos	24
2.4.1	<i>Alternativas para mitigar os impactos ambientais.....</i>	<i>33</i>
2.5	Considerações finais da revisão de literatura	33
3	MÉTODO.....	36
3.1	Localização dos atacados	38
3.2	Concentração de Poluentes - Material particulado	39
3.3	Índice de Vulnerabilidade social	44
3.4	Modelagem temporal e espacial de dados faltantes.....	46
3.5	Análise estatística entre as variáveis.....	47
4	RESULTADOS.....	49
4.1	Análise dos atacados - TUC	49
4.2	Análise do PM _{2.5}	52
4.3	Análise da Vulnerabilidade	57
4.4	Análise espacial da relação entre as variáveis	62
4.5	Análise temporal da relação entre as variáveis	73
5	CONCLUSÕES	76
5.1	Principais limitações.....	78

5.2	Sugestões para futuros trabalhos	79
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE 1 - REPOSITÓRIO DE GITHUB	88
	APÊNDICE 2 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DIÁRIA DO PM2.5 MODELADA	89
	APÊNDICE 3 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DO TUC, IVS E PM2.5 POR MÊS POR BAIRRO	90
	APÊNDICE 4 EVOLUÇÃO TEMPORAL DO TUC, IVS E PM2.5 POR MÊS POR HEXÁGONO	91
	APÊNDICE 5 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ANÁLISE LISA.....	92
	APÊNDICE 6 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ANÁLISE LISA EXCLUINDO A ÁREA DAS DUNAS, O CENTRO, ALDEOTA E MARAPONGA	93

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo contempla a contextualização para o estudo, apresentando informações necessárias à compreensão do tema de pesquisa. Além disso, são apresentados os objetivos e a estrutura da dissertação.

1.1 Contextualização

O Transporte Urbano de Carga (TUC) é uma atividade em constante evolução que desempenha papel fundamental na garantia da disponibilidade de produtos oferecidos pelas empresas e demandados pelos consumidores; na atualidade, devido às dinâmicas de globalização e serviços digitais gerou-se uma total dependência a esse transporte, procurando que os produtos cheguem a qualquer lugar no menor tempo possível. O TUC abrange modalidades de entrega em grande volume com o uso de atacados ou centros de distribuição, assim como entregas locais em escalas menores nos locais varejistas.

Apesar de sua importância, a execução do TUC está associada à presença de externalidades durante o processo como a concentração e emissão de poluentes, como óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de nitrogênio (NO₂) e Material Particulado (PM - sigla em inglês de *particulate matter*) os quais impactam a saúde pública e podem contribuir para o surgimento de doenças respiratórias (Vallero, 2016). Esse efeito é mais severo se está presente em populações com sistemas de saúde deficientes (WHO, 2015). Ressalta-se que o Material Particulado PM_{2.5} (partículas de diâmetro 2,5 micrômetros ou menor) devido ao seu pequeno tamanho, podem penetrar mais profundamente nos pulmões e até atingir a corrente sanguínea, tornando-os mais perigosos para a saúde humana, especialmente para os sistemas respiratório e cardiovascular.

As estimativas atuais dos efeitos da poluição atmosférica ambiental e doméstica incluem cerca de 7 milhões de mortes prematuras todos os anos, representando uma em cada oito do total de mortes a nível mundial (WHO, 2015; Fairburn *et al.* 2019). Além disso, 90% das pessoas da população mundial vivem em áreas onde a poluição do ar excede as diretrizes da Organização Mundial de Saúde - OMS. A Agência Europeia do Ambiente estimou que em 2015 ocorreram 422.000 mortes prematuras devido a concentrações de PM_{2.5} em 41 países da Europa; outras 79.000 foram atribuídos aos níveis de dióxido de nitrogênio (NO₂) e 17.700 ao ozônio. O custo econômico anual global dos impactos na saúde e da mortalidade devido à

poluição atmosférica, incluindo estimativas dos custos de morbilidade, situou-se em 1,575 bilhões de dólares. (WHO, 2015; Fairburn *et al.* 2019).

No que diz respeito ao papel do TUC na geração de poluentes, como é descrito por Vallero (2016) e Hagenbjörk *et al.* (2017) os NO_x e o PM associam-se com a atividade de transporte, dado que a combustão interna, principalmente de motores a Diesel, é responsável pelas emissões desses poluentes. A combustão incompleta dos automóveis está presente quando uma pequena fração do combustível é oxidada apenas em monóxido de carbono (CO), com alguns hidrocarbonetos voláteis também emitidos como vapor no escapamento e partículas carbonáceas de gotículas de combustível queimadas de forma incompleta (Colville *et al.* 2001). Outro fator a destacar é que, como indica Vallero (2016), o PM e o NO_x classificam-se como poluentes locais, que são menos impactados pela dispersão gerada pelo vento como acontece com o CO₂.

Portanto, as zonas que tenham maiores rotas de TUC, espera-se ter uma maior concentração e emissão de poluentes, de forma complementar, a localização dos atacados é uma decisão estratégica que gera impacto na quantidade de viagens demandadas para o transporte de carga e por consequência na emissão de poluentes (Dablanc e Rakotonarivo, 2010). Alinhado com essa temática, Yuan (2018a) tem observado o fenômeno de espraio logístico, que consiste na localização dos atacados em zonas periféricas, normalmente com o intuito de pagar um valor inferior pelo uso de solo. Com a ressalva que estes locais geralmente associam-se a populações de baixa e média renda, sendo um fenômeno estudado em diferentes locais do mundo, torna-se importante analisar a evolução temporal deste fenômeno dentro das cidades.

Pode-se notar que os serviços logísticos são uma parte essencial da cadeia de abastecimento global, pois permitem o funcionamento eficiente da economia. No entanto, os impactos ambientais subsequentes estão se tornando uma preocupação crescente para a população e para os gestores públicos. A locação de atacados para o transporte urbano de cargas em zonas com populações desfavorecidas, introduz um conceito fundamental a inequidade, Fairburn *et al.* (2019) e Yuan (2018a) explicam a inequidade como as diferenças mensuráveis e observáveis na exposição à poluição atmosférica nas dimensões sociais. Além disso, os mesmos autores definem inequidade como a carga ambiental desproporcional nas comunidades com elevados percentuais de população socialmente desfavorecida, além disso abordam o conceito de justiça ambiental como a procura de reduzir ou eliminar tais diferenças.

A partir disso, destaca-se a importância de entender como as concentrações de poluentes na cidade de Fortaleza, Ceará, se correlacionam de forma temporal e espacial com a localização dos atacados necessários para o TUC, e como reflete nas populações vulneráveis

para determinar se o TUC gera inequidade. Ressalta-se que, a justiça ambiental pode ser estudada desde diferentes focos, por exemplo, a Agência americana de proteção ambiental (US-EPA, 2021) mede a vulnerabilidade social a partir de quatro dimensões diferentes, indivíduos de baixa renda, adultos maiores do que 65 anos, indivíduos sem educação superior com mais de 25 anos e minorias (negros, indígenas, nativos e latinos).

Esses diferentes indicadores, permitem indicar que a justiça ambiental é um tema que pode ser estudado desde diferentes dimensões, e cada dimensão escolhida terá suas particularidades e poderá aportar a um maior entendimento da problemática. Procura-se então, propor determinantes que permitam analisar como tem sido a evolução entre a relação do TUC e a concentração de PM_{2.5} na cidade, sendo um tema com diferentes frentes de pesquisa a serem analisados e posteriormente aplicar essa análise para estudar a relação também com a localização das populações para uma maior compreensão da vulnerabilidade e a justiça ambiental.

1.2 Conceitos empregados para o desenvolvimento do estudo

Nesta seção são descritos os conceitos que serão utilizados durante a pesquisa, alinhados com os conceitos utilizados na literatura. Inicialmente, o **transporte urbano de cargas (TUC)** é entendido como o serviço de movimentação de bens e mercadorias dentro de áreas urbanas, essencial para abastecimento, logística e funcionamento das cidades, comumente realizado com veículos tipo caminhão movimentados à Diesel.

O **atacado** é uma modalidade de comercialização voltada para a venda de grandes quantidades de mercadorias, geralmente destinadas a revendedores, varejistas ou empresas, principalmente com destino aos centros urbanos e compras de grandes quantidades de produtos. Diferentemente de um centro de distribuição, que tem como principal função armazenar, organizar e distribuir produtos para diversos destinos, não necessariamente dentro da área urbana. Os atacados estão associados à emissão de viagens de transporte de carga urbano para a distribuição de produtos na cidade.

O **PM (Material Particulado)** é um conjunto de partículas sólidas ou líquidas suspensas no ar, enquanto PM_{2.5} se refere a partículas com diâmetro menor ou igual a 2,5 micrômetros, extremamente finas e capazes de penetrar profundamente no sistema respiratório, causando potenciais impactos à saúde e, portanto, trata-se de um poluente nocivo para a população (WHO, 2015). Vallero, 2016 destaca que é um poluente associado à combustão interna dos motores diesel dos caminhões que circulam pela cidade e seu impacto é de tipo

local, sua emissão está diretamente relacionada à fonte emissora e seus efeitos são mais evidentes na área onde foi liberado, quer dizer, não se dispersa tão rapidamente quanto o CO₂, este último se mistura de forma homogênea na atmosfera, independentemente do local onde foi emitido.

Assim, é mais difícil correlacionar a emissão de CO₂ de uma fonte específica a efeitos diretos em uma área geográfica específica. Cabe destacar que, **emissão** de poluentes refere-se à quantidade de substâncias poluentes liberadas por uma fonte em determinado período, enquanto a **concentração** indica a quantidade desses poluentes presente no ar em um local específico, influenciada por fatores como dispersão e condições climáticas.

Portanto, ao estudar as concentrações dos caminhões, o PM_{2.5} é mais indicado para análises locais, pois sua origem pode ser rastreada mais facilmente até a fonte emissora, para estudar a emissão torna-se necessário a análise de fonte emissora, para o escopo desta pesquisa analisou-se a concentração, destacando que não se pode afirmar 100% que um poluente foi emitido por uma determinada fonte, portanto, o termo adequado é falar de indícios e de relações.

Outro poluente importante de tipo local é o NO₂, este poluente também está relacionado aos veículos Diesel, porém, seus impactos na saúde são frequentemente indiretos e não podem ser correlacionados diretamente ao TUC, principalmente porque ele contribui para a formação de outros poluentes, como o ozônio e o próprio MP_{2.5} (Vallero, 2016).

Em quanto a **população vulnerável**, se refere a grupos sociais que apresentam maior suscetibilidade a impactos adversos, pode ser medido com diferentes indicadores como baixa renda, idade avançada (acima de 65 anos), baixos níveis de escolaridade (acima de 25 anos sem ensino superior), pertencimento a minorias étnicas ou raciais, como negros, indígenas, nativos e latinos (US-EPA, 2021), dentre outros, Quer dizer, uma população que por suas condições é mais susceptível a problemáticas seja sociais ou ambientais segundo seu entorno, por exemplo por contar com sistemas de saúde deficientes (WHO, 2015) ou impossibilidade de acesso a serviços especializados ou maior susceptibilidade à doenças por sua idade ou condições geográficas.

Entende-se como **equidade ou justiça** como a distribuição moralmente adequada de benefícios e encargos sobre os membros da sociedade. Por exemplo, é justo que todos recebam a mesma quantia e sejam igualmente protegidos, ou em determinados casos os mais vulneráveis devem ser os mais protegidos. (Martens *et al.* 2019) Enquanto a **equidade relacionada com o transporte**: o autor define desde diferentes dimensões como i) mobilidade/acessibilidade, ii) poluição relacionada com o trânsito, iii) segurança no trânsito e iv) saúde. No quesito das diferenças mensuráveis e observáveis na exposição à poluição

atmosférica nas dimensões sociais, entra o conceito de **justiça ambiental** a procura de reduzir ou eliminar tais diferenças (Travis *et al.* 2023a). Os cenários onde não exista justiça ambiental ou equidade são chamados de **inequidade**.

A partir da dos conceitos e da contextualização apresentada, destaca-se que a pesquisa proposta visa investigar de forma abrangente e em escala local as concentrações de poluentes (material particulado – PM2.5) advindas do Transporte Urbano de Carga segundo a localização dos atacados. A relevância desse estudo reside na compreensão dos impactos ambientais e de saúde pública associados à logística de transporte de carga nas áreas urbanas, especialmente nas populações desfavorecidas.

O intuito da pesquisa é entender se as concentrações associadas com o TUC geram cenários de inequidade, que se refere às disparidades observáveis na exposição à poluição atmosférica e sua carga desproporcional sobre certas comunidades, configurando um problema de justiça ambiental. O aprendizado pode apoiar aos tomadores de decisão e organizações governamentais para que possam reconhecer esta realidade e a partir disso, propor políticas públicas e medidas que visem mitigar as externalidades do TUC.

A importância está em tornar visível uma realidade que é constantemente ignorada ou desconsiderada no planejamento das cidades e que seu impacto gera agravos à saúde da população, partindo da premissa que a localização dos atacados em zonas periféricas pode agravar a vulnerabilidade das comunidades que moram nessa região ao aumentar a frequência na exposição aos poluentes gerados pelo transporte urbano de carga, a partir da hipótese construíram-se os objetivos que permitem quantificar e estimar indicadores que permitam determinar de forma estatística, temporal e espacial se existe ou não vulnerabilidade das populações atrelada às decisões logísticas do TUC.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é compreender a distribuição dos impactos ambientais da localização dos atacados para o TUC e associa-la geograficamente com a localização das comunidades vulneráveis.

1.3.2 Objetivo específicos

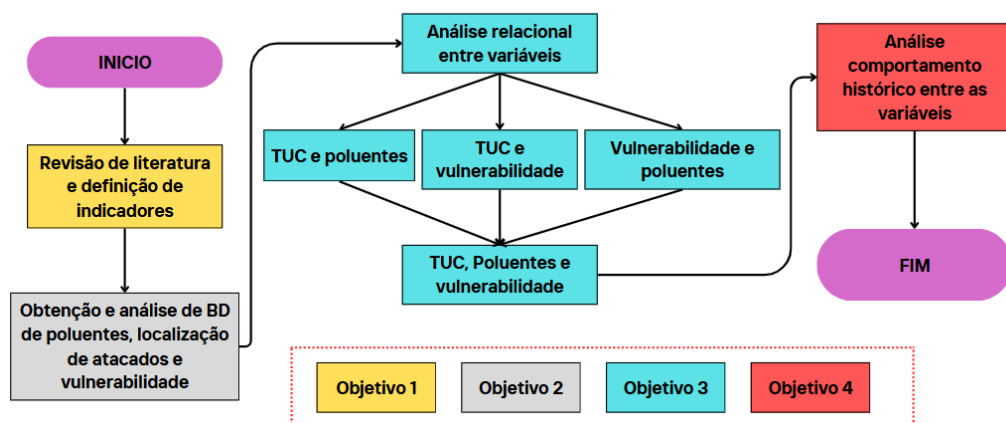
Em complementação ao objetivo geral, são apresentados os seguintes objetivos:

- Propor indicadores para caracterizar os impactos ambientais do TUC e sua relação com distribuição espacial das populações vulneráveis.
- Caracterizar a distribuição espacial e temporal das concentrações de PM_{2.5} em Fortaleza
- Investigar a relação entre o PM_{2.5}, a localização dos atacados e a distribuição espacial da população vulnerável;
- Identificar como tem sido o comportamento histórico do impacto na qualidade do ar pelo TUC nas populações vulneráveis.

1.4 Estrutura da pesquisa

A estrutura delineada na dissertação a seguir foi concebida para otimizar a organização dos principais tópicos abordados, facilitando a compreensão da interconexão entre eles e uma resposta fluida aos objetivos de pesquisa estabelecidos. Como é apresentado no Quadro 1, a qual vincula as questões aos objetivos e à metodologia adotada.

Quadro 1 - Estrutura da dissertação



Fonte: Autor (2023).

A pesquisa está dividida por capítulos, o capítulo 2 apresenta o referencial teórico para entender o estado atual da pesquisa. Já o capítulo 3, explica o método para a obtenção e tratamento de dados, bem como a geração de modelos necessários e as análises espaciais e temporais desejadas. O quarto e quinto capítulo tratam do encerramento do estudo, apresentando os resultados e conclusões das análises.

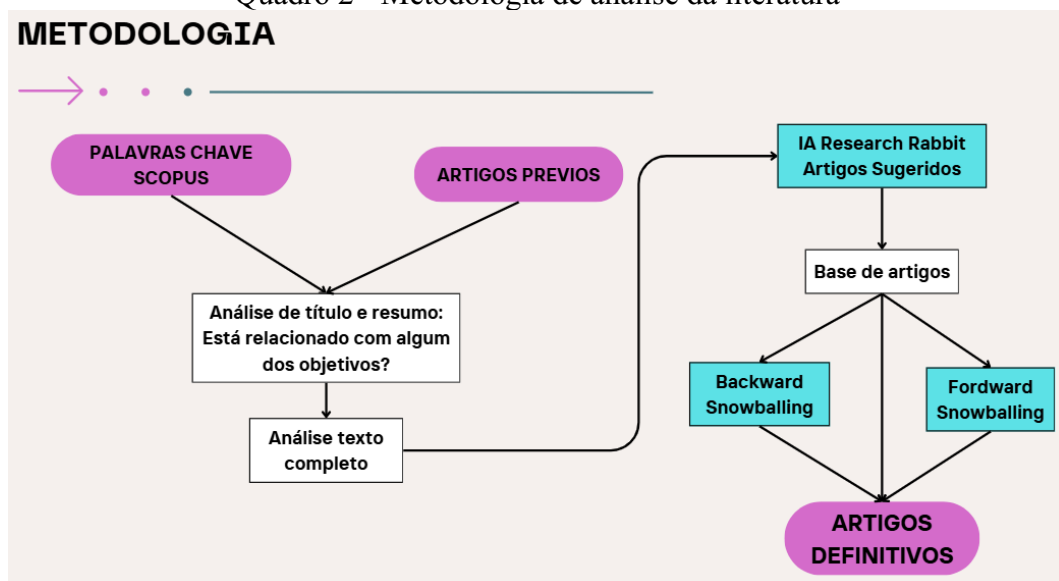
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os principais artigos relativos ao tema com o objetivo de conhecer o estado atual das investigações no tema, a fim de identificar quais autores estão trabalhando no tema, quais poluentes estão sendo analisados, quais relações estão sendo comparadas e qual o nível de agregação zonal que é utilizado, para ter um ponto de partida que permita identificar em que área pode ser feita uma contribuição e quais artigos servirão de base para a pesquisa.

Os artigos de revisão de literatura desempenham um papel fundamental na pesquisa científica, pois apresentam de maneira eficaz uma visão abrangente do conhecimento em uma área específica. Além de fornecer uma síntese do estado atual do campo, essas revisões devem ir além, destacando lacunas na pesquisa, propondo uma agenda de investigação, e avaliando métodos ou fundamentos teóricos aplicados (Wee e Banister, 2023).

Com o objetivo de ter uma análise abrangente dos diferentes artigos, estabeleceu-se o procedimento apresentado no Quadro 2, a fim de abordar os diferentes artigos que servem de referência. O intuito da revisão é conhecer o que tem sido pesquisado sobre a temática na atualidade e assim poder identificar quais contextos e cenários são úteis para projetar na cidade de Fortaleza, não é realizada uma análise sistemática da literatura, mas procura-se abarcar a maior quantidade de artigos possíveis para enriquecer o conhecimento sobre a temática.

Quadro 2 - Metodologia de análise da literatura



Fonte: Autor (2023).

O procedimento de revisão é uma adaptação do método proposto por Fairburn *et al.*

(2019), em uma revisão sistemática de justiça ambiental na Europa, onde inicialmente são disponibilizadas as palavras-chave e entradas adicionais, primeiro é feita uma revisão geral do artigo e depois é lido o texto completo e com base nos critérios de exclusão determina-se a base final.

2.1 Análise da literatura

A partir dos conceitos de poluição, transporte urbano de cargas (TUC) e vulnerabilidade, foram definidas as palavras-chave. Levando em consideração que a vulnerabilidade também pode ser entendida como uma questão de saúde, acrescentou-se também palavras-chave relacionadas à saúde. As *strings* de pesquisa definidas foram:

- TUC = (“city logistic*” OR “urban logistic*” OR “urban freight” OR “freight transport” OR “urban distribution”)
- Vulnerabilidade = (“vulnerab* population” OR “spatial distribution” OR “transport inequalit*” OR “spatial inequalit*” OR “spatial equalit*” OR “transport* equalit*” OR “societ* equit*” OR “societ* inequit*” OR vulnerab* OR “environmental justice” OR disparit)
- Saúde = (health* OR “repirator* disease” OR “pollution disease”)
- Ambiental = (“emission*” OR “air pollution” OR “pollution” OR “health impact*” OR “quality of life” OR “sustainability” OR “Environmental inequality” OR “Environmental equity”)

A fim de selecionar trabalhos de pesquisa potencialmente relevantes na área acadêmica, realizou-se a pesquisa com a ferramenta de procura avançada da base de dados Scopus®, por sua ampla cobertura de artigos na área, o auxiliar * é colocado no final das palavras-chave para considerar as diferentes opções que a palavra pode ter. A pesquisa foi feita em inglês por ser o idioma mais frequente na pesquisa científica e optou-se por selecionar apenas textos do tipo artigo científico nos quais a linguagem fosse em inglês, espanhol ou português, independente do ano de publicação.

Quando as 4 opções (TUC, vulnerabilidade, saúde e ambiental) foram colocadas juntas pelo conector do tipo “AND”, observou-se que os resultados obtidos foram bastante limitados, portanto, optou-se por fazer 2 agrupamentos de palavras-chave, primeiro unindo TUC com vulnerabilidade e depois TUC com saúde, com 252 e 321 resultados respectivamente.

2.2 Seleção da literatura

Dos artigos, extrai-se o arquivo tipo CSV e lê-se o título e o resumo, para verificar se está relacionado aos objetivos do projeto, esperando que atenda a algum dos seguintes critérios:

- Atinja algum dos objetivos, geral ou específico.
- Impacto do TUC nas populações vulneráveis.
- Impacto ambiental do TUC com poluentes como CO₂, NO_x, NO₂ e PM.
- Impacto na saúde gerado pelo TUC.
- Outros relacionados.

Da mesma forma, os critérios de exclusão foram:

- Não fala de impacto na sociedade.
- Não focado no TUC.
- Qualquer outro que não seja o critério do avaliador.

Portanto, com esse primeiro filtro a amostra é reduzida para 52 artigos, os quais são lidos na sua totalidade com os mesmos critérios de inclusão e exclusão, chegando-se a uma amostra de 20 artigos, foram acrescentados outros 13 artigos identificados em repositórios fora do *scopus*, tais artigos estavam alinhados com os critérios de seleção e filtrados por análises prévias definidas pelos autores desta pesquisa baseado nos conhecimentos prévios da temática.

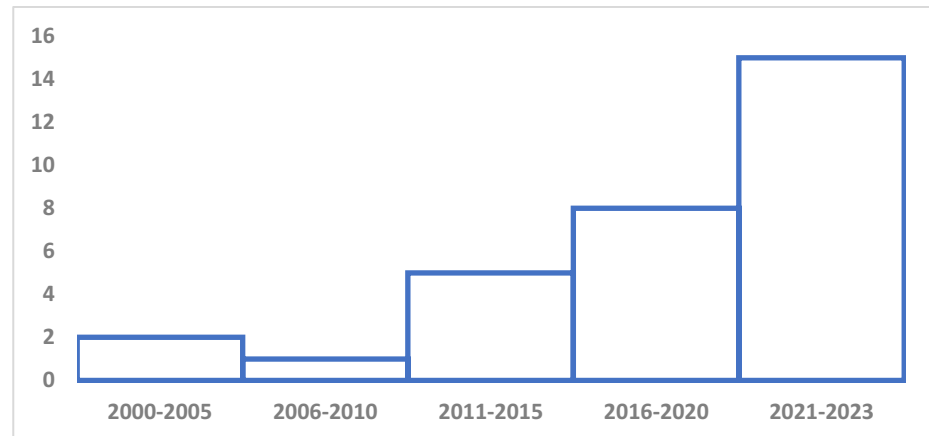
2.3 Metodologias complementares

Webster e Watson (2002) implementam a técnica *snowballing*, que consiste em utilizar listas de referências de artigos já encontrados para localizar outros artigos relevantes. Essa abordagem, proposta por Jalali e Wholin (2012) pode ser realizada tanto de maneira retroativa (referências) quanto progressiva (citações). Tendo em conta a importância atual da inteligência artificial como ferramenta complementar à investigação científica, utiliza-se também a ferramenta *Research Rabbit*®, que é um software que sugere artigos anteriores, subsequentes e relacionados

Colocaram-se os artigos em *research-rabbit* e a inteligência artificial fez sugestões de artigos, analisou-se o resumo dos artigos e, dessa forma foram acrescentados 7 artigos, após implementar o mesmo critério de seleção da etapa prévia, realizou-se também a técnica de

snowballing. Dessa forma, a base final do referencial teórico foi composta por 32 artigos. A Figura 1 apresenta a data dos artigos. Observa-se que é um tema que vem sendo estudado desde o início do século, mas que tem assumido maior relevância nos últimos anos.

Figura 1 - Ano de cada artigo



Fonte: Autor (2024).

2.4 Análise dos artigos

Inicialmente foram identificados três artigos que fazem revisão da literatura sobre o tema da pesquisa, um deles foi realizado em regiões da Europa onde apresenta diferentes cenários nos quais encontrou-se evidência que a poluição gerada pelo transporte tem um impacto significativo nas populações vulneráveis, o outro estudo conclui que a literatura sobre transporte de cargas é limitada se comparada ao transporte de passageiros, em quanto o último, enfoca os fatores que influenciam a escolha do local de instalação do armazém e os locais de moradia das populações desfavorecidas; o resumo encontra-se refletido no Quadro 3.

Percebe-se nos artigos estudados que há evidências de que o transporte de cargas gera poluição atmosférica, e que a poluição atmosférica tem aumentado com o percorrer dos anos, são encontrados diversos artigos na literatura que destacam que existe uma relação entre o transporte de cargas e a geração de poluentes, conforme apresentado no Quadro 4. Os diferentes artigos refletem que o transporte de cargas tem um impacto no meio ambiente e que, portanto, é uma área que deve ser estudada.

Há uma tendência crescente em analisar o impacto da poluição na sociedade e como isso gera desigualdade como foi identificado nos artigos identificados no Quadro 5, onde há evidências suficientes para mostrar que em diferentes situações os mais vulneráveis são mais afetados ao ficarem com um nível maior de exposição à poluição como a emissão de material

particulado, esses artigos estudam o fenômeno da desigualdade, do ponto de vista da geração de poluentes pelos diferentes meios de transporte, sem necessariamente focar no transporte de cargas, o que reflete que a inequidade é uma área de estudo que foi abordada a partir de diferentes modais de transporte, e no qual a literatura reflete que existe uma relação entre vulnerabilidade social e poluentes atmosféricos gerados pelos meios de transporte.

Portanto, com o que foi apresentado no referencial teórico, pode-se entender que há impacto do transporte de cargas e no meio ambiente, da mesma forma, reflete-se que diferentes modos de transporte geram desigualdades, uma vez que diferentes casos foram observados com diferentes abordagens e a partir disso a população mais vulnerável apresenta um nível mais elevado de exposição a poluentes. Posteriormente, analisou-se como esse fenômeno tem sido analisado do ponto de vista do transporte de cargas.

É aqui que se encontram os artigos do Quadro 6 que se relacionam com o objetivo de pesquisa, onde diferentes autores analisaram o tema de pesquisa sob diferentes perspectivas. Observa-se que os critérios de como avaliar o impacto das concentrações ou emissões geradas pelo TUC nas populações varia entre cada autor, enquanto a poluentes, tem-se autores que analisam PM enquanto outros focam-se no NO₂, no que se refere ao transporte de cargas, este é analisado por corredores logísticos, ou distâncias percorridas, ou localização de estabelecimentos, e enquanto à vulnerabilidade, é medida com diferentes indicadores como idade, raça ou nível econômico.

Em resumo, a literatura reflete que há evidências de que a TUC gera emissões que podem ter um impacto maior nas populações mais vulneráveis, mas não há consenso sobre quais indicadores utilizar para a análise. O Quadro 6 detalha os diferentes artigos encontrados que estão relacionados ao objeto de estudo. Algo a destacar também é que os estudos são geralmente realizados na China, nos Estados Unidos e na Europa, não há artigos que analisem o tema em nível local como na cidade de Fortaleza, Brasil. Da mesma forma, destaca-se que é um tema relevante e que tem sido estudado por diversos autores.

Dentre os fatores identificados que geram inequidade ambiental ao existir maior exposição nas populações vulneráveis, encontrou-se uma exposição mais prolongada dessas populações aos poluentes, também por se concentrar em áreas de maior densidade populacional e pelo zoneamento do TUC associado ao fenômeno de espraio logístico. Pode-se concluir que a revisão da literatura reflete que existe uma relação entre o transporte urbano de cargas, a concentração e emissão de poluentes e o impacto nas sociedades vulneráveis gerando inequidade.

Quadro 3 - Artigos com Revisão de literatura

Autor	Base de estudo	Objetivo	Resultados
Travis <i>et al.</i> (2023a)	34 estudos sobre justiça e equidade no transporte urbano de cargas.	Estudar como diferentes grupos populacionais são afetados pelas emissões e a falta de equidade em torno dessas questões	Literatura existente sobre equidade e justiça no transporte urbano de cargas é limitada, em comparação com a literatura sobre justiça no transporte de passageiros.
Fairburn <i>et al.</i> (2019),	Artigos publicados entre 2010 e 2017	Analisar as evidências sobre as desigualdades sociais e a poluição do ar na Europa.	Índices de privação e baixa posição econômica geralmente, estão associados a níveis mais elevados de poluentes atmosféricos, como material particulado e óxidos de nitrogênio.
Yuan (2018a)	Estado da arte sobre as externalidades ambientais das instalações de armazenamento e as questões de justiça ambiental associadas à sua localização em bairros desfavorecidos.	Como a localização de armazéns pode resultar em desigualdades ambientais para as comunidades locais devido aos riscos ambientais relacionados às atividades de armazenamento.	A localização de armazéns em bairros desfavorecidos agrava desigualdades ambientais devido a externalidades como poluição e ruído, influenciadas por fatores socioeconômicos e políticos

Fonte: Autor (2024).

Quadro 4 - Artigos transporte de carga e poluentes

Autor	Objetivo e área de estudo	Resultados
Luo <i>et al.</i> (2016)	Estudar o impacto ambiental negativo do setor de transporte de carga na China analisando as emissões de CO ₂	As emissões de CO ₂ do setor de transporte de carga na China aumentaram significativamente entre 1990 e 2007. Influenciadas por fatores como o nível de desenvolvimento econômico, a intensidade do transporte de carga e a mudança de modal.
Mommens <i>et al.</i> (2019)	Medir o impacto da poluição do ar gerada pelo transporte de cargas nas regiões metropolitanas de Bruxelas	A metodologia dinâmica deve ser usada para análises em microescala da poluição do ar relacionada ao transporte, e as políticas devem visar a separação das fontes de emissão e dos receptores, tanto temporal quanto espacialmente.
Piscitelli <i>et al.</i> (2019)	Estudar a quantidade de material particulado fino (PM10 e PM2.5) e óxidos de nitrogênio (NOx) que foram gerados pelo transporte rodoviário de carga em 2016 na Itália	O transporte rodoviário de carga tem um impacto significativo em relação à poluição do ar. Os custos relacionados a mortes prematuras decorrentes do transporte rodoviário chegaram a cerca de USD 1 trilhão em 2015, e representam cerca de 17% dos custos totais de saúde relacionados ao PM2.5.
Zhao <i>et al.</i> (2023)	Como a distribuição espacial se relaciona com as emissões de CO ₂ das cidades chinesas.	As emissões de CO ₂ geradas pelo transporte de carga aumentaram significativamente de 2005 a 2015

Fonte: Autor (2024).

Quadro 5 - Artigos impacto da geração de poluentes do transporte na sociedade

Autor	Objetivo e área de estudo	Resultados
Guzman <i>et al.</i> (2023)	Analisar as desigualdades existentes na exposição diária de trabalhadores aos poluentes do ar, com base em sua origem socioeconômica e em seus padrões de deslocamento urbano na Colômbia	Existência de maiores inequidades na dose diária aos poluentes para a população de menores rendas em comparação aos de rendas mais elevadas, explicadas pelo modo de transporte utilizado e pelo tempo de deslocamento urbano.
Houston <i>et al.</i> no ano 2004	Identificação de áreas de alta densidade de tráfego e a sua relação com regiões de minorias étnicas e baixa renda na cidade nos Estados Unidos	Bairros com altas densidades de minorias e pobreza enfrentam mais do que o dobro do volume de tráfego, resultando em maior exposição a poluentes veiculares e implicações significativas de justiça ambiental.
Houston <i>et al.</i> 2013	Entender o impacto de emissões veiculares em populações próximas às rodovias e portos com técnicas de regressão espacial, nos Estados Unidos	Comunidades com maior porcentagem de residentes negros, asiáticos e de baixa renda enfrentam disparidades na exposição ao tráfego veicular e à poluição por partículas finas.
Padilla <i>et al.</i> (2014)	Avaliar a relação entre as emissões NO ₂ e os dados sociodemográficos e econômicos das áreas metropolitanas da França, em dois períodos diferentes com métodos aditivos generalizados.	Os resultados variaram entre as cidades estudadas. Em Lille e Marseille, as classes sociais mais baixas estão expostas a concentrações médias mais elevadas de NO ₂ . No entanto, em Paris, a associação foi inversa.
Rivasa <i>et al.</i> (2017)	Comparação da exposição a diferentes tipos de PM durante a locomoção por diferentes meios de transporte em quatro áreas de Londres com diferentes níveis de privação de renda.	Grupos socioeconômicos mais desfavorecidos em Londres enfrentam maior exposição a poluentes do ar durante os deslocamentos, especialmente ao utilizar ônibus, destacando desigualdades ambientais e a influência do tipo de transporte e horário no nível de poluição.

Rowangould (2013)	Avaliar questões de justiça ambiental e saúde: distribuição da população que vive próxima a estradas de alta circulação nos Estados Unidos	Relação direta entre a densidade e volume de tráfego e a presença de moradores na região, com maior concentração de residentes de baixa renda e minorias raciais e étnicas.
Rowangould (2015)	Método para avaliar a exposição da população, além da equidade de exposição por raça e renda, aos riscos à saúde associados à exposição ao material particulado em Los Angeles.	A modelagem de dispersão de alta resolução pode identificar padrões espaciais e temporais de exposição ao PM2.5 revelando preocupações significativas de justiça ambiental, com comunidades de baixa renda e minorias enfrentando maior exposição a esses poluentes.
Thind <i>et al.</i> (2023)	Quantificar e comparar três impactos ambientais do transporte de carga inter-regional nos Estados Unidos: mortalidade total atribuível à poluição do ar por PM2.5, a disparidade racial/étnica na mortalidade atribuível ao PM2.5 e as emissões de CO ₂ .	Impactos por tonelada de carga são maiores para as aeronaves. Entre os modos não aéreos, por tonelada de carga, o trem tem o maior impacto na saúde e na disparidade da saúde, e o menor impacto no clima, enquanto o transporte de caminhão tem o menor impacto na saúde e o maior impacto no clima.
Ye <i>et al.</i> (2023)	Analisar a relação entre o nível de poluente e o grau de urbanização de cidades chinesas, com atenção especial ao UP (<i>Urban Polycentricity</i>)	O incremento da poluição se correlaciona com o policentrismo urbano; contudo, quando esse nível atinge um certo limiar, o aumento de UP passa a ter uma relação inversa com a poluição.
Zhai <i>et al.</i> (2023)	Avaliação da oferta e demanda das funções dos ecossistemas em áreas urbanas densas e identificação de desigualdades sociais relacionadas à oferta e demanda de serviços em Wuhan, China	A capacidade de oferta dos reguladores de ecossistemas está intimamente relacionada à distribuição do uso do solo.

Quadro 6 - Artigos transporte de carga, sociedade e poluentes

Autor	Objetivo e área de estudo	Resultados
Brusselaers <i>et al.</i> (2023a)	Analisar os efeitos da reorientação das rotas de transporte logístico de construção fora de locais de poluição do ar, em Bruxelas	A reorientação das rotas de transporte contribuiu para reduzir em até 25,53% os custos relacionados à saúde, redução das emissões permitem reduzir custos econômicos atrelados aos problemas de saúde gerados pela exposição à poluição do ar.
Brusselaers <i>et al.</i> (2023b)	Relação entre populações vulneráveis e a concentração de poluição do ar produzida pelo TUC em Bruxelas, Bélgica O método envolveu a modelagem espacial e temporal das fontes de emissão e exposição, utilizando dados de telefones celulares e a análise de efeitos na saúde com dados sociodemográficos e localização de instituições sensíveis, como creches e lares de idosos.	Embora as populações vulneráveis representassem pouco mais de um quarto da população total de Bruxelas, elas sofreram 60% dos custos financeiros e de saúde atribuídos à poluição do ar gerada pelo transporte de carga, o que demonstra que existe desigualdade ambiental nessa região.
Chang <i>et al.</i> (2023)	Impacto das políticas de controle de emissão de poluentes para caminhões pesados em Pequim, com ênfase na concentração de PM2.5 e seus efeitos na saúde pública e na economia	As políticas de controle de emissões para caminhões pesados podem ter um impacto significativo na redução da concentração de material particulado e, consequentemente, na melhoria da saúde pública e econômica.
Cidell (2010)	Suburbanização das atividades de armazenagem e transporte de carga nas áreas metropolitanas dos Estados Unidos. Com o uso dos índices Gini como medida de concentração e descentralização das atividades relacionadas ao transporte de carga.	Evidência da descentralização e suburbanização significativas das atividades de transporte de carga

Demetillo <i>et al.</i> (2021)	Avaliar as desigualdades na exposição ao NO ₂ em relação a raça e etnia e a renda. O método envolveu o uso de dados de observação capturados por satélites combinados com análises de padrões de distribuição de poluentes nos Estados Unidos.	Há desigualdades significativas na exposição ao NO ₂ em cidades americanas, com uma média de desigualdade de cerca de 28% de acordo com o indicador estabelecido pelos autores. Além disso, o estudo identificou que o tráfego de diesel é a principal fonte de desigualdades na exposição ao NO ₂ .
Dennis e Jaller (2023)	Estimar os custos de saúde pública associados à emissão de poluentes no transporte rodoviário de carga na Califórnia, com destaque para o PM2.5	Apresentaram-se ferramentas estatísticas para identificar grupos de veículos com características e operações que geram altos custos de saúde pública.
Jephcote e Chen (2011)	Efeitos da exposição das crianças à poluição do ar proveniente do tráfego rodoviário na cidade de Leicester, na Inglaterra: hospitalização respiratória em crianças em relação às circunstâncias sociais e exposições residenciais de emissões de PM10. Os autores utilizaram a Análise de Regressão Geograficamente Ponderada.	Existe uma relação significativa entre as taxas de hospitalização respiratória infantil, o status socioeconômico, minorias étnicas e PM10 gerado pelo tráfego rodoviário.
Maantay (2001)	Como as políticas públicas de zoneamento nos Estados Unidos afetam a saúde pública e a equidade social	O zoneamento acaba concentrando usos nocivos em áreas pobres e minoritárias
Olapiriyakul e Nguyen (2019)	Formular um modelo de planejamento de rede de cadeia de suprimentos com três objetivos (minimização de custo, impacto na saúde pública e uso da terra), utilizando a cidade de Can Tho	Com o modelo criado é possível reduzir os impactos negativos na saúde pública e no uso do solo, além de ser capaz de atender a meta anual de produção, por meio da seleção de localizações ideais para o fornecimento de matérias-primas e distribuição de produtos.

Sahin <i>et al.</i> (2023)	Modelagem baseada em agentes em larga escala, que permitiu estimar as emissões de gases do efeito estufa e níveis de ruído em relação às comunidades impactadas e suas vulnerabilidades em Estados Unidos	comunidades de baixa renda e com maior população não branca são desproporcionalmente impactadas por ruídos e emissões de gases de efeito estufa provenientes do TUC, destacando a necessidade de políticas para mitigar essas desigualdades.
Travis <i>et al.</i> (2023b)	Relação entre a localização de atacados e a poluição do ar em populações marginalizadas em áreas metropolitanas. Os autores analisaram a distribuição socioespacial dos quilômetros percorridos por veículos comerciais de entrega em domicílio de Seattle.	A localização de atacados urbana e a intensidade da atividade de entrega estavam correlacionadas com a exposição à poluição do ar, especialmente em regiões habitadas por populações marginalizadas.
Wang <i>et al.</i> (2023)	Variação da exposição ao NO ₂ gerado pelo transporte rodoviário, usinas de energia e outras fontes entre diferentes grupos étnicos e raciais em Estados Unidos	Grupos raciais e étnicos minoritários nos Estados Unidos estão desproporcionalmente expostos a níveis mais elevados de poluição por NO ₂ em comparação com os brancos.
Yuan (2018b)	Justiça ambiental na localização de armazéns e atacados do período de 2000-2010, relativos à região de Los Angeles utilizando equações simultâneas	Ao contrário dos latinos e asiáticos, a chegada de populações negras em um bairro não leva a um aumento na atividade de armazéns. A pressão do processo de expansão dos armazéns é maior em bairros com mais diversidade étnica
Zhang <i>et al.</i> (2022)	Impacto das emissões de PM dos caminhões a diesel na saúde pública em China. Analisado a partir de dados de trajetórias de veículos equipados com um sistema global de navegação por satélite.	339 mortes prematuras por ano em Pequim são atribuídas a emissões de PM _{2.5} , sendo que a mortalidade por doenças não transmissíveis e infecções respiratórias inferiores aumenta com a idade e é mais frequente em homens do que em mulheres.

2.4.1 Alternativas para mitigar os impactos ambientais

Para complementar o referencial teórico, destaca-se que, diferentes soluções têm sido adotadas para mitigar os impactos ambientais do TUC, porém ressalta-se que é uma problemática interligada a diferentes dinâmicas do TUC e do mercado do consumidor, portanto, é importante estabelecer políticas públicas e soluções que permitam reduzir no curto prazo o problema e visando melhorias ao longo prazo. Dentre as soluções identificadas na literatura tem-se como exemplo o artigo de Koç *et al.* (2016), os quais estudaram e analisaram o impacto combinado da localização dos atacados, da composição da frota e das rotas nas emissões dos veículos na logística urbana, encontraram que um caminho mais curto nem sempre é o caminho mais rápido, mais barato ou menos poluente na logística urbana.

De forma complementar, o estudo de Betancourt *et al.* (2022) demonstrou que a exposição a PM_{2.5} e carbono negro diminuiu quase 50% devido à renovação da frota do sistema de trânsito rápido de ônibus. Destaca-se que estratégias como planejamento da localização, modernização da frota, dentre outras, permitem diminuir a problemática ambiental e social da distribuição do TUC.

2.5 Considerações finais da revisão de literatura

As descobertas na literatura são importantes porque destacam a existência de um problema de justiça ambiental gerada pelo transporte de carga em áreas com populações vulneráveis. Foi apresentado um consolidado dos principais artigos relacionados ao estudo, mas destaca-se que é um tema que tem sido amplamente estudado e que podem ser identificados mais artigos afins que não tenham sido incluídos nesta revisão.

Destaca-se que é um tema que pode ser estudado em diferentes frentes, existem diferentes revisões sistemáticas na literatura que refletem que é uma abordagem que possui diferentes ferramentas, análises e relações estudadas. Por exemplo, Dyer *et al.* (2024) sintetizam estudos urbanos de grande escala focados na interação entre forma urbana, transporte, exposição ambiental e saúde, sua revisão buscou determinar metodologias comuns aplicadas, limitações e oportunidades futuras para melhorar a pesquisa.

Além disso, Glazener *et al.* (2021) apresentam um modelo conceitual para definir as conexões entre transporte e saúde. Como resultado, apresentam 14 conexões identificadas. Eles definem cada conexão e mostram as exposições relacionadas ao transporte e os resultados

de saúde associados, e destacam que as conexões podem ser influenciadas pela desigualdade e pelos modificadores de efeitos intrínsecos e extrínsecos.

A revisão de literatura realizada apresenta que é uma temática em crescente estudo nos últimos anos, associado a uma maior consciência ambiental, e identificou-se que a relação do TUC com a inequidade ambiental tem sido estudada em diferentes frentes, com diferentes metodologias. Além disso, observou-se que a análise depende também de dados disponíveis e do nível de agregação disponível daqueles dados. Além disso, percebeu-se que há autores que analisam o TUC, a concentração ou emissão de poluentes e a vulnerabilidade social de forma conjunta, mas, a tendência está mais centralizada em analisar o problema por partes, por exemplo só duas das três variáveis.

Destaca-se que a justiça ambiental tem sido um tema de constante aumento do interesse dos pesquisadores e órgãos públicos, na procura de diminuir as diferenças sociais, como foi observado na revisão de literatura realizada, na qual, observou-se um aumento nos estudos nos últimos 5 anos. A justiça ambiental está interligada a diferentes conceitos como a saúde e não se limita apenas à exposição desigual a poluentes, mas abrange também o direito de populações vulneráveis a viver em ambientes limpos e saudáveis, como parte de seus direitos humanos fundamentais, e torna-se também importante a procura de uma justiça intergeracional, ou seja, o impacto da poluição em gerações futuras, especialmente em áreas urbanas onde a logística e o transporte de carga crescem de forma exponencial.

Percebe-se que geralmente analisa-se o transporte de carga em diferentes modais sem ser especificamente o transporte urbano, como por exemplo o artigo de Travis *et al.* (2023b) que é focado nos produtos de *e-commerce*, analisando o tipo de entrega de *Business to Customer*, e não *Business to Business*. Portanto, existe uma lacuna de pesquisa ao focar o estudo no transporte urbano focado na localização de atacados que distribuem os produtos já seja aos clientes ou aos varejos e pontos de venda comerciais dentro da cidade.

Na literatura é comum ser estudado o CO₂, porém é importante estudar poluentes que estão maiormente interligados ao transporte de carga por motores Diesel como o PM_{2.5}. Observou-se também que existe uma lacuna de pesquisa em analisar o impacto do PM gerado pelo TUC nas populações desfavorecidas em uma escala de bairro, setor ou localidade, já que as pesquisas geralmente abordam a temática em nível de cidade ou de vias ou segmentos. Por fim, percebe-se que é um tópico que não tem sido suficientemente estudado no Brasil, já que os artigos identificados foram realizados em países europeus, Estados Unidos ou na China.

Portanto, é importante pesquisar a nível municipal em Fortaleza, Brasil, os indícios da evolução da relação entre a localização dos atacados com a geração de poluentes e como

estes impactam na sociedade e quais populações são mais afetadas. Independentemente dos resultados obtidos, o estudo permite um maior entendimento da logística da cidade e dessa maneira contribuir de forma significativa com o entendimento do sistema e como o planejamento adequado do sistema de transporte de carga pode mitigar os impactos sociais e ambientais gerados pela sua produção de viagens.

Com isso, esta pesquisa apresenta discussões relevantes que permitem repensar o planejamento urbano e compreender as relações entre os diferentes fatores envolvidos no transporte de cargas. Trata-se de uma temática multidisciplinar, em que, por exemplo, a justiça ambiental também implica custos econômicos significativos para a saúde pública. Dessa forma, a exposição desigual à poluição não é apenas uma questão ética e moral, mas também um problema econômico, com implicações orçamentárias para os governos e para a sociedade.

De acordo com o que foi supramencionado, identifica-se que a metodologia de obtenção de dados deve centrar-se na definição de indicadores que permitam estudar o fenómeno, os poluentes devem ser de tipo local como NO₂ ou PM_{2.5}. Por outra parte, os indicadores de vulnerabilidade e TUC devem ser definidos de acordo com o escopo desejado. Da mesma forma, deve ser apoiado com análises gráficas, estatísticas e percentuais para estudar a existência ou não de relação entre o TUC e os poluentes, e como essa geração está impactando a sociedade e se está sendo maior em determinados grupos populacionais, pode-se também contribuir metodologicamente para a obtenção e análise de dados a nível local.

A análise previa permite estabelecer a questão de pesquisa do presente documento, sendo ela: *Como o TUC está relacionado às concentrações de poluentes (PM_{2.5}) e à inequidade ambiental?*

3 MÉTODO

Nesta seção, apresentam-se os procedimentos metodológicos adotados para a realização do estudo, destaca-se a importância de contar com dados que permitam quantificar as variáveis que são alvo de estudo (localização de atacados, PM2.5 e vulnerabilidade) é indispensável que o nível de agrupamento dos dados permita realizar comparações em diferentes localizações da cidade por exemplo na escala de bairro.

Escolheu-se como área de estudo a cidade de Fortaleza, no estado do Ceará, Brasil. A análise é realizada de forma espacial por camadas de polígonos do mapa de Fortaleza (classificados por bairros e por hexágonos), os bairros por ser uma divisão administrativa e os hexágonos para uma análise uniforme, realiza-se por bairros e hexágonos com o intuito de realizar uma análise comparativa e observar se existem diferenças segundo a divisão espacial escolhida.

Os hexágonos foram obtidos do trabalho de Pinheiro *et al.* (2025) onde os autores adotaram uma abordagem de divisão espacial uniforme, com o objetivo de garantir homogeneidade espacial e evitar disparidades em termos de área e forma. Para isso, os autores escolheram a divisão hexagonal, reconhecida por sua relevância e aceitação entre profissionais e planejadores urbanos. Cada hexágono possui 1.700 metros de lado, valor que corresponde à distância média observada para viagens de carga, conforme dados do Pesquisa de Origem – Destino PASFOR, da Prefeitura de Fortaleza (2019). Essa metodologia resultou em uma malha composta por 147 hexágonos.

A análise por bairros permite entender o fenômeno a partir duma divisão espacial administrativa da cidade, e nas diferentes bases de dados existe facilidade em classificar os dados por bairros, porém, existe a limitação que os bairros tem tamanhos diferentes e populações diferentes, por esse motivo, precisar-se-ia standardizar. Por essa limitação, optou-se também usar a divisão por hexágonos, para retirar os impactos que poderiam ser gerados pelo tamanho do bairro ou quantidade de pessoas no bairro e não pelo fenômeno de estudo.

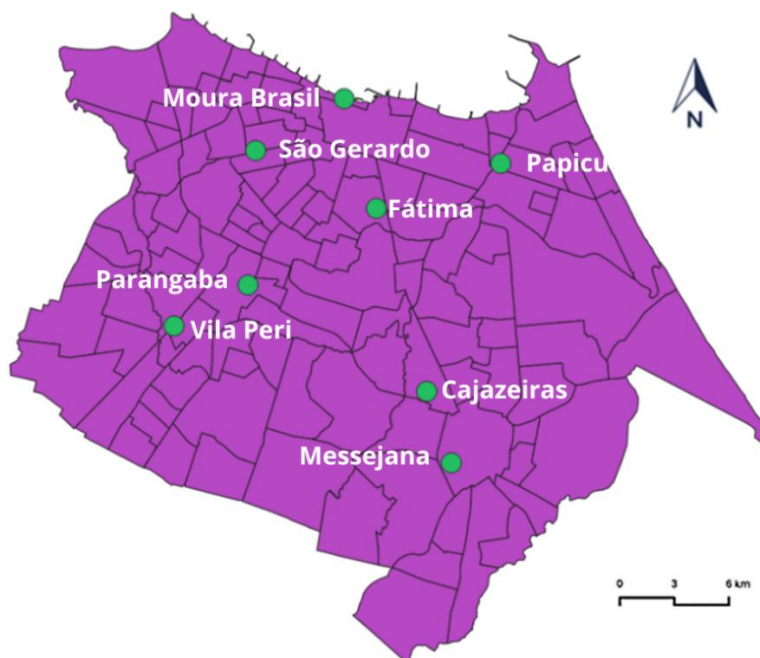
Para abordar o primeiro objetivo específico, precisa-se dum indicador que permita caracterizar os impactos ambientais do TUC; para o TUC conta-se com informação de localização histórica dos atacados na cidade, essa base de dados permite caracterizar a evolução temporal da decisão estratégica de origem do TUC na cidade. Por outro lado, para o PM2.5 destaca-se o uso de dados de satélites com apoio de ferramentas como modelos de regressão ou machine learning, como no trabalho de Handschuh *et al.* (2022).

Para prever PM2.5 utilizou-se uma base de dados de uma estação de monitoramento

da qualidade do ar da Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente (SEUMA), essa estação foi alocada em um ponto da cidade com fluxo de transporte de carga e depois de alguns meses trocava-se de local, em total esteve localizada em oito pontos da cidade, e o período de análise foi de quatro anos de 2020 até 2023, os pontos onde esteve localizada a estação podem ser encontrados na Figura 2, a estação estava localizada em Cajazeiras no ano 2020, no ano 2021 estava no bairro de Fátima, no ano 2022 trocava em média cada três meses, até fevereiro foi localizada também no bairro de Fátima, e depois Moura Brasil, São Gerardo, Parangaba e Papicu, no ano 2023 começou em Papicu, posteriormente 3 meses em Vila Peri, 3 meses em Messejana e em setembro voltou um mês para Cajazeiras.

A estação fornecia dados meteorológicos como temperatura e umidade e de poluentes como NO_2 e PM. Esta estação é a melhor ferramenta de medição de qualidade em escala local disponível na cidade. O tratamento dos dados para prever o $\text{PM}_{2.5}$ será uma contribuição metodológica, já que não se tem dados suficientes para projetar os níveis de $\text{PM}_{2.5}$ na cidade em anos anteriores e em diferentes pontos, essa previsão permitirá abranger o segundo objetivo específico.

Figura 2 - Pontos da estação de monitoramento



Fonte: Autor (2023).

De forma complementar, com o intuito de estudar as diferenças mensuráveis e observáveis na exposição à poluição atmosférica nas dimensões sociais, deve-se estimar algum indicador que permita mensurar onde estão localizadas as populações que podem sofrer o

impacto da inequidade na concentração de PM gerado pelo TUC. Martens *et al.* (2019) classificam diferentes tipos de indicadores para medir equidade. Utilizando-se a dimensão da poluição relacionada ao transporte, os autores afirmam que as externalidades negativas produzidas pelos transportes podem contribuir para o aumento das desigualdades na saúde, uns dos indicadores sugeridos são o aumento da morbidade e a incidência de doenças respiratórias na população. Fairburn *et al.* (2019) apresentam uma tabela com as diferentes dimensões sociais comumente utilizadas para avaliar equidade; por exemplo, etnia, ocupação, gênero e posição econômica.

Por fim, para atingir os objetivos específicos 3 e 4, ressalta-se que a análise deve ser feita de forma espacial e temporal, com o intuito de analisar indicadores e padrões históricos e de localização na área de estudo que permitam caracterizar o fenômeno. Visando que a localização dos atacados é uma decisão estratégica de longo prazo, deve ser estudada com intervalos temporais significativos que permitam estudar se existem mudanças temporais nos padrões a serem estudados, por tal motivo, estudar o século XXI é suficiente para analisar o foco de estudo de forma temporal e espacial e entender se os resultados são dum período específico ou se vem se desenvolvendo com o decorrer dos anos, por exemplo com mudanças do uso do solo ou o próprio espraiamento logístico.

Em resumo, primeiro devem ser obtidos os dados de localização de atacados, vulnerabilidade e PM2.5 na cidade, e posteriormente deve ser analisada a relação espacial e temporal entre as variáveis por meio de indicadores de correlação e associação. A análise também é feita de forma temporal, mês a mês durante as últimas 3 décadas (o século XXI, desde 2000 até 2023).

Cada base de dados pode ter diferentes horizontes temporais, no caso dos atacados tem-se dados ano por ano, no PM2.5 os dados são desde 2020 até 2023, e na vulnerabilidade tem-se diferentes anos como 2018, e de 2014 até 2023, assim que, é necessário complementar os dados medidos reais com modelos para projetar nos anos ou bairros onde não se conta com dados, e assim, todas as bases de dados estejam na mesma escala temporal e espacial.

3.1 Localização dos atacados

Como indicador dos atacados, conta-se com a base de dados histórica da localização dos atacados da cidade desde o ano 1960 até o ano de 2022 fornecida pela Secretaria de Finanças do Município de Fortaleza. A base de dados foi obtida no formato *PostgreSQL*, que possui endereço de cada estabelecimento, isto permitiu fazer análise geográfica. Para isso, trataram-se

os dados com a API do *Google* (do inglês, *Application Programming Interface*) com o objetivo de georreferenciar os endereços para se obter a latitude e longitude de cada ponto e assim poder analisar de forma espacial, posteriormente plotou-se no QGIS para associar cada ponto a sua camada de polígono, para identificar o número de estabelecimentos por polígono.

A escolha da localização dos atacados como indicador de TUC baseia-se que os atacados são uma fonte de geração de necessidades de fluxo de transporte de carga, já que os produtos devem sair do atacado até as lojas ou o cliente final, portanto, é um polo gerador de demanda de transporte de caminhões urbano, adicionalmente, ressalta-se a disponibilidade de dados, já que a base de dados permite desagregar no nível de rua.

3.2 Concentração de Poluentes - Material particulado

A partir da base de dados de PM da SEUMA pode-se identificar como limitante o fato de só ter dados em oito pontos da cidade. Portanto, precisa-se ter dados dos diferentes pontos da cidade que não foram avaliados pela estação. Para isso, é importante primeiro analisar a relação existente entre os dados da estação com o intuito de identificar as melhores ferramentas de análise e projeção, assim que, primeiramente calculou-se a correlação entre o PM_{2.5} e as outras variáveis que foram medidas na estação (umidade relativa, velocidade do vento, NO_x, NO₂ direção do vento, temperatura).

O alvo da análise é prever as concentrações de PM_{2.5} a partir de outras variáveis, dado que, não se conta com dados de PM_{2.5} já que não há outras estações de monitoramento espalhadas pela cidade. Enquanto que as outras variáveis como temperatura, vento, e outras variáveis explicativas podem ser obtidas com estações de monitoramento ou dados satelitais. Esta previsão permite atingir o segundo objetivo específico da pesquisa.

Em síntese, procura-se estimar os níveis de material particulado a partir de variáveis disponíveis e que possam estar relacionadas com a concentração de PM_{2.5}, utiliza-se como variáveis preditoras dados meteorológicos (temperatura, velocidade do vento, direção do vento e umidade relativa), dados espaciais (distância ao mar) e dados de outro poluente como NO₂.

Identificou-se a necessidade de contar com outras variáveis explicativas além das medidas pela estação, já que a concentração de PM_{2.5} é um fenômeno complexo, e portanto é adequado contar com diferentes variáveis explicativas, nos trabalhos de Handschuh *et al.* (2022) e Couto *et al.* (2020) foram incorporadas informações de quantidade de aerossol do satélite da NASA MODIS *Aerosol Optical Depth* 550 nm, o aerossol pode ser partículas como areia, partículas finas e material particulado, quer dizer, o PM_{2.5} está incluído dentro do aerossol e

por isso é uma variável comumente utilizada.

Destaca-se que o NO₂ medido pela estação não pode ser calculado em outros pontos da cidade, uma vez que os satélites medem o NO₂ na atmosfera, sendo a medição atmosférica diferente a medição em terra da estação, em vista que o desejado é poder ter dados de PM_{2.5} em toda a cidade o NO₂ deve ser excluído como variável explicativa.

Todos os dados são da estação hora a hora, com exceção dos dados do satélite para aerossol, o satélite passava em determinados momentos do dia e registrava dados nos momentos nos quais não houver presença nuvens, assim que, deve-se cruzar os dados para obter registros onde tem dados tanto da estação quanto o satélite. Os dados da estação estão entre os anos de 2020 e 2023, com períodos horários, enquanto o satélite geralmente circulava entre 11h e 17h. O intuito é no ponto onde estava a estação por cada hora saber quanto foi a quantidade de aerossol.

A decisão do satélite MODIS sustenta-se nos trabalhos de Handschuh *et al.* (2022) e Couto *et al.* (2020) e, destaca-se que o satélite tem uma boa resolução (ao redor de 1000 metros quadrados por pixel), além disso, esse satélite tem dados desde o ano 2000, diferente de outros satélites como Sentinel 5p que só tem dados disponíveis a partir de 2018. Além disso, ao observar a documentação dos satélites no *Earth Engine*, observa-se que o Modis calcula os aerossóis absorventes e não absorventes na superfície, enquanto outros satélites como o Sentinel 5p medem apenas aerossóis que absorvem luz UV, portanto seu foco é mais em relação a outros materiais, como poeira, enquanto o aerossol do MODIS pode estar diretamente relacionado ao material particulado.

Para os tratamentos dos dados satelitais, obtêm-se a imagem em formato tif, um formato de pixel onde cada pixel está localizado em uma parte do mapa e tem uma cor na escala de preto-branco de acordo à quantidade de aerossol, realizou-se o tratamento das imagens *tif* com a livreria geotiff do Python, essa livreria calcula o valor do pixel na coordenada indicada, quer dizer, a quantidade de aerossol na coordenada, que neste caso foram os oito pontos da estação. A análise por imagens, entende-se como que o nível de intensidade de cor atrela-se a um valor dentro da escala, portanto cada cor dentro da imagem representa a quantidade de aerossol neste caso, um exemplo pode ser encontrado na Figura 3 que apresenta a imagem no Qgis plotada na cidade de Fortaleza

Figura 3 - exemplo Pixel aerossol QGIS



Fonte: Autor (2024).

Posteriormente, cruzam-se os dados do satélite com os dados da estação, quer dizer, adiciona-se uma variável/coluna à base de dados da estação, essa variável é a quantidade de aerossol, essa estação tinha em total mais de 13000 dados (horários entre 2020 e 2023, cada certo tempo ia trocando de local da medição), porém, só se conseguiram 345 observações nos quais o satélite coincidia com a estação entre 2020 e 2023, o que evidencia uma perda significativa de observações devido o satélite não ter observações para todos os horários esperados. Destaca-se mesmo tiver uma perda na quantidade de dados, o aerossol é uma variável preditora comumente usada na literatura e, portanto, pode-se garantir um modelo robusto.

Para fazer a previsão, inicialmente realizou-se um modelo de regressão linear para prever PM_{2.5} a partir das outras variáveis, porém, pelo fato de que as relações entre as variáveis são não lineares não se conseguiu capturar uma boa precisão para a previsão. Isso leva à necessidade de provar ferramentas para modelos não lineares. Portanto, elaboraram-se diferentes modelos de *machine learning* como redes neurais ou *Random forest*. A escolha baseia-se a que na revisão de literatura da seção 2, identificou-se que os modelos de machine learning são apropriados para tentar prever variáveis de poluição como MP_{2.5} e NO₂.

Como foi mencionado, optou-se por realizar modelos de *machine learning*, realizou-se tanto *Random forest* quanto redes neurais, para posteriormente comparar a precisão de cada um dos dois modelos. Primeiro, é realizado o tratamento dos dados para evitar dados

errados ou faltantes, destacando que o modelo é treinado com os dados da estação e o satélite MODIS. Os modelos são realizados em *python* com as livrerias de *Scikit-Learn* e *Torch*, as suas camadas de entrada para o treinamento são a temperatura, a umidade, a velocidade e direção do vento, o ano, a distância ao mar, e a quantidade de aerossol.

A calibração é feita com os dados reais de PM2.5 da estação e a saída é a quantidade de PM2.5. Normalizaram-se as variáveis preditoras, dividiram-se os dados em 80% de treino e 20% para teste e, além disso, 20% dos dados de treino foram utilizados para a validação. Portanto, o modelo é treinado, e depois valida-se sua precisão calculando o R^2 implementando o modelo nos dados de teste e validação.

Enquanto a estrutura dos modelos, o *Random Forest* é modelado de forma simples com a livreria *RandomizedSearchCV* que permite testar a melhor configuração dos diferentes hiper parâmetros como a profundidade, o número de estimadores e a quantidade de amostras. Por outra parte, no modelo de *redes neurais*, na primeira iteração criaram-se diferentes modelos com diferentes tamanhos de camadas e de neurônios, e avalia-se o Erro quadrático médio raiz (RMSE) para determinar qual é o valor ótimo de camadas e neurônios.

Ajustou-se também os hiper parâmetros como o critério de parada ou número de épocas, entende-se como época como uma passagem completa por todo o conjunto de dados de treinamento, durante a qual o modelo ajusta seus pesos com base no erro calculado. Por cada iteração realizaram-se 100 épocas e o critério de parada foi se completaram-se as 100 épocas ou se durante 20 épocas as melhorias não eram maiores do que 0.0001 do RMSE da época anterior. Utilizaram-se técnicas de melhora dos hiper parâmetros como o otimizador Adam e remoção de dados atípicos.

Os modelos de *machine learning* e *Random Forest*, e os códigos de *python* para as diferentes análises utilizados ao longo da pesquisa estão disponíveis no Anexo 1.

Posteriormente, tendo o modelo pronto, escolhe-se qual dos dois modelos é mais preciso, a partir disso se pode prever os dados de MP2.5 por bairro ou hexágono, tem-se os dados satelitais por períodos do dia (manhã, meio-dia, tarde e noite) desde 2000 até 2023 de cada variável explicativa, como cada uma tem diferentes períodos de dados disponíveis, cruzam-se os dados e mantem-se os dias que tem dados de todas as variáveis. A partir disso, calcula-se os níveis diários de PM2.5 por bairro, e posteriormente calcula-se a média mensal de PM2.5 em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por polígono.

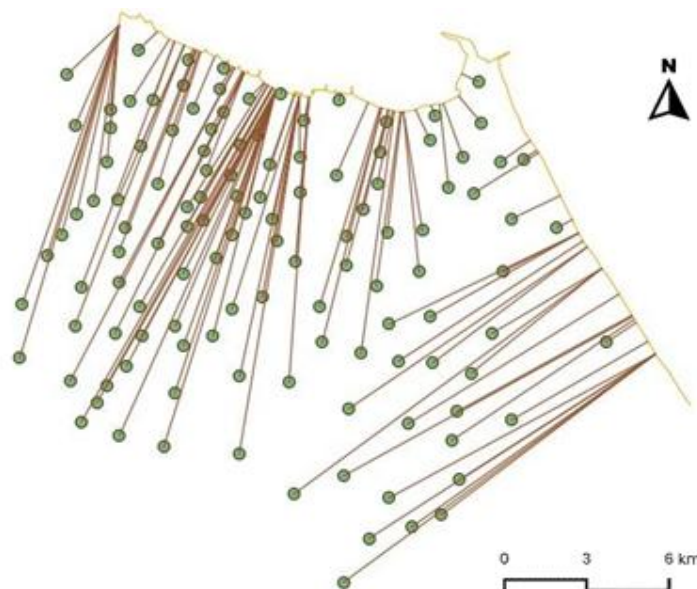
Para a previsão, precisou-se ter os dados de cada uma das variáveis preditoras, portanto, é importante determinar a temperatura média horaria ($^{\circ}\text{C}$) por bairro ou hexágono, a velocidade e direção média do vento, a distância ao mar (m/s e graus respectivamente), umidade

(porcentagem relativa de 0 a 100%). Assim, utiliza-se o modelo para prever desde o ano 2000 até 2023 em todos os bairros de Fortaleza.

As variáveis explicativas foram calculadas com imagens satelitais e com *Qgis*, obteve-se a temperatura, velocidade do vento e direção do vento utilizando o satélite de *Copernicus (ERA5 Daily Aggregates)* que fornece dados de temperatura e componentes de vento *u* e *v*, dois componentes que permitem calcular a velocidade e direção do vento na cidade toda, com diferentes pixels que permitem classificar cada variável por bairro.

Para a umidade utilizou-se o satélite de *Noaa (Global Forecast System)* desde o ano 2015, para anos anteriores estimou-se a umidade relativa a partir de dados como umidade absoluta e precipitação obtidas do satélite da NASA (*Goddard Space Flight Center - Global Land Data Assimilation System*). Para o aerossol utilizou-se o *Modis Aerosol Optical Depth*. Todas as imagens satelitais foram obtidas em *Google Earth Engine*. Para calcular a distância ao mar (em metros), na Figura 4 calculam-se os centroides dos polígonos e as retas desenhadas pelo *Qgis*, sendo a mínima distância do ponto ao mar, a reta amarela é toda a área de Fortaleza limítrofe com o mar, decidiu-se por centroide já que permite ser o ponto meio do bairro e portanto é mais significativo, no caso dos hexágonos é mais perceptível que o centroide é o ponto mais adequado para determinar a distância ao mar do hexágono.

Figura 4 - Distância ao mar



Fonte: Autor (2024).

A partir desses dados é possível calcular a quantidade de PM2.5 por ponto em qualquer ano e mês desejado utilizando o modelo que tiver melhores resultados. Considerando

que os dados de atacados se analisaram por mês, deve ser calculado a média mensal, existe um nível de agregação que pode aumentar o erro, mas é um ponto de partida adequado.

3.3 Índice de Vulnerabilidade social

Para definir o índice de vulnerabilidade por bairro ou hexágono por mês, tomou-se como referência o estudo de Martens *et al.* (2019) no qual classificam diferentes tipos de indicadores para medir equidade. Assim, determinou-se que deve se avaliar diferentes fontes de dados para estabelecer qual é o indicador mais adequado, que permita fazer uma análise na escala desejada, que estivessem relacionados com o fenômeno e que conte com dados disponíveis. A condição econômica é conceito frequentemente utilizado, portanto, indicadores como renda são pertinentes para avaliar equidade, outro conceito importante é incluir indicadores relacionados à saúde como acessibilidade ou hospitalizações. Considerando descrito, utilizaram-se três fontes diferentes de dados para avaliar equidade.

Primeiramente, na dimensão econômica, utilizaram-se dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), que calcularam o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) por bairro na cidade de Fortaleza nos anos 2000 e 2010, ambos cálculos foram obtidos a partir do censo dos anos 2000 e 2010 elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O IDH permite avaliar a vulnerabilidade em diferentes dimensões, pois este contém indicadores de educação, longevidade e renda para cada bairro de Fortaleza, encontra-se numa escala de 0 a 1, sendo que, quanto mais próximo de 1 o seu resultado, melhor o desenvolvimento humano de um bairro.

Porém, o IDH só está disponível por bairro e não num nível mais desagregado, portanto, o IDH limita-se à análise por bairro e não pode ser utilizada para analisar outras geometrias mais desagregadas como hexágonos, além disso, o fato de somente ter dados de 2000 e 2010 e nenhum dado de anos recentes, limita a análise temporal.

A segunda base de dados analisa a vulnerabilidade desde o ponto de vista da saúde, e consiste em diferentes bases de dados de saúde em formatos de CSV e Parquet, focado em atendimentos médicos por doenças respiratórias na cidade, já que o PM2.5 está relacionado com afetações no sistema respiratório. Os dados que conseguiram-se ter disponibilizados foram obtidos do SUS (Sistema Único de Saúde) e de um Hospital universitário que atende diferentes pontos da cidade.

As diferentes bases de dados têm informações de internações ou medicina ambulatorial das seguintes doenças: doença cardiovascular, doença pulmonar obstrutiva crônica,

doença respiratória, câncer de pulmão, acidente vascular cerebral, infecções do trato respiratório, doença isquêmica do coração. Os dados têm cada um dos pacientes, o ano e mês da internação ou do atendimento, se houve óbito ou não, características sociodemográficas do paciente, e dados de localização do paciente e do centro de atendimento, a unidade de medida a ser utilizada e número de internações ou atendimentos por bairro ou por hexágono.

Dentre as bases de saúde, encontram-se dados de atendimento por pneumonia em adultos e em pacientes pediátricos em um hospital universitário da cidade no período entre janeiro de 2023 e dezembro de 2023. Tem-se também a base do SUS com dados de internações hospitalares na cidade desde janeiro de 2010 até setembro de 2023. A seguinte base tem dados de mortalidade compreendidos no intervalo temporal de janeiro de 2010 até dezembro de 2022. Conta-se também com dados de atenção primária (*fastmedic*) desde janeiro de 2014 até dezembro de 2023 e finalmente a base de dados de atendimentos ambulatoriais a partir de dezembro de 2009 e até dezembro de 2023.

A terceira base de dados, é um indicador de vulnerabilidade que avalia diferentes condições socioeconômicas da população, e consiste no endereço das pessoas que estão cadastradas no CadÚnico no ano 2018, este é um cadastro que identifica e caracteriza as famílias de baixa renda residentes em todo território nacional, sendo o principal instrumento do Estado brasileiro para a seleção e a inclusão de famílias de baixa renda em programas federais, usado para a concessão dos benefícios do Programa Bolsa Família, do Pé de Meia, da Tarifa Social de Energia Elétrica, do Auxílio Gás, do Programa Minha Casa Minha Vida, entre outros. Além disso, ele também serve como critério para a seleção de beneficiários de programas oferecidos pelos governos estaduais e municipais.

Tratou-se a base de dados com os endereços das pessoas, aplicou-se o georreferenciamento com a API do Google e com a API de *Nominatim* de *OpenStreetMap*, e depois classificou-se por bairro e hexágono em QGIS. A unidade de medida é o número de pessoas cadastradas no CadÚnico por bairro ou hexágono, entende-se que a maior número de pessoas cadastradas no CadÚnico reflete uma maior exposição social, pois tem-se mais pessoas em situação de vulnerabilidade.

Essas três bases de dados são cruzadas para analisar a correlação entre as mesmas e, assim, determinar uma medida de vulnerabilidade que seja robusta, baseada em diferentes fontes de dados que permitem interligar as diferentes análises e focos que podem ser desenvolvidos para avaliar quais pontos da cidade estão mais expostos a situações de inequidade.

Para determinar o nível de vulnerabilidade por bairro, foi estabelecido um critério

de peso para cada variável. Primeiramente, cada variável é normalizada para que todas fiquem no intervalo de 0 a 1, e em seguida são atribuídos os pesos, Para CadÚnico e IDH pelo fato de abarcar diferentes dimensões sociais decidiu-se assignar um peso de 40% cada, e os níveis de saúde recebem um peso de 20%. Os dados do CadÚnico são usados da mesma forma para todos os meses e anos, os dados do IDH são usados a partir do IDH do ano 2000 para os primeiros 5 anos, o IDH de 2010 para os anos de 2005 a 2015, e realiza-se uma projeção do IDH para 2020 para os outros anos. A fórmula 1 apresenta como foi calculado o índice de vulnerabilidade.

$$Vulnerabilidade_i = \alpha * CadÚnico_i + \beta * IDH_i + \gamma * Hospital_i \quad (1)$$

$$\alpha = \beta = 0.4, \gamma = 0.2$$

Para outras dimensões espaciais da cidade como por exemplo, hexágonos devem ser usados só os dados do hospital e do CadÚnico, já que os dados de IDH só podem ser usados no nível de bairro. O CadÚnico recebe um peso de 60% e as hospitalizações um peso de 40%. O índice de vulnerabilidade permite identificar em quais regiões da cidade encontra-se população com maior vulnerabilidade e por tanto tem maior propensão a ter agravos pelos impactos do TUC e ao mesmo tempo menor acessibilidade a sistemas de saúde adequados.

3.4 Modelagem temporal e espacial de dados faltantes

As escalas temporais e espaciais diferem entre as bases de dados, então, precisa-se de modelos para prever dados faltantes para poder realizar a análise temporal do objetivo específico. Para o PM2.5, o modelo de *machine learning* permite estimar os dados para diferentes anos e locais. Por outra parte, na vulnerabilidade, na dimensão de saúde, tem-se a limitação de disponibilidade de dados, só desde o ano 2014, por esse motivo, realizou-se um modelo *backasting* (para trás) de séries temporais, no qual, em cada ponto, realiza-se uma série temporal investida para prever qual foi o valor no passado, cuja metodologia pode ser acessada no link: (<https://otexts.com/fpp2/backcasting.html>). Utilizou-se como método da série temporal o algoritmo de ARIMA, devido à sua flexibilidade para capturar diferentes tipos de padrões nos dados, como sazonalidade, ciclos ou tendências, assim como também é uma metodologia de fácil implementação no *software R*.

3.5 Análise estatística entre as variáveis

Para a análise da relação entre as variáveis de TUC, IVS e PM2.5 que permitam atingir o objetivo específico número 3, investigaram-se os índices clássicos de Moran Global e Local e análise LISA para compreender os padrões de distribuição espacial, assim como também a correlação e análise visual de padrões espaciais. Toma-se como ponto de partida a análise visual, posteriormente, calcula-se o índice de Moran que calcula a correlação espacial entre as variáveis e o índice de LISA que calcula as relações espaciais de cada polígono, este indicador por exemplo permite observar se um bairro com altos níveis de PM2.5 está cercado por bairros com altos níveis de IVS, o que permite observar se existem associações entre as variáveis. Calculou-se a matriz de vizinhança usando como critério o compartilhamento de fronteiras entre bairros (torre), se era só um vértice não foi considerado como vizinho.

Calcula-se também a relação das variáveis com o uso do solo, conta-se com um *shape* do uso do solo da cidade de Fortaleza do ano 2022, o nível de desagregação é no nível de casa/quarteirão, por tanto, para determinar o tipo de uso de solo por bairro ou hexágono, deve ser classificado por tipo de solo predominante, o tipo de solo pode ser territorial, residencial ou não residencial, portanto, calcula-se por área qual é o tipo de solo mais representativo, como critério, tem-se que se mais do 50% do uso do solo dum local é duma categoria, por exemplo residencial, então classifica-se como residencial, nos casos que dois solos tem predominância semelhante, determina-se que tem uso de solo misto entre essas duas categorias. Destaca-se que o uso do solo varia com o decorrer dos anos, portanto, toma-se exclusivamente 2022 para ter como padrão de comparação para evitar complexidade na análise.

Para o objetivo específico 4, é importante entender a evolução temporal da relação entre as variáveis, com o intuito de saber se existe relação entre elas e se com o decorrer dos anos os padrões têm-se mantido ou existem diferenças temporais; combina-se análise visual e ferramentas estatísticas que permitam um melhor entendimento do fenômeno, inicialmente, é calculada a evolução temporal do Índice de concentração de *Herfindahl-Hirschman*, é uma técnica usada na economia para analisar monopólios e porcentagens de participação de mercado, e que pode ser implementada para identificar se os fenômenos na cidade estão concentrados em um determinado local ou se estão distribuídos de maneira mais uniforme, esse indicador calcula o nível de concentração de uma variável, entende-se como concentração como que poucas zonas tendem a acumular a maioria dos recursos. Por exemplo, no caso dos atacados, se seu valor aumenta com o tempo, significa que, com o passar do tempo, a concentração de atacadistas em determinados setores aumenta, o que daria a entender que estão

se agrupando em determinadas zonas da cidade, um aumento deste índice reflete que zonas em específico da cidade estão tendo uma maior concentração de atacados, níveis de PM2.5 ou pessoas com vulnerabilidade social.

Agora, deve ser calculado a relação entre as variáveis de forma temporal, já que o índice HHI calcula cada variável de forma autônoma, portanto, utiliza-se o índice de co-integração de *Engle-Granger*, este índice é calculado para analisar a evolução do tempo, devido a que permite a identificação de relações de longo prazo entre as variáveis, de modo que é possível saber se o comportamento temporal de uma variável está relacionado a outra. Este índice é usado para identificar se duas ou mais séries temporais possuem uma relação de equilíbrio de longo prazo, quer dizer, apesar de as séries variarem independentemente no curto prazo, existe uma combinação linear delas que permanece estável ao longo do tempo. Desse modo, o índice de *Engle-Granger*, permite identificar se existem relações entre as evoluções temporais do índice HHI de cada variável, quer dizer, se o aumento na concentração duma variável pode estar associado com a aumento da concentração de outra variável.

Entende-se que os índices temporais estudam associação entre as variáveis, não pode ser falado de causalidade, por exemplo, no cenário no qual o aumento do HHI da quantidade de atacados e o aumento do HHI do IVS, entender-se-ia que as variações nos níveis de concentração de TUC também têm impacto sobre as variações na concentração de IVS, de modo que, quando o TUC começa a se concentrar em determinadas áreas da cidade, isso pode estar associado com uma maior vulnerabilidade na qualidade de vida das populações em determinadas áreas da cidade. Assim que, os dois indicadores escolhidos permitem um maior entendimento da relação espacial e temporal das variáveis.

Utilizaram-se os *Softwares Python* e *GeoDa* para realizar a análise estatística, são ferramentas de *software* gratuitas e de código aberto que facilitam a análise de dados e o cálculo de indicadores, explorando e modelando padrões espaciais. É importante compreender o fenômeno a partir dos diferentes aspectos e comportamentos da cidade, portanto, a análise não se limita apenas às ferramentas estatísticas, mas também do ponto de vista do pesquisador tentou-se compreender qualitativamente como tem sido a evolução da dinâmica da cidade de acordo com os resultados projetados pelos mapas elaborados. O método descrito representa uma contribuição para a literatura, uma vez que poucos estudos analisam o impacto ambiental do TUC nas populações a escalas mais desagregadas como bairros ou hexágonos, esta limitação de método e dados dificulta a análise, pelo que o método proposto foi o melhor que pode ser analisado com os dados disponíveis. Assim, contribui-se para que outros investigadores possam replicar a metodologia de acordo com os dados que estão disponíveis na sua área de estudo.

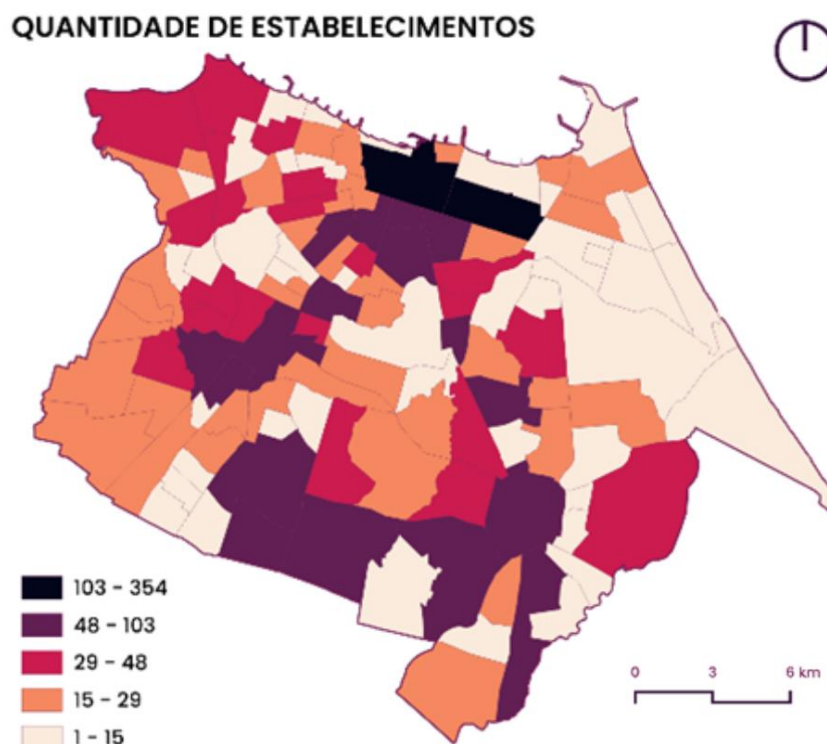
4 RESULTADOS

Nesta seção, são descritos os resultados das análises do banco de dados. Primeiro, são apresentadas as análises descritivas e visuais do TUC (número de ataques), PM2.5 e vulnerabilidade (IVS), alinhadas com os objetivos específicos 1 e 2. Em seguida, a relação das três variáveis é analisada espacialmente e, depois, é realizada a análise temporal, abrangendo os objetivos 3 e 4 e o objetivo geral da pesquisa.

4.1 Análise dos ataques - TUC

Para a análise preliminar dos dados, plotou-se a localização dos ataques mês a mês desde 2000 até 2022. A distribuição espacial no decorrer dos anos é estável, com os mesmos padrões de distribuição espacial, porém, observou-se um fenômeno de diminuição do número de ataques ao longo dos anos. Para uma noção inicial da distribuição, plotaram-se os ataques na cidade na última década, como pode ser observado na Figura 5.

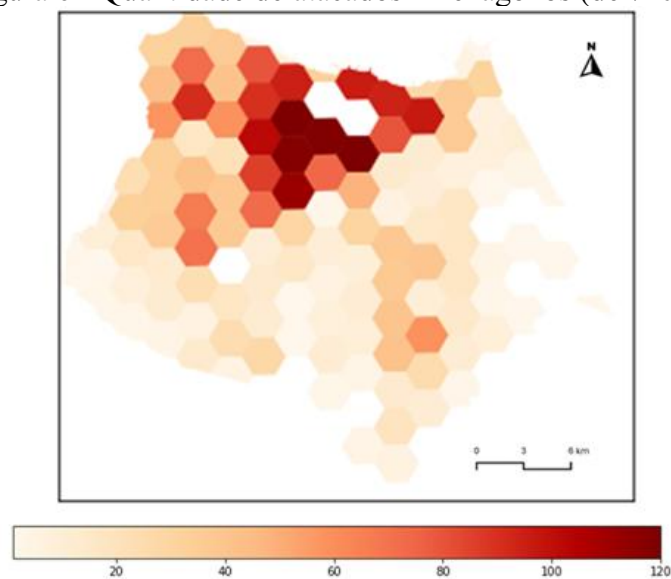
Figura 5 - Localização dos ataques última década, Fonte: Autor



Fonte: Autor (2025).

Percebe-se maior concentração no centro da cidade e Aldeota (bairros de cor preta, esquerda Centro e direita Aldeota) e suas imediações, o setor sudeste também têm uma forte presença de atacados. Os bairros do Centro e Aldeota são os que têm maior quantidade de atacados, isso se deve, por exemplo, ao fato de serem áreas altamente comerciais e porque podem ser o endereço fiscal e a sede da empresa, portanto, para melhorar a análise, foi estudado o comportamento sem essas áreas. Na Figura 6 apresenta-se o gráfico espacial com a distribuição por hexágonos excluindo o centro e Aldeota.

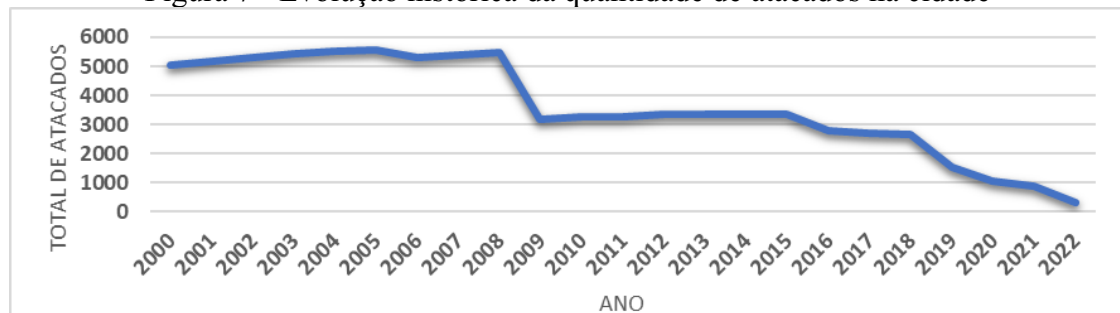
Figura 6 - Quantidade de atacados – hexágonos (dez/2000)



Fonte: Autor (2025).

Pode-se observar que a maior concentração de atacados se encontra em torno do centro, existindo um padrão aproximadamente circular, onde os anéis viários mais próximos do centro têm mais atacados e, à medida que se afasta, diminui. Adicionalmente, na Figura 7 plotou-se a evolução da quantidade de atacados na cidade no tempo.

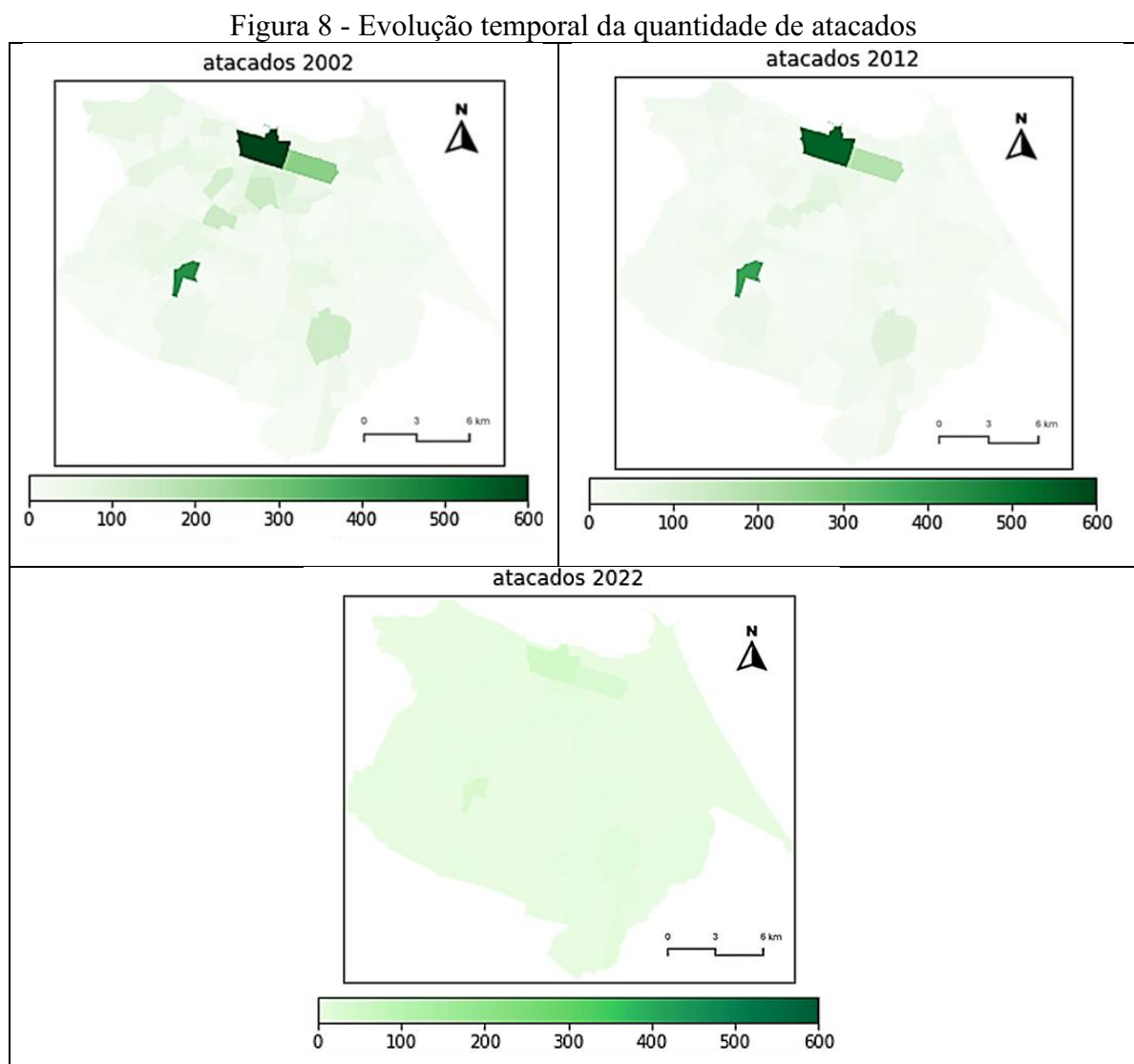
Figura 7 - Evolução histórica da quantidade de atacados na cidade



Fonte: Autor (2024).

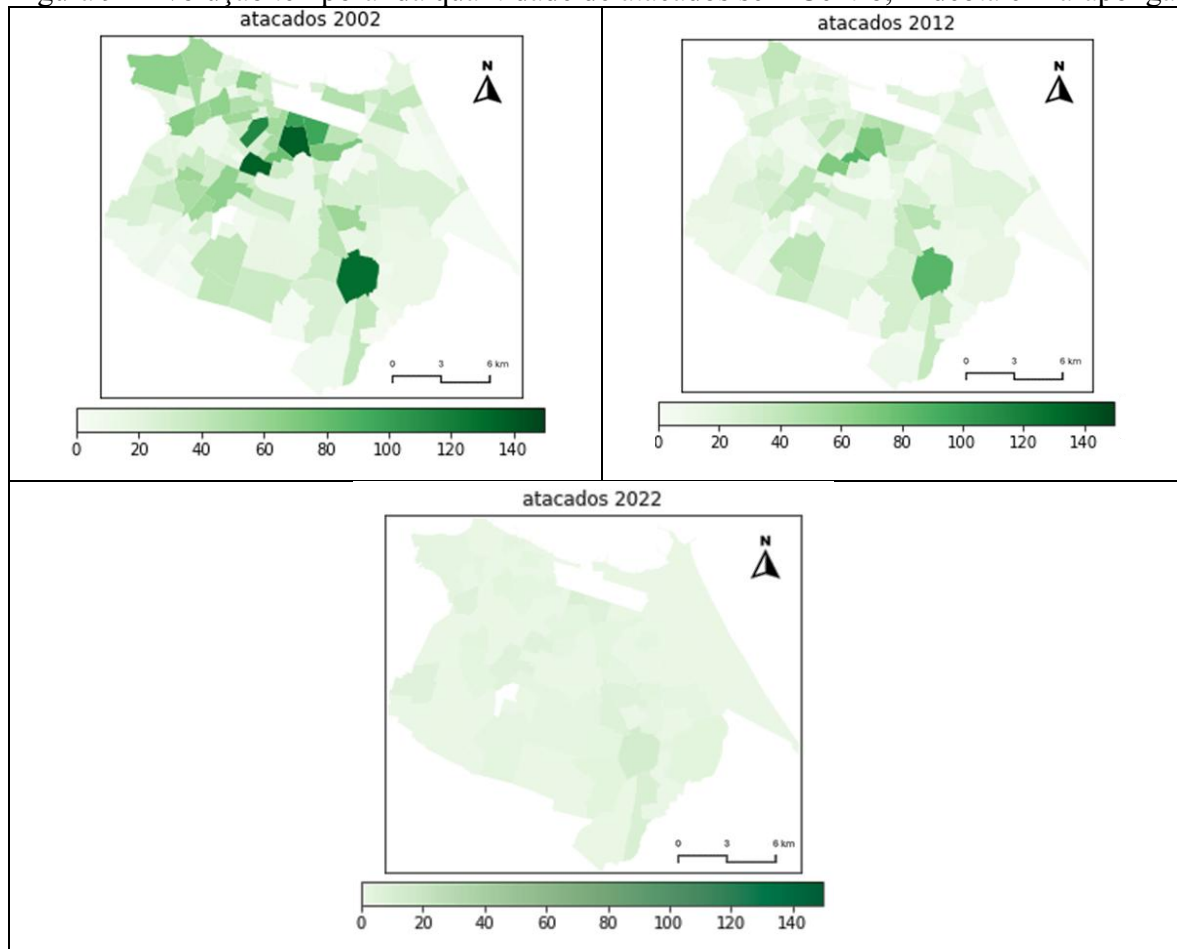
Identificou-se uma tendência decrescente no número de atacados ao longo dos anos, isso pode estar relacionado com mudanças entre os modelos de negócio ou à diversificação de atividades das empresas, identificam-se quedas nos anos 2008 e 2015, que equivalem às crises econômicas ao nível mundial em 2008 e no Brasil entre 2014-2015 (Barbosa Filho, 2017). A base de dados apresenta dados de quantidade de atacados, mas não se conta com outras variáveis endógenas que permitam identificar outros motivos para essa diminuição do número de atacados.

Destaca-se que os padrões espaciais se mantêm entre os bairros ao longo dos anos como ressalta-se na Figura 8, onde pode se notar uma predominância dos bairros Centro e Aldeota identificados previamente, e no bairro de Maraponga (ponto verde escuro que ressalta na região sudoeste do mapa), portanto, na Figura 9 desenhou-se sem esses três bairros, não se percebe um padrão em específico, mas no geral tem mais estabelecimentos ao redor do centro.



Fonte: Autor (2025).

Figura 9 - Evolução temporal da quantidade de atacados sem Centro, Aldeota e Maraponga



Fonte: Autor (2025).

Nota-se que no ano 2022 comparado com 2002 e 2012 a quantidade de atacados diminuiu de forma significativa, e por isso as cores são mais claras, portanto, em todas as regiões tem-se menos do que 80 atacados, nos anos 2002 e 2012 tinha regiões com mais de 80 atacados, destaca-se que no ano 2002 tinha-se um volume significativo de atacados ao redor do bairro do Centro (parte superior do mapa, região norte, como foi indicado previamente) Mas nos anos 2012 e 2022 diminui a quantidade ao redor do mesmo, pode-se dever a diminuição geral do número de atacados, mas também a fenômenos como o espraçamento logístico.

4.2 Análise do PM2.5

Para o cálculo do PM2.5, primeiro, analisaram-se os diferentes modelos de *machine learning* e avaliou-se o R^2 e o RMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio), para as variáveis explicativas utilizou-se a direção do vento, a velocidade do vento, a umidade, a temperatura, a

distância ao mar e a quantidade de Aerossol. E na metade dos cenários utilizou-se o ano também como variável explicativa, para identificar se existe influencia temporal nos dados. Os resultados desagregados encontram-se na Tabela 1.

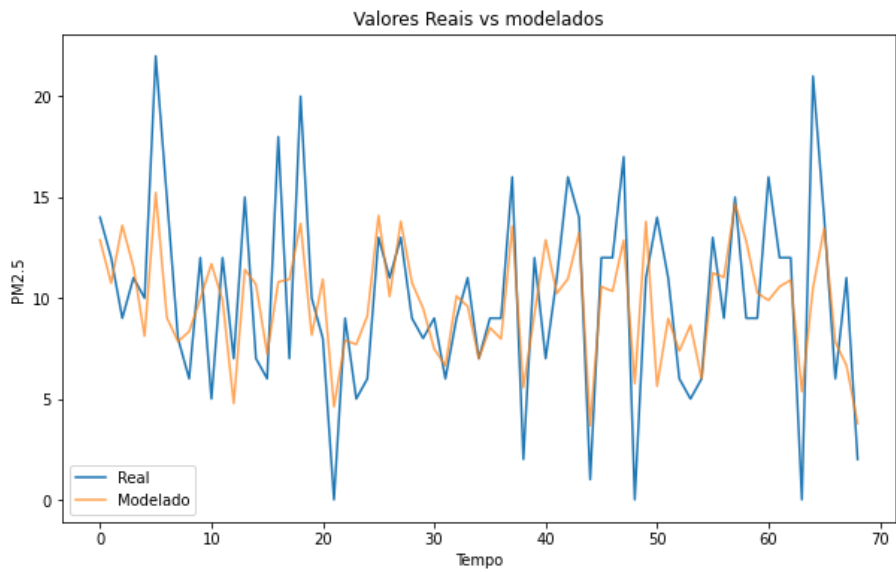
Tabela 1 - Comparação dos modelos de *Machine Learning*

		R2	MSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Com ano	Redes neurais	38%	10.22
	Random Forest	43%	13.89
Sem ano	Redes neurais	39%	14.12
	Random Forest	46%	12.1

Fonte: Autor (2024).

Os modelos de redes neurais tiveram em média menores rendimentos em comparação com o modelo de *Random Forest*. Isso pode ser explicado por conta que, no modelo de redes neurais, ao não contar com dados suficientes, tende a ter ajustes que melhoram o rendimento no conjunto de treino, mas não conseguem se adaptar ao conjunto de teste. Portanto, para esse modelo, precisa-se ter maior volume de dados ou de variáveis explicativas. O modelo de Random Forest sem ano teve o melhor R^2 . Portanto, determinou-se que ia ser o modelo a ser aplicado. O modelo com ano tem um menor R^2 , possivelmente porque somente se contava com dados entre 2020 e 2023, com dados diários, portanto o ano não tem grande variabilidade e não consegue ser significativo dentro do modelo. Na Figura 10, são apresentados os dados reais do conjunto de teste e os dados estimados pelo modelo.

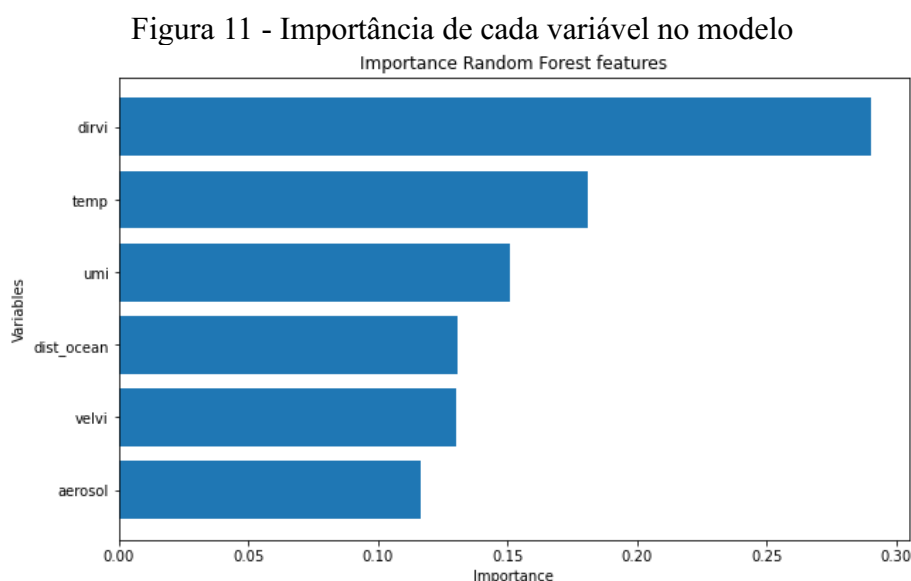
Figura 10 - Valores reais e modelados de PM2.5



Fonte: Autor (2024).

Os dados reais do conjunto de dados de validação de PM2.5 medidos pela estação apresentem picos mais altos em comparação com os dados projetados pelo modelo, mas, o modelo consegue acompanhar a tendência geral dos dados. Isso indica que ele é confiável, especialmente considerando a limitação de dados disponíveis e o nível de detalhamento utilizado. Para a cidade de Fortaleza, este é o melhor modelo possível nas condições atuais.

Apesar de não atingir uma precisão total por conta da ausência de mais variáveis explicativas, ele consegue capturar bem as variações entre os valores mais altos e mais baixos, o que já representa uma contribuição metodológica relevante, destaca-se que este é um fenômeno complexo, por esse motivo, as emissões de PM2.5 pode estar influenciada por diferentes variáveis exógenas ao modelo realizado, portanto, está fora do escopo do presente trabalho. Adicionalmente, plotou-se o nível de impacto de cada variável no modelo, como se observa na Figura 11.

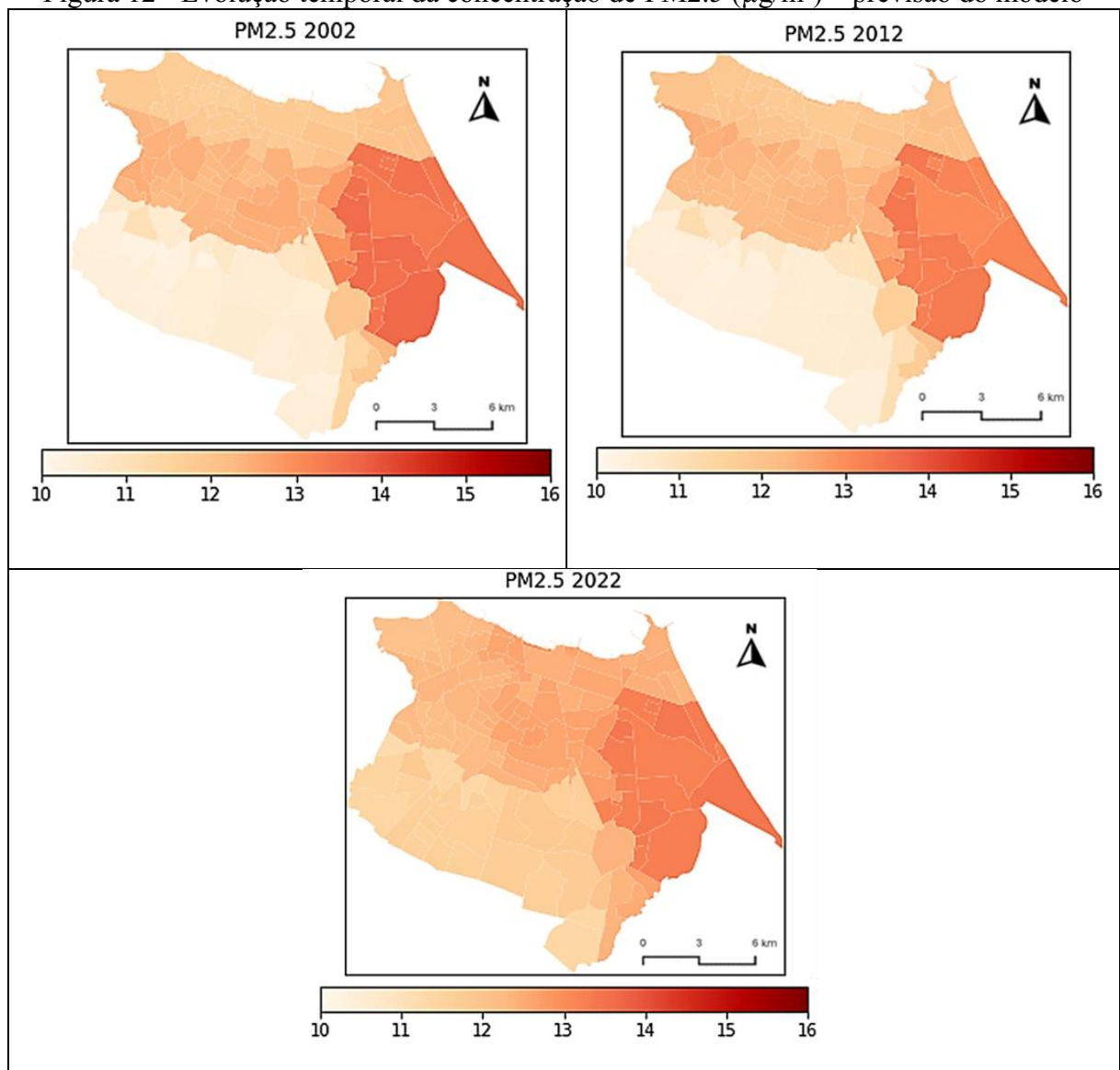


Fonte: Autor (2024).

A variável que tem maior influência no modelo é a direção do vento (dirvi) e depois a temperatura (temp), posteriormente, se encontra a umidade (umi), distância ao oceano (dist_ocean), velocidade do vento (velvi) e aerossol. Isso reflete que as condições ambientais têm um impacto significativo na concentração de PM2.5 e, portanto, a distribuição da cidade, os cânions, e outras variáveis podem impactar nas concentrações de PM2.5, portanto, a concentração de PM2.5 não pode ser isolada exclusivamente a ser causada pelo transporte de carga, mas, este tem um impacto significativo devido a que sua operação emite PM2.5 e, por consequência, concentrações dele.

Com o modelo pronto, pode ser calculada a quantidade de PM2.5 por cada bairro, colocam-se as variáveis explicativas de cada bairro/hexágono no modelo, e o modelo dá como output a quantidade de PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) por bairro, os dados por bairro são obtidos pelas imagens dos satélites, tem-se os dados satelitais por períodos do dia (manhã, meio-dia, tarde e noite) desde 2000 até 2023 de cada variável explicativa, como cada uma tem diferentes períodos de dados disponíveis, cruzam-se os dados e mantem-se os dias que tem dados de todas as variáveis. A partir disso, calcula-se os níveis diários de PM2.5 por bairro, e posteriormente calcula-se a média mensal da quantidade de PM2.5 por bairro; os resultados encontram-se na Figura 12. Construiu-se também em diferentes anos para observar que os padrões temporais se mantêm estáveis. No anexo 2 pode se observar a evolução temporal diária de PM2.5.

Figura 12 - Evolução temporal da concentração de PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – previsão do modelo

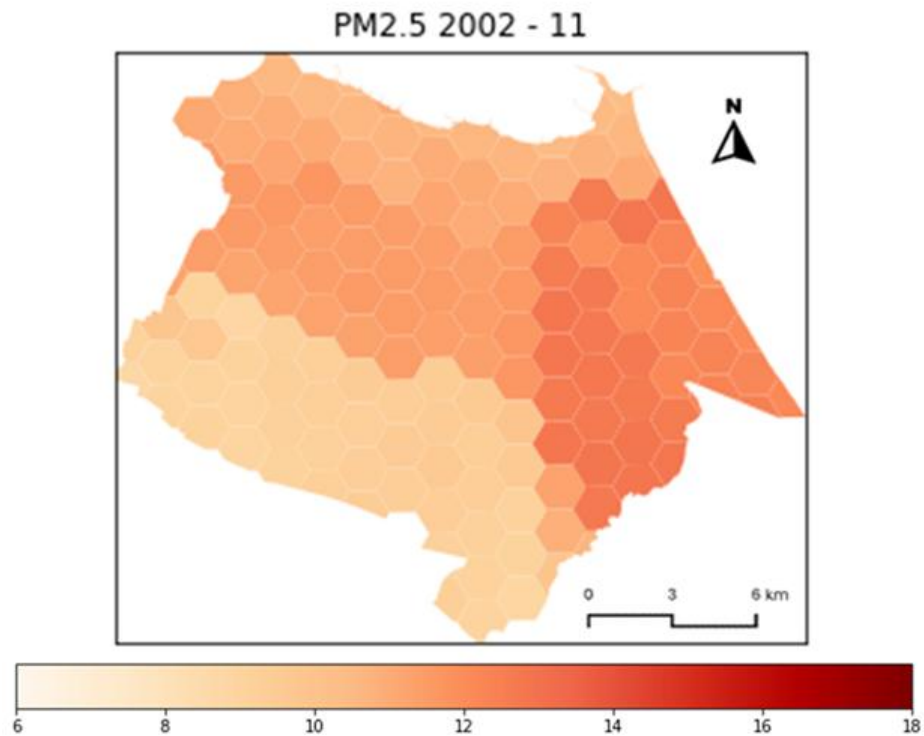


Fonte: Autor (2025).

Identificaram-se maiores níveis de PM2.5 na região leste da cidade na região das

dunas e menores níveis nos pontos que são longe do mar. Para comparar também com a outra divisão espacial, representou-se por hexágonos como pode ser observado na Figura 13. Sendo assim, não se identificou uma diferença significativa entre bairros e hexágonos, mas, pode se destacar que a divisão por hexágonos permite uma análise mais uniforme.

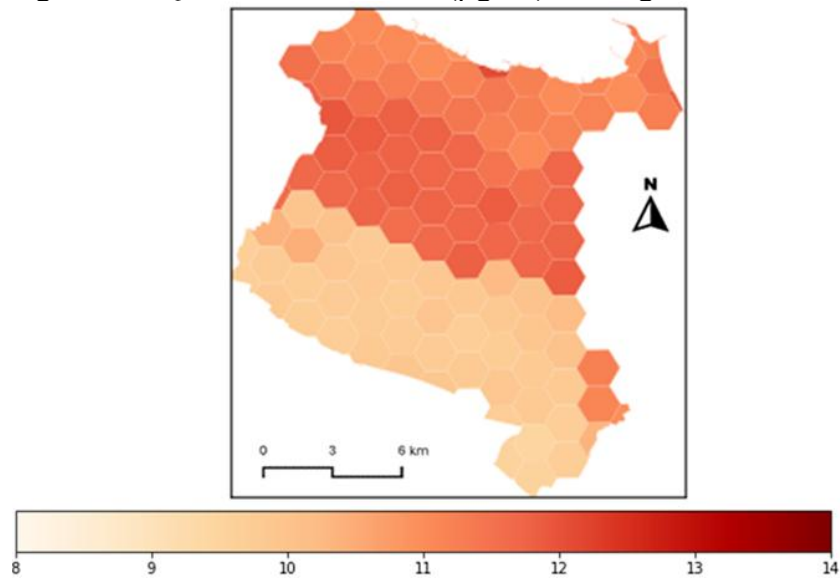
Figura 13 - quantidade de PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) por hexágono – mês amostral - modelado



Fonte: Autor (2025).

Deve-se destacar que a região das dunas é uma região influenciada por variáveis não antropogênicas, pois é uma região com pouca presença de atacados e população, mas apresenta altos níveis de aerossol e PM2.5, o que se deve a fenômenos ambientais naturais. Por isso decidiu-se não analisar essa região para esta pesquisa e plotou-se na Figura 14 os níveis de PM2.5 excluindo essa região.

Figura 14 - Quantidade de PM_{2.5} (µg/m³) – hexágono sem dunas

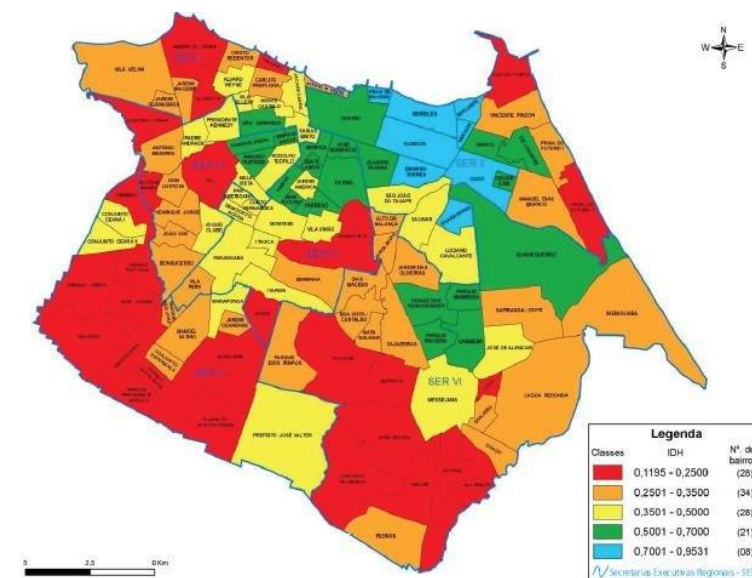


Fonte: Autor (2025).

4.3 Análise da Vulnerabilidade

Na Figura 15, pelo IDH é possível observar que existe um fenômeno notório de centralidade. O maior IDH encontra-se nos locais do centro e seus arredores, enquanto nas zonas periféricas o IDH é menor, como pode ser observado na região sudeste e noroeste que são pontos principais de atacados.

Figura 15 - IDH 2010

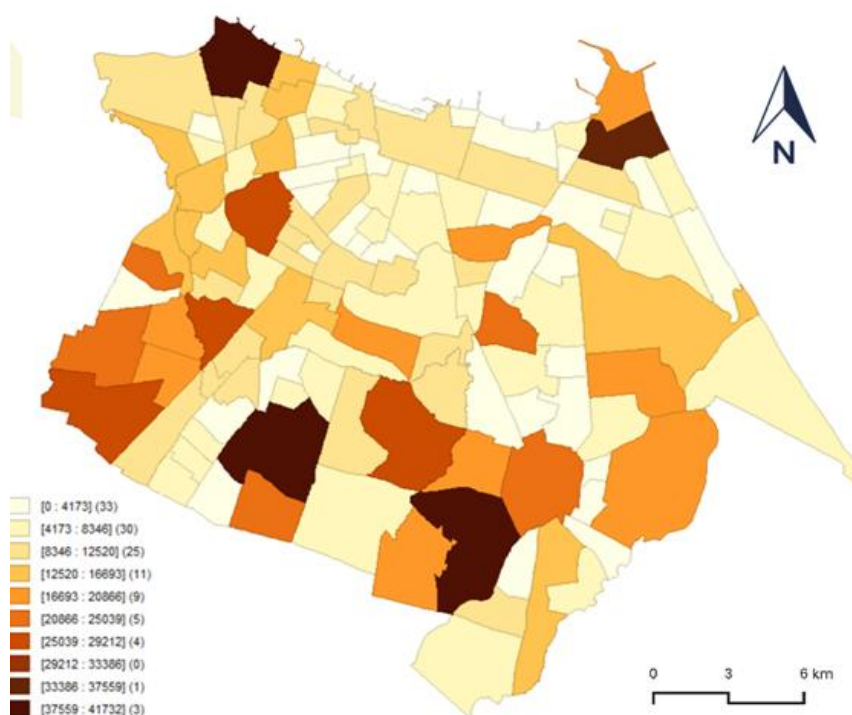


Fonte: Prefeitura de Fortaleza, Secretaria Municipal de desenvolvimento econômico (2010).

Na segunda análise de dados de vulnerabilidade social, compararam-se as diferentes

bases de dados de saúde, algumas delas tinham limitações pelo nível de desagregação ou pela precisão dos dados, por exemplo a base de mortalidade não tinha desagregação por bairro. Por outra parte, a base de ambulatório tinha grande número de dados atípicos e outros erros na fase de tratamento dos dados. Portanto, optou-se por utilizar somente a soma dos dados do hospital e os dados de atenção primária (*fastmedic*). A análise dos dados de *Fastmedic* e o hospital universitário são apresentados na Figura 16, apresenta-se o intervalo por cada categoria e a contagem por categoria.

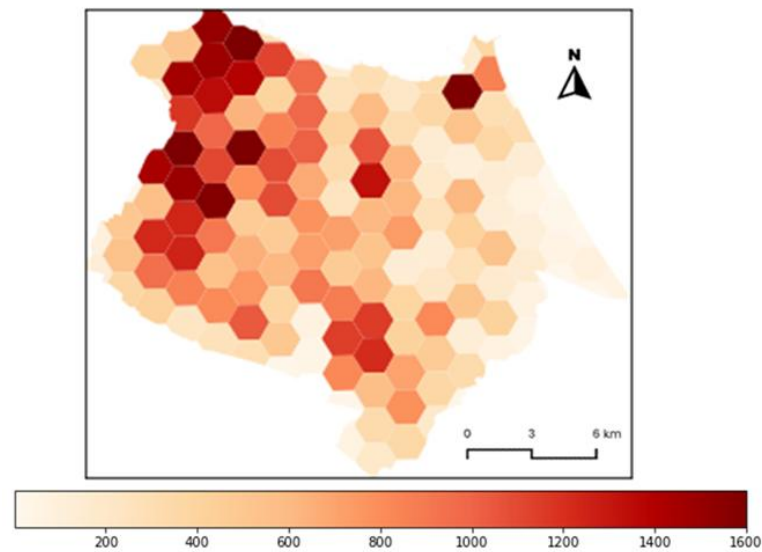
Figura 16 - Quantidade de hospitalizações fastmedic e HU - 2023



Fonte: Autor (2025).

Percebe-se uma maior incidência de hospitalizações na região oeste da cidade como no bairro Barra do Ceará, também, identifica-se uma quantidade significativa de atendimentos por motivos respiratórios na região sul da cidade. Além disso, a análise foi feita por hexágono como apresenta-se na Figura 17, os padrões por bairro e por hexágono foram semelhantes. Para transformar de bairro em hexágono, foram tidos em conta os setores censitários e os endereços dos usuários, a proporção de habitantes por setor censitário ajudou a fornecer dados de proporção de atendimentos por hexágono, uma vez que tiveram localizações que não puderam ser utilizadas porque no endereço apenas o CEP da pessoa estava disponível.

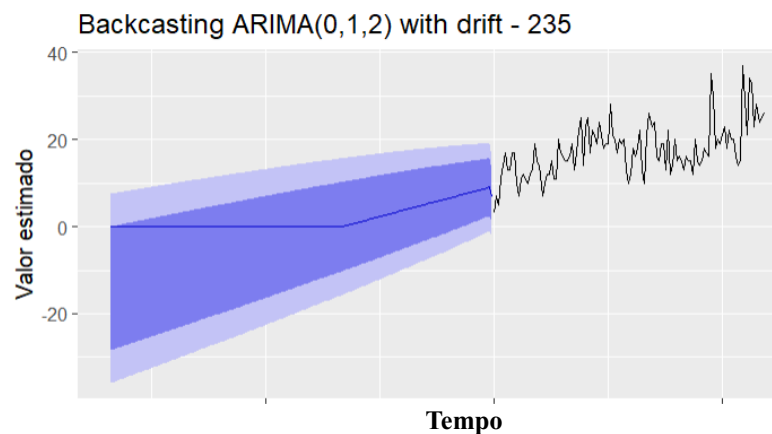
Figura 17 - Quantidade de atendimentos Fastmedic e HU – hexágonos – mês amostral
fastmedic e HU 2021 - 8



Fonte: Autor (2025).

Posterior à análise espacial, realizou-se a modelagem *backcasting* para projetar entre o ano 2000 e 2013, como é observado na Figura 18. O modelo do R utilizava modelo ARIMA e estimava a melhor combinação de parâmetros, no exemplo do hexágono 235 o modelo determinou um ARIMA (0,1,2), o zero indica que não há termos autorregressivos, o 1 representa uma diferenciação para tornar a série estacionária, e o 2 refere-se a dois termos de média móvel, para cada bairro o modelo escolhia quais parâmetros usaria o modelo ARIMA. No geral, observaram-se 3 padrões por bairro: os dados projetados para trás tomavam o valor do ano mais antigo, neste caso 2014, ou tomavam um valor ao redor da média, ou tinham uma tendência decrescente. Esta modelagem permite comparar mais anos com as outras variáveis e não se limitar somente aos dados observados.

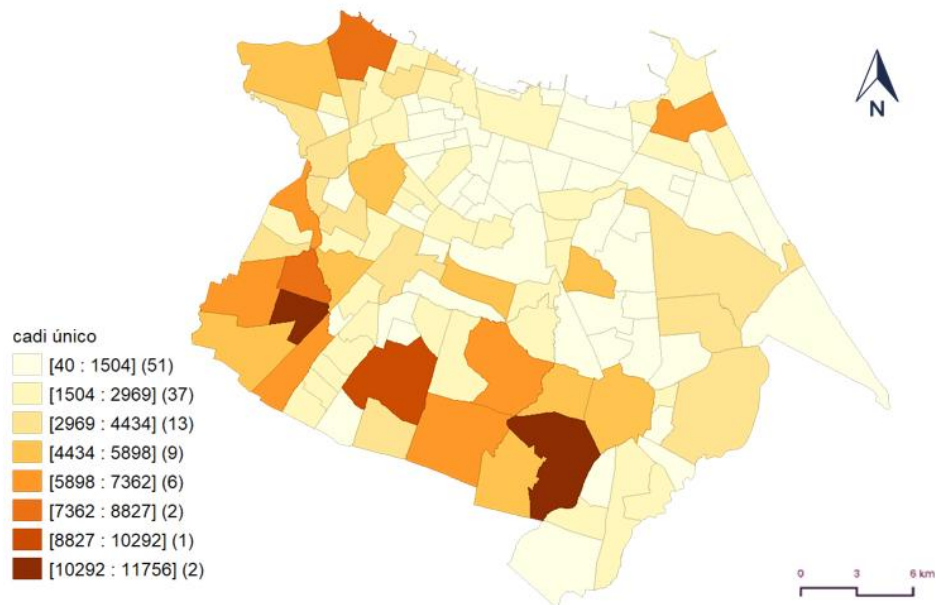
Figura 18 Resultados *backcasting* – exemplo hexágono 235



Fonte: Autor (2025).

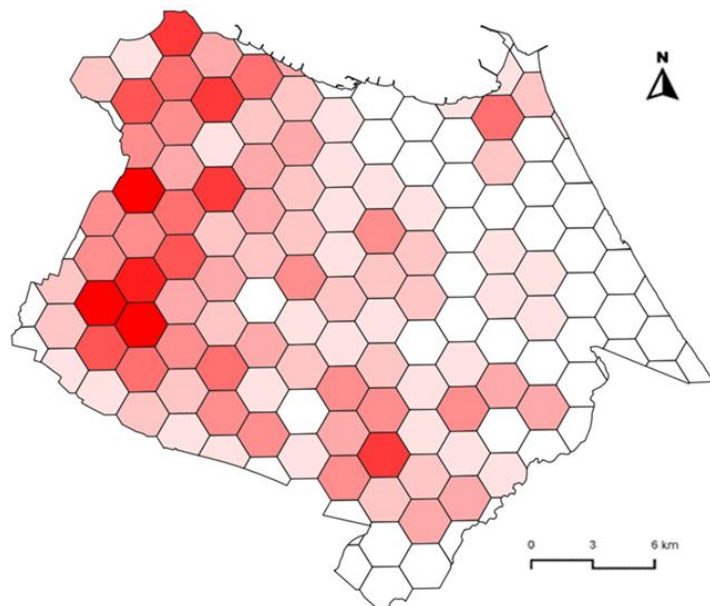
A terceira análise de vulnerabilidade social, reflete a quantidade de pessoas inscritas no CadÚnico, tem-se que onde há o maior número de pessoas inscritas, a vulnerabilidade social do bairro é maior. A Figura 19 apresenta uma maior quantidade de inscritos nas regiões leste e sul da cidade, com uma quantidade significativa nos bairros de Bom Jardim e Jangurussu. A Figura 20 oferece a representação por hexágonos, apresenta-se o intervalo por cada categoria e a contagem por categoria.

Figura 19 - Número de pessoas inscritas no CadÚnico por bairro, Fonte: Autor



Fonte: Autor (2025).

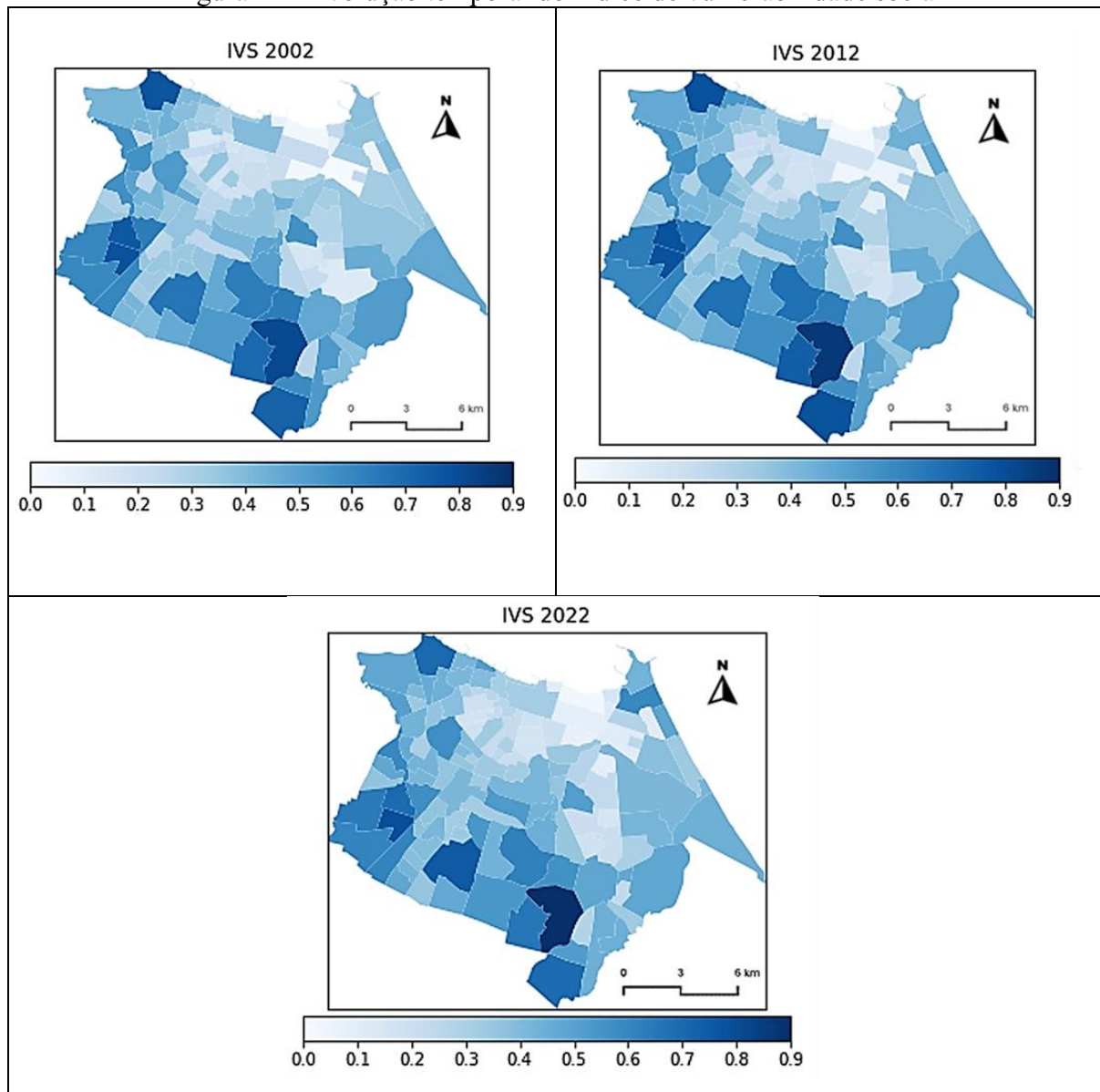
Figura 20 - Número de pessoas inscritas no CadÚnico - hexágonos



Fonte: Autor (2025).

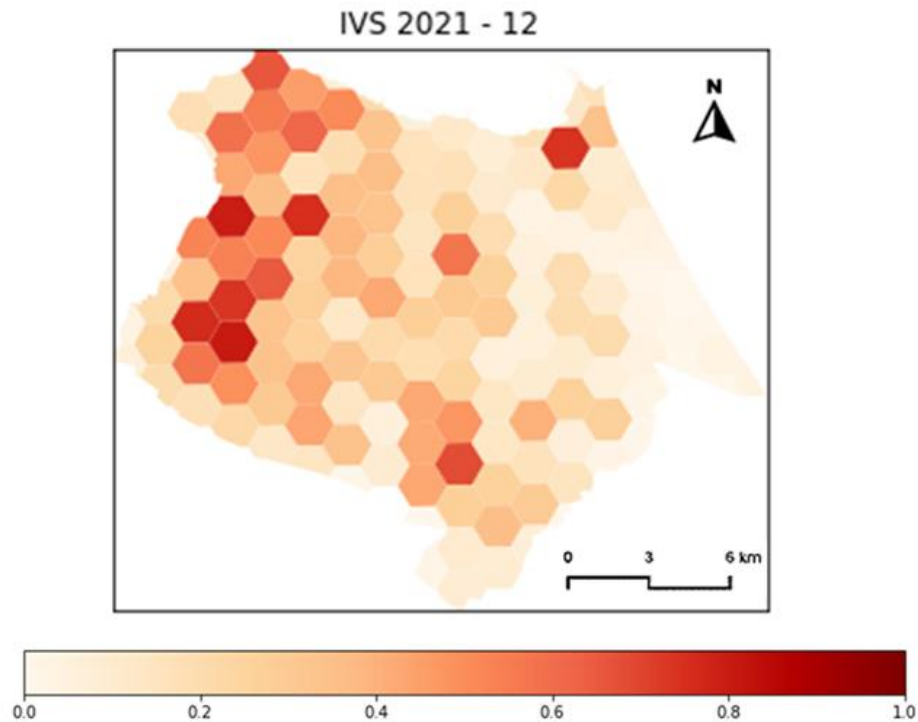
A partir das 3 bases de dados calculou-se o indicador de vulnerabilidade social (IVS). Observa-se que nas 3 bases os locais com maior vulnerabilidade encontram-se na região oeste e sul. Os resultados do cálculo de IVS, construíram-se na Figura 21 (evolução temporal por bairro) e a Figura 22 (hexágono num mês de amostra). É de notar que a análise por hexágono permite eliminar o impacto da dimensão da vizinhança, pelo que a análise é mais uniforme, em termos de área espacial.

Figura 21 - Evolução temporal do índice de vulnerabilidade social



Fonte: Autor (2025).

Figura 22 - IVS hexágonos – mês amostral



Fonte: Autor (2025).

Os níveis de IVS refletem que os dados são na sua maioria constantes ao longo do tempo, ou seja, a variação espacial não representa um padrão de mudança muito abrupto. Identifica-se um maior nível de vulnerabilidade nas zonas sul e oeste da cidade, percebe-se também que houve alguma deterioração do índice em alguns bairros da região centro-leste no percorrer dos anos.

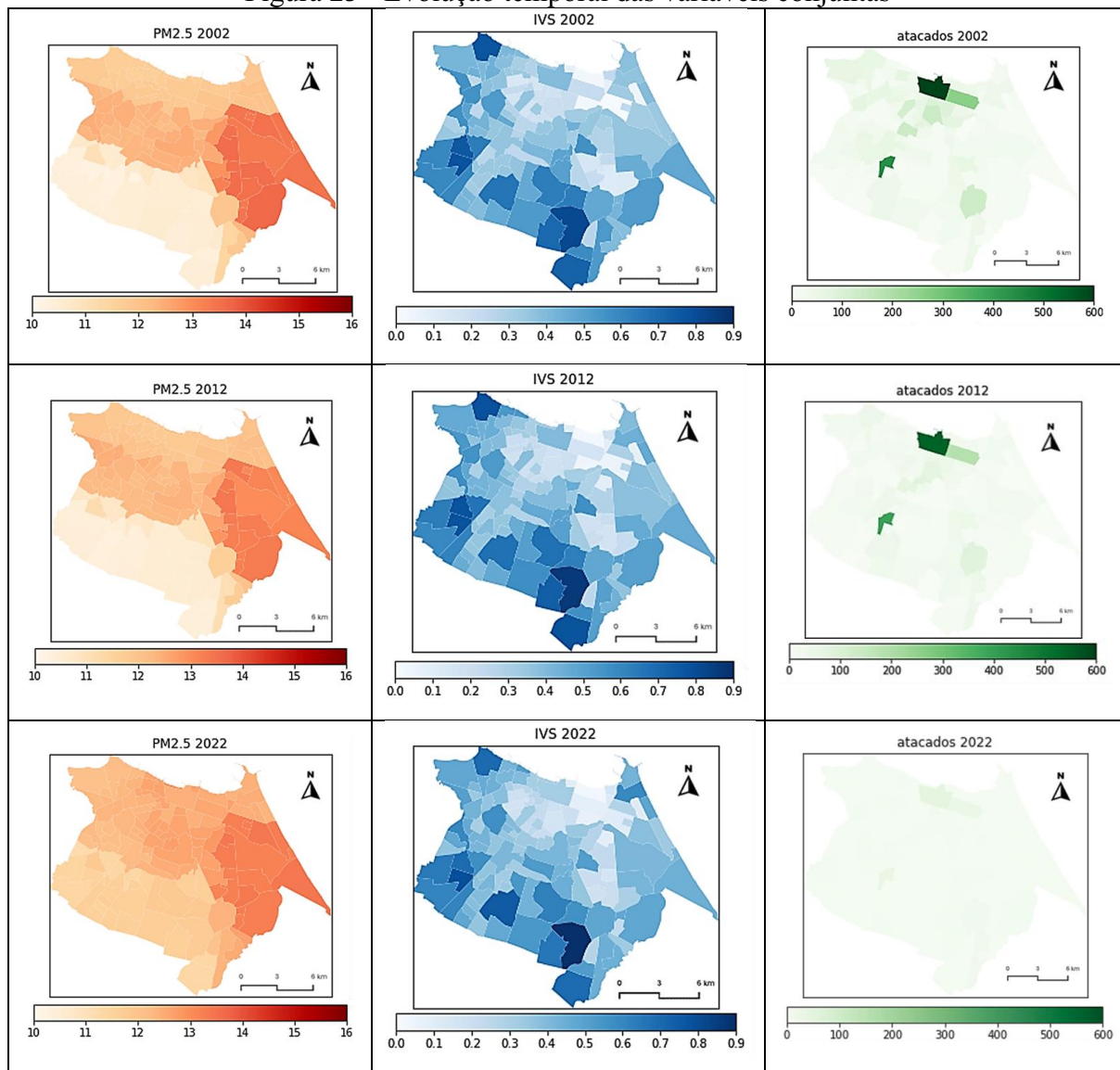
Este índice calculado é um ponto de partida para analisar a dinâmica da cidade, identifica-se que as áreas periféricas tendem a ter um maior valor de vulnerabilidade, o centro da cidade apresenta maior nível de vulnerabilidade em comparação aos bairros vizinhos, mas isso ocorre porque a dinâmica no centro de Fortaleza é diferente daquelas de outras áreas da cidade. É de notar que a análise por hexágono permite eliminar o impacto da dimensão da vizinhança, pelo que a análise tem maior uniformidade em termos de área espacial.

4.4 Análise espacial da relação entre as variáveis

Realizou-se inicialmente uma análise visual das variáveis conjuntas como se encontra na Figura 23, não se nota um padrão em específico a destacar, como já foi referido, cada conjunto de dados tem um comportamento diferente: enquanto os valores atacados são

mais elevados no centro, a vulnerabilidade é mais elevada nas zonas periféricas e as quantidades de PM2.5 são mais elevadas na franja média da cidade, mas, destacam-se regiões como a região noroeste, onde se tem altos níveis de concentração de PM2.5, quantidade significativa de pessoas com IVS, e um número alto de atacados, portanto, nesta região pode existir uma relação significativa entre as variáveis.

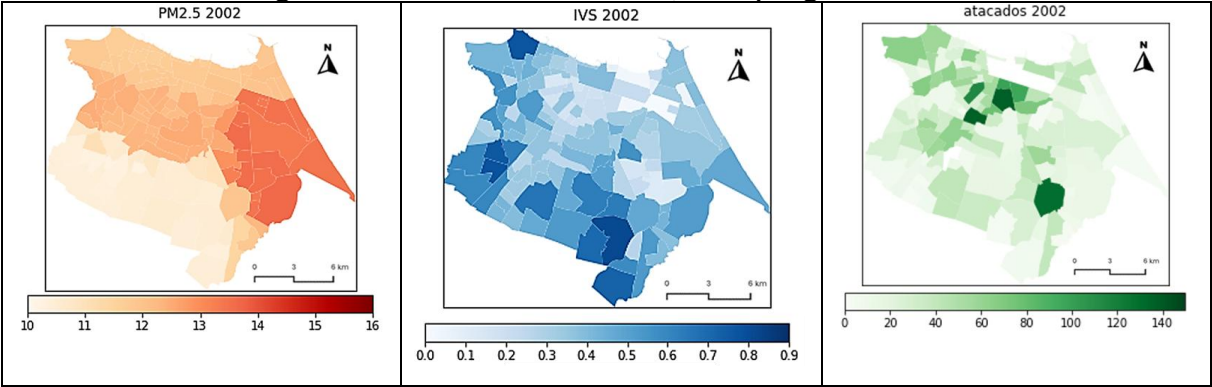
Figura 23 - Evolução temporal das variáveis conjuntas



Fonte: Autor (2025).

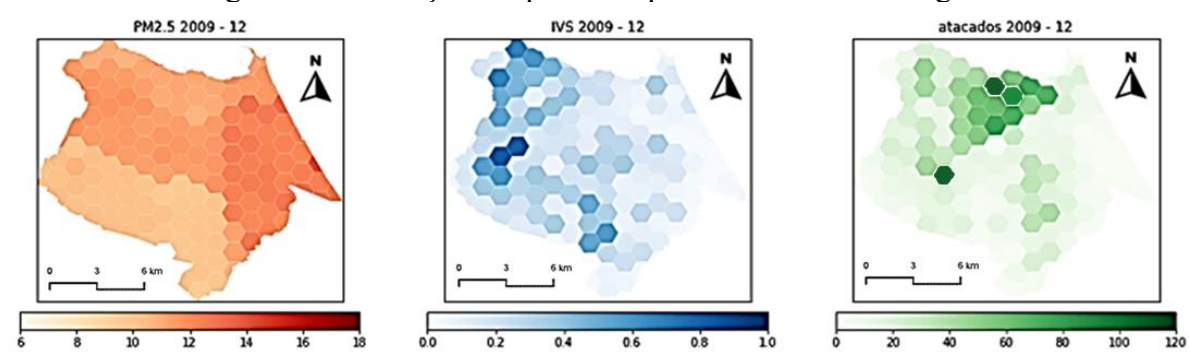
Enquanto a evolução histórica, não se percebem mudanças significativas espaciais, mas sim pode ser observado um leve aumento nas concentrações de PM2.5 na cidade e uma diminuição no número de atacados. A Figura 24 e Figura 25 complementam a informação, com uma análise sem centro, Aldeota e Maraponga e análise por hexágonos.

Figura 24 - Variáveis sem Centro, Maraponga e Aldeota



Fonte: Autor (2025).

Figura 25 - Evolução temporal e espacial variáveis - hexágonos



Fonte: Autor (2025).

A análise visual permite ter um entendimento mais detalhado de cada base de dados de forma individual, mas não permite um entendimento de como elas se relacionam. Assim que, para complementar a análise visual, calculou-se a correlação entre a localização dos atacados, o PM2.5 e os dados de saúde, como é apresentado na Tabela 2 e na Tabela 3, destaca-se que existe consistência entre os três indicadores de vulnerabilidade social, todos com valores maiores do que 40% e identifica-se que a menor IDH maior número de atendimentos por doenças respiratórias e maior número de pessoas no CadÚnico. Por outra parte, a correlação entre a localização dos atacados, o MP2.5 e os indicadores de vulnerabilidade não está sendo significativa. Porém, é só uma análise de correlação entre dados, sem ser uma análise espacial.

Tabela 2 - Correlações variáveis saúde

Dado	IDH	Hospital	CadÚnico
IDH	100%		
Hospital e fastmedic	-46%	100%	
CadÚnico	-56%	80%	100%

Fonte: Autor (2025).

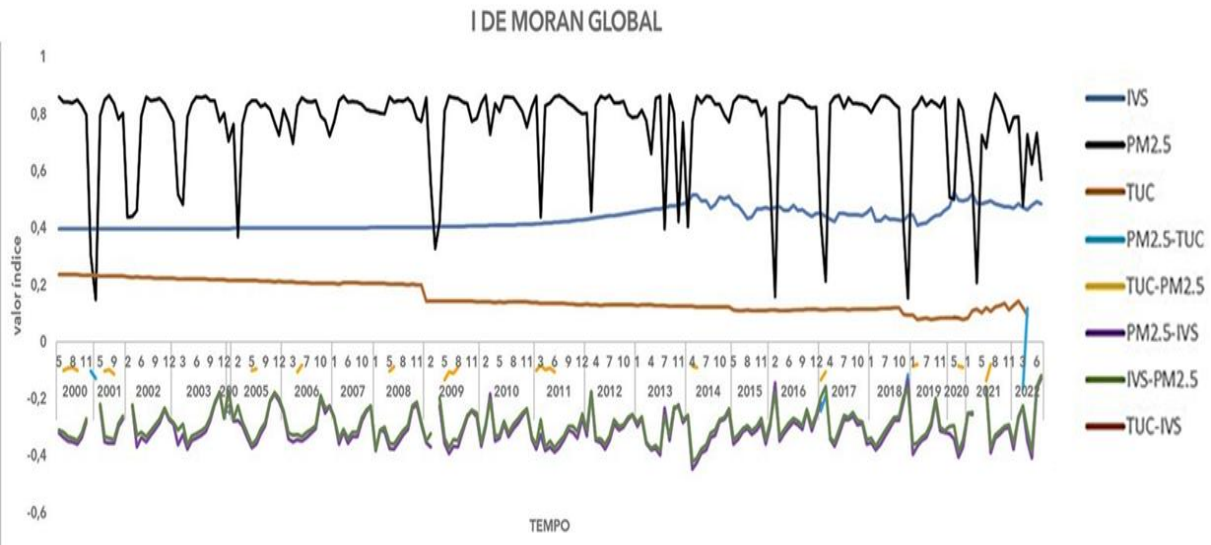
Tabela 3 - Correlações variáveis

Dado	IVS	TUC	MP2.5
IVS	100%		
Atacados	-18%	100%	
MP2.5	-5%	9%	100%

Fonte: Autor (2025).

A correlação é uma análise meramente numérica, que não considera os dados espaciais, por esse motivo se complementou a análise com o Índice de Moran que calcula a correlação espacial das variáveis, primeiro, calculou-se o I de Moran por cada mês uni-variado para cada variável, com o objetivo de identificar se os valores de PM2.5, atacados e IVS estão espacialmente agrupados ou dispersos sem correlações. Logo, é calculada a análise bivariada do I de Moran para medir se os valores de uma variável em uma região estão relacionados aos valores de outra variável nos bairros vizinhos. Por exemplo, identificar se os bairros com alta intensidade de TUC apresentada pelo número de atacados estão próximos de bairros com altos níveis de PM2.5, calculou-se o I de Moran bivariado para todas as combinações possíveis das variáveis, por exemplo PM2.5-IVS significam que um bairro com altas concentrações de PM2.5 está próximo a bairros com níveis significativos de pessoas vulneráveis, já IVS-PM2.5 significa que um bairro com alto nível de IVS está próximo a bairros com altas concentrações de PM2.5, Os resultados conjuntos de todas as variáveis mês a mês se apresentaram na Figura 26

Figura 26 - I de Moran



Fonte: Autor (2025).

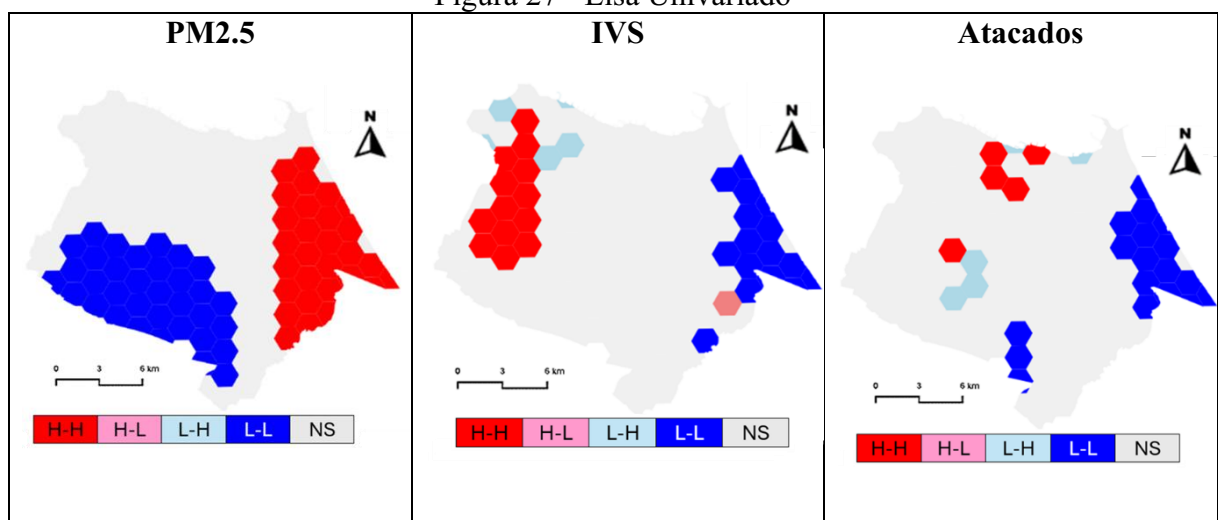
O I de Moran não apresentou significância estatística (valor p = 5%) para a relação

entre os atacados e o IVS, no caso do PM2.5 e o IVS deu sempre negativo entre 0% e -40%, e no caso do PM2.5 e os atacados só em alguns meses foi estatisticamente significativo, mas inferior a 20%. No caso das variáveis individuais o IVS sempre está próximo a 40% enquanto o PM2.5 tem períodos com alta correlação espacial com valores próximos a 80%. Portanto o I de Moran determinou que não existem relações significativas entre as variáveis. Porém, o I de Moran foi uma análise geral de todos os hexágonos ou bairros de forma global, para melhorar a precisão a análise, deve ser calculado o I de Moran local e fazer a análise LISA para poder entender o fenômeno por zonas e não de forma geral.

Realizou-se a análise LISA por hexágono para uma maior uniformidade espacial. Apresenta-se uma imagem de algum mês qualquer amostral, pode-se entender que todos os meses têm comportamentos similares e por esse motivo foi plotada somente uma imagem. A análise é calculada uni-variada e bivariada, no caso do bivariado as análises são de X para Y e de Y para X, já que uma explica a outra, quer dizer, calcularam-se todas as combinações possíveis como no I de Moran.

A análise pode ter diferentes relações (H-H: Alto-Alto, H-L: Alto-Baixo, L-H: Baixo-Alto, L-L: Baixo-Baixo). Por exemplo, uma relação alto-alto no PM2.5 significa que hexágonos com alto nível de PM2.5 estão próximos a bairros com também níveis altos de PM2.5. no caso bivariado, por exemplo uma relação alto-baixo para atacados e PM2.5 quer dizer que um hexágono com grande quantidade de atacados encontra-se numa zona de baixos níveis de concentração de PM2.5. Os gráficos do Lisa uni-variado podem ser contemplados na Figura 27.

Figura 27 - Lisa Univariado

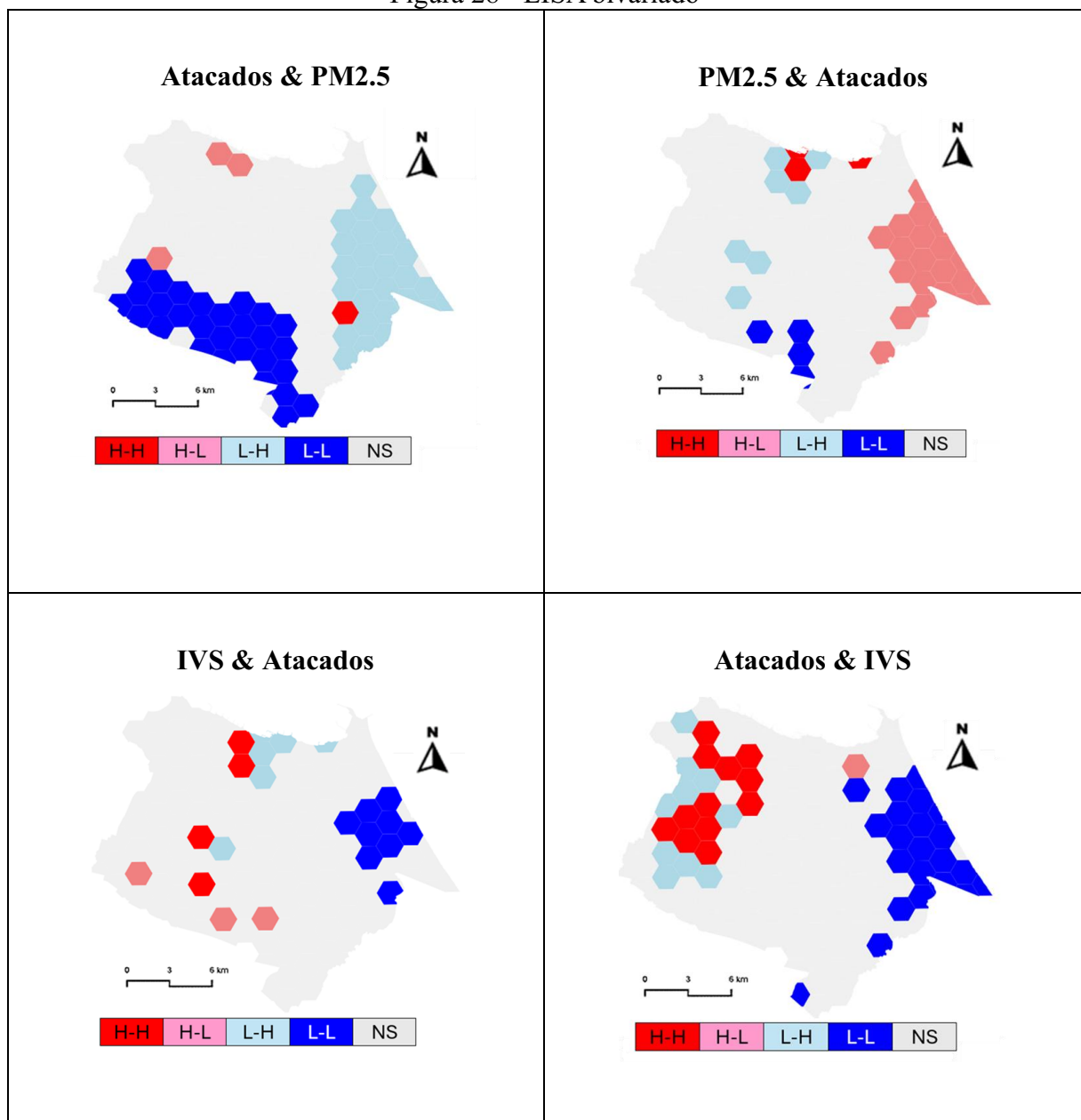


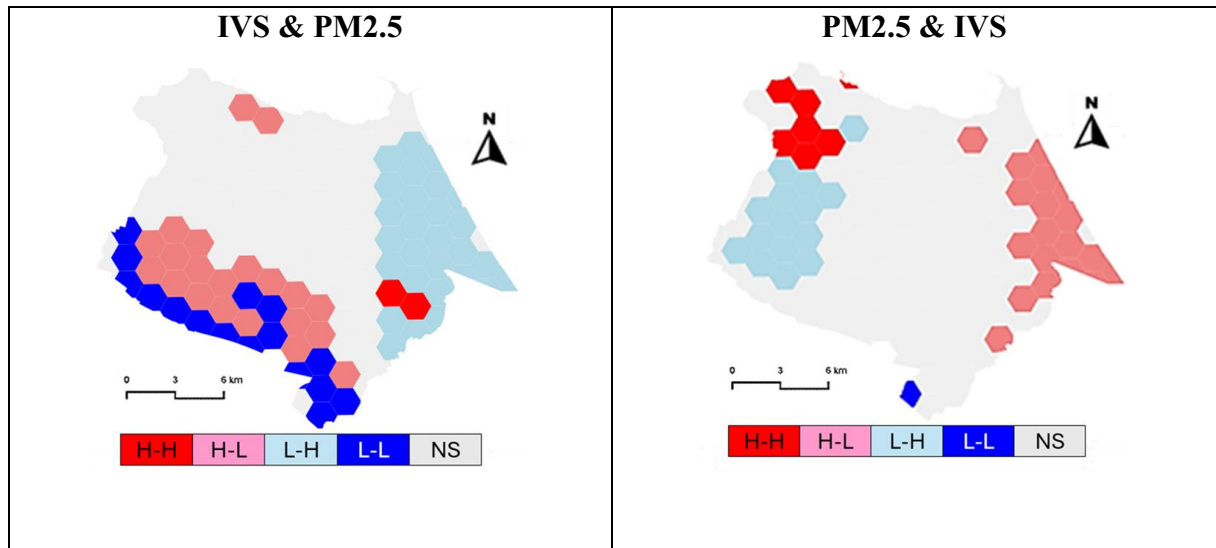
Fonte: Autor (2025).

No PM2.5 os níveis altos encontram-se na região das dunas e os níveis baixos na

região sul, as outras zonas da região não apresentam valores significativos, portanto, os pontos críticos encontram-se na zona leste da cidade; a vulnerabilidade as relações mais críticas encontram-se na zona oeste e são menores na zona leste, quer dizer, que na zona oeste existe uma presença significativa de pessoas vulneráveis, no caso dos atacados têm uma participação significativa de relação alto-alto no bairro do Centro e suas vizinhanças. Nas análises se deve priorizar os pontos alto-alto e baixo-baixo, quer dizer pontos com grande quantidade de atacados, IVS e níveis de PM2.5 são regiões críticas, e pontos com relações baixo-baixo são pontos ideais. A análise uni-variada calcula só cada variável de forma independente, portanto, deve-se complementar com a análise bivariada, A Figura 28 apresenta os resultados bivariado.

Figura 28 - LISA bivariado





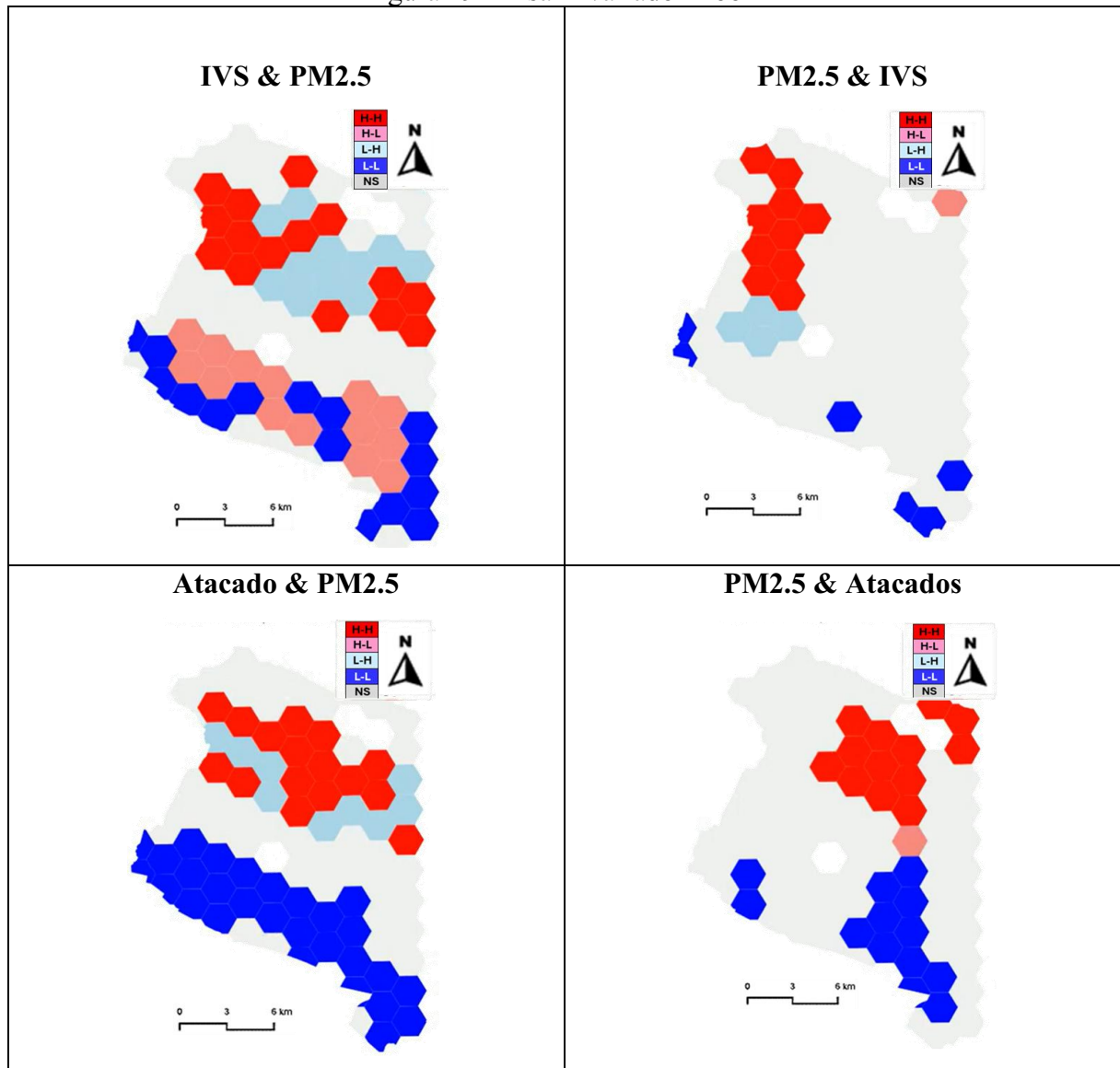
Fonte: Autor (2025).

Para a relação entre atacados e PM2.5, na região das dunas o fenômeno é alto-baixo por ser uma região com poucos atacados e altos níveis de PM2.5. Portanto, os pontos a destacar são no sul da cidade com baixa quantidade de atacados e de PM2.5 e destaca-se também o centro da cidade com uma relação alto-alto, pois tem um grande volume de atacados e níveis altos de concentração de PM2.5

Na mesma lógica, na análise de vulnerabilidade e atacados destacam-se a zona oeste da cidade, já que, em diferentes hexágonos apresentam altos níveis de pessoas vulneráveis e de atacados para TUC. Perto do bairro do Centro também existem pontos significativos de alto-alto, já na análise de IVS e PM2.5 a região noroeste da cidade apresenta pontos significativos de alto-alto. A análise LISA permitiu identificar que uma cidade não deve ser analisada como um todo e sim se devem entender suas particularidades, neste caso por exemplo mesmo os indicadores globais não apresentaram uma relação significativa da cidade, quando se analisa de forma local com LISA se pode observar que a região oeste da cidade é uma região que pode estar sendo afetada com as atividades atreladas ao TUC, já que é uma região com presença alta de atacados e ao mesmo tempo apresenta altos níveis de PM2.5 e níveis significativos de IVS e portanto de pessoas vulneráveis.

No entanto, ao realizar a análise LISA, existe a influência de áreas não antropogênicas como a região das dunas e regiões com comportamentos diferentes em relação ao número de estabelecimentos como o centro e a Maraponga. Portanto, optou-se por “*dar um zoom*” nas demais áreas e não considerar essas regiões na análise LISA, os resultados podem ser observados na Figura 29.

Figura 29 - Lisa Bivariado - zoom



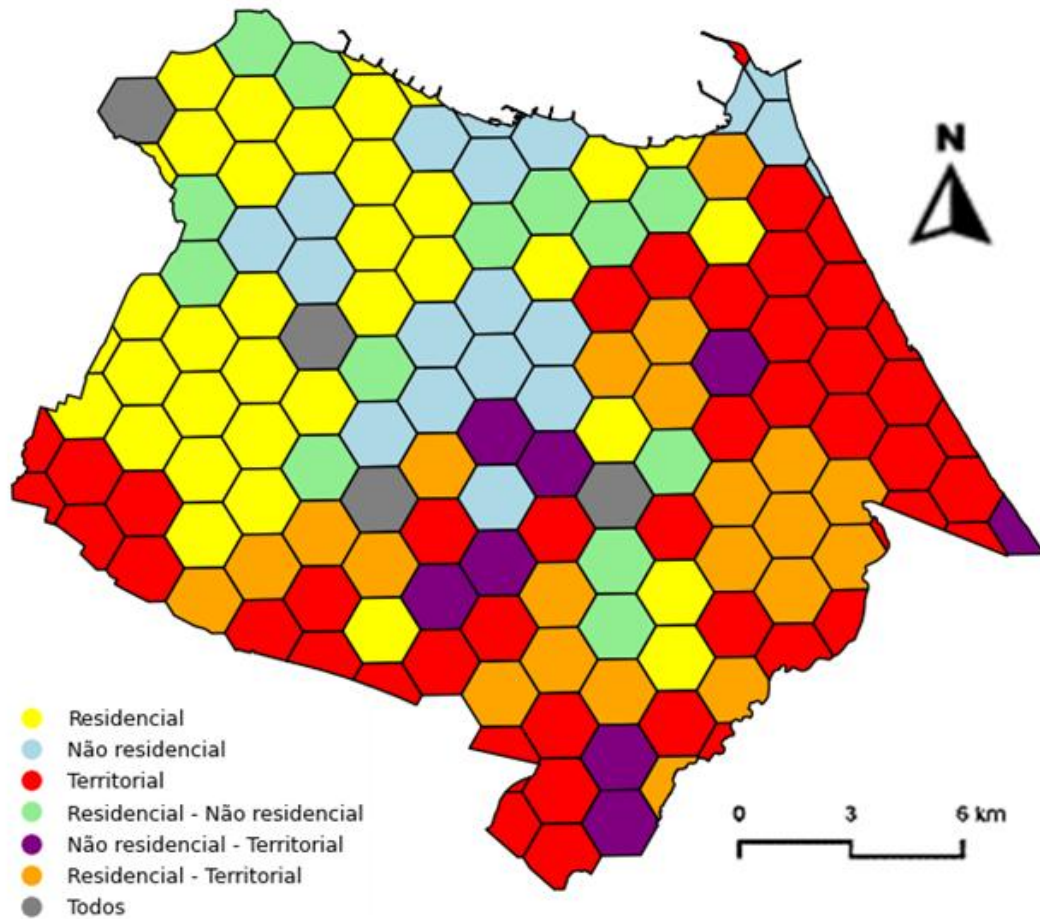
Fonte: Autor (2025).

O *zoom* excluindo zonas com particularidades especiais, resultou em uma maior quantidade de hexágonos com relações alto-alto nas regiões oeste e central da cidade, assim pode-se identificar que há indícios de uma relação significativa entre o impacto do número de atacados, a concentração de PM2.5 e regiões vulneráveis nessas áreas da cidade, já que, nos quatro gráficos existem relações importantes de alto-alto nessa região, mesmo que o análise é bivariado, é possível identificar relações nessa região entre as 3 variáveis.

Para complementar o estudo, e analisar fatores exógenos, foi calculada a relação entre o uso do solo e as três variáveis de forma temporal como foi descrito no método, com o intuito de entender se há influência do uso do solo nos resultados obtidos. Classificou-se cada hexágono segundo o uso de solo majoritário, sendo territorial, residencial, não residencial, uma

mistura de dois, a classificação pode ser vista na Figura 30, depois, classificou-se cada hexágono e analisou-se segundo o uso do solo como é o nível de MP2.5, a quantidade de atacados e o IVS, a fim de entender se o uso do solo tem relação com os resultados obtidos.

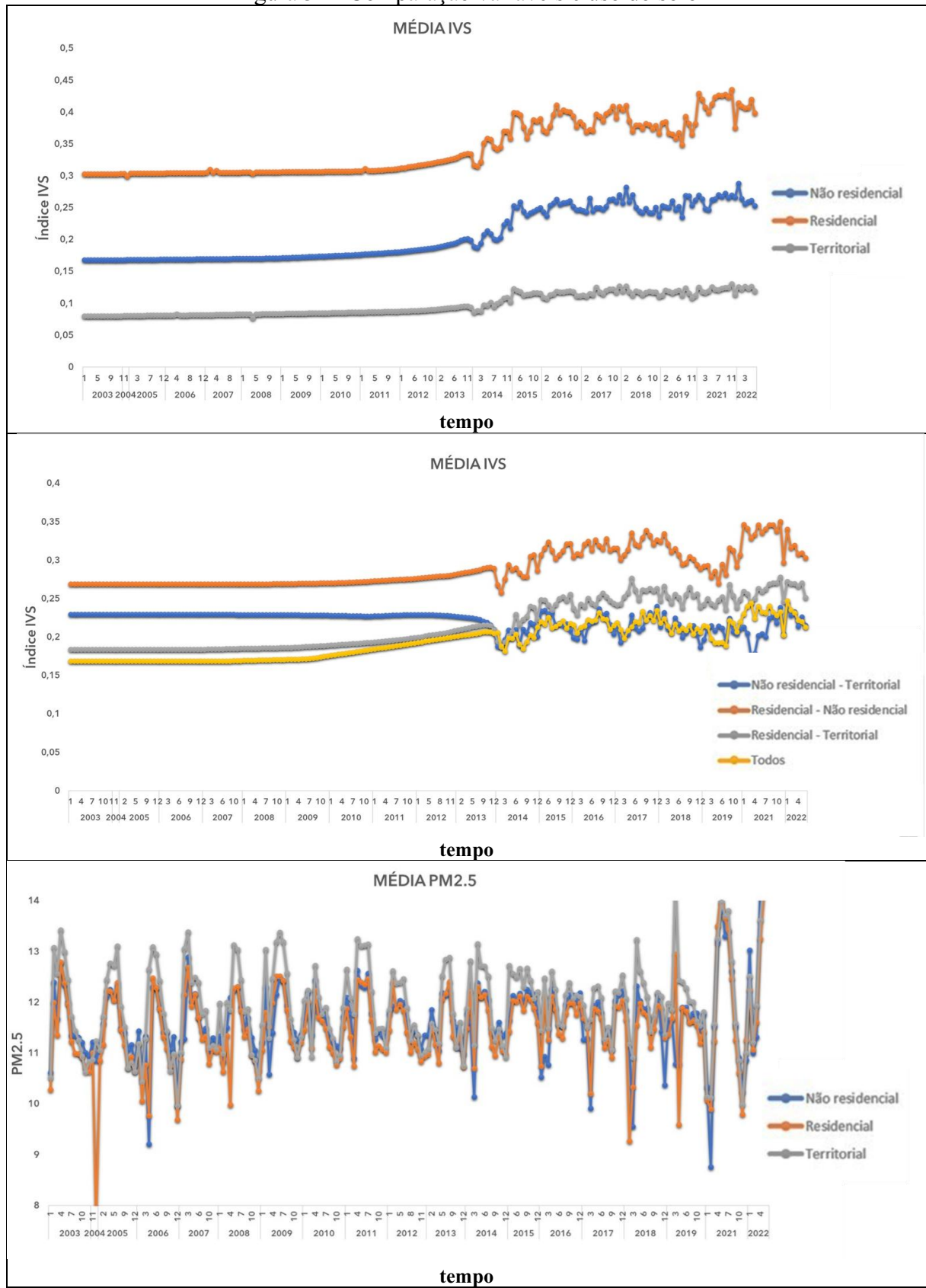
Figura 30 - Análise de uso do solo

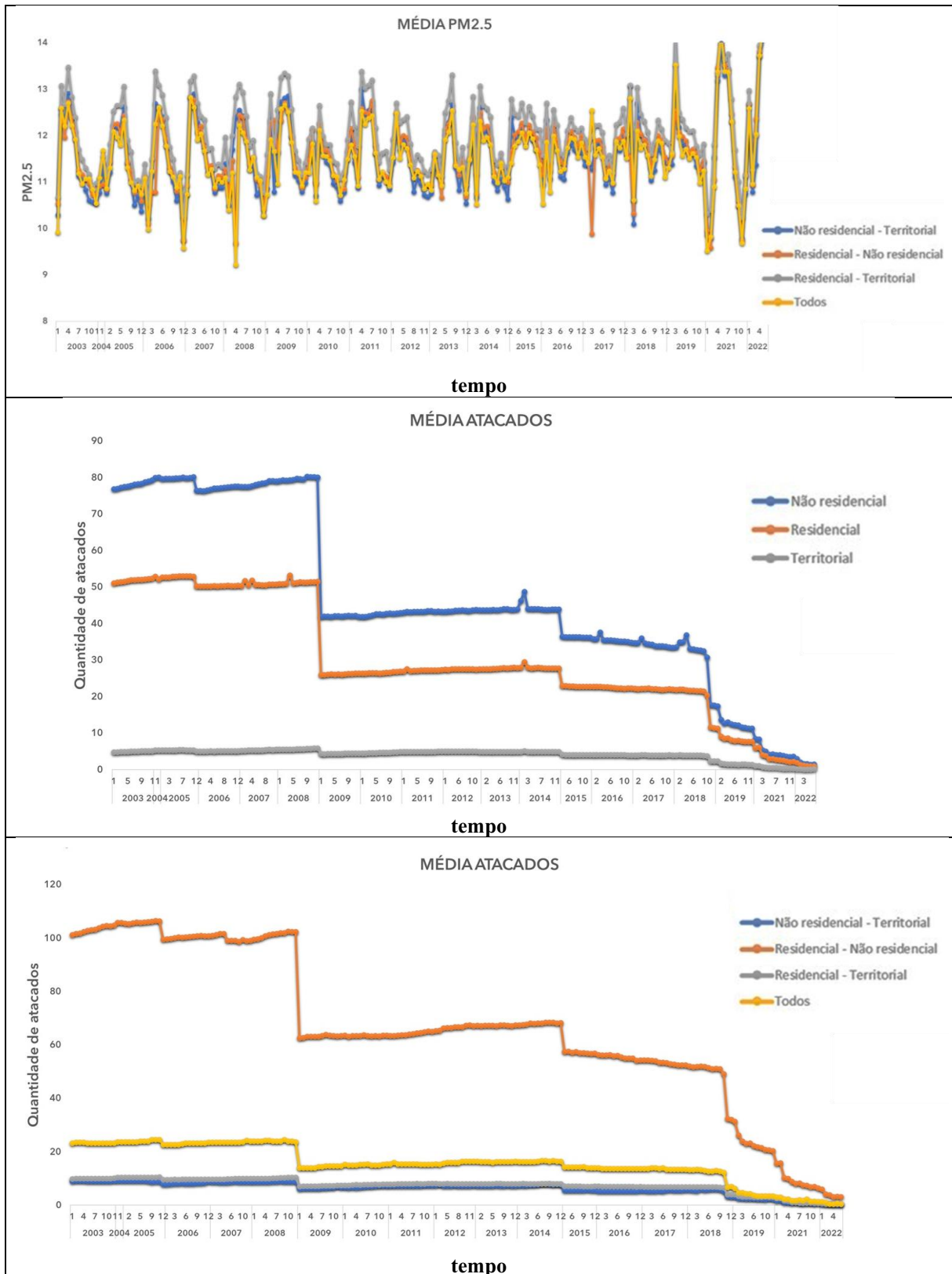


Fonte: Autor (2025).

Os resultados do uso do solo são mostrados na Figura 31. Os gráficos foram divididos para facilitar a compreensão.

Figura 31 - Comparação variáveis e uso do solo





Fonte: Autor (2025).

Com relação ao TUC, pode-se observar que os ataques estão principalmente em áreas não residenciais e depois em áreas residenciais ou em ambas. Enquanto a vulnerabilidade

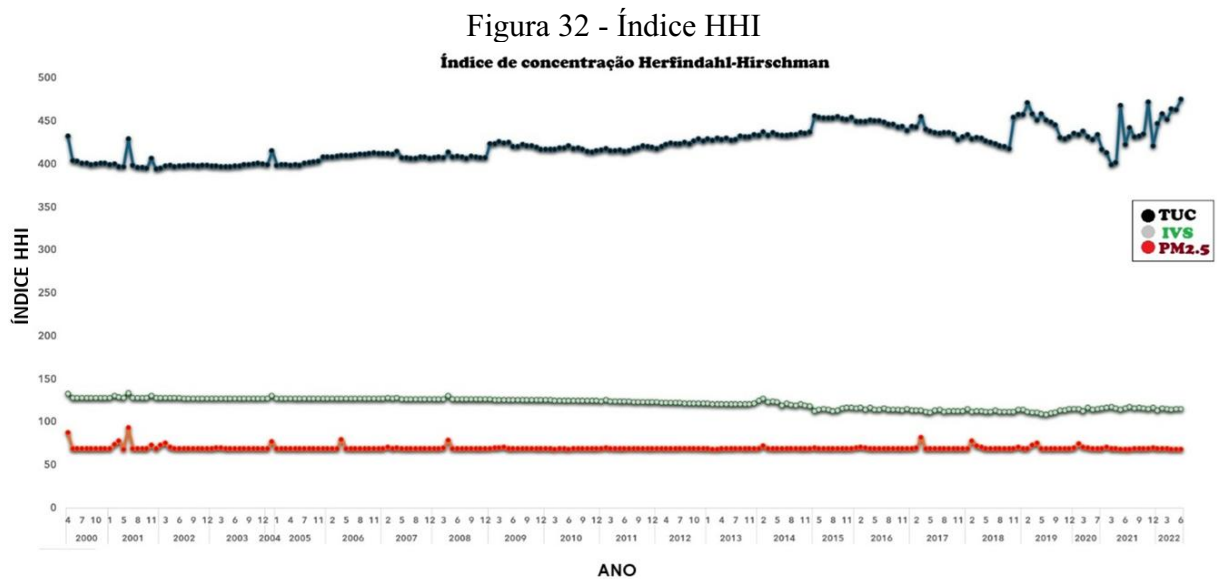
é maior nas áreas residenciais, por outro lado, o PM2.5 é semelhante entre as áreas, mas levemente maior nas áreas territoriais, depois nas não residenciais e, por fim, nas residenciais; isso reflete que cada variável se comporta de forma diferente em cada setor da cidade e, portanto, são necessárias mais análises e mais variáveis para entender as relações estudadas nesta pesquisa, já que cada variável se concentra em determinados usos de solo específicos.

4.5 Análise temporal da relação entre as variáveis

A análise do uso do solo permitiu um primeiro entendimento da análise espacial e temporal as variáveis, continuando com a análise visual temporal, primeiro foram realizados vídeos que permitem observar a evolução temporal das variáveis conjuntas, os vídeos podem ser encontrados desde o anexo 3 até o anexo 6, primeiro foi filmada a evolução temporal dos atacados (TUC), IVS e PM2.5 por mês por bairro e por hexágono, e posteriormente a evolução temporal do indicador Lisa da cidade toda, e excluindo regiões como a área das dunas.

Os vídeos permitiram realizar uma análise inicial de tipo visual, nos quais, pode-se observar que os comportamentos temporais são estáveis, mas seguindo os mesmos resultados já discutidos na análise espacial, com cada variável com comportamentos distintos, mas com destaque na região oeste da cidade. Para complementar a análise visual, deve ser realizada a análise estatística. Em seguida, o índice de concentração Herfindahl - Hirschman como primeiro indicador da evolução espacial e temporal, este indicador foi calculado para as três variáveis: Atacados (TUC), IVS e PM2.5.

O índice HHI, permite complementar o objetivo número 4, identificar como tem sido o comportamento histórico do impacto na qualidade do ar pelo TUC nas populações vulneráveis. Já que este índice determina se existe níveis de concentração da variável em determinadas zonas da cidade, quer dizer, pode-se observar, por exemplo, se os atacados estão se concentrando em zonas específicas ou se estão distribuídos de forma uniforme, se com o passo do tempo este índice aumenta se interpreta que a concentração vai aumentando com o tempo. Este índice permite entender se o fenômeno estudado tende a se agravar ou intensificar de forma temporal. O índice é mostrado na Figura 32, para a elaboração do gráfico, o indicador HHI foi calculado para cada mês; meses atípicos ou com dados faltantes foram eliminados. Quanto maior o valor do HHI, maior a concentração.



Fonte: Autor (2025).

Os resultados refletem que nos atacados é onde há maior concentração da variável em poucos hexágonos, ou seja, há poucos hexágonos predominantes onde se encontra a maioria dos atacados; possivelmente no bairro do Centro e seus vizinhos, enquanto no IVS e no PM2,5 estão distribuídos de forma mais uniforme entre vários hexágonos. Portanto, nos atacados o aumento do índice pode ser interpretado como que a maioria dos atacados da cidade estão localizados em poucos bairros, isto poderia se agravar se tais bairros são bairros com populações vulneráveis, além disso, a tendência é crescente, portanto, existe a possibilidade de ter presença do fenômeno de espraiamento logístico.

Com relação à evolução temporal, pode-se observar que a concentração dos atacados tem aumentado ao longo dos anos, enquanto PM2,5 e IVS permaneceram estáveis. O indicador HHI não é suficiente para analisar a evolução temporal das variáveis do objetivo 4, portanto, agora é necessário entender se há relações entre o HHI de cada variável, já que o HHI é uni variável, a continuação deve ser calculado as relações bi-variáveis.

Portanto, o índice de integração de Engle-Granger foi calculado; este índice serve para verificar se séries temporais possuem uma relação de equilíbrio de longo prazo entre elas, quer dizer, se são cointegradas, mesmo não represente causalidade, pode representar associação entre elas, assim que, se existe co-integração entre o índice de HHI de duas variáveis, entende-se que estas variáveis podem estar relacionadas e portanto complementam o objetivo da pesquisa que pretende entender as relações entre o TUC, a concentração de PM2.5 e a localização de populações vulneráveis.

Para calcular esse indicador, uma das premissas é que as variáveis não devem ser

estacionárias; portanto, o primeiro passo é calcular a estacionariedade, o teste de estacionariedade ADF (*Augmented Dickey-Fuller*) foi realizado; se o valor de p for maior que 5%, não é estacionário; os resultados são apresentados na Tabela 4. Para os atacados e o IVS encontrou-se que as séries são estacionárias, já para o HHI do PM2.5 o valor p deu como resultado que a série temporal é estacionária, assim que, esta variável não pode ser levada em consideração para o teste Engle-Granger e somente as outras duas variáveis serão analisadas.

Tabela 4 - Valor p – teste ADF

Variável	Valor p
TUC - Atacados	65%
IVS	64%
PM2.5	8.88e-29

Fonte: Autor (2025).

Para o teste de Engle-Granger, o calculou é simples, realiza-se o teste ADF para os resíduos da cointegração das séries, se o valor p é menor que 5% quer dizer que os resíduos são estacionários, quando os resíduos são estacionários se interpreta que as séries são co-integradas, neste caso, o valor p para os resíduos dos atacados e o IVS obteve-se um valor p de 7.26e-08, portanto, os resíduos são estacionários e, as séries são cointegradas. Para complementar o teste, calculou-se também o teste de Johansen no *Python*, este teste também avalia a co-integração entre séries temporais, o teste de Johansen também deu como resultado que o IVS e os atacados são cointegrados e também deu como resultado que há uma relação de cointegração única entre eles.

Embora esses resultados não reflitam que uma variável seja causal ou esteja correlacionada com a outra, eles dão indícios de que há uma relação entre elas; nesse caso, as variações nos níveis de concentração de atacados também têm impacto sobre as variações na concentração de IVS, de modo que, quando os atacados usados para a TUC começam a se concentrar em determinadas áreas da cidade, isso pode estar afetando a qualidade de vida das populações, pois também há um aumento nas concentrações de populações vulneráveis. Embora, com os dados disponíveis, não seja possível corroborar a existência de uma relação de causalidade entre as três variáveis, há áreas que podem ser afetadas e existem indícios de relações, como foi observado na zona oeste da cidade.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo explorou a intrincada relação entre o transporte urbano de cargas (TUC), a emissão de poluentes atmosféricos e o impacto desses fatores sobre a população em Fortaleza, uma cidade costeira com 121 bairros. Além disso, foi segmentada em 147 hexágonos geográficos. O objetivo foi ir além das generalizações, realizando uma análise desagregada por bairros e hexágonos para entender como o TUC a través do número de atacados pode refletir na qualidade do ar (PM2.5) e a saúde pública em diferentes partes da cidade.

Dentre dos objetivos, visou-se propor indicadores para caracterizar os impactos ambientais do TUC e sua relação com distribuição espacial das populações vulneráveis, as diferentes bases de dados e modelos utilizados permitiram atingir o objetivo almejado, adicionalmente, com o intuito de abordar o segundo objetivo de caracterizar a distribuição espacial e temporal das concentrações de PM2.5 em Fortaleza, conseguiu-se estruturar com o uso do modelo de *machine learning* que permitiu extrapolar os dados da estação para poder analisar a cidade toda.

Deve-se observar também que este trabalho apresenta uma contribuição metodológica sobre como analisar o impacto ambiental do TUC nas populações, pois apresenta ferramentas como um código para georreferenciamento, uma metodologia de previsão de séries temporais retrospectivas (*backasting*) e um modelo de previsão de PM2,5 com dados horários utilizando *Random forest* usando dados de satélite de épocas passadas. Portanto, brinda um suporte ferramental de apoio para pesquisas futuras. Encontra-se uma evolução metodológica em relação aos métodos tradicionais e mais agregados. Além disso, foi a melhor análise possível considerando as variáveis disponíveis e a variabilidade intrínseca dos poluentes e do TUC, já que estes são influenciados por muitos fenômenos antropogênicos e ambientais.

Na pesquisa conseguiu-se estudar os objetivos específicos 3 e 4, sendo o objetivo 3 investigar a relação entre o PM2.5, a localização dos atacados e a distribuição espacial da população vulnerável; e o objetivo 4 Identificar como tem sido o comportamento histórico do impacto na qualidade do ar pelo TUC nas populações vulneráveis, as diferentes análises estatísticas e gráficos permitiram analisar de forma temporal e especial as relações entre as variáveis, a análise Lisa permitiu identificar que existem relações por zonas específicas da cidade, enquanto a análise temporal permitiu identificar padrões estáveis, mas com a diminuição do número de atacados e um afastamento do bairro do Centro.

As descobertas revelam que Fortaleza apresenta um comportamento complexo de zonas urbanas com características distintas: o centro é predominantemente comercial; a região

sul, menos industrializada e com menor poluição, ainda abriga comunidades marginalizadas; o oeste apresenta uma combinação de alta vulnerabilidade social com variada intensidade de armazéns e emissões; e as áreas costeiras, especialmente nas dunas, enfrentam o impacto do aerossol marinho sem uma grande presença humana ou de armazenamento, portanto, no setor das dunas da cidade, os padrões de qualidade do ar são afetados por fatores não antropogênicos.

O objetivo geral desta pesquisa era compreender a distribuição dos impactos ambientais da localização dos atacados para o TUC e associa-la geograficamente com a localização das comunidades vulneráveis. Devido à complexidade do problema e à disponibilidade dos dados, não foi possível corroborar a hipótese inicial. Embora, destaca-se que foram identificadas zonas da cidade onde existem um número significativo de atacados, níveis altos de MP2.5 e porcentagem significativa de populações vulneráveis, como identificou-se na zona oeste da cidade, portanto, há indícios que existem relações entre as variáveis em determinadas zonas da cidade, assim que, existem padrões de associação em alguns períodos ou contextos específicos.

Os resultados sublinham a importância de evitar generalizações ao comparar diferentes cidades ou regiões e reforçam a necessidade de desagregações cuidadosas para capturar a realidade complexa e diversificada de cada área urbana. Tais insights são cruciais para o planejamento de políticas públicas e estratégias de planejamento urbano que promovam a justiça ambiental, considerando a distribuição equitativa das cargas ambientais e os benefícios entre todas as comunidades, ao mesmo tempo, ressaltam a importância de que os pesquisadores evitem chegar em conclusões sobre este fenômeno analisando a cidade como um todo, já que diferentes pesquisas são feitas de forma agregada no nível de cidade e região, e a presente pesquisa identificou que os padrões são diferentes em cada setor da cidade.

Este estudo também aponta para a necessidade de uma investigação mais profunda sobre como o TUC contribui para a concentração de PM2.5 em áreas vulneráveis, exigindo uma abordagem multifatorial que considere desde os tipos de produtos transportados até o volume diário de viagens de carga. A análise temporal indicou uma estabilidade nos níveis de PM2.5 e vulnerabilidade ao longo do tempo, enquanto a quantidade de armazéns diminuiu, refletindo mudanças nos padrões de consumo e na logística da cidade.

Ademais, as conclusões ressaltam a urgência de implementar políticas específicas para a gestão do TUC que levem em conta os níveis elevados de PM2.5, as zonas de alta atividade de TUC e a vulnerabilidade social, particularmente em áreas como a zona oeste. Essa abordagem poderá mitigar os riscos à saúde pública e respiratória em populações já desfavorecidas, que frequentemente têm acesso limitado a serviços de saúde de qualidade e a

infraestruturas públicas adequadas.

Salienta-se também a importância de uma visão integrada de todas as variáveis e comportamentos ambientais, económicos e sociais que podem interferir com o impacto dos TUC nas sociedades, uma vez que as políticas públicas giram geralmente em torno de soluções tecnológicas de curto prazo e não analisam adequadamente a complexidade da questão.

Este trabalho não apenas chama a atenção de pesquisadores e decisores para a complexidade e a especificidade dos desafios ambientais urbanos, mas também oferece uma base concreta para a formulação de medidas de gestão e regulamentação mais direcionadas e eficazes. Com esses dados, espera-se que planejadores urbanos e demais interessados possam empregar estratégias informadas que integrem a justiça ambiental nas políticas de desenvolvimento urbano e nos planos diretores da cidade de Fortaleza.

5.1 Principais limitações

A principal limitação do trabalho é a medição dos níveis de material particulado, a estação de monitoramento localiza-se apenas em alguns pontos da cidade. Portanto, foi necessário recorrer ao uso de modelos. Isto reflete que é importante que as organizações públicas invistam na medição deste tipo de poluente, uma vez que tem um elevado impacto na saúde da população.

Ainda, a limitação dos dados de saúde se reflete na falta de bases de dados unificadas ou de dados de vulnerabilidade atualizados, uma vez que a medição do último censo ainda não está disponível em nível desagregado para estudos académicos e o nível de desagregação impossibilita análise além do bairro.

Devido aos tipos de dados disponíveis e aos padrões de cidade, não foi possível realizar a análise da forma planejada, portanto, é necessário aprofundar em análises setorializadas para entender os padrões nos diferentes pontos da cidade. Ressalta-se que as variáveis de transporte de cargas e vulnerabilidade podem ser trabalhadas histórica e espacialmente com diferentes fontes de dados, como os dados censitários, portanto, a principal limitação foi a obtenção de dados históricos sobre PM_{2,5} na cidade, por isso, é importante em pesquisas futuras, por exemplo, utilizar ferramentas de imputação de dados ou tratamento de dados faltantes que permitam melhorias na modelagem espacial e temporal.

A base de dados da SEUMA que foi cruzada com os dados de satélite resultou numa série temporal não periódica, o que significa que algumas estratégias tradicionais de imputação de dados, como a imputação da média, da mediana ou do valor aleatório, não podem ser

utilizadas, pelo que é necessário continuar a trabalhar para identificar a forma de lidar com este tipo de dados não periódicos para melhorar a exatidão e precisão.

Embora as ferramentas de *machine learning* consigam identificar relações entre os dados e sejam técnicas avançadas eficazes, houve uma perda significativa de dados e de temporalidade. Uma tese que é muito útil em trabalhos futuros é a de Ribeiro (2015), em que o autor apresenta uma descrição detalhada dos tipos de dados em falta e como lidar com eles, esta deve ser complementada com ferramentas de análise de dados não periódicos como a apresentada por Elorrieta *et al.* (2019), onde aplicam o Método do Efeito Dependente do Local (SDEM) para a imputação de dados faltantes, que se baseia no pressuposto de que os efeitos das estações de monitorização e as variações temporais estão correlacionados. Além disso, Cao *et al.* (2025) apresentam o modelo ILTNet, que é uma combinação de previsão linear (AR) e não linear (Informer).

Assim como, deve ser focado no contexto de fatores ambientais e poluentes como o material particulado, o artigo de Nogarotto *et al.* (2019) serve de base para isso, o método proposto pelos autores calcula valores faltantes com base em médias relacionadas a fatores temporais como dias da semana. Cabe ressaltar que por se tratar de uma série temporal não periódica, é necessário ir mais a fundo e ir além dos métodos tradicionais, portanto, foge do escopo deste trabalho e por isso é apresentado como sugestão para o futuro.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

Diante do exposto tem-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) Realizar pesquisas com abordagem histórico-temporal para conhecer a tendência que o fenômeno estudado tem tido;
- b) Realizar pesquisas com diferentes modelos de previsão de material particulado e alianças com o setor público para aumentar a cobertura de medição;
- c) Realizar pesquisas visando soluções inovadoras para os problemas estudados neste documento;
- d) Destaca-se a importância de ter tecnologias de monitoramento ao longo da cidade, com o intuito de ter um maior entendimento das dinâmicas de concentração de poluentes da cidade, pois a falta de medição limita a compreensão dos fenômenos ambientais.

- e) Implementar melhoras do modelo de previsão de material particulado de acordo com o descrito na seção das principais limitações, adicionando mais variáveis, tratando os dados faltantes não periódicos ou treinando a rede com dados de outras cidades ou países como Estados Unidos onde existe uma maior disponibilidade de dados.

REFERÊNCIAS

BARBOSA FILHO, Fernando de Holanda. A crise econômica de 2014/2017. **Estudos Avançados**, *São Paulo*, v. 31, n. 89, p. 51–60, 2017. DOI: 10.1590/s0103-40142017.31890006.

BETANCOURT, R.; GALVIS, B.; MENDEZ-MOLANO, D.; RINCON-RIVEROS, J. M.; CONTRERAS, Y.; MONTEJO, T. A.; ROJAS-NEISA, D. R.; CASAS, O. Toward cleaner transport alternatives: reduction in exposure to air pollutants in a mass public transport. **Environmental Science & Technology**, v. 56, p. 7096-7106, 2022. DOI: 10.1021/acs.est.1c07004.

BRUSSELAERS, Nicolas; MACHARIS, Cathy; MOMMENS, Koen. Rerouting urban construction transport flows to avoid air pollution hotspots. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 119, n. 103747, jun. 2023. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103747.

BRUSSELAERS, Nicolas; MACHARIS, Cathy; MOMMENS, Koen. The health impact of freight transport-related air pollution on vulnerable population groups. **Environmental Pollution**, v. 329, n. 121555, abr. 2023. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121555.

CAO, Jianwen; WEI, Xingbao; YANG, Yi; LI, Caihong; ZHAO, Wenqing. Modelo para previsão de séries temporais não periódicas. **Big Data Research**. v. 1, p. 1-19. 2025, DOI : 10.11959/j.issn.2096-0271.2025010

CHENG, Shifen; ZHANG, Beibei; PENG, Peng; LU, Feng. Health and economic benefits of heavy-duty diesel truck emission control policies in Beijing. **Environment International**, v. 179, n. 108152, 2023. ISSN 0160-4120. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108152

COLVILE, R. N.; HUTCHINSON, E.; MINDELL, J.; WARREN, R. The transport sector as a source of air pollution. **Atmospheric Environment**, v. 35, p. 1537-1565, 2001. DOI: 10.1016/S1352-2310(00)00551-3.

CIDELL, Julie. Concentration and decentralization: The new geography of freight distribution in US metropolitan areas. **Journal of Transport Geography**, v. 18, n. 3, p. 363-371, 2010. Tourism and climate change. ISSN 0966-6923. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2009.06.017.

COUTO, Lucas de Oliveira do; NUTO, Sharmênia de Araújo Soares; HACON, Sandra de Souza; GIODA, Adriana; SOUSA, Francisco Wagner de; BARREIRA FILHO, Edenilo

Baltazar; GONÇALVES, Karen dos Santos; PÉRISSÉ, André Reynaldo Santos. Estimativa da concentração média diária de material particulado fino na região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Ceará, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 7, p. 1-14, 2020. DOI: 10.1590/0102-311X00177719.

DABLANC, L.; RAKOTONARIVO, D. The impacts of logistics sprawl: How does the location of parcel transport terminals affect the energy efficiency of goods' movements in Paris and what can we do about it? **Procedia—Social and Behavioral Sciences**, v. 2, n. 3, p. 6087-6096, 2010. DOI: 10.1016/j.sbspro.2010.04.021.

DEMETILLO, Mary; HARKINS, Colin; MCDONALD, Brian; CHODROW, Philip; SUN, Kang; PUSEDE, Sally. Space-based observational constraints on NO₂ air pollution inequality from diesel traffic in major US cities. **Geophysical Research Letters**, Estados Unidos, v. 48, p. 1-12, set. 2021. DOI: 10.1029/2021GL094333.

DENNIS-BAUER, Sarah; JALLER, Miguel. Truck transportation in California: Disaggregating public health costs from criteria pollutants. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 122, n. 103850, 2023. ISSN 1361-9209. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103850.

DYER, Georgia; KHOMENKO, Sasha; ADLAKHA, Deepti; ANENBERG, Susan; BEHNISCH, Martin; BOEING, Geoff; ESPERON-RODRIGUEZ, Manuel; GASPARRINI, Antonio; KHREIS, Haneen; KONDO, Michelle; MASSELOT, Pierre; MCDONALD, Robert; MONTANA, Federica; MITCHELL, Rich; MUELLER, Natalie; NAWAZ, M.; PISONI, Enrico; PRIETO-CURIEL, Rafael; REZAEI, Nazanin; NIEUWENHUIJSEN, Mark. Exploring the nexus of urban form, transport, environment and health in large-scale urban studies: A state-of-the-art scoping review. **Environmental Research**, v. 257, n. 119324. 2024. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119324.

ELORRIETA, Felipe; EYHERAMENDY, Susana; PALMA, Wilfredo. Modelo autoregressivo discreto para observações de séries temporais irregulares. **Astronomy & Astrophysics**, v. 627, n. 120, 2019. DOI: 10.1051/0004-6361/201935560.

FAIRBURN, Jon; SCHULE, Steffen; DREGER, Stefanie; HILZ, Lisa; BOLTE, Gabriele. Social inequalities in exposure to ambient air pollution: A systematic review in the WHO European Region. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 3127, ago. 2019. DOI: 10.3390/ijerph16173127.

GLAZENER, Andrew; SANCHEZ, Kristen; RAMANI, Tara; ZIETSMAN, Josias; NIEUWENHUIJSEN, Mark J.; MINDELL, Jennifer S.; FOX, Mary; KHREIS, Haneen. Fourteen pathways between urban transportation and health: A conceptual model and

literature review. **Journal of Transport & Health**, v. 21, n. 101070. 2021, ISSN 2214-1405. DOI: 10.1016/j.jth.2021.101070.

GUZMAN, Luis; BELTRAN, Carlos; MORALES, Ricardo; SARMIENTO, Olga. Inequality in personal exposure to air pollution in transport microenvironments for commuters in Bogotá. **Case Studies on Transport Policy**, Colômbia, v. 11, n. 100963 mar. 2023. DOI: 10.1016/j.cstp.2023.100963.

HAGENBJÖRK, A.; MALMQVIST, E.; MATTISSON, K.; SOMMAR, N.; MODIG, L. The spatial variation of O₃, NO, NO₂ and NO_x and the relation between them in two Swedish cities. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 161, 2017. DOI: 10.1007/s10661-017-5872-z.

HANDSCHUH, J.; ERBERTSEDER, T.; SCHAAP, M.; BAIER, F. Estimating PM_{2.5} surface concentrations from AOD: A combination of SLSTR and MODIS. Remote Sensing Applications. **Society and Environment**, v. 26, n. 100716, 2022. ISSN 2352-9385. DOI: 10.1016/j.rsase.2022.100716.

HOUSTON, Douglas; ONG, Paul; WU, Jun; WINER, Arthur. Structural disparities of urban traffic in Southern California: Implications for vehicle-related air pollution exposure in minority and high-poverty neighborhoods. **Journal of Urban Affairs**, v. 26, n. 5, p. 565-592, 2004. DOI: 10.1111/j.0735-2166.2004.00215.x.

HOUSTON, Douglas; LI, Wei; WU, Jun. Disparities in exposure to automobile and truck traffic and vehicle emissions near the Los Angeles-Long Beach port complex. **American Journal of Public Health**, v. 104, p 156-164, 2013. DOI: 10.2105/AJPH.2012.301120.

IRCEL-CELINE. Belgian interregional environment agency *What is the difference between emission, concentration, exposure, and deposition?* Disponível em: <https://www.irceline.be/en/documentation/faq/what-is-the-difference-between-emission-concentration-exposure-and-deposition>. Acesso em: 31 ago. 2024

JALALI, Samireh; WOHLIN, Claes. Systematic literature studies: Database searches vs. backward snowballing. **ACM-IEEE international symposium on empirical software engineering and measurement**, Lund, Suécia, p 29-38. Trabalho apresentado no congresso ESEM '12, 2012, [Lund, Suécia], DOI: 10.1145/2372251.2372257.

JEPHCOTE, Calvin; CHEN, Haibo. Environmental injustices of children's exposure to air pollution from road-transport within the model British multicultural city of Leicester: 2000-09. **The Science of the Total Environment**, v. 414, p. 140-151, dez. 2011. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.11.040.

KOÇ, Çağrı; BEKTAŞ, Tolga; JABALI, Ola; LAPORTE, Gilbert. The impact of depot location, fleet composition and routing on emissions in city logistics. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 84, p. 81-102, 2016. ISSN 0191-2615. DOI: 10.1016/j.trb.2015.12.010.

LUO, Xiao; DONG, Liang; DOU, Yi; LIANG, Hanwei; REN, Jingzheng; FANG, Kai. Regional disparity analysis of Chinese freight transport CO₂ emissions from 1990 to 2007: Driving forces and policy challenges. **Journal of Transport Geography**, v. 56, p 1-14, ago. 2016. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2016.08.010.

MAANTAY, Juliana. Zoning, equity, and public health. **American Journal of Public Health**, v. 91, p. 1033–1041, ago. 2001. DOI: 10.2105/AJPH.91.7.1033.

MARTENS, Karel; BASTIAANSEN, Jeroen; LUCAS, Karen. 2 - Measuring transport equity: Key components, framings and metrics. In: LUCAS, Karen; MARTENS, Karel; DI CIOMMO, Florida; DUPONT-KIEFFER, Ariane (Ed.). **Measuring Transport Equity**. Elsevier, 2019. p. 13–36. ISBN 978-0-12-814818-1. DOI: 10.1016/B978-0-12-814818-1.00002-0

MOMMENS, Koen; BRUSSELAERS, Nicolas; VAN LIER, Tom; MACHARIS, Cathy. A dynamic approach to measure the impact of freight transport on air quality in cities. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118192. set. 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118192.

NOGAROTTO, Danilo Covaes; RISSI, Nathalia Morgana; POZZA, Simone Andréa. Um novo método de preenchimento de dados faltantes aplicado a séries temporais de concentração de MP10. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 15, n. 37, p. 275-296. Jul./set. 2019,

OLAPIRIYAKUL, Sun; NGUYEN THI, Thaolan. Land use and public health impact assessment in a supply chain network design problem: A case study. **Journal of Transport Geography**, v. 75, p. 70–81, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.01.011.

PADILLA, Cindy M.; KIHAL-TALANTIKITE, Wahida; VIEIRA, Verónica M.; ROSSELLO, Philippe; LE NIR, Geraldine; ZMIROU-NAVIER, Denis; DEGUEN, Severine. Air quality and social deprivation in four French metropolitan areas—A localized spatio-temporal environmental inequality analysis. **Environmental Research**, v. 134, p. 315–324, 2024, ISSN 0013-9351. DOI: 10.1016/j.envres.2014.07.017

PREFEITURA DE FORTALEZA, Pesquisa Origem-destino - Plano de Acessibilidade Sustentável de Fortaleza (PASFOR), Fortaleza, 2019, Reporte Técnico. Disponível em: <https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/prefeitura-de-fortaleza-realiza-pesquisa-sobre-origem-e-destino-para-melhorar-sistema-de-transporte-publico>. Acesso em: 02 mar. 2023

PINHEIRO, Carlos; FELIU, Jesus; BERTONCINI, Bruno. Addressing spatial heterogeneity and MAUP in urban transport geography: A multi-scale analysis of accessibility and warehouse location. **Journal of Transport Geography**, v. 123 (104078), 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.104078>.

PISCITELLI, Prisco; VALENZANO, Barbara; RIZZO, Emanuele; MAGGIOTTO, Giuseppe; RIVEZZI, Matteo; CORCIONE, Felice; MIANI, Alessandro. Air pollution and estimated health costs related to road transportation of goods in Italy: A first healthcare burden assessment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, p. 2876, ago. 2019, DOI: 10.3390/ijerph16162876.

RIBEIRO, Elisalvo Alves. *Imputação de Dados Faltantes via Algoritmo EM e Rede Neural MLP com o Método de Estimativa de Máxima Verossimilhança para Aumentar a Acurácia das Estimativas*. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.

RIVASA, Ioar; KUMAR, Prashant; HAGEN-ZANKER, Alex. Exposure to air pollutants during commuting in London: Are there inequalities among different socio-economic groups? **Environment International**, v. 101, 2017, p. 143–157. ISSN 0160-4120. DOI: 10.1016/j.envint.2017.01.019.

ROWANGOULD, Gregory. A new approach for evaluating regional exposure to particulate matter emissions from motor vehicles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 34, p. 307-317, jan. 2015. DOI: 10.1016/j.trd.2014.11.020.

ROWANGOULD, Gregory M. A census of the US near-roadway population: Public health and environmental justice considerations. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 25, p. 59–67, 2013. ISSN 1361-9209. DOI: 10.1016/j.trd.2013.08.003

SAHIN, Olcay; ZUNIGA-GARCIA, Natalia; STINSON, Monique. Equity analysis of freight transportation using a large-scale agent-based modeling framework. **Procedia Computer Science**, Leuven, Bélgica v. 220, p. 692–697, 2023. Trabalho apresentado em: The 14th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT) e the 6th International Conference on Emerging Data and Industry 4.0 (EDI40), 2023, [Leuven, Bélgica], ISSN 1877-0509. DOI: 10.1016/j.procs.2023.03.090.

THIND, Maninder P. S.; TESSUM, Christopher W.; MARSHALL, Julian D. Environmental health, racial/ethnic health disparity, and climate impacts of inter-regional freight transport in the United States. **Environmental Science & Technology**, v. 57, n. 2, p. 884–895, 2023. ISSN 0013-936X. DOI: 10.1021/acs.est.2c03646.

TRAVIS, Fried; BROWNE, Michael; GOODCHILD, Anne; SANCHEZ-DIAZ, Ivan. Seeking equity and justice in urban freight: where to look? **Transport Reviews**, v. 44, n. 1, p. 191–212, 2023. DOI: 10.1080/01441647.2023.2247165.

TRAVIS, Fried; VERMA, Rishi; GOODCHILD, Anne. Ecommerce and environmental justice in metro Seattle. **Research in Transportation Economics**, Seattle, v. 103, p. 101382, 2023. ISSN 0739-8859. DOI: 10.1016/j.retrec.2023.101382.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Climate Change and Social Vulnerability in the United States: A Focus on Six Impacts*. Washington, D.C.: EPA, 2021. Disponível em: <http://www.epa.gov/cira/social-vulnerability-report>. Acesso em: 17 fev. 2025

VALLERO, D. A. Fundamentals of air pollution. **London Elsevier Academic Press**, Londres, v. 5. ed. 2016

VAN WEE, Bert; BANISTER, David. Literature review papers: the search and selection process. **Journal of Decision Systems**, v. 0, n. 0, p. 1–7, 2023. DOI: 10.1080/12460125.2023.2197703.

WANG, Yifan; LIU, Pengfei; SCHWARTZ, Joel; CASTRO, Edgar; WANG, Wenhao; CHANG, Howard; SCOVRONICK, Noah; SHI, Liuhua. Disparities in ambient nitrogen dioxide pollution in the United States. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Estados Unidos, v. 120 (16), abr. 2023, e2208450120. DOI: 10.1073/pnas.2208450120.

WEBSTER, Jane; WATSON, Richard T. Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. **MIS Quarterly**, v. 26, n. 2, p. 13–23, 2002. ISSN 0276-7783.

WORLD HEALTH ORGANIZATION REGIONAL OFFICE FOR EUROPE; OECD. Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: Clean air, health and wealth. *European Environment and Health Processes*, p. 1–54, 2015.

YE, Mi; DERUDDER, Ben; JIANG, Lei; CASET, Freke; LI, Yingcheng. The effects of urban polycentricity on particulate matter emissions from vehicles: Evidence from 102 Chinese cities. **Urban Planning**, China, v. 8, p. 135–147, jun. 2023. DOI: 10.17645/up.v8i3.6183.

YUAN, Quan. Environmental justice in warehousing location: State of the art. **Journal of Planning Literature**, v. 33, n. 3, p. 287–298, 2018. DOI: 10.1177/0885412217753841.

YUAN, Quan. Mega freight generators in my backyard: A longitudinal study of environmental justice in warehousing location. **Land Use Policy**, Los Angeles, v. 76, p. 130–143, 2018. ISSN 0264-8377. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.04.013

ZHAI, Wenya; ZHANG, Kaili; GOU, Feicui; CHENG, Hanbei; LI, Zhigang; ZHANG, Yan. Examining supply-demand imbalances and social inequalities of regulating ecosystem services in high-density cities: A case study of Wuhan, China. **Ecological Indicators**, Wuhan, China, v. 154, p. 110654, out. 2023, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110654.

ZHANG, Beibei; CHENG, Shifen; LU, Feng; LEI, Mei. Estimation of exposure and premature mortality from near-roadway fine particulate matter concentrations emitted by heavy-duty diesel trucks in Beijing. **Environmental Pollution**, Beijing, China, v. 311, p. 119990, 2022. ISSN 0269-7491. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119990.

ZHAO, Zhibo; SHI, Xunpeng; YE, Cao; HU, Mingzhao. The impact of urban population spatial distribution on CO2 emissions in China from the perspective of individual and interactive effects. **Environmental Science and Pollution Research**, China, v. 30, p. 1–14, jun. 2023. DOI: 10.1007/s11356-023-28105-8.

APÊNDICE 1 - REPOSITÓRIO DE GITHUB

Link: <https://github.com/SebastianCastellanosUdeA/Machine-Learning>

APÊNDICE 2 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DIÁRIA DO PM_{2.5} MODELADA

Link:

<https://drive.google.com/file/d/1cFe2fNk9ELSjzNZDEXDOqeNtf1HpDsXj/view?usp=sharing>

g

APÊNDICE 3 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DO TUC, IVS E PM2.5 POR MÊS POR BAIRRO

Link: <https://drive.google.com/file/d/1nARwzySd9PH-A8wApvQmQpgh5xtUjZ4p/view?usp=sharing>

APÊNDICE 4 EVOLUÇÃO TEMPORAL DO TUC, IVS E PM2.5 POR MÊS POR HEXÁGONO

Link: <https://drive.google.com/file/d/1heMkE5hq1U30LkUaa0-zJHvOkXtSCmDp/view?usp=sharing>

APÊNDICE 5 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ANÁLISE LISA

Link: <https://drive.google.com/drive/folders/1v-24ddygcG5-LuBbvSEQbXdJUNiJZ9fp?usp=sharing>

**APÊNDICE 6 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ANÁLISE LISA EXCLUINDO A
ÁREA DAS DUNAS, O CENTRO, ALDEOTA E MARAPONGA**

Link:

<https://drive.google.com/drive/folders/1KAkIS9qc2Fuu2MrJ2zM2wEupjUCF8Lm4?usp=sharing>