



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

BRENDA ARIELLY MENDONÇA RODRIGUES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONECTIVIDADE VIÁRIA SOBRE AS EMISSÕES
DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS CONFORME O PERFIL LOGÍSTICO**

**FORTALEZA
2024**

BRENDA ARIELLY MENDONÇA RODRIGUES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONECTIVIDADE VIÁRIA SOBRE AS
EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS CONFORME O PERFIL
LOGÍSTICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Transportes do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do Título de
Mestre em Engenharia de Transportes. Área
de Concentração: Planejamento e operação
de sistemas de transportes.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini

FORTALEZA

2024

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)

R611a Rodrigues, Brenda Arielly Mendonça.

Análise da influência da conectividade viária sobre as emissões de poluentes atmosféricos conforme
o perfil logístico / Brenda Arielly Mendonça Rodrigues. – 2024.
96 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini.

1. Conectividade viária. 2. Emissão de poluente. 3. Transporte urbano de carga. 4. Perfil logístico.
I. Título.

CDD 388

BRENDA ARIELLY MENDONÇA RODRIGUES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONECTIVIDADE VIÁRIA SOBRE AS
EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS CONFORME O PERFIL
LOGÍSTICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Planejamento e operação de sistemas de transportes.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família e ao grupo TRAMA.

AGRADECIMENTOS

À Jesus, que se pôs a caminho comigo. À família, em especial aos meus pais, Marcos e Rosângela, e às irmãs, Amanda e Camila, que me deram suporte necessário durante esses 3 anos, sempre me lembrando de ter paciência e de acreditar no processo. Tudo sempre com eles, por eles e para eles (*in memorian* Maria Gessi e Maria Helueni).

Ao meu orientador, prof. Bruno, por não desistir da gente nem do nosso crescimento em confiança, em sabedoria e em profissionalismo. Obrigada por ser tão grande, obrigada por tanto! À banca, profs. Verônica e Ana por terem aceitado participar desse trabalho, pelas contribuições que o fizeram melhor e pela representatividade feminina no ambiente acadêmico.

Ao Carlos, quase coorientador de pesquisa e melhor dupla de trabalho, por tantas "janelas mentais" abertas, pela criatividade e pelo empenho mostrado em toda atividade. Sono grata per ogni giorno che ho imparato da te!! Grazie mille, ragazzo. Ao João Evangelista que de longe, por reuniões via meet, foi luz e escuta ativa durante a finalização desse trabalho. Obrigadaaaaa!

Aos demais amigos e colegas de trabalho do TRAMA que surgiram como um suspiro em meio ao caos, em especial ao Jairo e ao Klinsman que foram super perturbados durante essa dissertação. Obrigada pela paciência. À Larissa e à Amanda, por terem me escutado quando o processo não andava e por terem puxado minhas orelhas quando foi preciso. À Letícia e à Fernanda por serem companhia sempre, pelas trocas de ideias de trabalho, pelas conversas de apoio pessoal e profissional, pelas melhores fofocas, pela empatia, pelas reuniões produtivas que misturavam drama e comédia. A todos, sinto amor por vocês e o percebo em cada fase.

Aos amigos que escutam "vou defender" desde o final de 2022, em especial à galera do CIJ (Aline, Marquinhos, Geovane, Amária, Dri, Tomelina, Regi e Jana). Obrigada pelos convites para ser mais presente e para encontrar meu propósito. Que bom que encontrei vocês bem no início desses 3 anos e pude compartilhar a minha evolução nesse processo.

Aos bests, Alexandre Conrado e Wanderson Hugues, engenheiros e pesquisadores incríveis, que sempre me ajudaram a remar, dando feedbacks, inclusive, antes do orientador e da banca. Que caminho lindo e difícil estamos construindo. Obrigada por serem presença mesmo na distância.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"Não é o muito saber que sacia e satisfaz a alma,
mas o sentir e saborear internamente todas as
coisas."

(Santo Inácio de Loyola)

RESUMO

A operação do Transporte de Carga, apesar de ser importante para o desenvolvimento de uma região, está bastante relacionado a externalidades negativas que tendem a se intensificar ao serem inseridas no ambiente urbano devido à diversidade de uso do solo, bem como à complexidade da malha viária com suas possibilidades de caminhos alternativos que podem influenciar em variação na extensão e a duração do trajeto e, assim, na ocorrência e na eficiência das entregas, refletindo nos custos logísticos. Dessa forma, e considerando as lacunas de pesquisa encontradas quanto ao estudo da relação entre conectividade viária, diversidade do meio urbano e emissão de poluentes pelo transporte urbano de cargas, o objetivo principal desse trabalho é compreender os efeitos da conectividade da rede viária sobre a emissão de poluentes atmosféricos conforme o Perfil Logístico, tendo como ideia principal de unidade de integração entre eles as rotas entre pontos de origem e de destino de entregas. Para isso, o estudo foi dividido em artigos para facilitar a compreensão das relações levantadas, tendo sido definidos Perfis Logísticos para a cidade de Fortaleza (CE) utilizando variáveis de uso do solo, de perfil econômico, de estabelecimento e de conectividade, por meio de indicadores de centralidade da Sintaxe Espacial (choice e integration) que tornaram a definição mais representativa. Com os perfis gerados, foi possível traçar rotas entre pares OD pelo software AimSun Next 22.00 que forneceu, também, os valores de emissão de CO₂ de acordo com o Modelo de Emissão de Londres. Ao serem feitos os testes estatísticos, a correlação entre conectividade e emissão para as rotas não foi significativa, porém foram encontradas aderências aos resultados de outros autores revisados.

Palavras-chave: conectividade viária; emissão de poluentes; transporte urbano de carga; perfil logístico.

ABSTRACT

Freight transport activity, despite being important for the development of a region, is closely related to negative externalities that tend to be intensified by its insertion into urban environment due to the diversity of land use, as well as the complexity of the road network, with its alternative routes possibilities that can influence variations in length and duration of the route and, thus, the occurrence and efficiency of deliveries, reflecting on logistics costs. Therefore, and considering the research gaps found regarding the study of the relationship between road connectivity, diversity of the urban environment and pollutant emissions due to urban freight transport operation, the main purpose of this work is to understand the effects of road network connectivity on air pollutant emissions according to the Logistics Profile, using routes between origin and destination deliveries points as the unit of integration between those subjects. Thus, the study was divided into articles to facilitate the understanding of those relationships mentioned, having defined Logistics Profiles for the city of Fortaleza (CE) using variables of land use, economic profile, settlement and connectivity, through Spatial Syntax centrality indicators (*choice* and *integration*) which made a more representative definition. By profiles' generation it was possible to trace paths between OD pairs using the *software* AimSun Next 22.00, which also provided CO₂ emission values according to the London Emission Model (LEM). The statistical tests carried resulted in a non-significant correlation between connectivity and emission for the routes (very weak/null), however adherence to other authors results was found as well as improvement suggestions for future research.

Keywords: road connectivity; pollutant emission; urban freight transport; logistic profile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Estrutura da dissertação.....	19
Figura 2	– Mapa axial (a) e o grafo correspondente (b) para uma mesma rede.	31
Figura 3	– Ilustração representativa do indicador <i>choice</i> de um local i.	32
Figura 4	– Método para a construção dos Perfis Logísticos	36
Figura 5	– Detalhe da área de estudo com nomes dos bairros principais	37
Figura 6	– Zonas de restrição ao transporte de carga em Fortaleza (CE).....	42
Figura 7	– Metodologia para a análise da conectividade viária.....	43
Figura 8	– Metodologia seguida para a construção dos Perfis Logísticos.....	47
Figura 9	– Malha de hexágonos gerada com detalhe para a área de estudo.	49
Figura 10	– Mapas gerados para as variáveis constituintes dos Perfis Logísticos.	50
Figura 11	– Mapas gerados para as variáveis constituintes dos Perfis Logísticos.	51
Figura 12	– Perfis Logísticos para a área de estudo	53
Figura 13	– Fluxograma representativo do método da revisão sistemática.....	62
Figura 14	– Nuvem de palavras resultante da revisão sistemática	64
Figura 15	– Metodologia para verificação da relação entre emissão de poluentes e conectividade.....	71
Figura 16	– Pares OD e rotas geradas por Perfil Logístico (cores meramente ilustrativas para melhorar a diferença visual entre as rotas).	76
Figura 17	– Gráficos de dispersão: i. <i>choice</i> x emissão; ii. <i>integration</i> x emissão.....	77
Figura 18	– Histograma e box-plot para avaliação dos dados	77
Figura 19	– Mapas de conectividade (Sintaxe Espacial) e de emissão (AimSun) para a região de estudo.	78
Figura 20	– Conjunto de rotas que tiveram mesmo valor de emissão	80
Figura 21	– Comparação das emissões por par OD com a adição de link. A tabela traz a emissão total na replicação 1 (vermelho), e com a substituição pelas rotas das replicações 2 (verde) e 3 (azul) para os casos em que a emissão total diminuiu.	81
Figura 22	– Gráficos de emissão total por perfil e boxplot comparativo para emissão, <i>choice</i> e <i>integration</i>	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos parâmetros utilizados na literatura para construir os Perfis Logísticos.....	26
Quadro 2 – Resumo dos indicadores de conectividade com respectiva referência	30
Quadro 3 – Resumo dos indicadores de centralidade com as respectivas referências .	34
Quadro 4 – Divisão dos grupos de CNAE.....	40
Quadro 5 – Combinação das variáveis e classificação dos grupos.....	48
Quadro 6 – Resumo das rotas geradas por Perfil Logístico.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estatística descritiva dos dados	78
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SE	Sintaxe Espacial
MP	Material Particulado
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PL	Perfil Logístico
SOM	<i>Self Organized Map</i>
TUC	<i>Transporte Urbano de Carga</i>
UMAP	<i>Uniform Manifold Approximation and Projection</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização.....	16
1.2	Objetivos	18
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	18
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	18
1.3	Estrutura da dissertação	18
2	IMPACTO DA INCORORAÇÃO DA CONECTIVIDADE VIÁRIA NA CONSTRUÇÃO DOS PERFIS LOGÍSTICOS	21
2.1	Introdução	21
2.2	Revisão Bibliográfica.....	22
2.2.1	<i>Perfis Logísticos.....</i>	22
2.2.2	<i>Conectividade viária no contexto do TUC.....</i>	27
2.3	Método	36
2.3.1	<i>Área de estudo.....</i>	36
2.3.2	<i>Construção dos Perfis Logísticos</i>	37
2.4	Resultados Obtidos	48
3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONECTIVIDADE VIÁRIA NA EMISSÃO DE POLUENTES PELO TUC.....	55
3.1	Introdução	55
3.2	Revisão Conceitual.....	57
3.2.1	<i>Conectividade e emissão de poluentes</i>	57
3.2.2	<i>Conectividade e exposição aos poluentes.....</i>	59
3.3	Método	61
3.4	Resultados Obtidos	63
4	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS PERFIS LOGÍSTICOS QUANTO À EMISSÃO DE POLUENTES.....	67

4.1	Introdução	67
4.1.1	Revisão Bibliográfica.....	68
4.2	Método	71
4.2.1	Definição dos cenários de análise.....	72
4.2.2	Definição dos pares OD.....	72
4.2.3	Roteirização.....	73
4.2.4	Cálculo da emissão e da conectividade nas rotas	74
4.3	Resultados obtidos e discussão	76
5	CONCLUSÕES.....	85
5.1	Considerações Finais	85
5.2	Sugestão para trabalhos futuros	87
	REFERÊNCIAS.....	88
	APÊNDICE A – ROTEIRO PARA ELABORAÇÃO DOS PERFIS LOGÍSTICOS.....	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O transporte de carga é uma atividade essencial por estar associado ao processo de industrialização e de expansão de cidades que, até então, não tinham perspectivas para tal, além de assegurar a manutenção do estilo de vida da população (Sánchez-Díaz et al., 2014). Porém, essa atividade traz externalidades negativas, impactando na qualidade do ar e no conforto das pessoas por meio da emissão de poluentes e de ruídos, da formação de congestionamentos, da má utilização do solo, das vibrações e dos riscos de acidentes, por exemplo (Mckinnon et al., 2015).

Ao relacionar essas externalidades com o ambiente urbano que é formado por diversidade de perfis de demanda/oferta e de uso do solo, bem como pela complexidade da malha viária, há uma intensificação dos problemas causados, refletindo nos custos logísticos (Cavalcante, 2009). No entanto, é perceptível nas pesquisas bibliográficas que o transporte de carga é bastante relacionado às características socioeconômicas, sendo, ainda, uma abordagem menos expressiva, quando comparada ao transporte de pessoas, a sua relação com os fatores espaciais e geográficos (Allen et al., 2012; Ducret et al., 2016).

Em vista disso, os estudos voltados para entendimento dessa relação e para proposição de medidas pautadas na garantia da logística sustentável vêm ganhando força, apresentando que a intensidade e a eficiência das atividades de carga urbana são bastante influenciadas por fatores como tamanho, densidade e layout da cidade; morfologia urbana; uso do solo e design da rede viária (Dablanc, 2011; Allen et al., 2012; Barczak; Duarte, 2012; Lindholm, 2012; Taniguchi et al., 2014).

Contudo, apesar do conhecimento teórico citado, a discussão acerca da influência do design das vias, mais precisamente da sua conectividade, na emissão de poluentes pelo Transporte Urbano de Carga (TUC) é vista com bastante superficialidade (Prud'homme et al., 2012; González-Feliu, 2018), e, ao se pensar em uma situação prática, o desenho das ruas e as suas conexões têm impacto importante no ciclo de condução veicular, na variação das velocidades, na extensão, na duração do trajeto, na ocorrência das entregas e nas decisões operacionais, determinando possibilidade de caminhos alternativos,

Ainda, desmistificando o desenvolvimento atrelado à concentração de serviços e de atividades em polos centrais, regiões não necessariamente localizadas no centro econômico, mas caracterizadas por uma boa conectividade viária têm potencial para serem pontos de passagem de diversas rotas com grande fluxo (Boisjoly; El-Geneidy, 2017), e,

assim, de boa acessibilidade enquanto detentoras de elevado potencial de interação no sistema (Porta et al., 2009; Sevtsuk, 2014).

Ademais, baseado nas diversidades logísticas presentes no ambiente urbano, ao contar com elevado número de atores, de produtos, de necessidades comerciais e de características locacionais, percebe-se que existe a possibilidade de união dessas regiões em grupos homogêneos que são chamados de Perfil Logístico (PL) e que consideram todos esses quesitos para entender como os perfis de demanda e de oferta da carga estão associados. Partindo-se disso, a hipótese de pesquisa levantada para o estudo no contexto da emissão de poluentes pela operação do TUC foi: "A conectividade influencia os níveis de emissão de poluentes conforme cada Perfil Logístico (PL)".

A definição de um perfil logístico possibilita o ajuste e a otimização dos processos pela adequação das soluções de acordo com as necessidades específicas de cada grupo (Macário, 2013). Considerando a hipótese levantada e a incorporação da forma urbana, mais precisamente do design da rede viária, como influenciadora nas decisões operacionais da carga, a primeira questão de pesquisa elaborada foi: "Qual o impacto da incorporação da conectividade viária na construção dos Perfis Logísticos?"

Por sua vez, tendo sido a conectividade viária, enquanto parâmetro topológico de rede, incorporada como influenciadora nas decisões de movimentos, na emissão de poluentes por transportes (Walker; Manson, 2014; Mirhedayatian; Yan, 2018) e como parâmetro explicativo da acessibilidade, visto que sistemas viários mais compactos e integrados tendem a ser mais eficientes (Thomas et al., 2003; Prud'homme et al., 2012; Ravulaparthy; Goulias, 2014; Sevtsuk, 2014), mas pouco discutida por estudos sobre o transporte de carga, foi traçada a segunda questão de pesquisa: "Como a conectividade pode influenciar na emissão de poluentes pelo TUC?"

Ainda fazendo referência à hipótese levantada e levando em conta que a concentração e a emissão de poluentes em uma determinada região é influenciada por diversos fatores referentes ao clima, às características do veículo e da carga transportada, bem como às características espaciais, a terceira questão de pesquisa levantada foi: "Os Perfis Logísticos da região terão comportamentos distintos quanto à emissão de poluentes?"

A partir do exposto, pensar em estratégias operacionais para o Transporte Urbano de Cargas (TUC) com minimização de emissão de poluentes, não se limitando às caracterizações usuais, promovendo melhor acesso a pontos de atração descentralizados e adequando as soluções de acordo com os interesses envolvidos se faz necessário para obter

maior justiça socioambiental e melhor otimização dos processos.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo geral*

Diante do problema de pesquisa apresentado e da hipótese formulada, o presente estudo terá por objetivo central analisar a influência da conectividade viária sobre as emissões de poluentes atmosféricos conforme o Perfil Logístico

1.2.2 *Objetivos específicos*

- (a) Verificar a influência da conectividade sobre os Perfis Logísticos;
- (b) Investigar a influência da conectividade da rede viária sobre as emissões de poluentes;
- (c) Avaliar os níveis de emissão de poluentes para os diferentes perfis.

1.3 Estrutura da dissertação

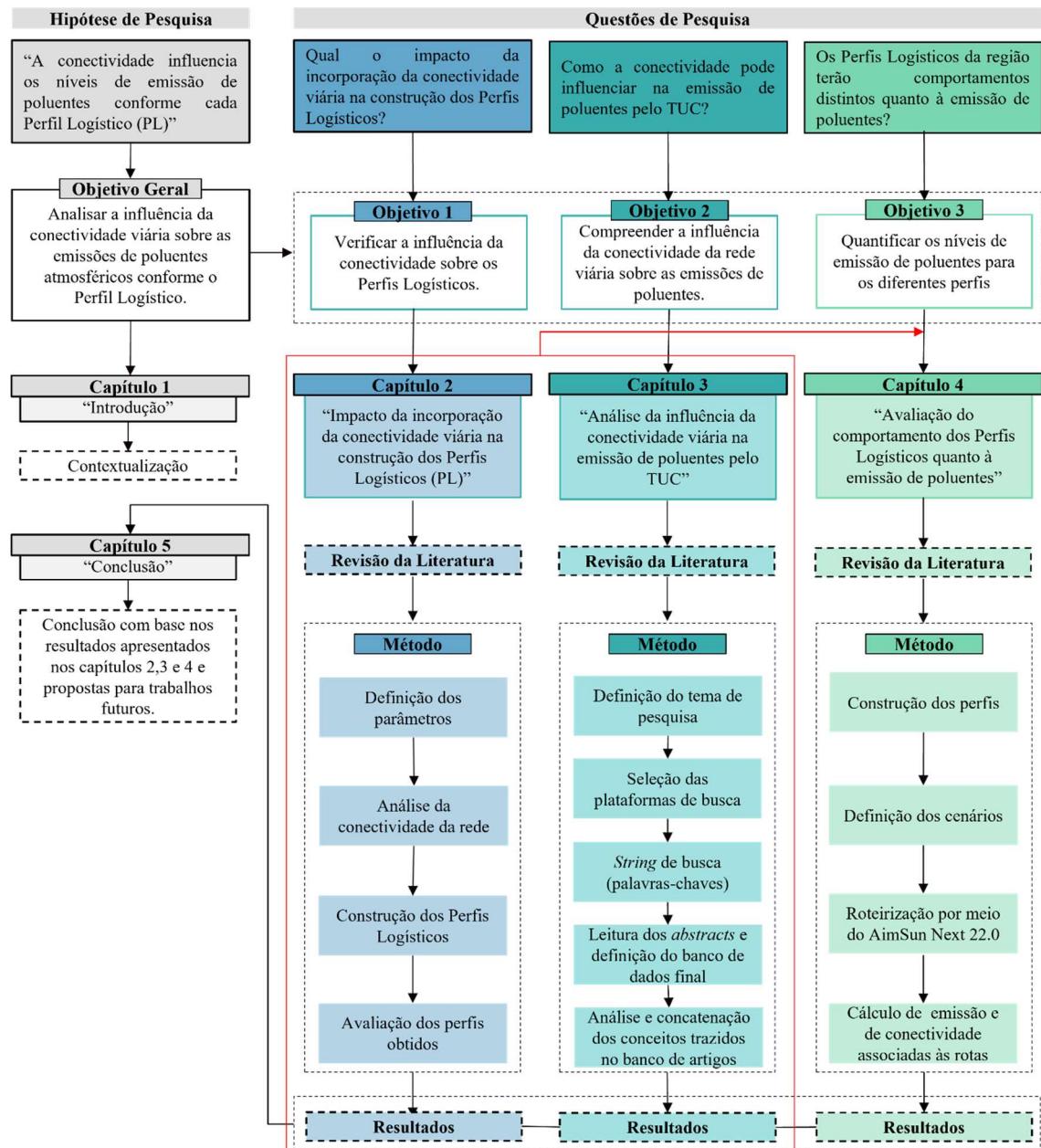
A estrutura da dissertação descrita abaixo foi pensada como forma de melhor organizar os principais nichos de conteúdos abordados para melhor entendimento da relação entre eles e para responder de modo orgânico aos objetivos de pesquisa traçados. Sendo assim, mediante fluxograma da figura 1 que relaciona as questões com os objetivos e com os passos metodológicos, foram propostos 3 capítulos construídos em forma de artigo, contendo suas revisões bibliográficas necessárias para o desenvolvimento.

O capítulo 2 apresenta o artigo fruto da primeira questão de pesquisa, cujo o título é “Impacto da incorporação da conectividade viária na construção dos Perfis Logísticos (PL)”. Nele, pensou-se na construção de uma revisão da literatura existente, abordando os métodos de construção dos Perfis Logísticos, as variáveis normalmente utilizadas e a prospecção de estudos que trouxessem o parâmetro topológico em suas abordagens e a sua forma de contabilização. O método para o encaminhamento das discussões também foi descrito e, devido às lacunas encontradas, as definições de alguns termos foram trazidas de forma mais detalhada.

Já o capítulo 3, fruto da segunda questão de pesquisa e intitulado “Análise da influência da conectividade na emissão de poluentes pelo TUC”, traz a revisão da literatura pautada na relevância do parâmetro no contexto da emissão de poluentes. Esse capítulo tem o objetivo de ser mais teórico para a construção do conhecimento acerca de como a conectividade impacta a

emissão de poluentes no ambiente urbano pela operação da distribuição da carga.

Figura 1 - Estrutura da dissertação



Fonte: Autora (2024)

O capítulo 4, terceiro artigo, se refere ao fechamento do estudo, no qual, por meio dos resultados obtidos nos artigos anteriores (capítulos 2 e 3), será possível verificar como as diversidades socioeconômicas e físicas das regiões no ambiente urbano impactam na emissão durante a operação da carga. O artigo intitulado “Avaliação do comportamento dos Perfis Logísticos quanto à emissão de poluentes” trará uma revisão breve sobre como as variáveis utilizadas na construção dos perfis feitos no capítulo 2 se associam à emissão de poluentes,

trazendo uma metodologia mais robusta quanto à execução, com a definições de pares OD e verificação da emissão de poluentes nas rotas geradas por meio do programa AimSun Next. As discussões feitas consideram os perfis logísticos como espaço de análise.

Por fim, o capítulo 5 traz as conclusões mediante os resultados encontrados e suas considerações à luz da hipótese e das questões norteadoras, bem como as sugestões para trabalhos futuros de acordo com as lacunas percebidas.

2 IMPACTO DA INCORORAÇÃO DA CONECTIVIDADE VIÁRIA NA CONSTRUÇÃO DOS PERFIS LOGÍSTICOS

2.1 Introdução

A logística de carga urbana está cada vez mais envolvida em conflitos entre os interesses comerciais e o ambiente urbano, visto que, apesar de ser causa de externalidades negativas e alvo de medidas públicas bastante restritivas, é essencial na manutenção das principais atividades geradoras de riqueza e na sustentação do estilo de vida das cidades (Castro et al., 2017).

Nos últimos anos, tem-se percebido um aumento na quantidade de entregas aliado à certa ineficiência operacional, seja por questões ambientais, com aumento na frota e na emissão de poluentes, ou por questões socioeconômicas, com problemas relativos ao espraiamento logístico dissociado do planejamento urbano e dificuldades de acesso. Assim, a busca pela eficiência na operação do transporte de carga deve ser publicamente pensada, visto que as empresas dificilmente levam isso prontamente em consideração, pois o custo tende a ser diluído no processo e repassado para a sociedade.

Contudo, existe uma certa dificuldade no planejamento assertivo devido à falta de expertise do poder público, à tendência ao regulamento rigoroso em detrimento de melhoria na organização e à diversidade, entre zonas de uma mesma cidade, de características e de problemas associados que exigem soluções diferentes (Macário, 2013; Ducret et al., 2016; Castro et al., 2017). Ainda, diferentemente do transporte de pessoas, existe uma lacuna de pesquisa, identificada durante as leituras e explicitamente em estudos, em relação à influência do espaço urbano na distribuição da carga que é mais comumente associada aos aspectos econômicos envolvidos (Ducret et al., 2016; Asih et al., 2018).

Nesse contexto, a introdução do conceito de Perfil Logístico surge como uma tentativa de otimizar as operações logísticas dentro das cidades a partir da caracterização dos aspectos de demanda e de oferta, fruto da interação entre aqueles socioeconômicos e espaciais. Características como tamanho das cidades, densidade, layout e forma urbana, design das vias, morfologia urbana, padrões de uso do solo e posição nas/das cidades na cadeia de suprimento impactam na eficiência (econômica, social e ambiental) e na intensidade de viagens de última milha (Dablanc, 2011; Allen et al., 2012; Lindholm, 2012; Ducret et al., 2016).

Dessas características apresentadas, as de layout e de disposição da malha, apesar de terem sido mencionadas em muitos estudos, não foram discutidas com profundidade e nem houve qualquer menção à medição de parâmetros explicativos, tendo sido dito, inclusive, que

são vistas apenas como suportes passivos inclusos na análise do espaço ou para computar matrizes de origem-destino (Prud'homme et al., 2012). Além disso, dos estudos que construíram PL, apenas um utilizou parâmetros topológicos, mas não fez alusão quanto à influência da conectividade viária na representatividade da análise.

Desse modo, o capítulo em questão tem como objetivo, motivado pela primeira questão de pesquisa proposta, verificar a influência da incorporação da conectividade viária nos Perfis Logísticos, apresentando uma revisão breve sobre a sua construção e o seu uso, bem como sobre os indicadores de conectividade abordados na literatura encontrada para a fundamentação dos passos metodológicos de encaminhamento da pesquisa.

2.2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica descrita na seção atual tem como objetivo trazer os estudos que abordaram o uso e a construção dos Perfis Logísticos, bem como aqueles que trouxeram a utilização da conectividade viária incorporada de alguma forma ao contexto do TUC. As duas subseções foram organizadas em 3 tópicos, trazendo conceitos, usos e importância, indicadores e parâmetros utilizados e conclusões com as principais questões trazidas em cada um dos temas.

2.2.1 *Perfis Logísticos*

2.2.1.1 *Conceito e usos*

Por Perfil Logístico entende-se a identificação de grupos homogêneos quanto às necessidades logísticas com base nas interações entre as características urbanas, as características dos produtos e das entregas e necessidade dos atores envolvidos (Macário, 2013). Isso foi trazido por estudos que, até mesmo sem usar o termo “Perfil Logístico”, propuseram a análise do ambiente urbano no contexto do transporte de carga por meio de clusters, sendo defendida como método bastante eficaz para auxiliar no entendimento sobre o planejamento de políticas para atingir grupos prioritários (Gehrke et al., 2020).

Por exemplo, Macário (2013) aplicou perfis na cidade de Lisboa para verificar quais mudanças ocorreriam no desenvolvimento do negócio da carga urbana se as soluções fossem implantadas; Oliveira et al. (2019), para verificar a relação entre as características espaciais dos equipamentos logísticos com os atributos urbanos e para comparar cidades em diferentes

contextos geográficos, e Ducret *et al.* (2016), para demonstrar que a modelagem espacial pode auxiliar na organização logística da carga nas cidades, tendo como estudo de caso a cidade francesa de Angers.

Asih *et al.* (2018) trouxeram a avaliação adaptando os conceitos dos estudos de Macário *et al.* (2008) de acordo com a análise de conjuntura da cidade indonésia de Yogyakarta para antecipar os problemas logísticos resultantes do aumento do número de lojas/negócios modernos. Ainda, a cidade de Lisboa também foi alvo de estudos envolvendo perfis, tendo sido traçados 4 para os quais puderam ser criados tipos diferentes de regulamentação logística (Alho; De Abreu e Silva, 2015).

Por meio do entendimento das características da rede logística da cidade, incluindo o modo de transporte usado, as localizações das facilidades logísticas, o tipo e o volume de produto a ser transportado, por exemplo, é possível identificar as necessidades comuns a grupos com características parecidas, bem como as áreas urbanas que precisam de melhorias no contexto da operação da carga.

2.2.1.2 *Parâmetros usados na literatura para a construção dos perfis*

Como os perfis são construídos partindo do enquadramento de grupos logísticos com base em características sociais, econômicas, geográficas e políticas de acordo com o contexto no qual está inserido o problema a ser estudado, é importante o levantamento de variáveis representativas para aquilo que se quer avaliar. Castro *et al.* (2017) objetivaram avaliar o impacto da incorporação do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e dos impostos sobre serviços na construção dos perfis e verificaram que o IDH permitiu uma melhor caracterização da distribuição socioeconómica da região estudada e conhecimento sobre padrões de consumo. Além disso, características demográficas como concentração/densidade populacional, idade e renda média familiar também foram usadas por outros autores na descrição do espaço e do perfil de demanda (Castro *et al.*, 2017; Ducret *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2019; Regal, 2020).

No quesito dados econômicos, foram supervalorizados indicadores referentes à densidade/concentração comercial e de pontos de entrega, à homogeneidade de serviços e à quantidade de armazéns (Alho; De Abreu e Silva, 2015; Asih *et al.*, 2018; Ducret *et al.*, 2016; Castro *et al.*, 2017; Macário, 2013; Oliveira *et al.*, 2019). As características dos produtos, como tamanho, peso, fragilidade e perecibilidade, e das entregas, como frequência e urgência, foram

levados em consideração no estudo de Macário (2013) e de Asih *et al.* (2018). Quanto à caracterização da infraestrutura e da acessibilidade logística, foram utilizadas a densidade e a capacidade viária, calculadas, respectivamente, pelo número de interseções/de seções de via e pelo comprimento total das estradas ponderadas ou não pelo fator de capacidade; a distância média entre os armazéns e o baricentro da região; a existência de vagas de carga/- descarga; o nível de congestionamento com base nas velocidades e o número de ruas de mão única (Castro *et al.*, 2017; Ducret *et al.*, 2016; Macário, 2013; Oliveira *et al.*, 2019; Regal, 2020). O parâmetro topológico de centralidade (“*betweenness centrality*”) também foi usado no estudo de Regal (2020).

Vale ressaltar, ainda, que foi latente a preocupação com a padronização das áreas para conseguir uma representação mais detalhada da realidade estudada, tendo sido contornada por meio do uso de malhas geométricas diferentes dos zoneamentos existentes nas bases de dados públicas, como quadrados de 1 km^2 (Regal, 2020) e de 0,04 km^2 (Ducret *et al.*, 2016), bem como hexágonos de 5 km e de 357 m de diagonal mais curta (Braga *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2019).

2.2.1.3 *Método de construção e exemplos de Perfis Logísticos gerados*

Dos estudos revisados, aquele mais citado como método seguido por terceiros (Alho; De Abreu e Silva, 2015; Asih *et al.*, 2018) para adequação de critérios de construção dos perfis foi o trabalho de Macário (2013) que traz classificação das variáveis em três níveis e como cada variável abordada se enquadra em cada perfil. A partir dessas informações, tanto Alho e De Abreu e Silva (2015), como Asih *et al.* (2018) fizeram os perfis adequando para suas áreas de estudo e complementaram com análise de cluster usando o método *TwoStep*.

Para esses casos, os perfis que foram apresentados no estudo de Macário (2013) e usados como base foram divididos em 5 grupos (A,B,C,D,E) de acordo com suas características. Por exemplo, o grupo A se refere ao *cluster* de estabelecimentos localizados em bairros considerados especializados em um tipo específico de serviço ou produto. Nele, foi considerada uma alta densidade comercial e uma elevada homogeneidade. Já o grupo B se refere àquele composto por hotéis, restaurantes e mercados, sendo considerada a densidade de estabelecimentos como alta, média e baixa, bem como a homogeneidade. No caso dos perfis C e D as características comerciais continuam aparecendo com mais evidência, sendo compostos, respectivamente por centros de negócios (pequenas entregas, B2C e correio) e por comércios grandes, como varejos e armazéns de distribuição. Por fim, o perfil E se refere ao percentual residencial da cidade que é

composto por comércio local.

No caso do estudo feito por Ducret *et al.* (2016), houve a utilização do método *Principal Component Analysis* (PCA) e do K-Means para a clusterização. O método PCA permitiu a redução da dimensão do grupo de dados sem perder informações e a análise foi feita em dois eixos, sendo um para variáveis econômicas/orientadas para demanda, e uma para os parâmetros espaciais, conseguindo obter, ao final do processo, 9 grupos.

Seguindo o uso das mesmas ferramentas, o estudo de Castro *et al.* (2017) conseguiu obter 7 grupos, sendo eles: *cluster 0* - zona residencial de baixa densidade populacional e comercial; *cluster 1* - zona mista composta por valores médios para todas as variáveis; *cluster 2* - área central com elevada atividade comercial; *cluster 3* - zonas mistas de baixa densidade populacional e densidade viária média; *cluster 4* - zona periférica caracterizada por baixa densidade populacional e comercial, bem como valores de IDH sem destaque; *cluster 5* - zona de alta densidade residencial; *cluster 6* - zona crítica para logística urbana por ter uma elevada atividade comercial associada a baixa acessibilidade e presença de zonas de restrição.

Já Oliveira *et al.* (2019) se baseou em um indicador de centralidade a partir do qual foram construídos os grupos de acordo com a distância ao seu valor e Regal (2020) confrontou os métodos de clusterização para verificar o que seria mais adequado para construção dos perfis, concluindo que PCA e K-Means são bastante sensíveis a *outliers* e a elevadas dimensionalidades, trazendo como alternativa a associação entre o *Uniform Manifold Approximation and Projection* (UMAP) e o *Self Organized Map* (SOM) que pode ter sua performance aprimorada com a redução de dimensão proporcionada pelo primeiro.

O método de Ward também foi citado como uma possibilidade para clusterização, sem necessidade de reduzir base de dados, e utiliza tanto a distância Euclidiana como a distância de Minkowski (Evangelista *et al.*, 2011). Vale ressaltar a necessidade de padronização das dimensões das variáveis trazida pelos estudos que optaram pelo método do score z, dado pela diferença da média dividida pelo desvio padrão.

2.2.1.4 Conclusões

De acordo com o exposto, os Perfis Logísticos podem ser vistos como uma forma eficaz de caracterização dos grupos logísticos em ambiente urbano, principalmente pelo fato de ele conseguir agrupar características diversas que estão envolvidas na operação do TUC. No entanto, como todo processo de caracterização, ele precisa ser fundamentado em dados

confiáveis de variáveis representativas de acordo com aquilo que se quer analisar, levando em consideração as limitações envolvidas e a facilidade de obtenção dos dados. Com o que foi dito no tópico 2.2.1.2, percebe-se que existe a possibilidade de ampliação dos parâmetros a serem utilizados. O quadro 1 apresenta um resumo por tipo e por referência.

Quadro 1 – Resumo dos parâmetros utilizados na literatura para construir os Perfis Logísticos

Classificação do parâmetro	Parâmetro indicado	Referência Associada
Características Demográficas	<ul style="list-style-type: none"> Concentração populacional; Densidade populacional; Idade; Renda média familiar; Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). 	(Castro et al., 2018; Ducret et al., 2016; Oliveira et al., 2019; Regal, 2020)
Características da cidade	<ul style="list-style-type: none"> Densidade/concentração comercial e de pontos de entrega; Homogeneidade de serviços; Quantidade de armazéns; Uso do solo; Existência de restrição ao TUC. 	(Castro et al., 2018; Ducret et al., 2016; Oliveira et al., 2019; Macário, 2013; Alho; De Abreu e Silva, 2015; Asih et al., 2018)
Características de entrega e dos produtos	<ul style="list-style-type: none"> Frequência e urgência; Tamanho, peso, fragilidade e perecibilidade. 	(Macário, 2013)
Características dos estabelecimentos	<ul style="list-style-type: none"> Concentração; Peso (tamanho); 	(Castro et al., 2018)
Características Econômicas	<ul style="list-style-type: none"> Quantidade de funcionários. Impostos sobre serviço. 	
Características da infraestrutura/acessibilidade logística	<ul style="list-style-type: none"> Densidade viária; Capacidade viária; Distância média entre armazéns e o baricentro da região; Existência de vaga de carga/descarga; Nível de congestionamento; Centralidade/conectividade (betweenness centrality). 	(Castro et al., 2018; Ducret et al., 2016; Macário, 2013; Oliveira et al., 2019; Regal, 2020)

Fonte: Autora (2024)

Além disso, apesar dos estudos terem feito propostas de métodos de definição dos

perfis e de avaliação das variáveis, percebeu-se que, na verdade, esse processo se constitui em técnicas de agrupamento que estão bastante relacionadas ao nível de conhecimento dos envolvidos, ao nível de detalhe que se quer obter e à análise de conjuntura em que está imerso o problema que se quer analisar, não sendo necessário se prender àqueles reportados na literatura

Para o estudo em questão, verificando os dados a serem utilizados na análise, percebeu-se que os setores censitários, o menor nível de agregação disponível para a cidade de Fortaleza, ainda não conseguiram representar fenômenos com componentes de vizinhança, bem como a conectividade da rede e a trajetória dos movimentos tão bem quanto os hexágonos, além de que eles permitem análises de acessibilidade com uma melhor resolução e com execução mais viável (Braga *et al.*, 2022). Assim, decidiu-se dividir, com base na revisão da literatura, o município em hexágonos por meio do software QGis 3.22.

Com relação às variáveis utilizadas para a definição dos perfis, além da verificação daquelas amplamente utilizadas na literatura (Macário, 2013; Ducret *et al.*, 2016; Castro *et al.*, 2017), como a existência de zonas de restrição; quantidade e tipo de estabelecimentos; quantidade de empregados; renda; vagas de carga e descarga; uso do solo; valor do solo; características de tráfego (nível de congestionamento); foram adicionadas ainda, devido aos objetivos do estudo, as características de conectividade da rede viária por meio das medidas *Integration e Choice* (ou *betweenness centrality*) (Jayasinghe *et al.*, 2019; Regal, 2020) que são geradas pela sintaxe espacial, ao invés de medidas de densidade viária (Castro *et al.*, 2017).

2.2.2 *Conectividade viária no contexto do TUC*

2.2.2.1 *Conceitos e importância*

A rede de transporte enquanto malha viária é um dos sistemas básicos da infraestrutura urbana que está bastante relacionado ao desenvolvimento espacial, econômico e social de uma determinada região da cidade. Não colocando-o como superior aos demais, mas é por meio dele que se consegue integrar o território, promovendo rapidez e articulação na mobilidade de pessoas e de cargas, funcionando como uma costura entre os demais sistemas (Marshall, 2004; Magalhães; Mendonca, 2021).

Ainda, está bastante associado, devido a sua contiguidade, à abertura do espaço urbano e à garantia da relação com o entorno por meio de uma conexão que objetive melhor acesso a pontos de atração, principalmente aqueles mais descentralizados. Sendo assim, a configuração

da malha influencia os padrões de deslocamento e, pela topologia da rede, é possível identificar as rotas com maior potencial de serem percorridas (Hillier et al., 1993; Pereira et al., 2011).

Por topologia de rede entende-se o estudo das relações espaciais enquanto partes conectadas, considerando o arranjo; a hierarquia; a posição; a direção e o nível de conectividade entre os elementos que compõem a malha viária (nós e links) e a forma/formato de uma rede particular (Cavalcante, 2009; Pereira et al., 2011; Rodrigue et al., 2016), verificando a influência na facilidade de movimentos entre elas, o potencial de caminhos alternativos entre os nós e a vulnerabilidade do sistema face a uma degradação de parte dele (Oliveira, 2012; Taylor, 2017).

A conectividade viária pode ser entendida como a conexão eficaz e eficiente entre as diferentes partes da rede de ruas/estradas que permite o funcionamento do sistema de transportes pelo deslocamento de pessoas e produtos. Isso, junto às características operacionais (direção de movimento) e estruturais, permite classificações tipológicas da rede que ditam a hierarquia funcional das vias, sendo possível observar que geralmente as vias que possuem uma elevada conectividade tendem a ter um papel mais expressivo quanto ao fluxo passante, sendo essa característica a mais básica da análise topológica e que determina o nível de confiabilidade e de flexibilidade da rede de acordo com a quantidade de rotas alternativas existente (Oliveira, 2012; Saboya, 2007).

Essa relação entre a forma urbana com foco na conectividade enquanto parâmetro topológico e o movimento de veículos e de pedestres vem sendo estudada para ampliar a visão sobre a geração dos movimentos, propondo a consideração da atuação da rede na distribuição dessas viagens de forma a reduzir custos que podem ser traduzidos em distâncias, em duração de viagem e em consumo de combustível (Scoppa et al., 2019).

No caso da operação do transporte de carga, Hillier et al. (1993) apresentam evidências que a própria configuração da malha favorece alguns pontos em detrimento de outros por meio de movimentos e que a localização do varejo aproveita os movimentos de passagem natural dos usuários. Ou seja, a localização de estabelecimentos em regiões bem conectadas é favorecida pela eficiência da distribuição, quanto ao tempo de viagem, ao acesso e ao consumo energético, bem como pela visibilidade e a popularidade do negócio devido à passagem, as vezes obrigatória, de muitas rotas (Crucitti et al., 2006; Pereira et al., 2011; Porta et al., 2009; Prud'homme et al., 2012; Sevtsuk, 2014; Sánchez-Díaz et al., 2014).

Assim, a identificação e o cálculo da conectividade viária, por serem trazidos de forma bastante tímida nos estudos de transporte de carga, se configura em uma lacuna a ser pesquisada. O presente capítulo tem como principal objetivo apresentar as definições de conectividade

encontradas nos estudos, bem como os indicadores utilizados para seu cálculo em busca de identificar aquele que mais possa se encaixar para o que se deseja estudar.

2.2.2.2 *Indicadores de conectividade revisados*

Nas pesquisas bibliográficas feitas, a conectividade foi relacionada com a acessibilidade como uma medida da facilidade de atingir destinos importantes (Baradaran; Ramjerdi, 2002; Jiao *et al.*, 2020; Lowry *et al.*, 2016; Xiao *et al.*, 2017) baseada na importância do link/nó na rede; na distribuição espacial das atividades e na conectividade entre zonas (*location-based*), medida pela distância (*distance measure*) em linha reta entre os pontos de interesse ou por medidas baseadas na infraestrutura, como duração de viagem e velocidade média associada à performance (Cui *et al.*, 2016; Ferreira; Raffo, 2013; Geurs; Van Wee, 2004; Jiao *et al.*, 2020; Pirra *et al.*, 2021) e como uma medida de impedância ou de diretividade de rota associada à várias opções e viagem (Frank *et al.*, 2000).

Essa forma de representação foi bastante citada nos artigos resultantes da revisão sistemática, sendo apontada como uma limitação do estudo da conectividade viária, visto que esta requer perspectivas topológicas e métricas (Crucitti *et al.*, 2006; Jiao *et al.*, 2020). Na tentativa de contabilizar isso, diversos estudos trouxeram a contagem dos elementos da rede (*links* e *nós*) em medidas de densidade.

Thomas *et al.* (2003) apresentam um cálculo de indicador para a acessibilidade topológica que reflete a conectividade da via, sendo ponderado pela distância em quilômetros e pelos custos de transporte, enquanto outros associaram-na às medidas qualitativas por meio da tipologia das vias (arterial, coletora e local), da hierarquia de velocidade e de ferramentas SIG para o mapeamento da malha e para a verificação das regiões cujos nós apresentavam, visualmente, maior conectividade (Ferreira; Raffo, 2013; Prud'homme *et al.*, 2012).

Ainda, a conectividade foi relacionada ao traçado da rede e ao número de links e nós existentes (Blanchard; Volchenkov, 2009; Jiang; Claramunt, 2004; Saberi *et al.*, 2018; Ke *et al.*, 2021; Taylor, 2017; Walker; Manson, 2014), ao tamanho e à densidade das quadras/quarteirões (Frank *et al.*, 2000) e ao desenvolvimento da resiliência e da vulnerabilidade do sistema por ser determinante na disponibilidade de rotas alternativas e de capacidade para acomodação de mudanças de itinerários (Cats; Jenelius, 2015; Reggiani *et al.*, 2015).

O quadro 2 apresenta um resumo dos indicadores diretamente apontados como medidas de conectividade revisados nesses estudos. Contudo, apesar da repercussão mais prática e mais atual dessa abordagem, foi identificado um outro método bastante associado à

conectividade, tendo como foco o potencial de comunicação e de movimento entre os pontos. Este traz o conceito de centralidade introduzido pela teoria da Sintaxe Espacial (SE) como uma forma de verificar o nível de importância de nós/links específicos e a probabilidade de serem usados nos caminhos mais curtos (Crucitti *et al.*, 2006; Ezaki *et al.*, 2022) e, diferentemente da teoria dos grafos convencional que finaliza o link em cada nó, como pode ser visto na figura 2, a conectividade do link se relaciona com a quantidade de interseções ao longo do seu comprimento (Marshall, 2004).

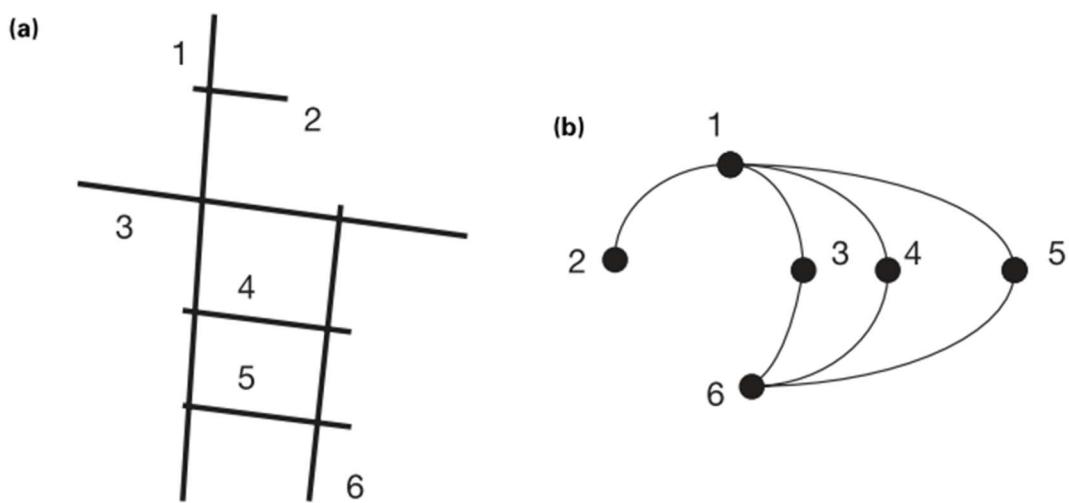
Quadro 2 – Resumo dos indicadores de conectividade com respectiva referência

Indicador	Explicação	Referência
Acessibilidade Topológica $A_i = \sum_j w_j \times f(d_{ij})$	Onde: A_i é a acessibilidade de um lugar i ; w_j , a ponderação representando a atratividade do local j ; d_{ij} é a medida de separação entre i e j ; $f(d_{ij})$ é a função de impedância. No caso da topologia, a impedância foi distância (km) e custo.	(Thomas <i>et al.</i> , 2003)
Densidade de Interseção	Número de interseções na área de estudo (maior a densidade, mais conectadas são as vias).	(Ji <i>et al.</i> , 2022)
Distância geodésica média	Razão entre a distância geodésica total de cada par de nó e o número total de pares de nós na rede (uma pequena distância média indica uma conexão mais direta)	(Ji <i>et al.</i> , 2022)
Índice α $\alpha = \frac{e - v + 1}{2v - 5}$	Onde: “e” representa o número de estradas; “v”, o número de nós na rede. O indicador varia de 0 a 1 em ordem crescente de conectividade.	(Ke <i>et al.</i> , 2021)
Conectividade da rede $\delta = \frac{2L}{N^2}$	Onde: N representa o número de nós e L o número de arestas/links.	(Saberi <i>et al.</i> , 2018)
Indicador de Conectividade $\gamma = \frac{S}{3N - 6}, \text{ para } N \geq 3$	Onde: “S” representa o número de links na rede e “N”, o número de nós. O indicador compara o quanto uma rede é conectada com o quanto ela poderia ser por meio da razão entre a quantidade atual e o número máximo potencial de links.	(Taylor, 2017)
Giant Component (GC) $GC = \frac{N'}{N}$	Reflete o grau de conectividade entre nós em uma rede considerando uma situação de avaliação da vulnerabilidade de um sistema frente emergências. N: número de nós na rede antes da falha; N': número de nós após a interrupção.	(Wang <i>et al.</i> , 2022)
Índice Beta (β) $\beta = \frac{e}{v}$	Determina a relação entre o número total de links e o número total de nós em uma rede. e: número de links; v: número de nós; $0,5 < \beta < (v-1)/2$. Se $\beta > 1$, sistema bem conectado; se $\beta < 1$, apenas uma opção de rota entre nós.	(Walker; Manson, 2014)
Índice Gama (γ) $\gamma = \frac{e}{(3(v - 2))}$	Determina, essencialmente, se cada nó está conectado ou não por um link. e: número de links; v: número de nós; $0 < \gamma < 1$. Se $\gamma = 0,5$, apenas 50% do máximo possível da quantidade de links em uma rede é fornecida e que os nós não estão bem conectados.	(Walker; Manson, 2014)

Fonte: Autora (2024)

Considera-se que um ponto na rede é central quando ele está localizado nos caminhos mais curtos entre pares de outros pontos, podendo interferir na comunicação das diversas partes do sistema e, assim, no acesso às oportunidades (Baradaran; Ramjerdi, 2002; Freeman, 1977; Freeman *et al.*, 1991; Porta *et al.*, 2009). Logo, quanto mais conectado for um link/nó, maior a probabilidade de ser acessado ao longo do dia por rotas diversas e, também, maior a sua importância na segurança e na resiliência do sistema.

Figura 2 - Mapa axial (a) e o grafo correspondente (b) para uma mesma rede.



Fonte: Marshall (2004)

Nessa perspectiva, os autores apontam que os usos urbanos atuam como multiplicadores dos movimentos urbanos e não como geradores, ou seja, os estabelecimentos comerciais tendem a se instalar em locais de integração elevada, pois nesses locais já existe um movimento natural que será potencializado pela sua presença.

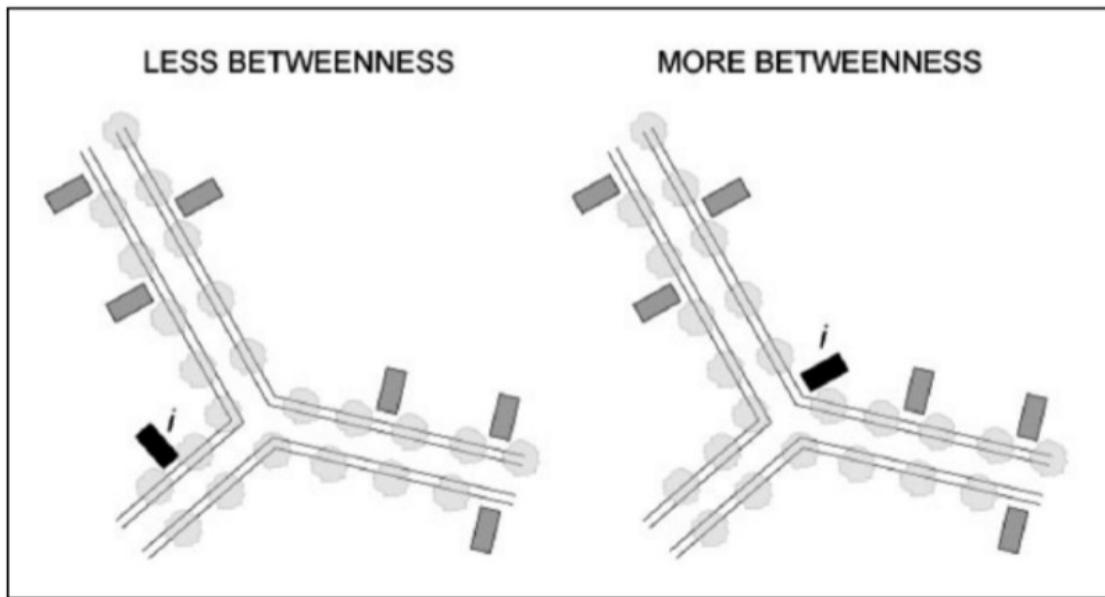
A sua instalação em ambientes mais segregados para atrair movimento, no caso, não faz sentido, pois nessas regiões a probabilidade de rotas passantes é menor pela própria configuração topológica do sistema viário (pensando enquanto um sistema de rotas possíveis) que imprimem um certo campo probabilístico com as rotas que têm potencial de serem percorridas (Pereira *et al.*, 2011).

Para que fosse possível quantificar essas características de forma mais real possível, houve o desenvolvimento de um método de normalização dos segmentos das vias de acordo com as mudanças angulares entre elas, levando em consideração a soma dos ângulos como custo de viagem, podendo-se calcular o caminho mais curto (Cavalcante, 2009; Turner, 2007). Para isso,

foi desenvolvido um indicador chamado *betweenness* ou *choice* que se assemelha à “rota de caminho mínimo” e foi apontado como o melhor modelo empírico para movimentos veiculares (Cavalcante, 2009; Turner, 2007).

Esse indicador foi trazido por estudos que o utilizaram tanto associado à própria sintaxe, como também à teoria dos grafos de forma mais matemática (Cats; Jenelius, 2015; Chen *et al.*, 2021; Crucitti *et al.*, 2006; Ezaki *et al.*, 2022; He *et al.*, 2021; Jayasinghe *et al.*, 2019; Jiao *et al.*, 2020; Lowry *et al.*, 2016; Taylor, 2017; Scorza; Fortunato, 2021; Turner, 2007; Xiao *et al.*, 2017) e ele representa o potencial “*through-movement*” no sistema, ou seja, captura a propriedade de um local de passagem (que não atua nem como origem, nem como destino) que será “central” se for atravessado por muitos dos caminhos mais curtos que conectam os pares de nós no sistema (figura 3) (Crucitti *et al.*, 2006; Hillier *et al.*, 2012; Jayasinghe *et al.*, 2019; Scorza; Fortunato, 2021).

Figura 3 - Ilustração representativa do indicador *choice* de um local *i*.



Fonte: Sevtsuk (2014)

A figura 3 traz essa definição do *choice* de forma ilustrativa, sendo possível verificar a interseção de 3 ruas e a presença de pontos (talvez comercial ou residencial) de atração de viagens que são representados por retângulos na cor cinza. Ao ser escolhido o retângulo “*i*”, pode-se ver na primeira imagem que o *choice* correspondente a ele é menor, visto que ele só será atravessado por rotas que venham de uma das duas vias. Já na segunda figura, a localização de “*i*” logo na interseção das 3 ruas permite que por ele passem todas as rotas possíveis entre as três ruas, aumentando a possibilidade de ele ser atravessado movimentos e, portanto, o seu valor

de *choice*. O ponto "i" na segunda imagem é mais central que na primeira.

Além disso, o parâmetro “*Integration*” da sintaxe espacial foi bastante considerado como sendo um dos mais importantes da análise, mas quando se relaciona com movimento em si, ele não consegue representar bem, sendo geralmente usado para verificar o potencial “*to-movement*”, ou seja, selecionar um destino mais atrativo partindo de uma origem. Ele seria o equivalente ao *closeness centrality*, outra medida de centralidade também citada nos estudos, e mede o quão próximo um local está de todos os outros ao longo do caminho mais curto (Hillier *et al.*, 2012; Jayasinghe *et al.*, 2019). O quadro 3 apresenta o resumo dos indicadores de centralidade trazidos pelos estudos revisados.

Ainda, como complementação aos conceitos de conectividade, a Sintaxe Espacial traz o indicador de profundidade (“*depth*”) que é uma medida de distância entre os componentes da rede. Quanto mais profundo for um segmento, ou seja, quanto mais distante em termos de passos topológicos ele estiver em relação a outro, mais segregado ele será. Na figura 2, por exemplo, o eixo 6 é o mais profundo em relação ao 1, portanto, os centrais possuem profundidades menores por estarem mais integrados (Marshall, 2004; Turner 2007).

Vale ressaltar, contudo, que apesar de os indicadores terem sido apontados como bastante adequados aos movimentos em ambiente urbano, mostrando claramente que uma rede mais complexa e interconectada é capaz de difundir demandas de viagem fora das rotas principais e alcançar, de forma mais geograficamente equilibrada, fluxos de passageiros com menos pontos de compressão de capacidade (Scheurer; Porta, 2006), houve o levantamento de fraquezas e críticas quanto ao método de cálculo dos mesmos.

Scheurer e Porta (2006) apontam que uma das fraquezas do *betweenness centrality* reside no tratamento de cada caminho entre um par de nós como sendo igual, desconsiderando o potencial variável dos fluxos de passageiros entre eles e propondo a ponderação do indicador de acordo com capacidade dos nós, tempo e frequência da viagem.

Além disso, em Crucitti *et al.* (2006) há uma discussão sobre a não consideração de distâncias métricas pela Sintaxe Espacial, sendo dito que apenas a topologia é considerada e que a distância entre os nós é dada por passos. Marshall (2004) menciona que, para que a representação da sintaxe fosse mais verídica, as linhas axiais consideradas no mapa deveriam ter mais relação com as rotas de movimento que por sua vez está mais relacionado com a continuidade de vias e de caminhos do que com a intervisibilidade pelo espaço.

Quadro 3 - Resumo dos indicadores de centralidade com as respectivas referências

Indicador	Explicação	Referência
Passenger betweenness centrality (PBC)	Fez-se a utilização do <i>betweenness centrality</i> como um indicador de importância. Enquanto ele se configura na fração de caminhos mais curtos entre todos os pares de nós da rede, o PBC foi definido como a fração esperada de todos os passageiros que viajam durante um determinado intervalo de tempo no link.	(Cats; Jenelius, 2015)
Betweenness centrality (BC) $\sum_{i \neq j} \frac{\sigma_{ij}(n)}{\sigma_{ij}}$	Corresponde à razão entre os caminhos mais curtos que cruzam um nó “n” e todos os outros caminhos mais curtos possíveis para todos os pares OD da rede. $\sigma_{ij}(n)$ = número de caminhos mais curtos de qualquer nó “ni” para qualquer nó “nj”, cruzando o nó “n”; σ_{ij} = número total de caminhos mais curtos entre os nós “ni” e “nj”.	(Chen <i>et al.</i> , 2021)
Degree Centrality (C^D) $\frac{K_i}{N - 1}$	É a definição mais simples de centralidade do nó e se baseia na ideia de que os nós importantes têm o maior número de laços com os outros nós na rede. K_i = grau do nó “i” (número de nós adjacentes ao nó “i”); N = número de nós.	(Crucitti <i>et al.</i> , 2006)
Betweenness Centrality (C^B) $\frac{1}{(N - 1)(N - 2)} \sum_{\substack{j, k \in G, j \neq k \neq i \\ /n_{jk}}} n_{jk}(i)$	O nó é central se ele está entre muitos outros nós no sentido de ser atravessado por muitos dos caminhos mais curtos conectando os pares de nós. n_{jk} = número dos caminhos mais curtos entre j e k; $n_{jk}(i)$ = número dos caminhos mais curtos entre j e k que contém o nó i.	(Crucitti <i>et al.</i> , 2006; Ezaki <i>et al.</i> , 2022; Taylor, 2017; Xiao <i>et al.</i> , 2017)
Closeness centrality (C^C) $\frac{N - 1}{\sum_{j \in G, j \neq i} d_{ij}}$	Mede o quanto um nó “i” está próximo de todos os outros nós ao longo dos caminhos mais curtos. d_{ij} = é o comprimento do caminho mais curto entre “i” e “j”, definido como a menor soma dos comprimentos das arestas entre todos os caminhos possíveis da rede que ficam entre “i” e “j”.	(Crucitti <i>et al.</i> , 2006)
Information Centrality (C^I)	Está relacionado à habilidade da rede em responder a uma desativação do nó. Se refere à performance da rede.	(Crucitti <i>et al.</i> , 2006)
Staightness Centrality (C^S) $C_i^S = \frac{1}{N - 1} \sum_{j \in G, j \neq i} \frac{d_{ij}^{Eucl}}{d_{ij}}$	Se relaciona com a eficiência na comunicação entre os nós ou links “i” e “j” e é igual ao inverso do menor comprimento do caminho d_{ij} . A distância euclidiana utilizada captura o quanto uma rota de conexão entre dois nós se desvia da rota reta virtual.	(Crucitti <i>et al.</i> , 2006)
Betweenness Centrality (choice) $C_B(P_i) = \left(\frac{\sum_j \sum_k g_{jk}(p_i)}{g_{jk}(j < k)} \right)$	Calcula a potencialidade de um elemento do espaço (segmento de rua) ser um ponto intermediário relevante capaz de obter “movimento direto” em uma rede. $g_{jk}(p_i)$ = número de caminhos mais curtos (considerando distância angular) entre os nós p_j e p_k que contém o nó p_i ; $g_{jk}(j < k)$ = número de todos os caminhos entre p_j e p_k .	(Scorza; Fortunato, 2021)

Fonte: Autora (2024)

Críticas como essas e quanto à normalização dos dados para que fosse possível comparar resultados da análise entre contextos urbanos diferentes foram trazidos em estudos mais recentes que abordaram a adequação do uso da análise angular como melhor determinante das escolhas de rota, ponderação das medições pelo comprimento dos segmentos, a incorporação de ideias da modelagem de tráfego para melhorar a coerência do modelo e a utilização de raios de análise métricos e topológicos para observar fenômenos locais (Hillier *et al.*, 2012; Turner, 2007).

2.2.2.3 *Conclusões*

De acordo com o que foi dito sobre a conectividade, entende-se que se configura em uma característica bastante importante para a caracterização espacial da rede viária, sendo impactada não apenas por questões físicas de design das vias e interseções, como também por questões operacionais e tipológicas. Ou seja, um nó bastante conectado, mas que é formado por interseções de vias de sentido único possui uma conectividade menor que uma interseção formada por vias de dois sentidos de circulação, sendo esta, também, mais robusta e resiliente.

Além disso, ficou evidente durante as leituras que, apesar de sua importância, se configura em um parâmetro ainda pouco explorado principalmente no quesito operação da carga em ambiente urbano. Como uma forma de contornar isso, foram feitas pesquisas tanto com transporte de pessoas, como no contexto do varejo, para que fosse possível elencar modos de quantificar essa conectividade para fazer sentido no contexto do movimento dentro da cidade.

Muitos estudos trouxeram indicadores baseados em características operacionais e de densidade de vias, mas todos eles aparentemente não conseguem considerar conversões angulares e nem a relação entre os segmentos do sistema, mostrando uma visão mais pontual do fenômeno. Com o avanço, chegou-se em pesquisas referentes à teoria da Sintaxe Espacial como um provável método que melhor se adequaria para verificar as relações topológicas de conectividade para o transporte de cargas.

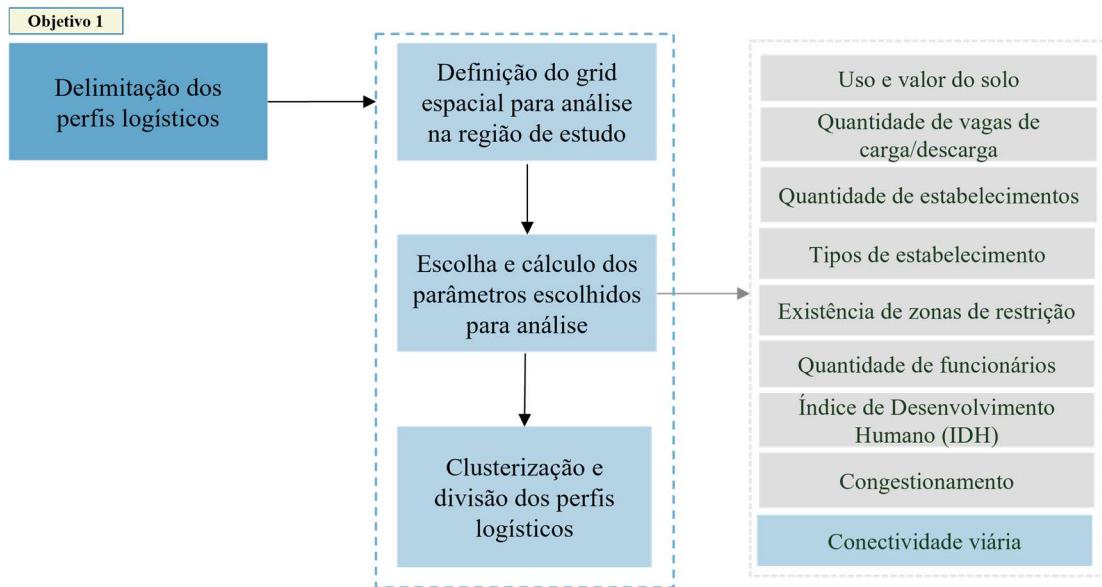
Assim, para o estudo, optou-se pelo uso do ferramental baseado na teoria da Sintaxe Espacial que consegue predizer, por meio, apenas, da configuração da rede e da sua integração, quais vias tem maior ou menor potencial de serem percorridas por rotas cotidianas.

Apesar das limitações trazidas pela revisão bibliográfica, entende-se que esse assunto ainda é pouco estudado no âmbito dos transportes; que o seu uso é bem mais latente no transporte de pessoas, sendo essa uma contribuição pertinente da metodologia a ser descrita para o transporte

de carga; que as críticas apontadas foram devidamente respondidas pelos autores, tendo sido aplicadas melhorias a nível de *software* para a análise do espaço; e que dentre os métodos citados a Sintaxe Espacial traz uma melhor facilidade de manuseio associada a uma análise topológica mais representativa dos padrões de conexão entre as vias.

2.3 Método

Figura 4 - Método para a construção dos Perfis Logísticos



Fonte: Autora (2024)

O método proposto para o desenvolvimento do capítulo pode ser visto no fluxograma apresentado na Figura 4 que mostra os quatro passos gerais para a construção dos perfis logísticos e verificação do impacto da utilização da conectividade viária nesse processo. Cada passo será detalhado mais adiante, bem como o cálculo das variáveis escolhidas.

A delimitação dos perfis teve como finalidade considerar as diversidades logísticas na escolha de um grupo urbano representativo e homogêneo na região e, a partir disso, verificar, posteriormente, o impacto da conectividade da malha viária na sua operação.

2.3.1 Área de estudo

Para o desenvolvimento da análise proposta, escolheu-se como área de estudo a cidade de Fortaleza, no estado do Ceará, mais precisamente a região que compreende os bairros Centro,

Aldeota e Meireles, como mostrado no mapa da Figura 5, e que, de acordo com o relatório do PASFOR 2020, é aquela que tem maior concentração de varejo na cidade e, portanto, maior concentração de viagens de transporte de carga.

Figura 5 - Detalhe da área de estudo com nomes dos bairros principais



Fonte: Autora (2024)

Pelo fato de o estudo priorizar o transporte urbano de carga, a topologia da rede e a preocupação com a roteirização verde, a utilização do ambiente da capital com sua distribuição de comércio; com a crescente demanda pelo espraiamento logístico e por políticas de melhoria da qualidade do ar e com as características de disposição da malha, torna a análise relevante e bastante rica de detalhes.

2.3.2 Construção dos Perfis Logísticos

Os passos seguidos para aquisição dos dados e plotagem dos mapas de cada viável escolhida, como mencionado no tópico 2.3, é descrito na sequência e, verificando a representatividade do grid gerado, será possível a clusterização para posterior delimitação dos perfis.

2.3.2.1 *Criação do grid hexagonal*

A decisão sobre o uso de uma malha espacial constituída por hexágonos se justifica pelo fato de o nível de agregação conseguir representar de forma mais clara fenômenos como trajetórias de movimento, conectividade de rede e características socioeconômicas locais (Braga *et al.*, 2022; Yoon *et al.*, 2021), objetivo do estudo, bem como pelo fato de os hexágonos fornecerem uma correspondência melhor, em comparação às grades retangulares, entre distâncias medidas em unidades de grade e distância em linha reta.

O tamanho dos hexágonos foi escolhido tendo como base o estudo feito para análise do impacto da expansão do metrô de Fortaleza por Braga *et al.* (2022), em que o grid contava com hexágonos de 357 m de diagonal curta e, por consequência, aproximadamente $0,11 \text{ km}^2$, e sua geração se deu pelo *software* QGis. Acredita-se que essa dimensão é suficiente para captar as nuances do TUC relacionado à conectividade.

2.3.2.2 *Espacialização das variáveis*

2.3.2.2.1 Características econômicas

a. Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)

Como incorporação de dados sociais que representassem características relacionadas ao perfil de demanda, optou-se pelo uso do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) por ele conseguir vincular aspectos sociais e econômicos que tendem a se relacionar bastante com os motivos de compra. Como se trata de um dado disponibilizado normalmente por bairro, para adequação aos hexágonos foi feito o cálculo do índice por setor censitário utilizando os dados de escolaridade, renda e população. A partir desses valores, foi feita a interseção da camada de setor com a camada de hexágono e, mediante o valor das áreas de cada setor inscritas, fez-se uma ponderação dos valores do IDH. Isso permitiu um valor mais representativo do índice, sem que fosse severamente degradado como poderia ocorrer caso, ao invés desse método, tivesse sido feita uma interpolação.

b. Valor do solo

Para a caracterização do valor do solo, foi utilizada a base disponibilizada pela Secretaria de Finanças (SEFIN) que consta dos preços de oferta ("pedido pelo vendedor") desde o ano

de 2015 de terrenos geolocalizados. Esse banco foi gerado a partir da junção de informações do Cadastro Imobiliário Municipal, de pesquisas de campo e de informações retiradas da base de cadastro do Observatório Imobiliário Municipal. O valor considerado como valor unitário do solo para cada hexágono foi o referente à mediana dos valores encontrados pros lotes. Regiões que não foram cobertas pela base passaram por processo de interpolação dos valores dos hexágonos vizinhos.

2.3.2.2.2 Características dos estabelecimentos: quantidade de estabelecimentos e de funcionários

Os dados referentes aos estabelecimentos comerciais da região foram conseguidos por meio das informações disponíveis na planilha da RAIS (Relação Anual de Informações Sociais) que conta com as coordenadas dos estabelecimentos por macrozona e informações quanto à quantidade de vínculos, ao tamanho e ao tipo de estabelecimento.

Assim, por meio do georreferenciamento dos estabelecimentos no *software* QGis, tendo como camada limitadora de área a cidade de Fortaleza em malha hexagonal, foi possível interceptar e, no Excel, por meio da tabela dinâmica, calcular, considerando apenas aqueles enquadrados no grupo dos estabelecimentos do ramo alimentício, a quantidade de estabelecimentos por porte e a quantidade de empregos por hexágono.

2.3.2.2.3 Características do solo

a. Uso do solo: percentual de uso comercial

O uso do solo para cada hexágono foi conseguido a partir da base de pontos georreferenciados disponibilizada pela Secretaria Municipal de Finanças (SEFIN) que mostra o tipo de uso existente no local (comercial, residencial, misto). Para a agregação dos dados, a sua união à base de hexágonos da área de estudo no QGIS permitiu contabilizar a área total construída, bem como o percentual de área para cada tipo de uso do solo (residencial, comercial, industrial e serviço). A partir disso, fez-se o percentual da área construída do tipo comercial em relação aos outros tipos, sendo possível obter a intensidade de uso comercial para a região em estudo. Esse passo foi baseado no estudo de (Macário, 2013).

b. Entropia: tipos de estabelecimento

A avaliação quanto à heterogeneidade/diversidade da região pela variedade de estabelecimentos existentes foi possível por meio da utilização da base georreferenciada da RAIS, que conta com a informação do número de CNAE de cada empresa presente, tendo como indicador avaliativo a medida de entropia apresentada na equação 2.1 (Alho; De Abreu e Silva, 2015).

$$Entropia = \sum_j = \frac{|P_j * \ln(P_j)|}{\ln(j)} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde: indicador varia de 0 a 1 em ordem crescente de heterogeneidade;

P_j é a proporção de estabelecimentos da categoria j;

J é a quantidade total de grupos em que os estabelecimentos foram enquadrados.

Como este estudo tem interesse na avaliação voltada para um tipo de produto que tenha sua distribuição feita de forma mais latente na cidade, resolveu-se utilizar apenas os CNAES referentes ao comércio atacadista e varejista de produtos alimentícios, visto que o estudo feito para o Plano de Acessibilidade Sustentável de Fortaleza (PAS/FOR 2020) trouxeram essa atividade como a de maior geração de movimento. As divisões dos subgrupos foram feitas com base no tipo de alimento, como podem ser vistas no quadro 4.

Quadro 4 - Divisão dos grupos de CNAE

Comércio Atacadista	Comércio Varejista
Cereais e Leguminoas; Café em grão; Leite e laticínios; Hortifrutigranjeiro; Carnes; Bebidas; Produtos de fumo; Alimentos em geral; Não especificados anteriormente.	Hipermercados e supermercados; Minimercados, mercearias e armazéns; Produtos de padarias, laticínios, doces e semelhantes; Carnes-açouques e peixarias; Varejista de bebidas; Varejista de hortifrutigranjeiros; Não especificado anteriormente.

Fonte: Autora (2024)

2.3.2.2.4 Acessibilidade logística

a. Congestionamento

O nível de congestionamento para a área de estudo foi avaliado pela razão entre volume de veículo e capacidade das vias da cidade. Esse dado foi conseguido por meio das pesquisas feitas para o projeto Fortaleza 2040 e consiste em um *shape* das vias com os dados modelados de volume e de capacidade no horário de pico para o ano de 2016. Como o intuito dessa etapa é visualizar um padrão comportamental na região de estudo, ficou entendido que os dados defasados não comprometeriam o objetivo. Para a avaliação do nível de congestionamento, foi feita a união, no QGis, da camada citada aos hexágonos e o cálculo do indicador se deu pela razão entre a soma do volume total passante pela soma da capacidade total de cada hexágono de acordo com as vias pertencentes a eles.

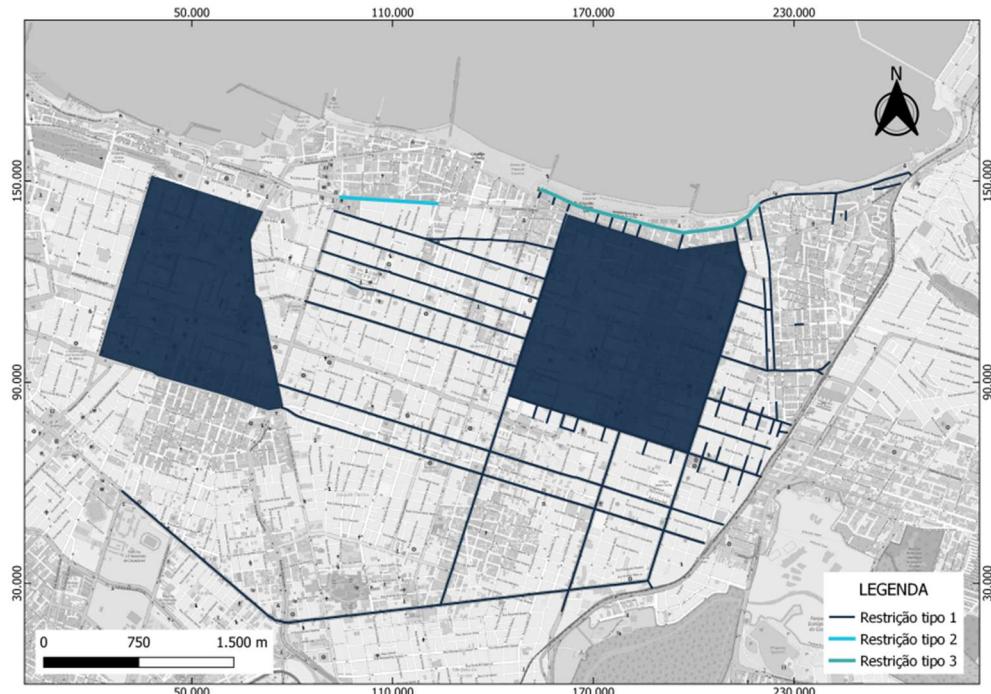
b. Vagas de carga e descarga

Para a verificação da quantidade de vagas de carga e descarga existente na área de estudo, foi utilizada a base disponibilizada pela prefeitura de Fortaleza, feita durante a pesquisa de Origem-Destino da carga do relatório PASFOR 2020. A base conta com dados georreferenciados de vagas do tipo “titulares”, “reserva 1” e “reserva 2” dos estabelecimentos levantados. Acredita-se que a consideração dos 3 grupos, por não serem compostos pelas mesmas observações, caracterizaria melhor a região em estudo e o resultado se deu pela união das camadas citadas à camada de hexágonos no *software* QGis. Para as áreas em que existia vaga dos 3 grupos, foi considerada a soma.

c. Restrição ao TUC

A análise das zonas de restrição ao transporte urbano de carga foi permitida a partir dos dados cedidos pela prefeitura de Fortaleza e foi verificada a sua existência quase que inteiramente dentro da área escolhida para ser aquela de estudo, como mostrada na figura 6. É possível ver que foram estabelecidos 3 tipos de restrição na região, sendo a restrição do tipo 1 encontrada nas vias e nas áreas marcadas em azul escuro que corresponde àquelas regiões onde não se pode acessar entre os horários de 6:00 e 20:00; a do tipo 2 encontrada na Avenida Monsenhor Tabosa que é totalmente restrita à circulação independentemente do horário; e a restrição do tipo 3 encontrada na Avenida Beira Mar que impede o acesso de caminhões entre 00:00 e 9:00.

Figura 6 - Zonas de restrição ao transporte de carga em Fortaleza (CE)



Fonte: Autora (2024)

Apesar de Macário (2013) trazer esse parâmetro classificado como “sim” ou “não” de acordo com a existência em determinada região, foi estabelecido, devido à diversidade de tipos de restrição, que no presente estudo a abordagem seria feita calculando a densidade de vias, dada pela razão entre o comprimento total das vias com restrição (considerando os três tipos) e o comprimento total de vias existente em cada hexágono. Esse passo foi feito no *software* QGis 3.22 por meio da função “soma comprimentos de linha”, existente na opção “analisar” da guia “vetor”.

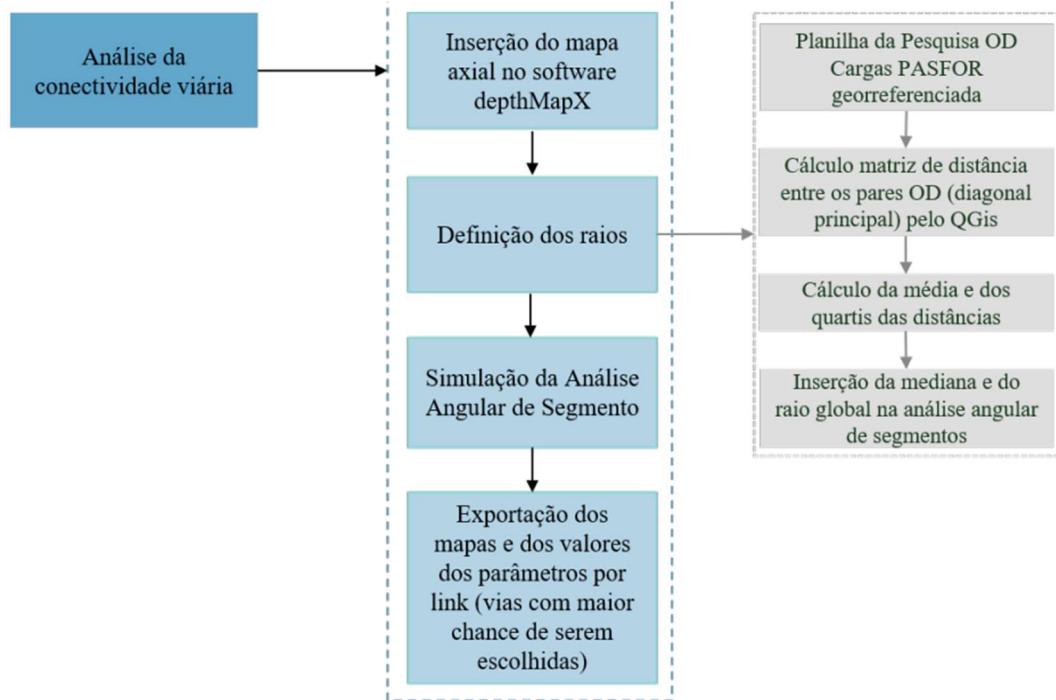
2.3.2.2.5 Dados topológicos: conectividade viária

A análise topológica da rede consiste na verificação das características associadas à forma urbana e à conectividade viária. A revisão da literatura feita proporcionou a verificação de várias maneiras de medir a topologia, apresentando indicadores baseados em parâmetros operacionais e em características físicas da rede, como número de interseções, de links e de angulações.

Assim, os passos seguidos para a análise topológica da rede são apresentados na figura 7 que correspondem aos que devem ser feitos no software livre DepthMapX para o cálculo dos

parâmetros de centralidade, mais precisamente o “*choice*”, que corresponde ao “*betweenness*” na teoria dos grafos e que foi apontado na literatura como o indicador que tem mais relação com o movimento, e o “*integration*”, que corresponde ao “*closeness*”, e é a medida de conectividade mais importante na teoria da Sintaxe Espacial.

Figura 7 - Metodologia para a análise da conectividade viária



Fonte: Autora (2024)

Os dados topológicos foram feitos de acordo com o passo a passo descrito, sendo, posteriormente, adequado aos hexágonos. Para isso, o mapa resultante da análise angular de segmentos foi exportado para o QGis que permitiu a interseção com os *shapes* de hexágonos e o cálculo do comprimento de cada segmento de via pertencente às unidades.

O primeiro passo se deve à criação/aquisição do mapa axial da área de estudo. Apesar da possibilidade de ser feito em ambiente CAD com base no mapa de logradouros da cidade, optou-se pela utilização do mapa axial de Fortaleza disponibilizado por (DONEGAN *et al.*, 2017). Como se refere ao ano de 2017, foi feita uma verificação via QGis comparando-o à atual situação da rede viária e constatou-se que o mapa poderia ser usado sem qualquer prejuízo, sendo esse composto também por vias locais destinadas apenas para pedestres.

O segundo passo antes do início da simulação deve ser a determinação do raio topológico a ser utilizado. Esse raio representa o tipo de análise que se quer fazer, podendo ser a

nível global (Rn ou raios métricos de valores bastante elevados que se referem às viagens tendo como raio toda a cidade/ região), que representa a acessibilidade de uma via em relação a todas do sistema, e a nível local (R3, R4 [...] ou raios métricos menores que representam viagens em raios mais locais, como quarteirão e bairro), que delimitam a acessibilidade de acordo com o nível de conexão entre as vias e são indicados para escalas menores, como setores censitários e bairros (BARROS, 2006; CASTRO *et al.*, 2017). No caso em estudo, a definição foi feita da seguinte forma:

- Por meio dos dados da pesquisa OD cargas do PASFOR, foi possível o cálculo das distâncias entre os pontos de origem e destino georreferenciados por meio da extensão “Matriz de distância” do *software* QGis;
- Em seguida, exportando as informações para o Excel, foram calculados os quartis (1º: 708,88 m; 2º: 1700,83 m; 3º: 5474,17) e a média (8747,25 m) da amostra;
- A escolha do valor do raio se deu com base na informação trazida pelo próprio relatório que mostrou que 23% do movimento total da carga permanece dentro das respectivas macrozonas. Ao comparar a distância média com essas regiões de Fortaleza, percebeu- se que não representaria bem a situação, pois além de exceder bastante os limites, ela é bastante sensível aos *outliers*. Sendo assim, optou-se pelo uso do segundo quartil (mediana) calculado como raio métrico para a análise angular.

O último passo se refere à simulação da Análise Angular de Segmento no software depthMapX que foi feito por meio das sequências encontradas na literatura. O cálculo de cada índice topológico normalizado por hexágono se deu pela equação (2.2) na qual os valores obtidos das vias foram ponderados pelo comprimento existente em cada hexágono.

$$IPT = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i * Ext_i)}{\sum_{i=1}^n Ext_i} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde:

IPT é o índice para os parâmetros topológicos (*choice* e *integration*); P_i é o valor do parâmetro escolhido para o cálculo no hexágono; Ext_i é a extensão das vias existentes dentro do hexágono i.

Em seguida, para que houvesse uma padronização dos valores entre 0 e 1, que correspondem, respectivamente, às vias que possuem menor integração e menor potencial de atravessamento, e àquelas que são mais integradas (minimizam distâncias) e que têm um elevado potencial para serem escolhidas como vias de atravessamento em uma rota, fez-se uma interpolação baseada na equação 2.3. Esse passo se baseou nos estudos propostos por (Pinho *et al.*, 2019; Rodrigues, 2021).

$$IPT_p = \frac{IPT_{dohexagon} - IPT_{menor}}{IPT_{maior} - IPT_{menor}} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Onde: IPT_p é o índice para os parâmetros topológicos padronizados de 0 a 1.

2.3.2.3 Definição dos Perfis Logísticos

A definição dos Perfis Logísticos ocorre por meio da formação de *clusters* com base nos parâmetros estabelecidos anteriormente ou com o enquadramento das características da área de estudo em perfis propostos na literatura. No caso do estudo, pensou-se na possibilidade de se fazer o agrupamento por meio da utilização da curva ABC para cada variável. A necessidade de categorizar as variáveis de acordo com sua importância para a operação da carga fez que esse método fosse utilizado, visto ser bastante usado na indústria para verificar aqueles produtos mais importantes de acordo com o faturamento.

Assim, houve uma associação ao levantamento de hipótese quanto à forma como cada variável se relaciona com a operação do transporte de cargas em ambiente urbano, tendo a faixa A como aquela referente aos aspectos que favorecem a maior intensidade de operação do TUC e a faixa C, a menor. Vale ressaltar ainda, que para melhorar a visualização dos dados no indicador de densidade viária quanto à restrição ao TUC essa classificação foi invertida, ou seja, apenas para ele as faixas A e B representam os hexágonos com maior quantidade de vias com restrição e a C, aqueles com menor presença de restrição. A figura 8 apresenta o fluxograma representativo do método tendo sido o levantamento de hipóteses baseado na literatura e listado

abaixo:

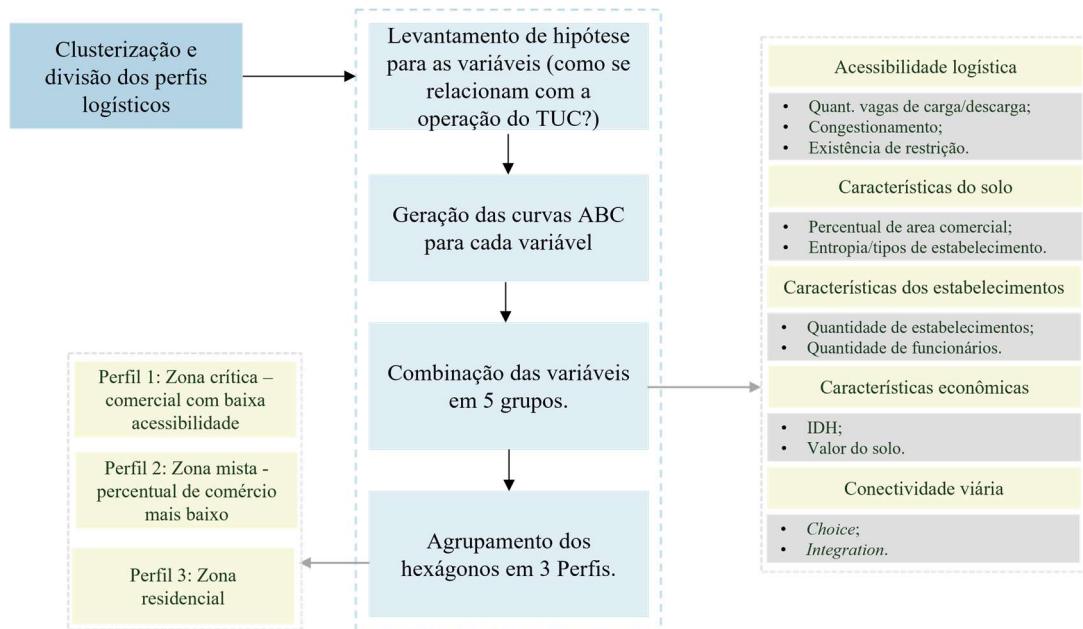
- **IDH:** Maior IDH está relacionado com melhor qualidade de vida no quesito poder de compra, renda e escolhas que favorecem a operação do TUC;
- **Congestionamento:** A operação do TUC é beneficiada pelo bom nível de serviço da via no quesito relação entre fluxo e capacidade. Quanto menos congestionamento, melhor para a operação;
- **Vagas de carga e descarga:** Quanto maior a quantidade de vagas de carga descarga, melhor acesso às entregas e diminuição de tempo de espera/ de abastecimento, favorecendo a operação;
- **Zonas de Restrição:** A presença das restrições dificulta a operação da carga por questões referentes à necessidade de rotas alternativas, acesso ao local de destino e mudanças nos horários das entregas;
- **Quantidade de estabelecimentos e de empregos:** A operação do TUC é favorecida em regiões com grande quantidade de estabelecimentos e de empregos;
- **Entropia/tipos de estabelecimentos:** Quanto mais heterogênea for a região quanto aos tipos de estabelecimentos existentes, maior a atividade da carga no entorno.
- **Uso do solo/ Percentual de uso comercial/ intensidade comercial:** A operação do TUC é maior em regiões onde o percentual de uso comercial é elevado;
- **Conectividade:** A localização dos estabelecimentos aproveita os movimentos de passagem natural e a operação da carga é favorecida pela eficiência da distribuição (tempo, acesso e combustível) quando se tem uma rede bem conectada.

Após isso, o passo comum às curvas ABC geradas foi feito no *software* Excel por meio do qual os valores foram organizados em ordem decrescente quanto ao impacto no TUC, com exceção o caso da presença de restrição. A faixa A se deu pela junção de 5% dos valores de maior impacto, a faixa B, de 15% deles e a faixa C, de 80% (restante), correspondendo, respectivamente, à 13, 39 e 206 hexágonos.

Em seguida, decidiu-se enquadrar as variáveis em grupos específicos para facilitar a clusterização também quanto aos níveis ABC. O quadro 5 apresenta as combinações feitas entre as variáveis para cada grupo de acordo com aquilo visto na literatura e com os conhecimentos dos envolvidos. Por exemplo, no caso do acesso logístico, região sem congestionamento (A/B)

e com grande quantidade de vagas de carga e descarga (A) foram avaliadas com alta acessibilidade, enquanto regiões com elevado nível de congestionamento e baixo número de vagas, e vice-versa, tiveram sua classificação reduzida. Com o acréscimo da avaliação da presença de restrições, hexágonos que eram classificados como A ou B tiveram sua acessibilidade reduzida ao possuírem restrições.

Figura 8 - Metodologia seguida para a construção dos Perfis Logísticos



Fonte: Autora (2024)

Já no caso de caracterização do solo, o percentual de área comercial alto atrelado a uma elevada entropia resultou em uma avaliação tipo A do grupo devido à probabilidade de maior atividade da carga. Já o grupo da conectividade, por ser composto de dois indicadores que não necessariamente se complementam (*choice* e *integration*), nos casos em que tiveram classificações B-C ou C-B optou-se por deixar essa relação explícita na análise visto que representam padrões de movimento diferente; exemplificando, regiões com maiores valores de *choice* são vistas como área de passagem, enquanto valores mais altos de *integration* representam regiões mais acessadas como destino. Casos em que ambos tiveram classificações iguais, a mesma foi mantida, e em que tiveram classificações diferentes altas, a do grupo resultante foi alta também.

Quanto à definição dos perfis, aqueles gerados em Macário (2013) e Castro *et al.* (2017) foram revisitados, sendo possível criar grupos de acordo com as características do estudo. O número de perfis foi definido após testes de agrupamentos feitos sem o uso de softwares,

resultando em 3 como suficiente. Foram feitos ainda, para comparação, alguns estudos, por meio do K-Means, utilizando o programa *Orange* que faz análise de dados por *python* como forma de verificar se seriam obtidos agrupamentos mais representativos que aquele feito, mas, após análise, optou-se pelo uso do primeiro.

Quadro 5 - Combinação das variáveis e classificação dos grupos

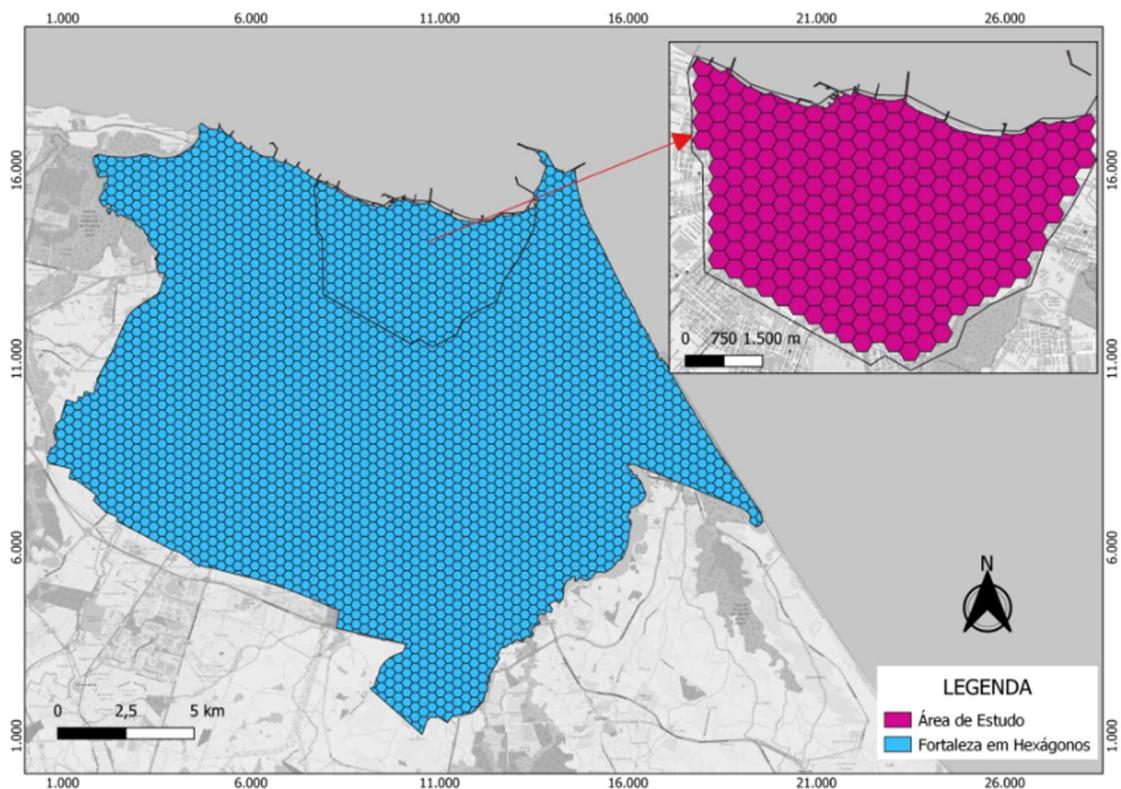
GRUPO	CLASSIFICAÇÃO											
Acessibilidade Logística	A			B					C			
- Qntd Vagas de Carga e Descarga	A	B	C	A	A	B	C	C	A	B	B	C
- Congestionamento	A/B	B	A	A/B	C	C	A	B	C	C	B	C
- Existência de Restrição ao TUC	C	C	C	A/B	C	C	A/B	C	A/B	B	A/B	A/B
Características do Solo	A			B					C			
- Percentual de Área Comercial	B	B	A	C	C	B	A		C			
- Tipos de Estabelecimento	B	A	B	A	B	C	C		C			
C. dos Estabelecimentos	A			B					C			
-Quantidade de Estabelecimento	A	B		A		C			C			
-Quantidade de Funcionários	A/B	A/B		C		A/B			C			
Caract. econômicas	A				B				C			
-IDH	A	B	A	C		B		C		C		
-Valor do Solo	C	B	B	A		C		B		C		
Conectividade	A				B			C	B/C		C/B	
-Choice	A	B	B	A	C	A	C		B		C	
-Integration	A	A	B	B	A	C	C		C		B	

Fonte: Autora (2024)

2.4 Resultados Obtidos

Considerando o método geral descrito apresentado na Figura 4 e a sequência de passos apresentada, essa seção se refere àquela de apresentação dos resultados e das discussões acerca deles. A região de estudo, após a geração da malha de hexágonos, pode ser vista na figura 9 e conta com 258 hexágonos de 0,11 km². Além disso, os mapas das variáveis gerados podem ser vistos nas Figuras 10 e 11 que foram organizadas de acordo com os dados reais, em que cores mais fortes representam valores mais altos, e com os dados das cuvas ABC geradas para cada variável, em que as faixas A, B e C são representadas, respectivamente, pelas cores vermelho, roxo e azul.

Figura 9 - Malha de hexágonos gerada com detalhe para a área de estudo.

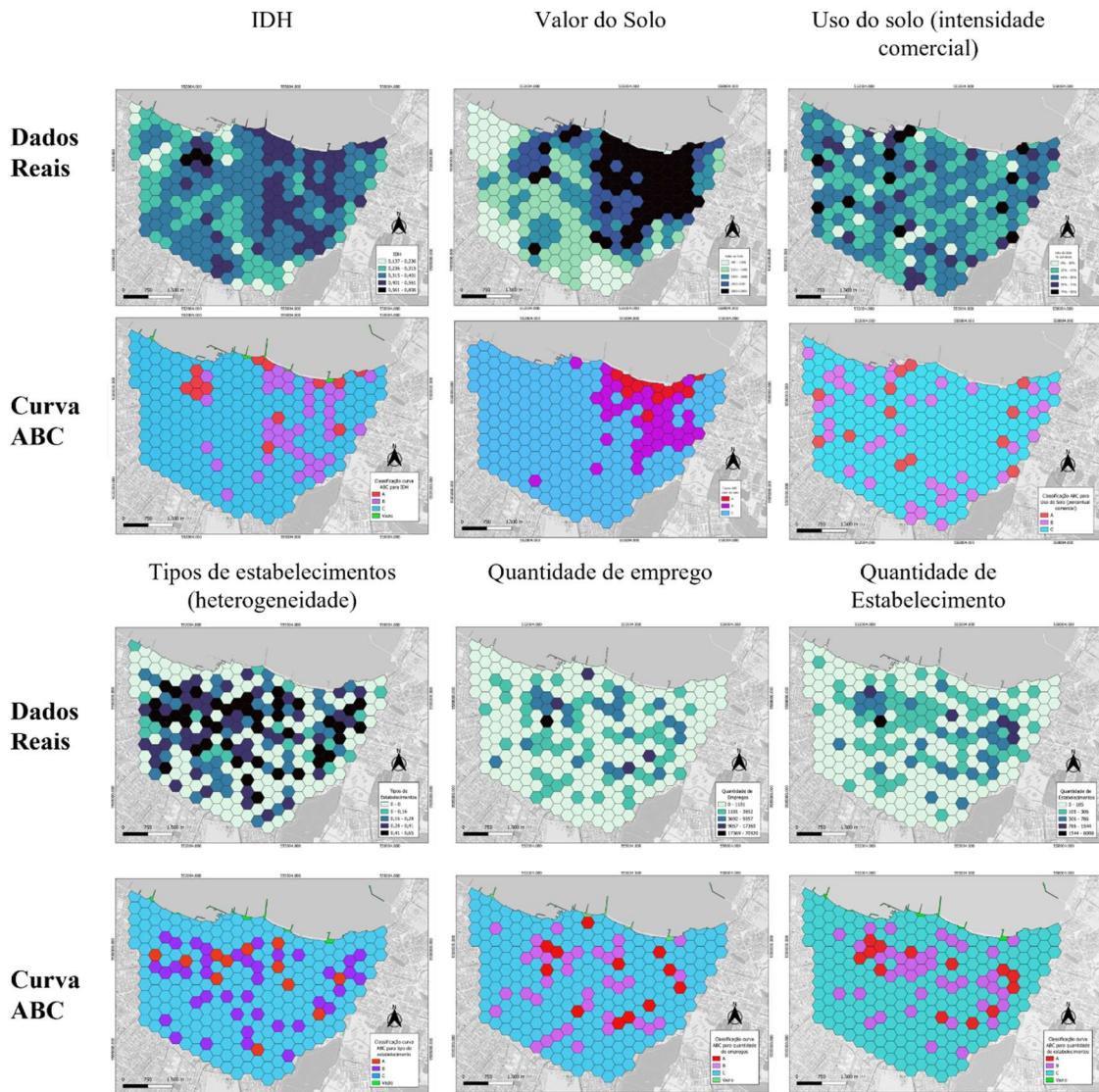


Fonte: Autora (2024)

Primeiramente, fazendo uma análise dos dados reais, quanto às questões socioeconômicas, percebe-se que os valores de IDH para a região são próximos, não existindo muitos classificados como precários, por se tratar de uma região mais central e maior rica da cidade, tendo como maiores índices os hexágonos marcados por maiores valores do solo. Pode-se perceber também que na região de estudo os dados referentes à quantidade de estabelecimento e de emprego conversam bastante, podendo haver uma diferença em relação ao porte do estabelecimento. Por exemplo, regiões que possuem muitos negócios de porte pequeno podem ter menos empregos que regiões que possuem poucos negócios de grande porte.

A quantidade de vagas de carga e descarga também segue esse mesmo padrão, existindo uma maior concentração no polo comercial localizado no bairro Centro/ Beira Mar que também é bastante rico em pontos turísticos, como teatros, parques e mercados. Vale observar que, via de regra, o domínio se refere aos hexágonos com, no máximo, quatro vagas de carga e descarga para toda a região de estudo e que nesses pontos em destaque mais à direita no mapa encontram-se polos culinários.

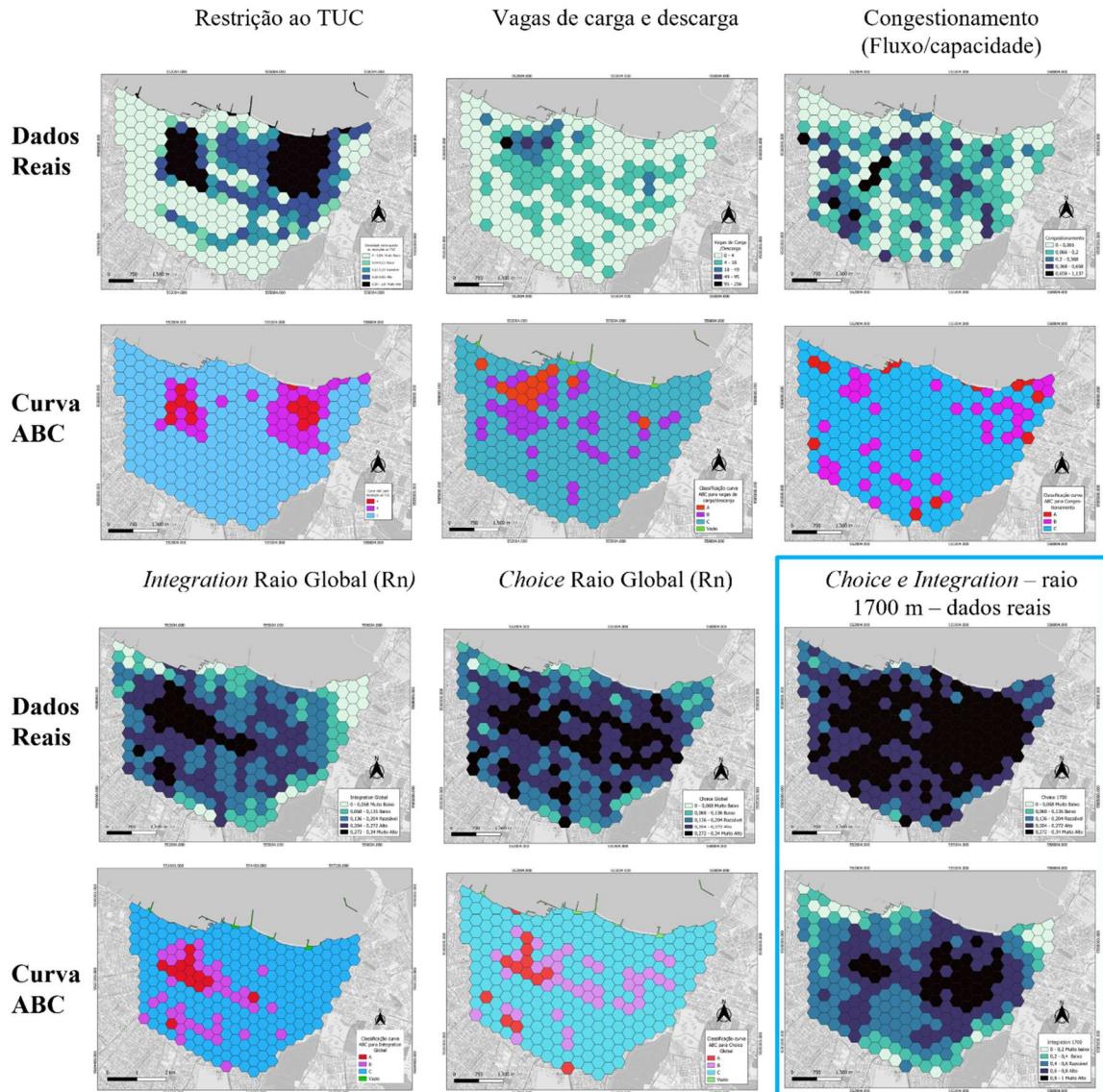
Figura 10 - Mapas gerados para as variáveis constituintes dos Perfis Logísticos.



Fonte: Autora (2024)

A intensidade de uso comercial na região, de fato, é bastante alta, tendo a maior quantidade de hexágonos enquadrada em percentuais que variam de 43% a 95% quanto à existência de uso comercial e a heterogeneidade quanto ao tipo de estabelecimento também é bastante marcada nessa região, sendo possível observar que naquela mais à esquerda do mapa existe uma maior diversidade. Já no quesito características da infraestrutura, a existência de restrições à carga está presente na região mais ao norte da área de estudo, tendo como predominância a restrição do tipo 1 de horário, como descrito anteriormente. São regiões localizadas próximas aos estabelecimentos e com densidade viária alta, mas um ponto a ser considerado é que nessas regiões de restrição existem motivos turísticos de acesso de pessoas e são bastante adensadas.

Figura 11 - Mapas gerados para as variáveis constituintes dos Perfis Logísticos.



Fonte: Autora (2024)

O nível de congestionamento encontrado para a região também se apresenta de forma bastante diversificada, sendo possível verificar visualmente sua relação com os tipos dos estabelecimentos: menor nível de congestionamento é encontrado em pontos com melhor homogeneidade de estabelecimentos. Ademais, a conectividade das vias foi avaliada pelos parâmetros *Choice* e *Integration* para o raio global, que considera a cidade toda, e para o raio de 1700 m visto que, de acordo com relatório PASFOR, a maior parte das viagens do TUC ocorre dentro das macrozonas de tráfego.

O parâmetro *Choice* mostrou para o raio global avenidas de grande fluxo existentes na cidade, bem como interseções entre elas. Essa configuração foi alterada ao restringir o raio para 1700 m, sendo possível verificar que muitas ruas locais e suas interseções com arteriais foram

identificadas como de elevada conectividade. Além disso, foram destacados conjuntos de ruas locais que são responsáveis pelo movimento de veículos em regiões da área de estudo mais periféricas que não são atravessadas necessariamente por vias arteriais.

Quanto ao *Integration*, foram identificados os pontos de destino que possuem uma melhor acessibilidade quanto à conectividade. Para o raio global, os pontos de maior interação estão localizados no Bairro Centro sendo formados por interseções de 7 avenidas importantes. Para o raio de 1700 m, houve uma mudança para a região mais à direita da área de estudo, mostrando que nela existem pontos de destino mais conectados para viagens dentro desse raio. Além disso, esse parâmetro traz um resultado mais restrito que o anterior, apresentando pontos focais com predominância de interseções de vias arteriais.

Vale ressaltar, porém, que no caso da conectividade para a construção dos perfis, como o objetivo do estudo foi elaborado pensando no movimento da carga para uma região de raio maior que 1700 m (primeiro anel viário), apesar de a análise dos indicadores para esse raio menor ajudar a entender algumas características da região, foram usados especificamente os resultados obtidos para o raio global. A figura 11 apresenta os mapas de dados reais para *choice* e *integration* no raio de 1700 m a título de informação, não tendo sido necessária a construção das curvas ABC.

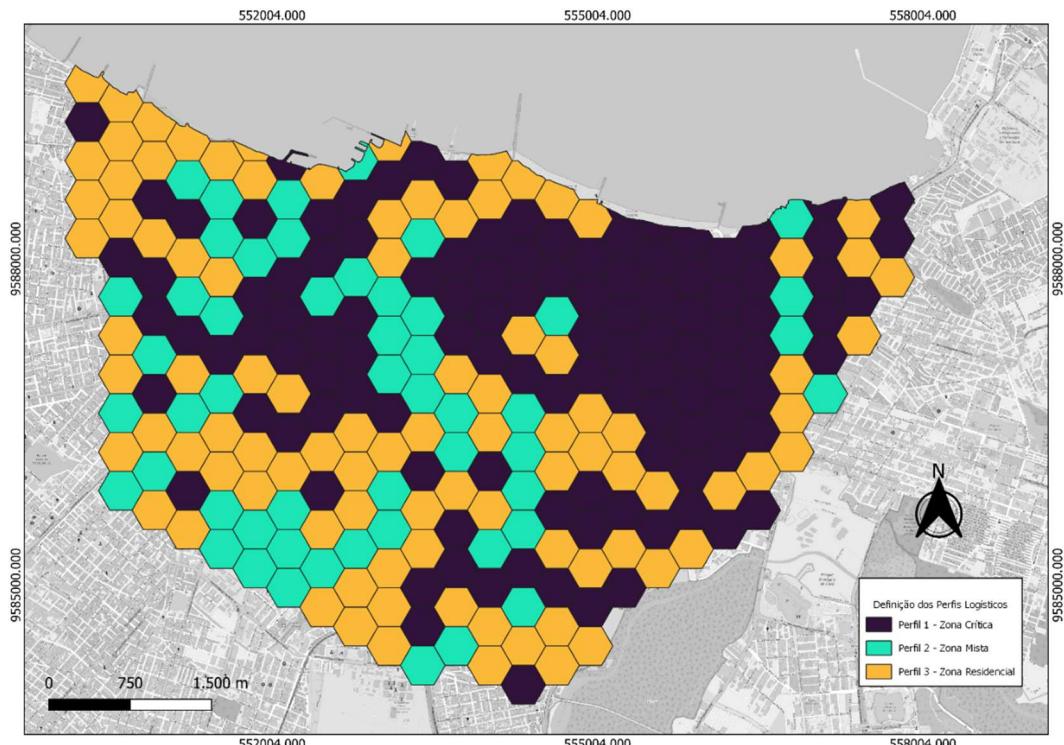
Em posse desses resultados, foi possível identificar que a região de estudo apresenta um percentual de área comercial bastante elevado, até mesmo os hexágonos localizados nas periferias da área de estudo, visto que ela é formada por bairros localizados no centro da cidade de Fortaleza e caracterizados por serem polos de serviços e de comércios. Assim, foi possível a delimitação de três grupos principais de perfis descritos em sequência e que são apresentados na figura 12.

- Perfil 1 - Zona crítica - caracterizado por elevada atividade comercial quanto ao percentual de comércio e à entropia dos estabelecimentos (características do solo, dos estabelecimentos e econômicas classificadas como ABC) associada à baixa acessibilidade logística por causa de grande área com presença de restrições, nível de congestionamento mais alto e baixa quantidade de vagas de carga e descarga; Pode-se dizer que é nele que acontece a maior operação (quantidade) da carga transportada globalmente.
- Perfil 2 - Zona mista - segundo maior valor de concentração de estabelecimentos com

valor de solo intermediário e acessibilidade logística classificada como boa, com quantidade de vaga de carga e descarga classificada como média e restrição em apenas 3 hexágonos. Pode-se dizer que é uma região de passagem das viagens da carga.

- Perfil 3 - Zona residencial com comércio local- características econômicas, do solo e dos estabelecimentos classificadas como baixas (C) associadas à existência de comércio local com baixa heterogeneidade e porte, e a acessibilidade logística classificada como média a alta (A-B) principalmente por não existir restrição na região, pelo baixo nível de congestionamento e por possuir baixa quantidade de vagas de carga e descarga. Pode ser vista como região com operação/fluxo de carga mais local.

Figura 12 - Perfis Logísticos para a área de estudo



Fonte: Autora (2024)

Quanto à presença da conectividade nos perfis, variável pouco utilizada nos estudos revisados da área, mas cuja importância no movimento dentro da cidade é reconhecida na literatura e abordada como objetivo desse estudo, foi visto que as regiões eleitas como residencial com comércio local (Perfil 3) possuíram os valores mais baixos, tendo sido identificado valores

mais altos para o *integration* do que para o *choice*, revelando o potencial de destino dos movimentos e de circulação mais local da carga, característica confirmada pelos valores do *choice* no raio de 1700 m que, para esse perfil, ficou classificado como médio a alto.

O Perfil 1, por sua vez, possui nível de conectividade médio-baixo, com alguns pontos classificados como alto, e equilíbrio entre os indicadores constituintes, com leve valorização do primeiro que mostra, também, o potencial de receber viagens de destino. Por fim, o Perfil 2 é aquele cuja conectividade foi melhor avaliada, sendo classificada como alta-média e certa predominância de valores altos no *choice*, mostrando que é composto de hexágonos cujo movimento é derivado dos de passagem através dessa zona reiterando que esse PL não é constituído, normalmente, por regiões de origem ou de destino, como o PL 3 e 1.

Dessa forma, percebe-se que os indicadores de conectividade ao serem incorporados nos perfis podem melhorar o detalhamento da análise a nível de movimento do transporte de carga, conseguindo prever aquelas regiões que são marcadas por movimentos passantes ou como ponto de destino para que seja possível traçar estratégias, como a adequação de quantidade de vagas e carga e descarga, por exemplo, para pontos de recepção intenso e previsão de reordenação de trajetos em regiões com elevada conectividade a fim de diminuir o fluxo passante em horários de pico que possam diminuir a eficiência da operação. No apêndice desse estudo pode ser encontrado esse método desenvolvido em forma de roteiro para que seja possível a replicação em estudos futuros.

3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONECTIVIDADE VIÁRIA NA EMISSÃO DE POLUENTES PELO TUC

3.1 Introdução

Nos últimos anos, tem-se percebido um apelo mundial em decorrência das mudanças climáticas geradas como externalidades negativas associadas ao desenvolvimento das cidades, contando não apenas com o processo de industrialização em si, mas também com o aumento populacional, com a crescente demanda por consumo e, consequentemente, por operações logísticas.

Durante o desenrolar da cadeia de suprimentos inerente à produção de qualquer produto, existe a necessidade, em alguma fase, da utilização do sistema de transportes para facilitar o escoamento produtivo. No entanto, essa fase operacional da carga, apesar de essencial, está associada a uma elevada taxa de emissão de poluentes, sendo responsável não apenas pela produção de CO₂, mas, principalmente, pela emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) e de Material Particulado (MP), nas formas MP 10 e MP 2,5, que impacta negativamente a saúde das pessoas por causa do tamanho da sua partícula e da sua distribuição tempo-espacó, sendo o MP 2,5 ainda mais perigoso por causa da facilidade de penetração no sistema respiratório e da sua distância de propagação mais longa (Mckinnon *et al.*, 2015; Yoon *et al.*, 2021).

Ademais, ao se considerar o contexto socioeconômico e a consequente distribuição espacial da população nos centros urbanos, verifica-se que há, inherentemente, uma desigualdade de acesso que é constantemente reiterada pela distribuição e pelo planejamento de medidas de urbanização. A necessidade de melhoria da acessibilidade de uma minoria às oportunidades depende, geralmente, da privação de acesso de uma maioria que consiste naquela parcela mais vulnerabilizada da população.

A logística envolvida na distribuição de produtos, ao ser relacionada a essas características do ambiente urbano, pode ser inserida nesse contexto como um resultado e, ao mesmo tempo, como uma intensificadora dos problemas causados, aumentando as vulnerabilidades sociais, os custos logísticos e as injustiças ambientais, visto que aqueles que mais utilizam transportes públicos e ativos e que possuem menor poder de consumo são os que mais estão expostos a níveis altos de poluição (Cavalcante, 2009; Guzman *et al.*, 2023).

Essa distribuição desigual é refletida principalmente, a nível espacial, nas características de disposição da malha viária. É possível verificar que, geralmente, as regiões periféricas das cidades são aquelas cuja conectividade viária é menor, sendo regiões penalizadas com dificuldades de acesso por limitações de rotas alternativas e por viagens mais duradouras.

Em vista disso, a ideia logística urbana amplamente visada é a possibilidade de garantir a harmonia entre o ambiente e o transporte para melhorar a eficiência e a igualdade, diminuindo a emissão de gases nocivos pelo setor de transporte e a exposição da população, e possibilitando uma melhor igualdade de acesso (Taniguchi *et al.*, 2014). Para isso, é contínuo o esforço em medidas de planejamento urbano como mitigadoras desse processo (Barczak; Duarte, 2012).

Dentre essas, a preocupação quanto às zonas de restrição de circulação de veículos e à definição de rotas a serem percorridas de forma a minimizar custos tem se tornado objeto de diversos estudos na área de transportes, mas a consideração da “emissão de poluente” nas funções objetivo ainda representa um desafio importante a ser analisado para a otimização dos processos logísticos, principalmente quando é considerada a incorporação de limitações relativas à dinamicidade, teórica e prática, da acessibilidade, explicada por características topológicas, geográficas, econômicas e multimodais; do comportamento dos usuários; da forma urbana e das condições atmosféricas (Aeris, 2012; Dias, 2018; Thomas *et al.*, 2003; Fialho, 2022).

Sabe-se que a emissão de poluentes decorrente dos transportes tem bastante influência de fatores como tipo de motor, tipo de combustível utilizado, velocidade, duração e distância percorrida, características físicas da via, como geometria, conectividade, declive e hierarquia funcional, bem como experiência de direção do condutor e existência ou não de falhas que influenciem em redução de nível de serviço (Bertонcini *et al.*, 2021; Boriboonsomsin; Barth, 2009; Incremona; Polterauer, 2023; Zhang; Frey, 2006; Ma *et al.*, 2023).

Contudo, como trazido por alguns autores, as características da rede viária, tendo como foco a conectividade das vias, a existência das interseções e de links/rotas alternativas associadas ao ciclo de condução e à emissão de poluentes, apesar de se saber que existe relação entre elas, ainda tem uma abordagem bastante escassa nos estudos de transportes, tendo sido dito no estudo de (Prud'homme *et al.*, 2012) e confirmada tanto por referências mais atuais, como pela dificuldade encontrada durante as pesquisas práticas focadas na prospecção de estudos sobre a temática (Ma *et al.*, 2023; Yoon *et al.*, 2021).

A partir disso, e fazendo jus ao segundo objetivo específico desse trabalho, o capítulo a ser desenvolvido tem como intuito discutir sobre como a conectividade da rede viária pode impactar na emissão de poluentes pelo transporte urbano de cargas. Para isso, os tópicos que se seguem trarão o método de pesquisa utilizado e as principais contribuições bibliográficas encontradas para a construção do conhecimento.

3.2 Revisão Conceitual

A seção que se segue corresponde ao conhecimento teórico construído com o desenvolvimento do método descrito no item 3.3. Durante a leitura dos artigos, percebeu-se uma divisão sutil dos trabalhos em “emissão de poluentes” e em “exposição aos poluentes”, que reflete mais sobre o impacto das emissões na saúde da população, decidindo-se, pois, por dividi-la nesses dois tópicos.

3.2.1 *Conectividade e emissão de poluentes*

A compreensão do papel dos diferentes modos de transporte, dos tipos de veículos de acordo com as especificações do motor e com o ano de fabricação, da temperatura, das distâncias de viagem e das práticas de direção sobre o consumo energético e sobre o ciclo de condução veicular é amplamente abordada na literatura, mas a relação da estrutura da rede viária sobre a emissão de poluentes ainda é algo desconhecido (Ma *et al.*, 2023; Prud'homme *et al.*, 2012).

Em seu estudo, Prud'homme *et al.* (2012) objetivam identificar os possíveis efeitos da estrutura da rede viária na emissão de poluentes, trazendo a importância de considerar a rota como um nível relevante para identificar e medir, visto que abrange o comportamento dos veículos dentro da estrutura da malha viária (Marshall, 2004). Além disso, mencionam a importância do parâmetro “conectividade” enquanto provedor de melhorias na acessibilidade porta-porta, na preservação de áreas ambientais com a condução do fluxo por rotas alternativas e no uso de modos não-motorizados.

O estudo trouxe, ainda, a ideia de hierarquia viária por meio das limitações de velocidades impostas na região de estudo, mostrando que a velocidade tem um impacto considerável na emissão, visto que no cenário constituído por velocidades baixas nos caminhos mais curtos, mesmo que a quantidade de carros usada tenha sido maior que no cenário de velocidades altas, a emissão foi menor (Prud'homme *et al.*, 2012).

Além disso, a associação da conectividade com a heterogeneidade da rede foi bastante discutida. Em redes homogêneas, onde as seções das vias e as velocidades são parecidas, as interferências e, portanto, as emissões são menores. Já em redes rápidas, os poluentes tendem a se concentrar nos pontos de interseção de vias com hierarquia de velocidade altas, principalmente regiões localizadas no centro da cidade.

Nesses casos, o “*betweenness centrality*” mais alto é encontrado nos trechos que permitem as maiores velocidades (Prud’homme *et al.*, 2012). Logo, redes mais homogêneas e bem conectadas são mais indicadas para diminuir a emissão de poluentes e para manter uma boa acessibilidade, enquanto que a de baixa conectividade implica em grande taxa de desvios (longos trajetos) com baixa taxa de agrupamento de veículos e maior emissão de poluentes.

Outra característica que se relaciona bastante à conectividade é a presença de interseções ao longo do trecho percorrido que também influencia bastante nas emissões, visto que, próximo a esses pontos geralmente considerados de gargalos, existe o encontro de velocidades diferentes e comportamentos de direção também diferentes, aumentando a taxa de emissão quando comparado ao restante da via (Prud’homme *et al.*, 2012; Bampounakis *et al.*, 2021).

Ainda, o padrão de disposição da malha também foi levado em consideração. Yan *et al.* (2020) apresentam em seu estudo dois padrões a partir dos quais foram observados o consumo de combustível (FC – *fuel consumption*) e a emissão de poluentes. O primeiro se refere à estrutura monocêntrica e concêntrica da cidade de estudo que pode ser explicada pela agregação espacial comumente observada dos pontos de origem de viagens, existindo uma maior taxa de consumo de combustível no centro, decaindo à medida que avança para regiões periféricas; e o segundo, ao padrão radial e circular das estradas principais que são destacadas por conta do alto índice de FC e, por consequência, de emissões.

Nesse caso, há uma discussão sobre a diferença desses índices encontrados para os diferentes tipos de vias (principal, local e ramais) mesmo dentro da região mais central, tendo sido dito que o maior percentual de emissão nas vias principais circulares e radiais se deve à sua maior utilização em rotas individuais (maior “*betweenness centrality*”) (Yan *et al.*, 2020). Como complementação, citando o estudo de Frank *et al.* (2000), as redes viárias que possuem maior quantidade de ruas entre os quarteirões (maior conectividade) e menores dimensões de quadras tendem a reduzir as velocidades e as distâncias, a permitir transporte ativo e a aumentar a segurança de pedestres, enquanto que redes com presença de "ruas unicamente principais" proporcionam viagens mais longas para se conseguir atingir destinos próximos e facilitam a utilização de velocidades mais altas, aumentando a emissão de poluentes.

Walker e Manson (2014) traz o uso da telemática atrelada à topologia para melhoria de provisão de caminhos, já que a estrutura viária original não pode ser modificada. Mostraram, pois, que em redes do tipo radial e tributária podem atingir estágios de funcionamento de forma eficiente, enquanto redes lineares dificilmente atingem nível ótimo de eficiência.

Em uma visão diferente, houve a discussão quanto ao paradoxo atrelado à relação entre a conectividade e a eficiência. Como o aumento da demanda no trecho da via pode impactar no aumento da duração de viagens e na emissão de poluentes, mitigar a formação de congestionamentos é uma maneira eficaz de reduzir a poluição.

Nesse sentido, Ma *et al.* (2023) trazem a avaliação do aumento da conectividade do trecho como uma forma de gerar caminhos alternativos para escoar o fluxo e diminuir a demanda em alguns pontos da rede. No entanto, há a discussão sobre o chamado paradoxo de emissão que consiste no seguinte: em uma rede viária, os usuários sempre buscam as menores rotas, tendo a liberdade de escolher aquela a qual melhor se adapta. Isso acontece em todo o sistema até que uma situação de equilíbrio seja atingida e todas as rotas usadas possuam o mesmo tempo de viagem que é menor que o daquelas que não estão sendo utilizadas.

Dessa forma, se em uma rede são adicionados novos links, o fluxo de passagem se organiza de forma a atingir esse equilíbrio e, se o intuito era diminuir o congestionamento e, consequentemente a emissão de poluentes, a emissão tende a aumentar por causa da adição de mais links à rede (Ma *et al.*, 2023; Nagurney, 2000).

Além disso, foram trazidos outros exemplos sobre demanda e capacidade das vias. O aumento da demanda na rede, intuitivamente, aumentaria a emissão de poluentes, mas com o aumento da quantidade de links isso não aconteceu, já com o aumento na capacidade da via, mesmo não alterando a demanda e nem a quantidade de links, a emissão mudou (Ma *et al.*, 2023). Isso mostra que, apesar de a topologia influenciar na emissão, deve-se ter cautela quanto à tomada de decisão e sempre averiguar as outras características do sistema, como distâncias e durações médias de viagens (VMT e VHT) e analisar a especificidade da área de estudo para que se consiga um resultado eficiente (Nagurney, 2000; Ma *et al.*, 2023; Frank *et al.*, 2000).

3.2.2 *Conectividade e exposição aos poluentes*

A preocupação quanto às emissões de poluentes pelo TUC se torna mais impactante ao ser associada diretamente àquilo que ela pode causar negativamente ao meio ambiente (flora e fauna) e à saúde das pessoas, principalmente daquelas que compõem os grupos mais vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas de baixa-renda. A exposição aos poluentes descreve exatamente isso e, considerando o ambiente urbano e a aglomeração populacional, ela acaba se relacionando mais à exposição das pessoas e às doenças normalmente geradas pela taxa de

inalação, principalmente, de material particulado (Luo *et al.*, 2018).

E isso tem sido uma crítica constantemente levantada em alguns estudos que trazem a utilização de Eco-ITS (*Eco-Friendly Inteligente Transportation System*) com o foco especificamente nos veículos, tendo como objetivo a redução da emissão e do consumo energético e, por fim, do custo logístico, como é o caso das zonas de baixa emissão (*Low Emission Zones*) e das rotas verdes (Dias, 2018; Luo *et al.*, 2018). Além disso, em ambiente urbano, com a elevada densidade de vias e de pessoas vivendo às suas margens, é importante ver a estrutura da rede viária como um epicentro do aumento dos níveis de concentração de material particulado que, mesmo com a dispersão normalmente vista a partir do distanciamento da fonte poluidora, a concentração próxima às vias varia de 2 a 4 vezes àquela encontrada a 100 metros de distância (Luo *et al.*, 2018; Yoon *et al.*, 2021).

Nesse contexto, alguns estudos trazem que a conectividade da via entra como influenciadora nesse processo. Em seu estudo, Luo *et al.* (2018) traz um processo de roteirização veicular na qual a exposição dos residentes à poluição foi estimada e usada como um custo junto à consideração da duração de viagem econômica. Ainda, como área de estudo, escolheu parte da cidade que possuía diversidade de tipologias de vias (auto-estrada, arteriais e vias coletoras) e elevado percentual de residentes idosos e crianças e de escolas e casas de apoio próximas às estradas.

Foram feitos cenários, sendo um composto pela rota de menor duração (LDR - *Least Duration Route*) e outro pela rota de menor exposição (LER – *Low Exposure Route*) e foi visto que apenas em 30% dos pares OD a emissão nos dois cenários foi igual, existindo no restante mudança significativa quanto à emissão seguida de certo aumento na duração da viagem que pode ser contornada (Luo *et al.*, 2018). Isso traz a conclusão de que em uma rede com diversidade de vias (densidade e conectividade), existem rotas alternativas de forma que veículos muito poluentes possam percorrer a fim de diminuir o impacto das emissões para a população local, principalmente para grupos sensíveis como idosos, crianças e pessoas hospitalizadas (Luo *et al.*, 2018).

Brusselaers *et al.* (2023) traz, após verificar a distribuição diária das emissões de PM e NOx, que os valores destacam claramente a hierarquia viária da região. Além disso, os maiores custos relativos à exposição foram encontrados em localidades próximas a rodovias e estradas principais na área industrial, mas que em regiões periféricas também foi percebido esse comportamento nos principais eixos.

Enquanto os dois estudos mencionados falaram sobre densidade e hierarquia viária, que não deixam de ser atrelados à topologia, Yoon *et al.* (2021) trazem abertamente a importância da conectividade e da centralidade para diminuir a exposição dos pedestres aos poluentes ao mesmo tempo em que consegue melhorar a acessibilidade às facilidades sociais, econômicas e educacionais.

Em seu estudo, Yoon *et al.* (2021) avaliam dois indicadores associados ao “*between-ness centrality*”, nomeados por *Short-Path Betweenness Centrality (SPBC)* e por *Current-Flow Betweenness Centrality (CFBC)*, tendo como objetivo a redução da taxa de MP2,5. Com isso, foram construídos 4 cenários ao longo da área de estudo que foram formados por regiões (1) que precisavam de planos redução de MP2,5 devido ao alto risco de exposição ao poluente nos caminhos curtos; (2) que tinham as condições mais favoráveis de caminhada devido à baixa exposição ao MP2,5 nos caminhos curtos; (3) que tinham rotas alternativas expostas ao PM2,5 e, por isso, seria recomendado a redução do poluente na região; (4) que possuíam muitas rotas alternativas associada a baixo risco de exposição ao poluente.

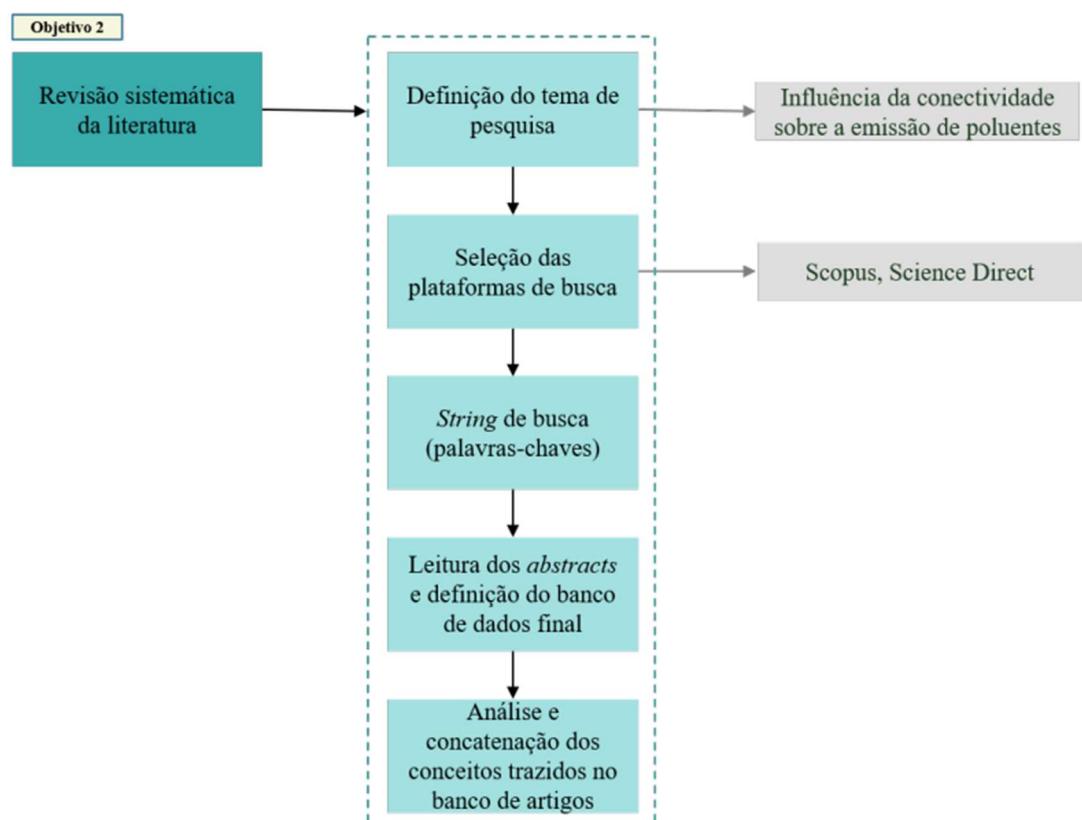
Como um dos resultados vistos no estudo, verifica-se a possibilidade de manejo de pedestres por rotas alternativas, em locais onde existe uma densa rede bem conectada, que estão localizadas em vias ou em regiões menos acometidas com a presença de material particulado. Por fim, os estudos trouxeram sobre a importância de considerar o impacto da poluição do ar em microambientes, bem como a inclusão de cálculos de exposição dinâmica que incluam a presença espacial e temporal das pessoas em determinadas localidades (Brusselaers *et al.*, 2023; Luo *et al.*, 2018). Um melhor entendimento sobre a exposição das pessoas e sobre a dose de poluentes inalada pode auxiliar em um melhor planejamento de alternativas no setor de transportes (Guzman *et al.*, 2023).

3.3 Método

O método elencado para desenvolver o capítulo se baseou nos passos da revisão sistemática, como pode ser visto na figura 13 que conta com o fluxograma descritivo. Assim, primeiramente, foram feitas pesquisas preliminares de artigos relacionados à conectividade ou forma urbana e à emissão de poluentes na logística urbana para contextualização e entendimento inicial daquilo que se queria propor e, posteriormente, para a construção do conhecimento sobre como a conectividade da rede viária impacta na emissão de poluentes pelo TUC.

Dessa forma, percebeu-se que os estudos que mais se aproximaram daquilo que se queria utilizaram palavras-chaves como: “*road network shape*”, “*air quality*”, “*betweenness centrality*”, “*pollutant emission estimation*” e “*shortest path*”. Utilizando a ferramenta “busca avançada” nas plataformas de pesquisa “*Science Direct*” e “*Scopus*”, foi possível pesquisar os temas de interesse por meio do uso de palavras-chave unidas por conectivos lógicos, formando a *string* de busca. Vale ressaltar que algumas das palavras citadas retornaram pesquisas amplas e sem especificidade, tendo sido, por isso, feito restrições voltadas para o transporte de cargas.

Figura 13 - Fluxograma representativo do método da revisão sistemática



Fonte: Autora (2024)

Considerando que, durante essa etapa, a dificuldade encontrada residia na escassez de estudos que relacionassem parâmetros de cálculo da conectividade viária (centralidade), reportados em estudos revisados anteriormente, à emissão de poluentes e ao transporte de carga, bem como de estudos sobre a aderência de teorias/ferramentas de análise topológica ao contexto do transporte urbano de carga, a seguinte string foi construída: (“*CENTRALITY* OR “*STREET CENTRALITY*” OR “*ROAD CONNECTIVITY*” OR “*TRANSPORT LINK*”) AND (“*ROUTE SELECTION*” OR “*ROUTE CHOICE*”) AND (“*EMISSION*”) AND (“*SPACE SYNTAX*” OR

“GRAPH”).

Durante os testes feitos, as combinações do tipo “*road connectivity AND pollutant emission*”; “*road connectivity AND freight transport emission*”; “*road centrality AND pollutant emission*”; “*betweenness centrality AND pollutant emission*”; “*betweenness centrality AND transport pollutant emission*”; “*road topology AND pollutant emission*” resultaram em apenas 3 estudos na base Scopus.

Foram feitas tentativas de mudança da *string*, mas a busca ficava sujeita a generalizações ou a restrições em excesso, tendo sido obtidos como resultado do processo 391 estudos envolvendo artigos e capítulos de livro. Após revisão de títulos, resumos e palavras-chave, foram elencados 7 como pertinentes àquilo posto. Além disso, foi considerado como forma de ampliar o banco de dados, também, aqueles que deram origem à busca, as referências citadas por eles e os trabalhos que os citaram, totalizando em 10 documentos a serem revisados.

3.4 Resultados Obtidos

O objetivo das pesquisas descritas na seção anterior foi, principalmente, conseguir entender como a conectividade impacta na emissão de poluentes, levando em consideração a interferência de muitas interseções em um trecho e a existência de caminhos alternativos. Com a prospecção, foi gerada uma nuvem de palavras, como mostrado na figura 14, sendo possível ver que a pesquisa retornou artigos relacionados também com acessibilidade; com vulnerabilidade/confiabilidade da rede, por meio da resiliência e da robustez; com análise de topologia de rede, conectividade, centralidade e padrões espaciais, bem como com mobilidade e com desenvolvimento sustentável, incluindo eficiência dos processos, consumo energético, impacto socioeconômico e qualidade do ar.

A lista final dos artigos que foram considerados pertinentes ao que se queria analisar contou com diversidade de métodos, existindo 3 que discutem diretamente sobre o paradoxo de Braess (Ma *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2023; Nagurney, 2000), e foi percebido maior importância à exposição das pessoas aos poluentes em si, tendo sido isso mencionado inclusive naqueles estudos que abordaram prioritariamente sobre a emissão. Quanto aos locais de análise, houve variação, contando com cidades escocesas, norte-americanas, francesas, gregas, coreanas e chinesas, existindo uma percepção diferenciada quanto ao interesse de pesquisadores asiáticos pelo tema. Essa diversidade quanto às cidades analisadas provém do interesse em analisar

diversidades de malha viária, bem como em selecionar áreas com grande emissão de poluentes proveniente do tráfego veicular intenso e diverso (Walker; Manson, 2014; Yoon *et al.*, 2021; Barmpounakis *et al.*, 2021).

Quanto às questões ambientais referentes às emissões, ao consumo energético, ao desenvolvimento sustentável e à eficiência, os estudos que apresentaram a temática propuseram a utilização de medidas do padrão topológico da rede viária, tendo sido associado os pontos de interseção da rede aos congestionamentos e ao aumento da poluição (BARMPOUNAKIS *et al.*, 2021); o layout da rede (linear, tributário, radial e grade) e a tipologia das vias à *ridesharing* e à performance, com foco na duração da viagem, no custo e na emissão de carbono (Walker; Manson, 2014; Yan *et al.*, 2020; Prud'homme *et al.*, 2012); a conectividade e a hierarquia viária à exposição dos pedestres e de pessoas vulneráveis (idosos e crianças) ao material particulado (MP 2,5) (Yoon *et al.*, 2021; Luo *et al.*, 2018; Brusselaers *et al.*, 2023) e como parâmetro de uso do solo associado à emissão (Frank *et al.*, 2000).

Figura 14 - Nuvem de palavras resultante da revisão sistemática



Fonte: Autora (2024)

Ainda, vale ressaltar, inclusive como forma de justificar o esforço da pesquisa, a carência em relação a estudos que abordem a temática. Houve dúvida durante a leitura dos artigos sobre a incompreensão da temática ser relativa à dificuldade fenomenológica em si ou de explicação dos autores e, aparentemente, há/houve um descaso com a temática, sendo verificado, em alguns momentos, certo desinteresse. Ao mesmo tempo, os estudos revisados trouxeram,

reiteradamente, a dificuldade em isolar o efeito da conectividade viária na emissão de poluentes por transportes, visto que esta está associada às diversas variáveis, como capacidade viária, demanda, velocidade, greide da estrada e características de condução do motorista (Ma *et al.*, 2023; Nagurney, 2000; Ma *et al.*, 2018; Nuñez *et al.*, 2023; Prud'homme *et al.*, 2012).

Assim, ficou claro que essa característica topológica tem um papel importante na operação, mas que deve haver, a partir do interesse em usá-la, um estudo minucioso que leve em consideração as características próprias da região, do fenômeno de estudo e dos perfis de tráfego. Ma *et al.* (2023) e Nagurney (2000) trouxeram essa discussão de forma bastante latente em seus estudos, mostrando que mesmo que sejam propostos métodos para verificar a relação, o resultado não pode ser generalizado. Assim, pôde-se concluir que:

- Redes homogêneas quanto às características físicas e operacionais tendem a interferir menos no ciclo de condução, diminuindo as emissões durante os movimentos (Prud'homme *et al.*, 2012);
- Os poluentes tendem a se concentrar em pontos onde a hierarquia de velocidade é alta, como por exemplo em interseções de vias de tipologias diferentes (nós com elevada conectividade);
- Há, aparentemente, um maior percentual de poluentes (qualidade do ar mais baixa) nas vias principais por serem mais utilizadas em rotas diversas - maior centralidade (Yan *et al.*, 2020);
- A geração de NOx é mais sensível à conectividade da rede que o CO e o VOC (compostos orgânicos voláteis) e essa característica (que ocorre geralmente em regiões mais centrais e densas) está associada a uma menor velocidade média de viagem por conta das conversões (Frank *et al.*, 2000).

No caso da exposição aos poluentes, foi possível concluir que em uma rede com diversidade de vias conectadas existem rotas alternativas de forma a diminuir o impacto das emissões para a população e que quanto maior for o número de arcos conectados em caminhos mais curtos, menores serão os problemas de saúde por diminuir os focos de poluição (Prud'homme *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2018; Brusselaers *et al.*, 2023).

Logo, pode-se dizer que redes bem conectadas permitem uma melhor escolha de rotas e de disposição geográfica de pessoas e negócios como forma de diminuir a emissão e a exposição aos poluentes, mesmo que nelas existam também pontos de gargalo originados da elevada conectividade entre vias heterogêneas que, apesar de serem vistos como pontos positivos

para o acesso aos destinos, trazem problemas à mobilidade, ao consumo de combustível e à emissão de poluentes. A promoção, inclusive, de melhorias de conectividade a nível de cidade com a implementação de ligações entre os usos pode melhorar tanto acessibilidade e mobilidade, como reduzir emissões de óxidos de nitrogênio e formação de ozônio (Frank *et al.*, 2000).

4 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS PERFIS LOGÍSTICOS QUANTO À EMISSÃO DE POLUENTES

4.1 Introdução

Como já visto em vários estudos, a emissão de poluentes depende de muitos fatores, desde questões climáticas e meteorológicas até o comportamento dos usuários (Mckinnon *et al.*, 2015; Mirhedayatian; Yan, 2018; Walker; Manson, 2014; Bertoncini *et al.*, 2021; Boriboonsomsin; Barth, 2009; Incremona; Polterauer, 2023; Zhang; Frey, 2006; Ma *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2018; Frank *et al.*, 2000). Assim, o uso do solo com sua diversidade de atividades disposta ao longo da malha viária influencia bastante nisso por estar associado diretamente à dinâmica dos movimentos de pessoas e de carga e, portanto, ao nível de serviço local. Por exemplo, se regiões que possuem muitos comércios (centro urbano) estiverem associados a redes viárias de baixa capacidade ou com falhas na operação que as tornem vulneráveis, haverá uma taxa elevada de congestionamento, independente da distância a ser percorrida. Enquanto em regiões mais espalhadas, bastante assistidas geralmente por vias de contorno com elevada capacidade, há uma sujeição às viagens de maiores distâncias, impactando também na emissão (Brusselaers *et al.*, 2023).

Ao serem analisados esses diferentes fatores, percebe-se que a rota como uma unidade de análise e seus caminhos alternativos se torna pertinente, visto que com a dinamicidade permitida para os movimentos se conseguiria fazer uma combinação de características ao longo do caminho que tivesse como intuito diminuir as injustiças no transporte e minimizar a emissão pelo veículo. Essa escolha está bastante associada à uma distribuição justa do espaço viário que tem como principal objetivo oferecer equilíbrio tanto na acessibilidade como na mobilidade urbana, diminuindo disparidades entre os grupos sociais e supressões de viagens desconhecidas pelos planejadores (Guzman *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a conectividade da rede surge como uma característica e, quantitativamente, como um parâmetro a ser estudada no processo de reordenação do fluxo por rotas alternativas de acordo com a sua vulnerabilidade, com a sua capacidade e com a necessidade do ator. Apesar dessa relação ter sido discutida em diversos estudos, ainda é um parâmetro pouco explorado no contexto da emissão de poluentes e na área do TUC, sugerindo uma possível lacuna de pesquisa a ser pesquisada (Prud'homme *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2023; Yoon *et al.*, 2021; Porta *et al.*, 2009; Hillier *et al.*, 1993; Marshall, 2004). Com base nisso, este

capítulo tem como objetivo, com foco mais metodológico e fazendo referência à questão de pesquisa "Os Perfis Logísticos da região terão comportamentos distintos quanto à emissão de poluentes?", quantificar os níveis de emissão de poluentes dentro de cada perfil à luz da conectividade viária, partindo de uma modelagem utilizando o *software* AimSun Next 22.0 e confrontando com os apontamentos e com as dúvidas trazidas ao longo do trabalho.

Como a revisão conceitual trazida anteriormente foi utilizada na construção do método deste capítulo, a seção que se segue de revisão da literatura será trazida como complemento da revisão bibliográfica de embasamento dessa pesquisa que vem sendo construída com o intuito de relacionar, dois a dois, "perfis logísticos", "conectividade viária" e "emissão de poluentes pelo TUC" (o capítulo 2 relacionou na revisão bibliográfica as duas primeiras e o 3, as duas últimas). Assim, foi construída tendo como principal objetivo trazer resumidamente as visões dos autores sobre como cada variável usada para construir os perfis logísticos no capítulo 2 se relaciona com a emissão de poluentes pelo TUC que são considerações necessárias para levantamento de hipóteses e discussão dos resultados.

4.1.1 Revisão Bibliográfica

Os questionamentos sobre como as características físicas das cidades influenciam na emissão de poluentes têm sido bastante levantados e apoiados com esforços de pesquisa na área. No caso do sistema de transportes e das emissões provenientes, percebe-se que existe uma relação entre ele e a forma como a população se apropria dos espaços urbanos (Essabbá; Bertoncini, 2022).

Nos centros urbanos é comum verificar uma relação entre a densidade comercial e o aumento das emissões por transportes devido à grande concentração de viagens durante o dia, enquanto que zonas com alta densidade residencial são mais marcadas por viagens pendulares devido à distribuição contrária em relação aos postos de trabalho e, portanto, por menores emissões (Essabbá; Bertoncini, 2022). Frank *et al.* (2000) observaram o mesmo padrão e citaram que os óxidos de nitrogênio aparentemente possuem mais sensibilidade aos fatores de uso do solo que o monóxido de carbono e os compostos orgânicos voláteis, sendo percebido isso também para a conectividade da rede que, por sua vez, pode implicar em reduções junto às de velocidade de viagem.

Ribeiro *et al.* (2019), por exemplo, trouxe em seu estudo, além de uma revisão

sistemática sobre o tema, conclusões de que foram encontradas maiores concentrações de poluentes, mais precisamente de dióxido de nitrogênio, em regiões da cidade de Fortaleza que possuíam maior valor de entropia e, por consequência, de fluxo veicular. Ainda, foi verificada uma taxa alta de poluentes em vias de pouca movimentação, mas cujo uso do solo em seu entorno era bastante diverso, mostrando o impacto dessa variável no fenômeno (Ribeiro *et al.*, 2019).

Zhang *et al.* (2018) trouxeram como contribuição, reiterando conclusões citadas anteriormente, que as emissões por transportes são em sua maioria influenciadas por regiões com elevada densidade residencial e comercial por serem os principais motivos de viagem. Contudo, citam que regiões mais compactas caracterizadas por elevada densidade de atividades diferentes e próximas tendem a reduzir congestionamentos, duração e quantidade de viagens motorizadas e a permitir uso de modos ativos, enquanto regiões mais espalhadas com menores densidades e entropia, requisitam o uso de modos motorizados para atingir destinos mais afastados, aumentando distâncias, durações e emissões de viagem.

Já Sider *et al.* (2013) discutiram sobre como as características de uso do solo e de renda tem relação com a desigualdade quanto à poluição atmosférica. No contexto de Montreal, área de estudo, regiões/pessoas que poluem menos são expostas a maiores taxas de poluentes. Verificou-se que áreas marcadas por rendimentos elevados e por veículos mais novos possuem menores níveis de emissão individual, enquanto veículos mais antigos, geralmente encontrados em regiões mais pobres, poluem mais, aumentando a taxa individual nessas regiões (Sider *et al.*, 2013).

Lembrando ainda que, apesar dessas características, a periodicidade e a distância das viagens a que cada grupo está sujeito também impacta nessas emissões. Por exemplo, os componentes do primeiro grupo tendem a andar mais regularmente em veículos motorizados próprios para atingir destinos mais acessíveis por viagens menos duradoras, enquanto os do segundo, a usar pouco para percorrer longas distâncias, existindo uma taxa de emissão talvez bastante próxima (Kahn, 1998).

Além disso, os aspectos econômicos referentes ao IDH e crescimento econômico também foram vistos como relacionados com uma maior taxa de poluição (Li *et al.*, 2022; Chovancová *et al.*, 2021). Li *et al.* (2022) verificaram uma forte correlação entre ambos, mostrando que em países com IDH mais baixo, a taxa de carbono é mais baixa e a sua curva de crescimento é bastante lenta, comportamento refutado em países com IDH mais alto em que a

curva de crescimento é mais rápida e os níveis de carbono emitidos também .

Considerando o exposto, o percentual comercial e a heterogeneidade das atividades está relacionado com aumento da emissão. Assim, o número de estabelecimentos e a quantidade de empregados também tem um impacto a ser discutido (Pani *et al.*, 2021), visto que regiões com maior quantidade de estabelecimentos e alta quantidade de funcionários recebem mais viagens, sendo a primeira mais associada à atração do transporte de carga e a segunda, à atração de transporte de pessoas. Se a quantidade de empregados se relacionar com o porte ou com a quantidade de estabelecimentos, pode-se presumir que o fluxo do transporte de carga também é maior nessas regiões.

Os congestionamentos de tráfego, por sua vez, tendem a afetar a operação do TUC e a emissão de poluentes à medida em que aumentam a duração das viagens e o tempo do veículo efetivamente em trânsito, a necessidade de mudanças de roteiros, o consumo de combustível e a interferência no ciclo de condução (Kellner, 2016; Zhang, 2013; Bharadwaj *et al.*, 2017). Em seu estudo, Wang *et al.* (2023) analisaram o efeito do congestionamento na emissão de poluentes em cidades chinesas e concluíram que as emissões de MP2,5, CO e NO₂ aumentam devido a esse fator principalmente nas regiões urbanas mais desenvolvidas que possuem maior densidade populacional e número de veículos.

Ainda, verificando a tipologia de via, Zhang *et al.* (2018) encontraram que aquelas consideradas locais e arteriais estiveram relacionadas com maiores níveis de emissão que vias principais, expressas e rodovias. Os autores relacionaram esse resultado com a menor capacidade dessas vias, com a permissão de maiores velocidades e com o maior nível de congestionamento e discutiram que o centro geométrico da cidade de estudo que foi caracterizado com grande densidade de vias, de conectividade e de atividades teve maior influência nas emissões que as outras regiões da cidade, ocorrendo em sua maioria a nível de rede viária. Quanto mais distante do centro, menor a emissão.

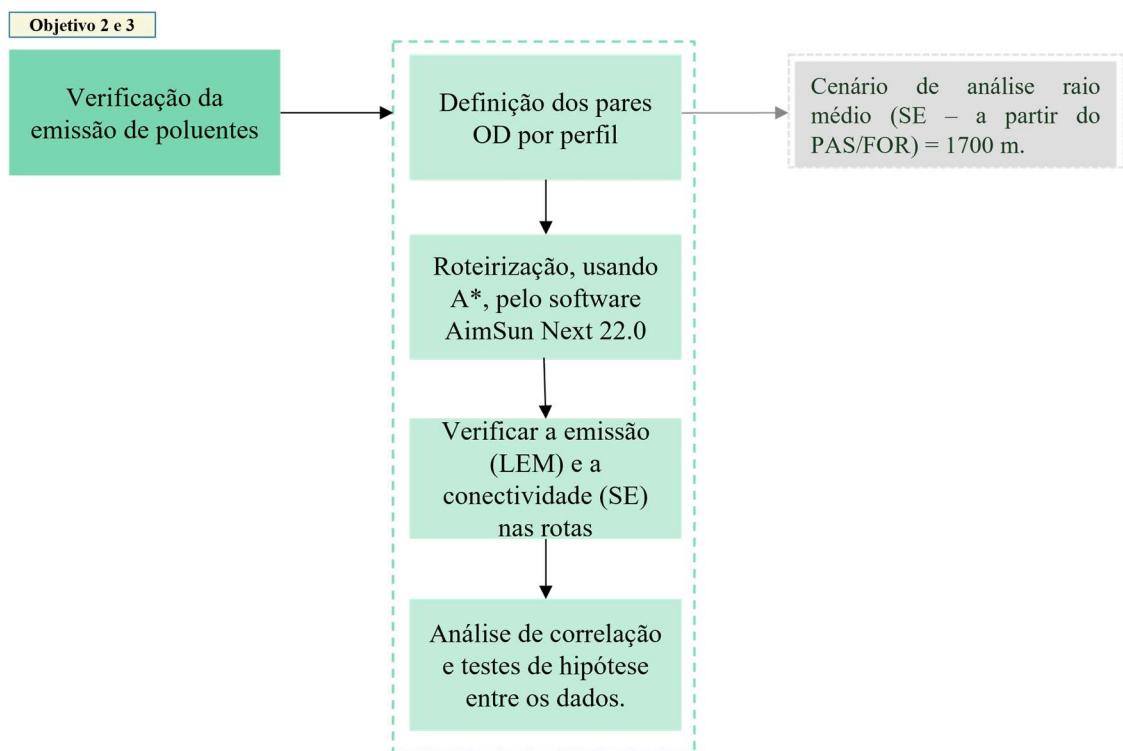
Associado a isso, no caso do Transporte Urbano de Carga, a existência de vagas de carga e descarga e de zonas de restrição podem ser incluídas na operação. Ao passo que a primeira tende a otimizar a distribuição logística e, ambas, a diminuir o impacto dos veículos de carga na redução da capacidade da via e nos congestionamentos, bem como o consumo de combustível e a emissão, a segunda está bastante associada a custos econômicos referentes à operação. Regiões que possuem restrições ao TUC podem favorecer a qualidade do ambiente local e diminuir a taxa de emissão individual, porém podem impactar no aumento da poluição

em outros locais por onde as rotas serão recalculadas. É importante ressaltar, pois, que os seus planejamentos podem interferir de forma a reduzir espaços públicos e a reordenar o fluxo de transportes e de carga por outros modos, sendo de grande importância que haja um estudo adequado quanto à quantidade e à localização mais oportuna, bem como quanto à regulação da sua operação e à justiça socioambiental e econômica envolvida no processo (Comi *et al.*, 2018; Dias, 2018; Cruz, 2016).

4.2 Método

O método descrito para o capítulo atual é apresentado no fluxograma da figura 15. Pode-se ver que neste, diferentemente dos capítulos anteriores, o método depende dos resultados daqueles descritos nos capítulos 2 e 3. Essa seção, representa, portanto, o método de fechamento para responder ao objetivo geral desse estudo.

Figura 15 - Metodologia para verificação da relação entre emissão de poluentes e conectividade



Fonte: Autora (2024)

4.2.1 Definição dos cenários de análise

Primeiramente, como se pretende verificar a relação entre a emissão de poluentes e a conectividade viária, o método proposto traz como principal unidade de análise dentro da área de estudo a rota entre um par OD de movimento de carga. Como a análise da emissão de poluentes está relacionada com muitas variáveis diferentes, a modelagem dessas rotas dentro dos perfis gerados no capítulo 2 permite que se consiga analisar essas situações para grupos homogêneos quanto à operação da carga e, possivelmente, à emissão, se for considerado que ela é maior quanto maior for aquela atrelada à baixa acessibilidade logística e à elevada atividade comercial.

A partir disso e do estudo feito para a conectividade, ressaltando aquilo trazido anteriormente de que os movimentos locais acontecem no raio médio de 1700 m, foram elencados pares OD dentro de cada perfil logístico obedecendo a definição dessa distância que foi feita usando os dados dos pares OD carga do estudo PASFOR 2020 que contém as coordenadas dos pontos de expedição e de recebimento. Foi feita uma filtragem dos pontos que estariam dentro da área de estudo considerando CNAE de alimentos e, no QGIS, fez-se um cálculo com a matriz de distância entre esses pontos. Como resultado, foi possível obter os quartis (aproximadamente, 1º: 1617,8 m, 2º: 2409,5 m, 3º: 3547,4 m) e a média dos valores (2638,15 m), decidindo-se que o cenário seria composto por par OD que estivesse distando entre si de até 1700 m, menor distância encontrada na análise atual que converge para os resultados obtidos no cálculo do raio topológico apresentado anteriormente (item 2.3.2.2.5).

4.2.2 Definição dos pares OD

Durante a análise dos dados fornecidos pelo PASFOR 2020, foi verificado que as localizações e as distâncias entre os pontos de origem e destino, por serem bastante próximos ou em regiões com predomínio de vias arteriais, dificultaram a modelagem de rotas alternativas diversas entre si e a quantidade existente na região resultaria em quantidade de rota não representativa. Assim, como forma de contornar isso para se conseguir fazer a análise completa, decidiu-se criar pares OD via QGIS, tendo como premissas distâncias que permitissem rotas contidas estritamente dentro dos respectivos perfis em um raio de 1700 m, bem como por pares em que origem e destino estavam no mesmo perfil mas cujas rotas atravessavam todos os 3 perfis.

Dessa forma, Perfil 1 contou com 6 pares, perfil 2 com 3 pares e perfil 3, com 5 pares. Os pares OD finais podem ser vistos na figura 16.

Vale ressaltar que o estudo utilizará o perfil logístico apenas como uma forma de caracterização da região em que as rotas estão inseridas para que se consiga um padrão que represente fielmente a emissão local, não sendo um objetivo a comparação da emissão dentro dos perfis.

4.2.3 *Roteirização*

A etapa de roteirização realizada no estudo contou com a utilização do software AimSun, ferramenta de simulação e análise de tráfego que integra, também, modelo de verificação de emissão de poluentes, podendo estimar valores de CO_2 , NOx e material particulado de acordo com a classe do veículo (Euro).

Mediante centroides escolhidos e localizados na malha viária, foi feita a análise da matriz OD entre os pares de acordo com a amostra trazida pelo relatório do PASFOR 2020. Como as viagens entre eles se dão entre zonas de tráfego, considerando o contexto do TUC, a quantidade de viagens é pequena (no máximo, 5 viagens de caminhão para 11 de carros, por exemplo, existindo situação de apenas 1 viagem de carro) e isso, durante testes prévios, dificultou a simulação das rotas pelo *software* que, apesar de ter recebido o comando para gerar pelo menos 3 rotas diferentes, devido ao fluxo muito baixo retornou em alguns casos apenas 1. Vale ressaltar que, a quantidade de rotas seguiu a proposição feita no estudo de Rakha *et al.* (1998) e Bertoncini (2010) em que os usuários geralmente escolhem até 5 caminhos diferentes para se chegar ao destino, tendo sido isso inserido no AimSun.

Além disso, levando em consideração que o objetivo do estudo é avaliar uma relação entre emissão e conectividade, que as rotas não mudaram com alterações bruscas da matriz OD (diferença de 20 para 100 viagens) e que o programa, pelos testes feitos, retornaria uma maior quantidade de rotas alternativas com uma quantidade mínima de 25 viagens, fez-se a extração da matriz OD amostral de forma proporcional (quantidade de caminhões em relação à quantidade de carros).

Isso posto, a roteirização propriamente dita seguiu o modelo binomial de escolha estocástica de rota e o algoritmo A* (lê-se A-estrela) de busca de caminho. O A* se trata de uma combinação de algoritmos de busca em largura e do algoritmo de Dijkstra e busca

encontrar os caminhos de menor custo, não necessariamente o mais curto como faz o Dijkstra, considerando que o custo restante no próximo nó não seja nunca maior que o custo restante no nó anterior, sendo possível encontrar sempre um resultado ótimo. Essa avaliação dos nós depende da combinação do custo para alcançar o nó n ($g(n)$), partindo da origem, com a função $h(n)$ que descreve o menor custo para ir da origem ao destino (Zanchin, 2018), como pode ser visto na equação 4.1:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (\text{Equação 4.1})$$

Para o caso, foram feitas duas matrizes OD, sendo uma para a consideração das viagens de carro a gasolina, tendo sido considerado pelo modelo os padrões de emissão Euro 0, Euro 1, Euro 2, Euro 3, Euro 4, Euro 5, Euro 6, e uma para caminhão (HGV) a diesel, levando em conta os padrões Euro 0, Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV EGR, Euro V EGR, Euro V SCR, Euro VI, de acordo com o manual.

4.2.4 Cálculo da emissão e da conectividade nas rotas

No caso da verificação da emissão das rotas, o próprio programa AimSun fornece esse dado por seção de via percorrida seguindo o modelo de emissão de Londres (London Emission Model - LEM) que leva em consideração a variabilidade na atividade do veículo e fornece uma taxa de emissão mais precisa para links curtos ou para curtas durações. A abordagem adotada pelo modelo deriva as emissões de um veículo individual utilizando a sua velocidade média considerando um conjunto de microviagens componentes da sua viagem (AIMSUN, 2022).

De acordo com o manual do software AimSun, uma microviagem pode ser definida como um segmento de uma viagem onde a velocidade aumenta a partir de uma estacionária para $> 5\text{km/h}$ e depois retorna. A emissão de CO_2 pode ser calculada pela relação polinomial derivada de uma análise de regressão, como apresentada nas equações 4.2 e 4.3.

$$y = ax^2 + b: x < 10 \text{ km/h} \quad (\text{Equação 4.2})$$

$$y = ax^3 + bx^2 + x + c: x \geq 10 \text{ km/h} \quad (\text{Equação 4.3})$$

Onde: y é a emissão em g/km; x é a velocidade média na microviagem; a, b, c são constantes derivadas definidas para cada veículo e classificação Euro.

Uma microviagem é definida como um segmento de uma viagem onde a velocidade aumenta de estacionária para > 5 km/h e volta para estacionária. Além disso, no Aimsun a velocidade média individual do veículo dentro da seção é usada para determinar a sua emissão localmente e o valor total da rede é calculado por meio da soma das emissões dos veículos nos trechos. As equações 4.4, 4.5 e 4.6 mostram essas relações.

$$EM = \sum_{i=0}^n EM_{ij} \quad (\text{Equação 4.4})$$

Onde: EM_j é a emissão total na seção j em g/km; EM_{ij} é a emissão total do veículo i na seção j .

$$EM_{lj} = (\sum_{i=0}^n (EM_{ij}) * (D_{ij})) * \Delta T \quad (\text{Equação 4.5})$$

Onde: EM_{lj} é a emissão total por link j em g/h; EM_{ij} é a emissão do veículo i no link j em g/km; D_{ij} é a distância percorrida no link j em km; ΔT a duração da viagem em h.

$$EM_r = \sum_{i=0}^n (EM_j) * (L_j) \quad (\text{Equação 4.6})$$

Onde: EM_r é a emissão total por replicação em g; EM_j é a emissão total na seção j em g/km; L_j é o comprimento total da seção j em km.

O valor final por rota foi dado pela soma das emissões de CO_2 (em gramas) das seções/links presentes nelas que foram levadas ao QGis para interceptar com a camada de análise topológica gerada pela Sintaxe Espacial (descrição no item 2.3.2.2.5). O valor de cada índice de conectividade por rota (*choice* e *integration*) se deu por uma média dos valores mediante ponderação pelo comprimento dos segmentos componentes das rotas.

O último passo contou com a análise estatística da amostra, mediante descrição, análise de correlação e teste de hipótese para verificar se as variáveis "emissão de CO_2 " e "conectividade", representada pelos indicadores "*choice*" e "*integration*", possuem relação de dependência ou associação. Para isso, foram utilizadas as funções "cor()" e "cor.test()" no R para o teste de Spearman pelo fato de a relação entre os dados contínuos ser aparentemente não linear de acordo com os gráficos de dispersão apresentados na figura 17.

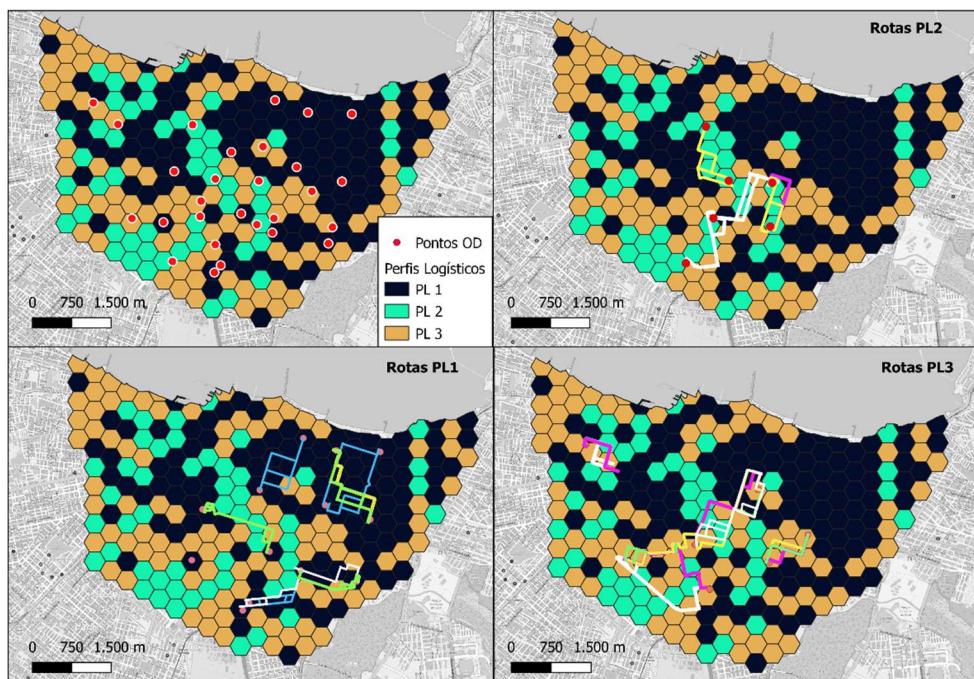
Quanto ao teste de hipóteses feito, foi estabelecida como hipótese nula (H_0) "A

correlação entre as variáveis é zero", e como alternativa (H_1), "A correlação entre as variáveis é diferente de zero". Rejeita-se a hipótese nula caso seja obtido um valor p significante, ou seja, menor que o nível de significância (alfa) de 0,05.

4.3 Resultados obtidos e discussão

Como fruto do método, foram geradas 51 rotas considerando 3 replicações diferentes simuladas durante 1 hora, mudando os valores das sementes em cada uma. Para cada par OD, foi possível um máximo de 3 rotas diferentes (alguns tiveram apenas 2 rotas) resultando, para os perfis 1,2 e 3, respectivamente, em 22, 10 e 19 rotas, como pode ser visto na figura 16. Os dados por rota, contando com origem, destino, emissão, valores de conectividade e distância podem ser vistos no quadro 6 apresentado no final do presente tópico.

Figura 16 - Pares OD e rotas geradas por Perfil Logístico (cores meramente ilustrativas para melhorar a diferença visual entre as rotas).

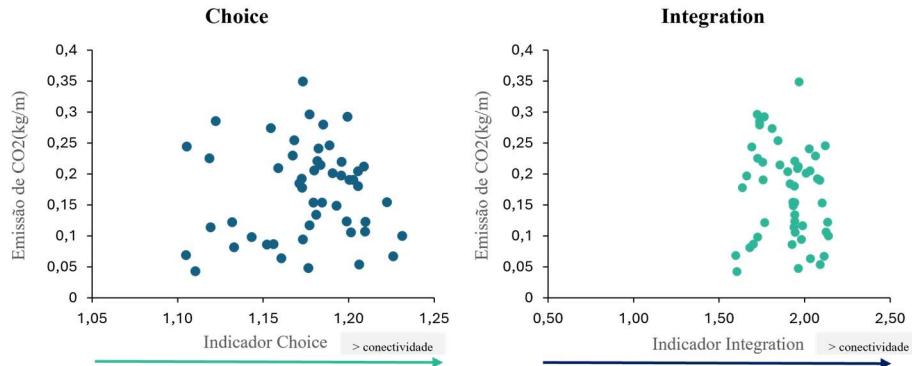


Fonte: Autora (2024)

Tendo uma quantidade representativa de dados (51 observações) na amostra gerada, os gráficos apresentados na figura 17 mostram o comportamento da emissão de CO_2 nas rotas em relação aos indicadores de conectividade, lembrando que o *choice* representa a probabilidade de

a rota/ o link ser atravessado por outras rotas até o destino, e o *integration*, quando próxima a rota está de todos os outros pontos da rede.

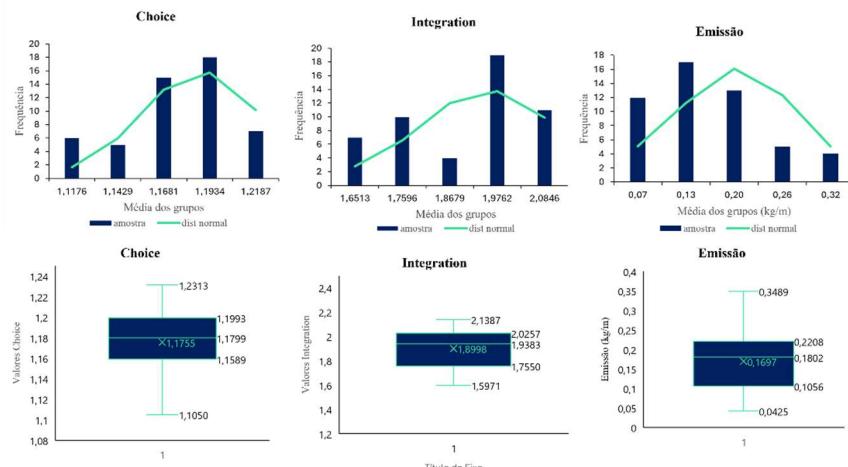
Figura 17 - Gráficos de dispersão: i. *choice* x emissão; ii. *integration* x emissão.



Fonte: Autora (2024)

A partir da análise do histograma e do teste de Shapiro-Wilk no software R (função `shapiro.test()`), foi possível verificar a normalidade dos dados. Contudo, observou-se que os indicadores de conectividade não seguem uma distribuição normal (Valores-p < 0,05), como apresentado na figura 18, comportamento diverso dos dados de emissão que teve sua hipótese de normalidade aceita (valor-p=0,26). A unidade de emissão originalmente é dada em gramas, mas para melhorar a visualização em relação à ordem de grandeza dos valores de conectividade, optou-se por deixá-la em kg/m.

Figura 18 - Histograma e box-plot para avaliação dos dados



Fonte: Autora (2024)

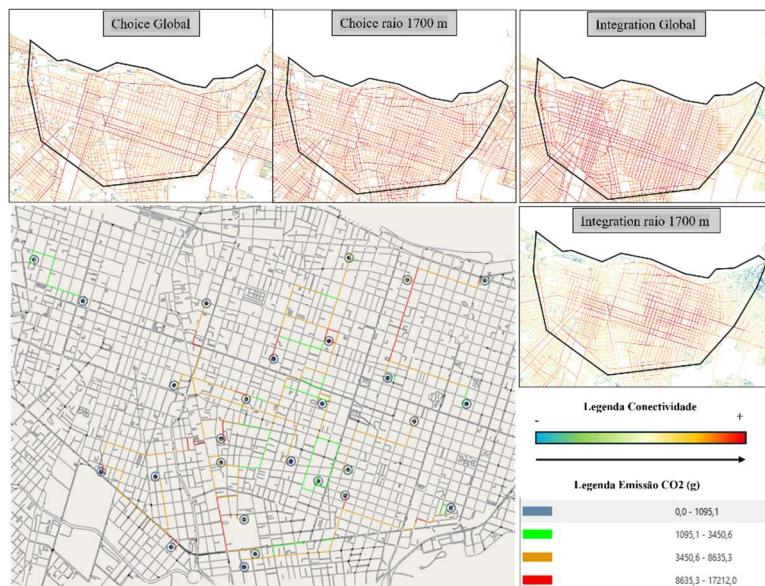
Tabela 1 - Estatística descritiva dos dados

	<i>Emissão de CO₂</i>	<i>Choice</i>	<i>Integration</i>
Classificação	Paramétrico	Não Paramétrico	Não Paramétrico
Média	0,169	1,175	1,89
Mediana	0,180	1,179	1,938
Desvio Padrão	0,075	0,031	0,155

Fonte: Autora (2024)

Dessa forma, no caso da conectividade, por ser dado não paramétrico como trazido na tabela 1, é melhor representada, como pode ser visto no box-plot, pela mediana e pelos intervalos entre os quartis, enquanto que a emissão é melhor representada pela média dos dados. Além disso, percebe-se que não apresentaram *outliers* vistos no box-plot nem dispersões elevadas, com maior desvio padrão ocorrendo para o "integration"(s = 0,16) que foi bastante motivado pelo fato de o indicador na região apresentar uma variação mais alta entre os links da rede, padrão não encontrado nas simulações do *choice* que apresentou classificações mais próximas, mostrando a homogeneidade da malha viária escolhida para o estudo que contando com características físicas e arranjos de quarteirões, avenidas e ruas coletoras e locais semelhantes, como podem ser vistos na figura 19 os mapas de conectividade global e para o raio de 1700 m e o mapa de emissão gerado no AimSun.

Figura 19 - Mapas de conectividade (Sintaxe Espacial) e de emissão (AimSun) para a região de estudo.



Fonte: Autora (2024)

Dando continuidade à análise estatística dos dados, fez-se um teste de correlação entre cada indicador de conectividade e de emissão por meio do teste de Spearman. Tanto a correlação entre emissão e *choice* ($rh_0=0,0057$), como entre emissão e *integration* ($rh_0=-0,136$) foi muito pequena, sendo a primeira quase nula e a segunda classificada como uma correlação fraca com sinal negativo, indicando uma relação inversamente proporcional entre os dois indicadores. Foi feito ainda um teste de hipótese, mas para as duas situações os valores-p obtidos foram maiores que 0,05 (respectivamente, 0,9685 e 0,34) e não houve rejeição da hipótese nula de que “A Correlação entre as variáveis é nula”. Com isso, conclui-se que aparentemente não existe uma relação de dependência entre emissão e conectividade.

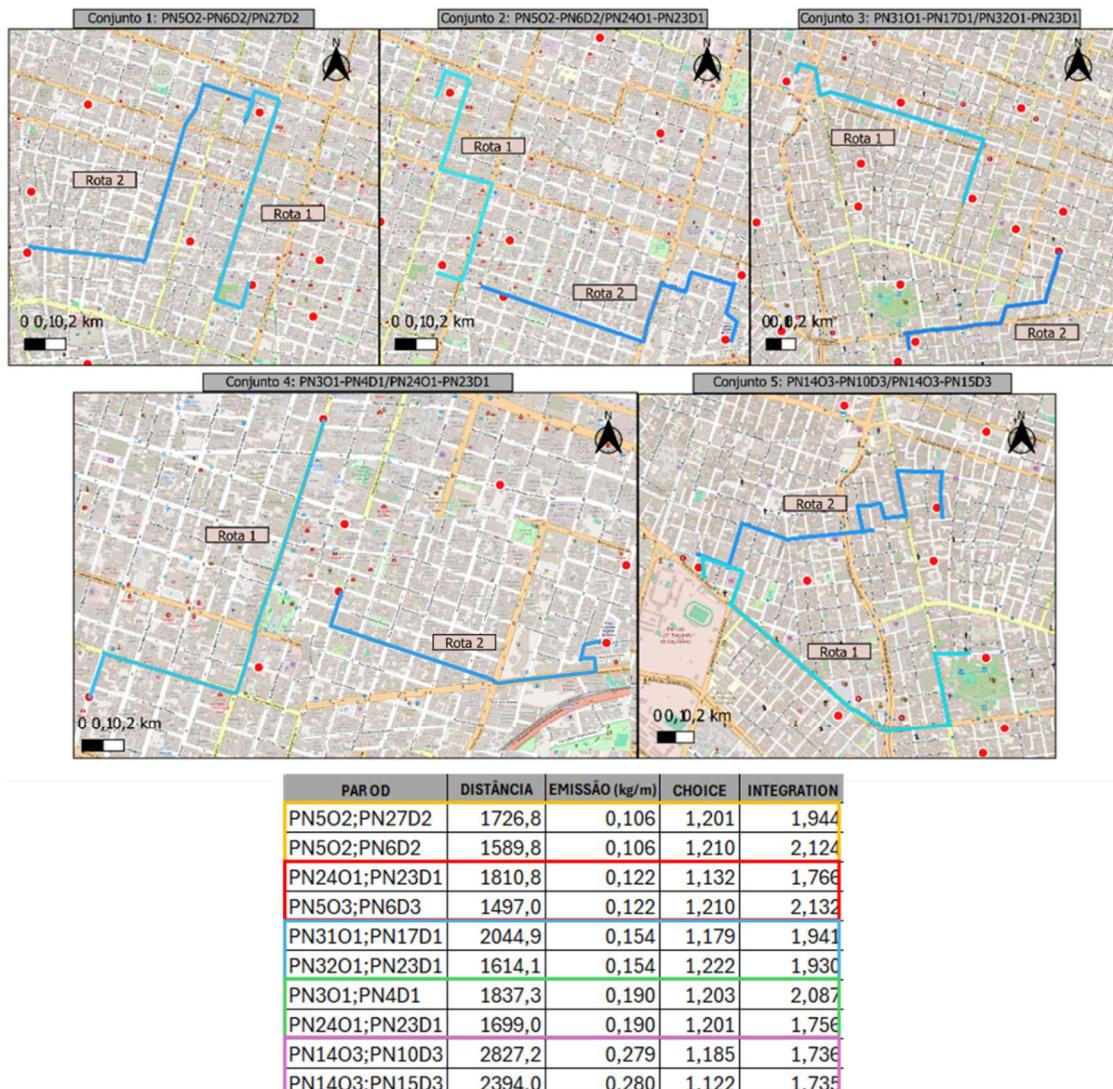
Quanto às considerações trazidas ao longo da revisão bibliográfica desse estudo, foram percebidas algumas aderências ao se fazer uma análise das rotas geradas por par OD e de acordo com a emissão. Por exemplo, as rotas que tiveram valores de emissão iguais foram estudadas separadamente e são destacadas na figura 20 sem levar em conta os perfis aos quais pertencem. Para o conjunto 1, foi observado não apenas igualdade das emissões como também da conectividade, variando quanto à distância percorrida e ao tipo de via, sendo a rota 1 menor que a rota 2 e localizada em trecho mais heterogêneo, com presença de avenidas e ruas locais.

No conjunto 2 foi observado que a rota 1, apesar da menor distância, possui maiores valores de conectividade e presença de avenidas, sendo bastante acessada como passagem de outras rotas, característica também observada no conjunto 3, em que a rota 2 tem menor comprimento e maior valor de *choice*. Já o conjunto 4 apresenta uma rota 2 menor e bastante local, mas formada por heterogeneidade maior quanto à conectividade, interseção com avenidas e maior quantidade de conversão, padrão também encontrado no conjunto 5, sendo as rotas deste localizadas em trechos mais homogêneos que as daquele, porém por tipologias de via diferentes: rota 1 mais arterial com maior distância que a 2, por sua vez formada por vias mais locais/coletoras.

Essas observações fazem jus ao que foi trazido por Prud'homme et al. (2012) de que a poluição tende a ser maior quando a rede é mais heterogênea, com maior diferença entre as características das vias quanto à capacidade, à velocidade permitida e à utilização em rotas individuais. Além disso, percebe-se uma influência da quantidade de conversões feitas sobre a emissão, visto que rotas menores localizadas em trechos homogêneos de vias locais e com maior quantidade de conversão que, normalmente, desencorajam o uso de velocidades mais altas, tiveram valores de emissão equiparável aos daqueles em trechos mais lineares e mais rápidos.

Como a região é bastante homogênea quanto ao tamanho das quadras e localização de vias, não foi possível verificar, como sugerido por Frank et al. (2000), a influência do tamanho dos quarteirões nessa dinâmica. Ainda, não foi testada uma mudança brusca (nível de saturação) na demanda dos links, porém, por meio das replicações 2 e 3, algumas opções de rotas bastante diferentes das primeiras surgiram, agregando links não utilizados anteriormente.

Figura 20 - Conjunto de rotas que tiveram mesmo valor de emissão



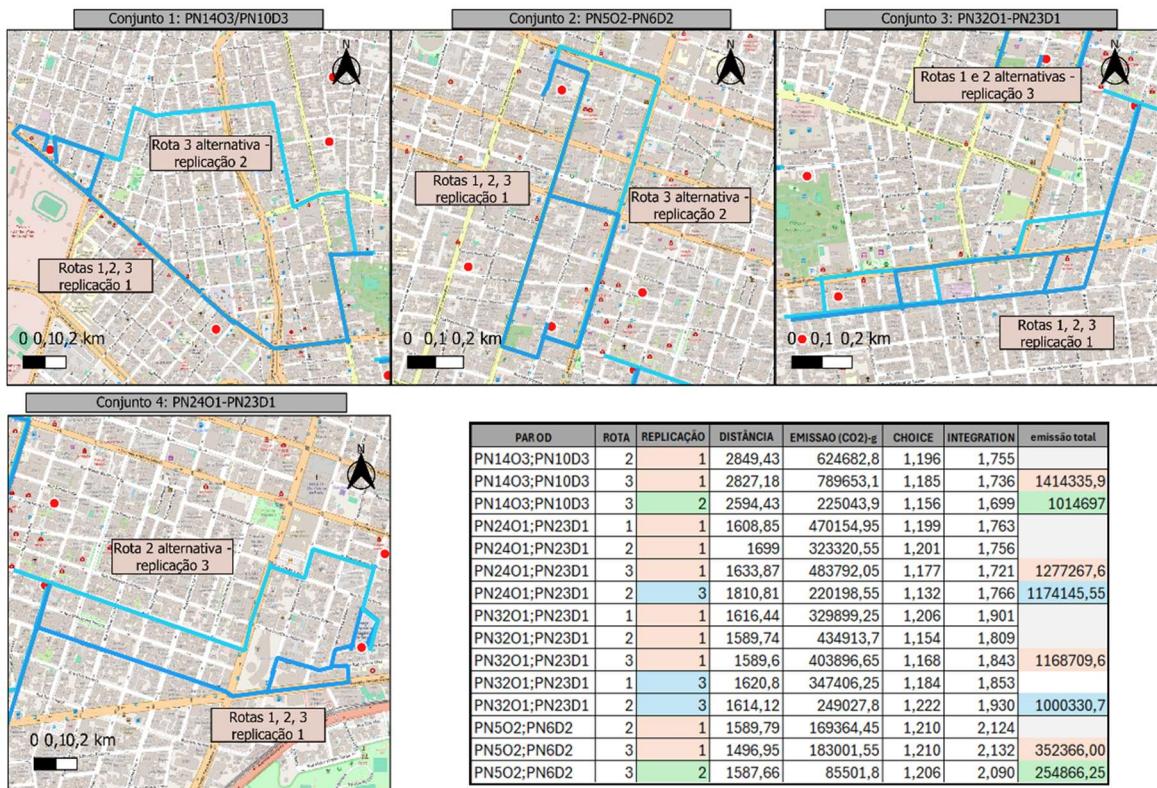
Fonte: Autora (2024)

Ao ser verificada a emissão nessas condições, foi percebido que a adição de links diferentes no percurso entre o par OD PN14O3-PN10D3, com rota alternativa formada por ruas locais; entre as origens e os destinos do pares PN24O1-PN23D1 e PN32O1-PN23D1, com alternativas passando por pequenos trechos de avenida e com menor quantidade de conversões;

e entre o par PN5O2-PN6D2, cuja rota alternativa passa por avenidas que possuem maior capacidade de escoamento, permitiu um menor valor de emissão total. A figura 21 apresenta visualmente esses rotas citadas.

Em dois pares OD (PN19O3-PN20D3 e PN2O1-PN1D1) essa adição representou um aumento no valor total da emissão, mas para o primeiro par a rota alternativa possuia maior conectividade e para o segundo par, menor conectividade e muitas conversões. Isso traz uma reflexão tanto sobre a exposição aos poluentes que, como apresentado por (Brusselaers *et al.*, 2023; Prud'homme *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2018), que os focos de poluição são reduzidos quando o número de links conectados em uma rota mais curta for maior, diminuindo problemas de saúde, bem como sobre o paradoxo de emissão trazido por Ma *et al.* (2023) em que a adição de links pode melhorar a conectividade e propor alternativas ao movimento, mas que a eficiência quanto à emissão na rota se relaciona também às características inerentes à ela, como capacidade, velocidade permitida, quantidade de conversões e equilíbrio da demanda.

Figura 21 - Comparação das emissões por par OD com a adição de link. A tabela traz a emissão total na replicação 1 (vermelho), e com a substituição pelas rotas das replicações 2 (verde) e 3 (azul) para os casos em que a emissão total diminuiu.



Fonte: Autora (2024)

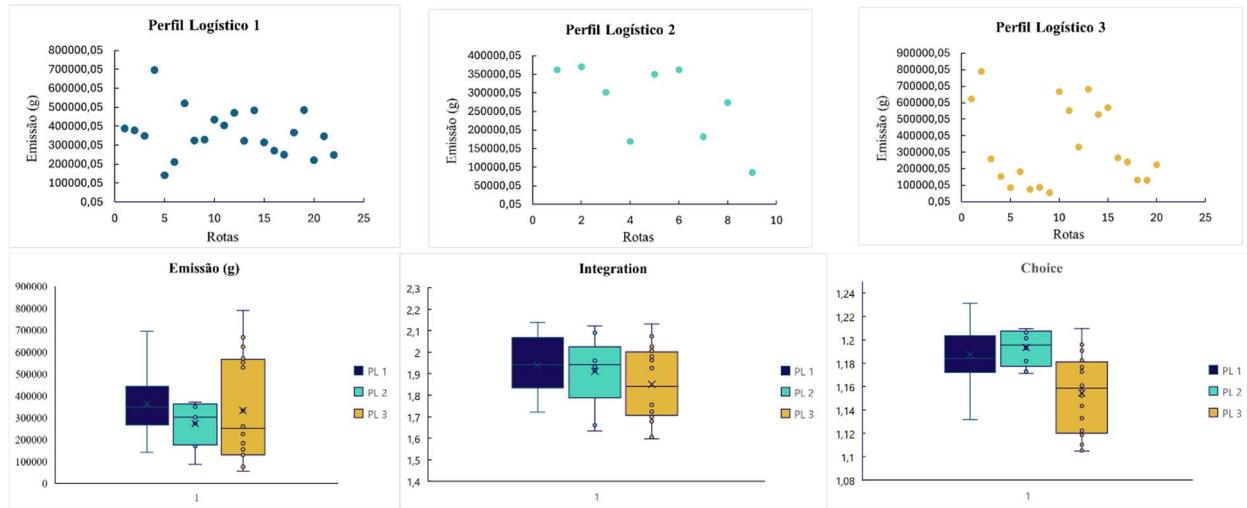
A última análise das rotas geradas foi feita por par OD dentro dos respectivos perfis. A rotas entre os pares pertencentes ao Perfil Logístico 1, chamado de zona crítica, tiveram como ponto chamativo os valores mais altos e menos dispersos do indicador *integration*. Além disso, a comparação entre as rotas alternativas e as rotas neutras em cada situação mostraram bastante a relação inversa entre conectividade e emissão de poluentes associada, também, à capacidade viária, ou seja, vias mais conectadas e de maior capacidade apresentam uma menor emissão de poluentes. Apesar dessa relação, esse perfil foi o que possuiu valores de emissão maiores e bem representados pela média, indicando que regiões visadas predominantemente como destino estão associadas à taxas de emissão mais homogênea e altas, como esperado visto as variáveis componentes.

No caso do Perfil Logístico 2, chamado de zona mista, os valores do indicador *choice* para as 10 rotas foram mais próximos entre si e menos dispersos em relação ao valor mais alto (1,22). Para ele, os valores de emissão foram menores, reiterando, devido à sua característica de passagem, a influência da tipologia das vias e da homogeneidade das rotas que foram constituídas prioritariamente por um tipo de via (ou arterial ou local). Por apresentar valores de conectividade próximos, o isolamento do seu provável efeito na emissão foi dificultado, mas há um indício de que, em comparação aos outros perfis, possui taxas mais baixas desta devido às vias de passagem de conectividade mais alta que reordenam o fluxo pelas rotas alternativas.

Já o Perfil Logístico 3, denominado de zona residencial com comércio local, apresentou uma maior amplitude e uma maior dispersão para os dados de emissão, podendo ser explicado pela ambiguidade dos movimentos nessa região que podem ser tanto de viagens mais curtas e locais, como origem de viagens mais longas em regiões de acessibilidade logística, enquanto definição usada nos perfis, média associada à vias mais locais. A análise das rotas nessa região retornou, em um dos casos em que atravessam mais de um perfil, a relação inversa entre o indicador *choice* e emissão de poluentes (PN14O3-PN10D3). As outras situações retornaram uma relação direta entre a emissão e o indicador *integration*: quanto mais alto, maior a emissão.

Quanto às características tipológicas das rotas, foi percebido que no PL 1 existem rotas mais heterogêneas, mesclando ruas coletoras, locais e avenidas, enquanto os outros 2, mais homogêneas. Além disso, o sentido de movimento nas vias apareceu como uma característica determinante na formação das rotas alternativas realmente diferentes quanto à utilização de outros links e, portanto, de parâmetros de conectividade, distância e emissão diferentes. A figura 22 apresenta os gráficos de emissão e de conectividade para os perfis.

Figura 22 - Gráficos de emissão total por perfil e boxplot comparativo para emissão, *choice* e *integration*.



Fonte: Autora (2024)

Quadro 6 - Resumo das rotas geradas por Perfil Logístico

PAR OD	PL	ROTA	REPLICAÇÃO	DISTÂNCIA	EMISSAO (CO2)-g	EMISSÃO (kg/m)	CHOICE	INTEGRATION
PN11O3;PN12D3	3	1	1	1350,53	259846,85	0,192	1,173	2,074
PN11O3;PN12D3	3	2	1	1354,24	154344,05	0,114	1,119	1,936
PN11O3;PN12D3	3	3	1	1353,59	86141,65	0,064	1,161	2,033
PN14O3;PN10D3	3	3	1	2827,18	789653,1	0,279	1,185	1,736
PN14O3;PN15D3	3	1	1	2394,01	682781,6	0,285	1,122	1,735
PN14O3;PN10D3	3	2	1	2849,43	624682,8	0,219	1,196	1,755
PN14O3;PN15D3	3	3	1	2342,46	571235,85	0,244	1,105	1,691
PN14O3;PN15D3	3	2	1	2350,08	529106,85	0,225	1,119	1,724
PN14O3;PN10D3	3	3	2	2594,43	225043,9	0,087	1,156	1,699
PN19O3;PN20D3	3	3	2	1317	129142,65	0,098	1,143	1,725
PN19O3;PN20D3	3	2	1	1092,56	88641,15	0,081	1,133	1,679
PN19O3;PN20D3	3	1	1	1091,9	75004,05	0,069	1,105	1,597
PN19O3;PN20D3	3	3	1	1315,37	55905,6	0,043	1,110	1,604
PN24O1;PN23D1	1	3	1	1633,87	483792,05	0,296	1,177	1,721
PN24O1;PN23D1	1	1	1	1608,85	470154,95	0,292	1,199	1,763
PN24O1;PN23D1	1	2	1	1699	323320,55	0,190	1,201	1,756
PN24O1;PN23D1	1	2	3	1810,81	220198,55	0,122	1,132	1,766
PN25O1;PN26D1	1	1	1	1993,94	695721,25	0,349	1,173	1,968
PN25O1;PN26D1	1	3	1	2116,55	211332,85	0,100	1,231	2,139
PN25O1;PN26D1	1	2	1	2115,41	141542,7	0,067	1,226	2,113
PN28O2;PN27D2	2	3	1	1837,79	362205,5	0,197	1,196	1,660
PN28O2;PN27D2	2	2	1	1969,87	350119,6	0,178	1,173	1,635

PAR OD	PL	ROTA	REPLICA ÇÃO	DISTÂNCIA	EMISSAO (CO2)-g	EMISSÃO (kg/m)	CHOICE	INTEGRATION
PN2O1;PN1D1	1	1	1	2118,95	521065,3	0,246	1,189	2,119
PN2O1;PN1D1	1	1	2	2110,92	484148,55	0,229	1,167	2,062
PN2O1;PN1D1	1	2	1	2113,13	323871,7	0,153	1,184	2,102
PN31O1;PN17D1	1	3	2	2029,94	365847,3	0,180	1,205	1,938
PN31O1;PN17D1	1	1	1	2044,88	314233,4	0,154	1,179	1,941
PN31O1;PN17D1	1	2	1	2022,09	271340,3	0,134	1,181	1,941
PN31O1;PN17D1	1	3	1	2029,94	250085,6	0,123	1,199	1,941
PN32O1;PN23D1	1	2	1	1589,74	434913,7	0,274	1,154	1,809
PN32O1;PN23D1	1	3	1	1589,6	403896,65	0,254	1,168	1,843
PN32O1;PN23D1	1	1	3	1620,8	347406,25	0,214	1,184	1,853
PN32O1;PN23D1	1	1	1	1616,44	329899,25	0,204	1,206	1,901
PN32O1;PN23D1	1	2	3	1614,12	249027,8	0,154	1,222	1,930
PN33O3;PN15D3	3	1	1	2771,84	666981,85	0,241	1,182	2,026
PN33O3;PN15D3	3	2	1	2748,45	552995,35	0,201	1,191	2,007
PN33O3;PN15D3	3	3	1	2849,23	332083,5	0,117	1,177	1,987
PN33O3;PN15D3	3		2	2840,51	267221,95	0,094	1,173	1,980
PN33O3;PN15D3	3	2	2	2804,92	240759,9	0,086	1,152	1,926
PN33O3;PN15D3	3	3	2	2748,45	130991,45	0,048	1,176	1,963
PN3O1;PN4D1	1	1	1	1850,72	387042,7	0,209	1,159	1,958
PN3O1;PN4D1	1	2	1	1845,31	378672,95	0,205	1,180	2,030
PN3O1;PN4D1	1	3	1	1837,26	349528,15	0,190	1,203	2,087
PN5O2;PN27D2	2	3	1	1840,97	273699,75	0,149	1,193	1,933
PN5O2;PN6D2	2	3	1	1496,95	183001,55	0,122	1,210	2,132
PN5O2;PN27D2	2	2	1	1726,77	182389,55	0,106	1,201	1,944
PN5O2;PN6D2	2	2	1	1589,79	169364,45	0,107	1,210	2,124
PN5O2;PN6D2	2	3	2	1587,66	85501,8	0,054	1,206	2,090
PN7O2;PN8D2	2	2	1	1746,45	370116,75	0,212	1,209	1,961
PN7O2;PN8D2	2	1	1	1640,34	362219,6	0,221	1,182	1,942
PN7O2;PN8D2	2	3	1	1632,4	301197,65	0,185	1,171	1,915

Fonte: Autora (2024)

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações Finais

O estudo descrito teve como objetivo principal analisar a influência da conectividade viária sobre as emissões de poluentes atmosféricos no contexto do transporte urbano de carga (TUC) que, devido a sua inserção no ambiente urbano que é marcado por diversidade de características físicas e operacionais, foi analisado mediante definição de Perfis Logísticos. Além disso, visto toda a contextualização da problemática, como foram abordados três assuntos cuja relação foi de difícil prospecção, decidiu-se dividir a dissertação em artigos que respondessem cada questão de pesquisa e objetivo específico elencado, relacionando os assuntos (emissão, perfil logístico e conectividade) de dois em dois.

Desse modo, primeiramente, o capítulo 2 trouxe a relação entre a conectividade viária e a construção dos Perfis Logísticos com sua revisão própria e seu método que culminou na formação de 3 perfis logísticos diversos entre si quanto às características dos estabelecimentos, do uso do solo e da acessibilidade logística. Ainda, pode ser dito que houve uma inovação do método quanto à clusterização das variáveis que seguiu com a aplicação da curva ABC para ordená-las de acordo com a sua importância na operação do transporte urbano de carga.

Nele, foi possível responder à primeira questão de pesquisa "**Qual o impacto da incorporação da conectividade viária na construção dos Perfis Logísticos?**", mostrando que a conectividade viária, a nível global, tornou o agrupamento mais representativo quanto às características físicas da malha viária e confirmou aquilo esperado pelas avaliação das outras variáveis componentes. Apesar de a região de estudo ser bastante homogênea entre si, o Perfil 1, nomeado de zona crítica e visto como zona de destino de viagens, foi aquele em que o indicador *integration* atingiu valor mais alto retornando esse potencial de receber viagens. O Perfil 2, nomeado como zona mista, teve o indicador *choice* melhor avaliado, convergindo para a característica verificada por meio das outras variáveis como um perfil de passagem de rotas. Por sua vez, o perfil 3, classificado como zona residencial com comércio local, teve um equilíbrio entre os indicadores, revelando valores altos quanto à conectividade para o raio de 1700 m que revela o movimento mais local de circulação, bem como valores globais do *integration* mais altos que o *choice* que indicam um movimento para as residências.

O capítulo 3, por sua vez, respondendo ao segundo objetivo específico, foi elaborado como uma revisão bibliográfica e teve como intuito entender como a conectividade da rede viária

pode impactar na emissão de poluentes. Foram encontrados tanto estudos sobre isso, como em relação à exposição aos poluentes. A partir disso, foram levantadas hipóteses de embasamento das discussões do capítulo 4, bem como respostas para a segunda questão de pesquisa: "**Como a conectividade pode influenciar na emissão de poluentes pelo TUC?**". De acordo com os autores revisados, o isolamento dessa relação é difícil por causa da quantidade de variáveis envolvidas, podendo-se dizer que é uma relação ambígua, pois ao passo que uma rede mais conectada permite rotas alternativas por vias mais homogêneas quanto às características físicas e operacionais que diminuem emissão e focos de poluição, aquelas vias que possuem maior conectividade em si, por serem pontos de passagem prioritários, estão associadas à maior emissão de poluentes. Dessa forma, pode-se dizer que a avaliação dessa relação faça mais sentido em uma análise macro da rede e associada às outras características operacionais.

Já capítulo 4, relacionando a emissão de poluentes nos perfis logísticos à luz da conectividade viária, trouxe uma revisão bibliográfica de fechamento do estudo, mostrando como cada variável usada nos perfis pode impactar na emissão de poluentes. Com a simulação das rotas no software AimSun Next 22.0 e a comparação com os indicadores de conectividade, foi possível responder à terceira questão de pesquisa: "**Os Perfis Logísticos da região terão comportamentos distintos quanto à emissão de poluentes?**" Pelas características dos perfis, esperava-se que os PLs 1 e 3 tivessem valores de emissão maiores, o primeiro por ser destino de viagens globais e foco de elevada atividade comercial, e o segundo por causa do seu caráter residencial com comércio local, sendo origem de muitas rotas globais e detentor de muito movimento internamente; e o Perfil 2, emissão menor por ser local de passagem.

Esse padrão foi verificado e confirmado pelas emissões nas rotas que possuíram características distintas quando observadas enquanto pertencentes a um PL específico: aquelas do PL1 tiveram maiores valores de *integration* e trouxeram uma relação inversa entre emissão e conectividade; as do PL2 possuíram valores de *choice* mais altos e menos dispersos, mostrando sua característica de passagem e sua relação com menores emissões; no PL3, apenas as rotas de um par OD trouxeram essa relação inversa, tendo a maioria mostrado que a maior conectividade impacta em uma maior emissão de poluentes além de terem apresentado valores mais dispersos tanto pra emissão como para conectividade, mostrando um *integration* alto por serem pontos de destino de viagens curtas e um *choice* também bem avaliado por causa desses movimentos de passagem internos (raio de 1700 m).

Apesar do que foi apontado, o teste de correlação de *Spearman* e o teste de hipótese

feitos resultaram em uma correlação aproximadamente nula entre conectividade e emissão, refutando a hipótese de que “A conectividade influencia os níveis de emissão de poluentes conforme cada Perfil Logístico (PL)” levantada como princípio norteador dessa pesquisa. Porém, foram verificadas aderências aos pontos levantados na revisão bibliográfica, sendo esses os principais:

- A conectividade da rede impacta na quantidade de opções de rotas alternativas que o usuário pode acessar e essas rotas podem sim ser melhores quanto à emissão;
- A conectividade das rotas esteve associada à heterogeneidade de vias componentes;
- Rotas mais homogêneas, formadas por vias com características operacionais e físicas parecidas, tendem a possuir menor emissão de poluentes;
- Rotas formadas por tipos diferentes de vias podem ter a mesma conectividade, mas influenciam de forma diferente a emissão;
- A adição de links aumenta a conectividade, mas não necessariamente a eficiência (paradoxo de Braess);
- Região de passagem de rotas que possuem destinos vizados (como o PL 2 desse estudo) pode ter uma maior eficiência nos deslocamentos, reduzindo a emissão de poluentes, como citado também por Hillier *et al.* (1993);
- Centros de destino de viagens, com maior *integration* aparentemente estão ligados à maior emissão.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

Essa pesquisa contou com limitações metodológicas, sendo possível sugerir melhorias e propostas de continuidade para trabalhos futuros. A curva ABC se mostrou uma ferramenta bastante útil na formação dos perfis, porém estudar uma mudança nas proporções das classes pode ser interessante para a melhor representatividade do espaço; utilizar uma área de estudo mais heterogênea quanto às características da malha viária; avaliar essa relação entre conectividade e emissão em um nível mais global; verificar essa relação entre emissão e conectividade por meio de coletas de campo, como apresentado também por (Frank *et al.*, 2000); verificar modelos de roteirização que possam aceitar indicadores de conectividade como *input* nessa escolha; utilizar dados de levantamento de campo sobre volume de tráfego e presença de semáforos.

REFERÊNCIAS

AERIS. Dynamic low emissions zones -aeris user needs workshop. 2012. Disponível em: https://www.its.dot.gov/research_archives/aeris/pdf/Low%20Emissions%20Zone%20Read%20Ahead%20Packet%20v4.pdf. Acesso em: 14 fev, 2022.

AIMSUN. **Aimsun next users manual 22.0.2 - environmental models.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://docs.aimsun.com/next/22.0.2/UsersManual/EnvironmentalModels.html>. Acesso em: 26 mar. 2024.

ALHO, A. R.; DE ABREU E SILVA, J. Utilizing urban form characteristics in urban logistics analysis: a case study in Lisbon, Portugal. **Journal of Transport Geography**, [s.l], v. 42, p. 57–71, 2015. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2014.1. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/jotrge/v42y2015icp57-71.html>. Acesso em: 05 set. 2023.

ALLEN, J.; BROWNE, M.; CHERRETT, T. Investigating relationships between road freight transport, facility location, logistics management and urban form. **Journal of Transport Geography**, [s.l.] v. 24, p. 45-57, set. 2012. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2012.06.010.

ASIH, A.; SOPHA, B.; MARDIYAH, S. Urban logistics profile – Yogyakarta city, Indonesia. **MATEC Web of Conferences**, [s.l.], v. 154, p. 01053, jan. 2018. DOI: 10.1051/matecconf/201815401053.

BARADARAN, S.; RAMJERDI, F. Performance of accessibility measures in Europe. **Journal of Transportation and Statistics**, [s.l], v. 4, p. 31-48, set. 2002. ISSN 1094-8848. Disponível em: https://www.bts.gov/archive/publications/journal_of_transportation_and_statistics/volume_04_number_23/paper_03/index. Acesso em: 20 out. 2022.

BARCZAK, R.; DUARTE, F. Impactos ambientais da mobilidade urbana: cinco categorias de medidas mitigadoras. **Brazilian Journal of Urban Management**, [s.l], p. 13–32, 2012. ISSN 2175-3369. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/urbe/a/ZXSBgxC6QxMwtB7rhHDtLkC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 14 fev. 2022.

BARMPOUNAKIS, E.; MONTESINOS-FERRER, M.; GONZALES, E. J.; GEROLIMINIS, N. Empirical investigation of the emission-macroscopic fundamental diagram. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l]: Elsevier Ltd, v. 101, dez. 2021. ISSN 13619209.

BARROS, A. P. B. G. **Estudo exploratório da sintaxe espacial como ferramenta de alocação de tráfego.** [Brasília], 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2006.

BERTONCINI, B. V. **Uma proposta de estimação da matriz OD a partir dos fluxos de tráfego observados nas interseções da rede de transportes.** Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <http://repositorio.eesc.usp.br/handle/RIEESC/3034>. Acesso em: 26 mar. 2024.

BERTONCINI, B. V.; QUINTANILHA, W. F. L.; RODRIGUES, L. A.; CASSIANO, D. R.; RIBEIRO, J. P.; CAVALCANTE, R. M. Onboard analysis of vehicle emissions in urban ways with different functional classifications. **Urban Climate**, [s.l.]: Elsevier B.V., v. 39, set. 2021. ISSN 22120955.

BHARADWAJ, S.; BALLARE, S.; ROHIT; CHANDEL, M. K. Impact of congestion on greenhouse gas emissions for road transport in Mumbai metropolitan region. **Transportation Research Procedia**, [s.l.], v. 25, p. 3538–3551, 2017. ISSN 2352-1465. World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai, jul. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146517305896>. Acesso em: 02 abr. 2022.

BLANCHARD, P.; VOLCHENKOV, D. **Mathematical analysis of urban spatial networks**. [s.l.]:s.n.], 2009. ISBN 978-3-540-87828-5. DOI: 10.1007/978-3-540-87829-2.

BOISJOLY, G.; EL-GENEIDY, A. M. How to get there? a critical assessment of accessibility objectives and indicators in metropolitan transportation plans. **Transport Policy**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 55, p. 38–50, abr. 2017. ISSN 1879310X.

BORIBOONSOMSIN, K.; BARTH, M. Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems. **Transportation Research Record**, [s.l.], p. 21–30, 2009. ISSN 03611981.

BRAGA, C. K. V.; TOMASIETTO, D. B.; HERSENHUT, D.; OLIVEIRA, J. L. A.; PEREIRA, R. H. M. Td 2767 - Impactos da expansão do metrô de fortaleza sobre o acesso a oportunidades de emprego, saúde e educação. **Texto para Discussão/Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Brasília**, Rio de Janeiro: IPEA, p. 1–50, mai. 2022. ISSN 1415-4765.

BRUSSELAERS, N.; MACHARIS, C.; Mommens, K. The health impact of freight transport-related air pollution on vulnerable population groups. **Environmental Pollution**, [s.l.], v. 329, p. 121555, jul. 2023. DOI 10.1016/j.envpol.2023.121555. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749123005572>. Acesso em: 24 mai. 2023.

CASTRO, R.; MERCHAN, D.; JR, O. L.; WINKENBACH, M. City logistics and clustering impacts of using hdi and taxes. **The 10th International Conference on City Logistics**, [s.l.].2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338019930_CITY_LOGISTICS_AND_CLUSTERING_IMPACTS_OF_USING_HDI_AND_TAXES. Acesso em: 19 nov. 2022.

CATS, O.; JENELIUS, E. Planning for the unexpected: The value of reserve capacity for public transport network robustness. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [s.l.],Elsevier Ltd, v. 81, p. 47–61, nov. 2015. ISSN 09658564.

CAVALCANTE, A. P. de H. **A arquitetura da cidade e os transportes: o caso dos congestionamento em Fortaleza - Ceará**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo)-Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/3999>. Acesso em: 06 mai. 2022.

CHEN, R.; LECLERCQ, L.; AMELI, M. Unravelling system optimums by trajectory data analysis and machine learning. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [s.l.],Elsevier Ltd, v. 130, p. 103318, set. 2021. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103318. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X21003259>. Acesso em: 22 abr.

2023.

CHOVANCOVÁ, J.; POPOVIČOVÁ, M.; HUTTMANOVÁ, E. Decoupling transport-related greenhouse gas emissions and economic growth in the European Union Countries. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, 2021. DOI: 10.13044/j.sdewes.d9.0411.

COMI, A.; SCHIRALDI, M. M.; BUTTARAZZI, B. Smart urban freight transport: tools for planning and optimising delivery operations. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 88, p. 48–61, 2018. DOI: 10.1016/j.simpat.2018.08.006.

CRUCITTI, P.; LATORA, V.; PORTA, S. Centrality in networks of urban streets. **Chaos (Woodbury, N.Y.)**, v. 16, p. 015113, 2006. DOI: 10.1063/1.2150162.

CRUZ, A. M. C. Implementation and impacts of low emission zones on freight activities in europe: Local schemes versus national schemes. **Transportation Research Procedia**, V.12,P. 544-556, 2016. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.02.010.

CUI, J. X.; LIU, F.; HU, J.; JANSSENS, D.; WETS, G.; COOLS, M. Identifying mismatch between urban travel demand and transport network services using gps data: A case study in the fast growing chinese city of harbin. **Neurocomputing**, [s.l.], Elsevier B.V., v. 181, p. 4–18,mar. 2016. ISSN 18728286.

DABLANC, L. **City distribution, a key element of the urban economy: guidelines for practitioners**. [S. l.]: Edward Elgar, 2011. ISBN 9780857932754.

DIAS, H. L. F. **Methodology for air pollution impact assessment of low emission zones in urban areas of brazil - the case study of Fortaleza**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/40358>. Acesso em: 17 out. 2021.

DONEGAN, L.; RODRIGUES, K.; FERREIRA, P.; LIMA, L.; CORRÊA, P.; GURGEL,A/ P. **Mapa Axial Fortaleza (CE)**. 2017. Disponível em: <http://urbanidades.arq.br/mapasconfiguracionais/category/brasil/ceara/>. Acesso em: 27 out. 2022.

DUCRET, R.; LEMARIÉ, B.; ROSET, A. Cluster analysis and spatial modeling for urban freight: identifying homogeneous urban zones based on urban form and logistics characteristics. **Transportation Research Procedia**, [s.l.], v. 12, p. 301-313, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.067>.

ESSABBÁ, L.; BERTONCINI, B. Avaliação da qualidade do ar a partir das atividades produtivas e do tráfego: Uma análise no contexto da pandemia de covid-19 em fortaleza, brasil. **Anais do 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Fortaleza, 2022.

EVANGELISTA, G. L.; NOGUEIRA, M. E. F.; NUNES, F. R. de M.; FREITAS, S. M. de. A técnica de cluster como ferramenta de apoio à tomada de decisão visando à melhoria da qualidade do serviço prestado: Estudo de caso em empresa do ramo de distribuição, ceara. **XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Belo Horizonte, 2011.

EZAKI, T.; IMURA, N.; NISHINARI, K. Towards understanding network topology and robustness of logistics systems. **Communications in Transportation Research**, Tsinghua University, v. 2, dez. 2022. ISSN 27724247.

FERREIRA, R. V.; RAFFO, J. D. G. Visualização cartográfica da acessibilidade geográfica aos postos de saúde da região rural de Registro (SP). **Open Edition Journals**, Confins, jul, 2013. DOI : <https://doi.org/10.4000/confins.8425>.

FIALHO, M. H. S. de A. **Modelo de classificação de rotas do transporte de cargas em meio urbano: análise de riscos sobre a geração de emissões de poluentes atmosféricos.** 2022. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

FRANK, L. D.; STONE, B.; BACHMAN, W. Linking land use with household vehicle emissions in the central puget sound: methodological framework and findings.

Transportation Research Part D: Transport and Environment, [s.l.], v. 5, n. 3, p. 173–196, 2000. ISSN 1361-9209.

FREEMAN, L. C. **A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness.** Sociometry, [s. l.], American Sociological Association, 1977. v. 40, 35-41 p. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/3033543>. Acesso em: 30 nov. 2022.

FREEMAN, L. C.; BORGATTI, S. P.; WHITE, D. R. **Centrality in valued graphs: A measure of betweenness based on network flow.** [S. l.: s.n.], 1991. v. 13, 141 p

GEHRKE, S. R.; AKHAVAN, A.; FURTH, P. G.; WANG, Q.; REARDON, T. G. A cycling-focused accessibility tool to support regional bike network connectivity. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 85, ago. 2020. ISSN 13619209.

GEURS, K. T.; VAN WEE, B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. **Journal of Transport Geography**, [s.l.], v. 12, p. 127–140, jun. 2004. ISSN 09666923.

GONZÁLEZ-FELIU, J. Urban logistics and spatial territorial intelligence indicators: State-of-the-art, typology and implications for Latin American cities. **Interfases**, v. 11, n. 011, p. 135-176, dez. 2018.

GUZMAN, L. A.; BELTRAN, C.; MORALES, R.; SARMIENTO, O. L. Inequality in personal exposure to air pollution in transport microenvironments for commuters in Bogotá. **Case Studies on Transport Policy**, Elsevier Ltd, v. 11, 3 2023. ISSN 22136258.

GUZMAN, L. A.; OVIEDO, D.; ARELLANA, J.; CANTILLO-GARCÍA, V. Buying a car and the street: Transport justice and urban space distribution. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 95, p. 102860, 2021. ISSN 1361-9209.

HE, Z.; NAVNEET, K.; DAM, W. van; MIEGHEM, P. V. Robustness assessment of multimodal freight transport networks. **Reliability Engineering and System Safety**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 207, mar. 2021. ISSN 09518320.

HILLIER, B.; PERM, A.; HANSON, J.; GRAJEWSKI, T.; XU, J. Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. **Environment and Planning B: Planning and Design**, [s.l.], v.20, p. 29-66, 1993.

HILLIER, B.; YANG, T.; TURNER, A. Normalising least angle choice in depthmap and how it opens up new perspectives on the global and local analysis of city space. **The Journal**

of Space Syntax (JSS), [s.l.], p. 155–193, dez. 2012. ISSN 2044-7507.

INCREMONA, G. P.; POLTERAUER, P. Design of a switching nonlinear mpc for emission aware ecodriving. **IEEE Transactions on Intelligent Vehicles**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 8, p. 469–480, jan. 2023. ISSN 23798858.

JAYASINGHE, A.; SANO, K.; ABENAYAKE, C. C.; MAHANAMA, P. K. A novel approach to model traffic on road segments of large-scale urban road networks. **MethodsX**, Elsevier B.V., v. 6, p. 1147–1163, jan 2019. ISSN 22150161.

JI, S.; WANG, X.; LYU, T.; LIU, X.; WANG, Y.; HEINEN, E.; SUN, Z. Understanding cycling distance according to the prediction of the xgboost and the interpretation of SHAP: A non-linear and interaction effect analysis. **Journal of Transport Geography**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 103, jul 2022. ISSN 09666923.

JIANG, B.; CLARAMUNT, C. Topological analysis of urban street networks. **Environment and Planning B: Planning and Design**, [s.l.], Pion Limited, v. 31, p. 151–162, 2004. ISSN 02658135

JIAO, J.; ZHANG, F.; LIU, J. A spatiotemporal analysis of the robustness of high-speed rail network in China. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 89, dez. 2020. ISSN 13619209.

KAHN, M. E. A household level environmental Kuznets curve. **Economics Letters**, [s.l.], Elsevier, v. 59, p. 269–273, 1998. ISSN 0165-1765.

KE, L.; FURUYA, K.; LUO, S. Case comparison of typical transit-oriented-development stations in Tokyo district in the context of sustainability: Spatial visualization analysis based on FAHP and GIS. **Sustainable Cities and Society**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 68, mai. 2021. ISSN 22106707.

KELLNER, F. Exploring the impact of traffic congestion on CO₂ emissions in freight distribution networks. **Logistics Research**, [s.l.], 2016. <https://doi.org/10.1007/s12159-016-0148-5>.

LI, D.; SHEN, T.; WEI, X.; LI, J. Decomposition and decoupling analysis between HDI and carbon emissions. **Atmosphere**, [s.l.], v. 13, n. 4, 2022. ISSN 2073-4433.

LINDHOLM, M. How local authority decision makers address freight transport in the urban area. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, [s.l.], Elsevier BV, v. 39, p. 134–145, 2012. ISSN 18770428.

LOWRY, M. B.; FURTH, P.; HADDEN-LOH, T. Prioritizing new bicycle facilities to improve low-stress network connectivity. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 86, p. 124–140, abr. 2016. ISSN 09658564.

LUO, J.; BARTH, M. J.; BORIBOONSOMSIN, K. Vehicle Routing to Mitigate Human Exposure to Traffic-Related Air Pollutants. **21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**, [s.l.], 2018. ISBN 9781728103235.

MA, J.; LI, D.; CHENG, L.; LOU, X.; SUN, C.; TANG, W. Link restriction: Methods of testing and avoiding Braess paradox in networks considering traffic demands. **Journal of**

Transportation Engineering, Part A: Systems, [s.l.], v. 144, n. 2, p. 04017076, 2018.

MA, J.; XU, M.; JIANG, J. Mapping high-resolution urban road carbon and pollutant emissions using travel demand data. **Energy**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 263, jan 2023. ISSN 03605442.

MACÁRIO, R. Modeling for public policies inducement of urban freight business development. **Freight Transport Modelling**, [s.l.], p. 405–432, mai. 2013. DOI:10.1108/9781781902868-020.

MAGALHAES, M. T. Q.; MENDONCA, F. A. F. A palavra é resiliência. **9º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável**. Pluris, 2021. Disponível em: <https://pluris2020.faac.unesp.br/Paper887.pdf>. Acesso em: 24 out. 2022.

MARSHALL, S. **Streets and Patterns: The Structure of Urban Geometry**. [S. l.], Routledge, 2004. ISBN 9780415317504.

MCKINNON, A.; BROWNE, M.; WHITEING, A.; PIECYK, M. **Green Logistics – Improving the environmental sustainability of logistics**. [s. l.: s. n.], 2015. ISBN 978-0-7494-7185-9.

MIRHEDAYATIAN, S. M.; YAN, S. A framework to evaluate policy options for supporting electric vehicles in urban freight transport. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier Ltd, v. 58, p. 22–38, jan 2018. ISSN 13619209.

NAGURNEY, A. Congested urban transportation networks and emission paradoxes. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 5, p. 145-151, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920999000310>. Acesso em: 02 jun. 2023.

NUÑEZ, J. Y. M.; MILLAN, R. H. R.; ERAS, J. J. C.; GARRALAGA, O. P.; GATICA, G. How the street network slope influences fuel consumption in urban freight routing. **Procedia Computer Science**, Elsevier BV, v. 220, p. 909–915, 2023. ISSN 18770509.

OLIVEIRA, E. L. de. **Indicadores para hierarquização de ligações em rede viária urbana com base em desempenho**. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

OLIVEIRA, R.; DABLANC, L.; SCHORUNG, M.; UPEM, G. E. **Comparative Analyses of Logistics Activities in Major Cities Around the World with a Focus on Urban Characteristics and Logistics Sprawl**. 2019. 73 f. Postdoctoral research development. [s.l.:s.n].2019.

PANI, A.; SAHU, P. K.; HOLGUÍN-VERAS, J. Examining the determinants of freight transport emissions using a fleet segmentation approach. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 92, p. 102726, 2021. ISSN 1361-9209.

PEREIRA, R. H. M.; BARROS, A. P. B. G.; HOLANDA, F. R. B. de; MEDEIROS, V. A. S. de. **O uso da sintaxe espacial na análise do desempenho do transporte urbano: Limites e potencialidades**. 2011. ISSN 1415-4765. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br>. Acesso em:14 nov. 2023.

- PINHO, G. M.; OLIVEIRA, L. C.; ROCHA, M. de M.; BARROS, A. P. B. G. Mapeamento da vulnerabilidade de evacuação em caso de desastres naturais empregando a sintaxe espacial. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s.l.], v. 71, p. 328–366, 2019. ISSN 0560-4613.
- PIRRA, M.; CARBONI, A.; DEFLORIO, F. Freight delivery services in urban areas: Monitoring accessibility from vehicle traces and road network modelling. **Research in Transportation Business and Management**, [s.l.], Elsevier Ltd, 2021. ISSN 22105395.
- PORTA, S.; STRANO, E.; IACOVELLO, V.; MESSORA, R.; LATORA, V.; CARDILLO, A.; WANG, F.; SCELLATO, S. Street centrality and densities of retail and services in Bologna, Italy. **Environment and Planning B: Planning and Design**, [s.l.], Pion Limited, v. 36, p. 450–465, 2009. ISSN 14723417.
- PRUD'HOMME, J.; GENRE-GRANDPIERRE, C.; PRUD'HOMME, R. Impact of road network structure on pollutant emissions illustration for a demand responsive transport system. **AGILE'2012 International Conference on Geographic Information Science**, [s.l.], abr. 2012.
- RAKHA, H.; AERDE, M. V.; BLOOMBERG, L.; HUANG, X. Construction and calibration of a large-scale microsimulation model of the Salt Lake area. **Transportation Research Record**, [s.l.], v. 1644, n. 1, p. 93–102, 1998. DOI: 10.3141/1644-10
- RAVULAPARTHY, S. K.; GOULIAS, K. G. Characterizing the composition of economic activities in central locations. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s.l.], SAGE Publications, v. 2430, p. 95–104, jan. 2014. ISSN 0361-1981.
- REGAL, A. Logistic profile generation via clustering analysis. **International Journal of Machine Learning and Computing**, v. 10, p. 207–212, 1 2020. ISSN 20103700. Disponível em: <http://www.ijmlc.org/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=105&id=1081>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- REGGIANI, A.; NIJKAMP, P.; LANZI, D. Transport resilience and vulnerability: the role of connectivity. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 81, p. 4–15, nov. 2015. ISSN 09658564.
- RIBEIRO, J. P.; CASSIANO, D. R.; BERTONCINI, B. V.; BRANCO, V. T. F. C.; SOUSA, F. F. L. de M.; QUINTANILHA, W. F. L.; CAVALCANTE, R. M.; SANTIAGO, I. S. de; FERNANDES, G. M. Compreensão da formação de no₂ proveniente das operações de transporte urbano e suas relações com agentes causais. **Revista Transportes**, [s.l.], 2019. ISSN 2237-1346.
- RODRIGUE, J.-P.; COMTOIS, C.; SLACK, B. **The Geography of Transport Systems**. 1. ed. 2016. 440 p. ISBN 9781315618159.
- RODRIGUES, B. A. M. **Proposição de metodologia para traçado de rota de fuga em caso de falha em barragem**. 2021. 84 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- SABERI, M.; GHAMAMI, M.; GU, Y.; SHOJAEI, M. H. S.; FISHMAN, E. Understanding the impacts of a public transit disruption on bicycle sharing mobility patterns: A case of tube strike in london. **Journal of Transport Geography**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 66, p. 154–166, jan.

2018. ISSN 09666923.

SABOYA, R. **Sintaxe Espacial**. Urbanidades: Urbanismo, Planejamento Urbano e Planos Diretores, 2007. Disponível em: <https://urbanidades.arq.br/2007/09/03/sintaxe-espacial/>. Acesso em: 05 jun. 2022.

SÁNCHEZ-DÍAZ, I.; HOLGUÍN-VERAS, J.; WANG, C. An exploratory analysis of spatial effects on freight trip attraction. **Transportation**, v. 43, 2014. DOI:10.1007/s11116-014-9570-1

SCHEURER, J.; PORTA, S. Centrality and connectivity in public transport networks and their significance for transport sustainability in cities. **World Planning Schools Congress, Global Planning Association Education Network**, Mexico DF, jul. 2006.

SCOPPA, M.; BAWAZIR, K.; ALAWADI, K. Straddling boundaries in superblock cities. assessing local and global network connectivity using cases from Abu Dhabi, UAE.

Transportation Research Part A: Policy and Practice, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 130, p. 770–782, dez. 2019. ISSN 09658564.

SCORZA, F.; FORTUNATO, G. Cyclable cities: building feasible scenario through urban space morphology assessment. **Journal of Urban Planning and Development**, [s.l.], American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 147, dez. 2021. ISSN 0733-9488.

SEVTSUK, A. Location and agglomeration: the distribution of retail and food businesses in dense urban environments. **Journal of Planning Education and Research**, SAGE Publications Inc., v. 34, p. 374–393, dez. 2014. ISSN 15526577.

SIDER, T.; ALAM, A.; ZUKARI, M.; DUGUM, H.; GOLDSTEIN, N.; ELURU, N.; HATZOPPOULOU, M. Land-use and socioeconomics as determinants of traffic emissions and individual exposure to air pollution. **Journal of Transport Geography**, [s.l.], v. 33, p. 230–239, 2013. ISSN 0966-6923.

TANIGUCHI, E.; THOMPSON, R. G.; YAMADA, T. Recent trends and innovations in modelling city logistics. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, [s.l.], Elsevier BV, v. 125, p. 4–14, mar. 2014. ISSN 18770428.

TAYLOR, M. A. P. **Vulnerability analysis for transportation networks**. [S. l.: s. n.], 2017. ISBN 9780128110102.

THOMAS, I.; HERMIA, J.-P.; VANELSLANDER, T.; VERHETSEL, A. Accessibility to freight transport networks in Belgium: a geographical approach. **Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie**, [s.l.], v.94, p. 424-438, 2003. DOI: 10.1111/1467-9663.00271.

TURNER, A. From axial to road-centre lines: a new representation for space syntax and a new model of route choice for transport network analysis. **Environment and Planning B: Planning and Design**, [s.l.], Pion Limited, v. 34, p. 539–555, 2007. ISSN 02658135.

WALKER, G.; MANSON, A. Telematics, urban freight logistics and low carbon road networks. **Journal of Transport Geography**, Elsevier BV, v. 37, p. 74–81, 2014. ISSN 09666923.

WANG, P.; ZHANG, R.; SUN, S.; GAO, M.; ZHENG, B.; ZHANG, D.; ZHANG, Y.; CARMICHAEL, G. R.; ZHANG, H. Aggravated air pollution and health burden due to traffic congestion in urban China. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 23, n. 5, p. 2983–2996,

2023.

WANG, S.; CHEN, C.; ZHANG, J.; GU, X.; HUANG, X. Vulnerability assessment of urban road traffic systems based on traffic flow. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, [s.l.], Elsevier B.V., v. 38, set. 2022. ISSN 18745482.

XIAO, Y.; SARKAR, C.; WEBSTER, C.; CHIARADIA, A.; LU, Y. Street network accessibility-based methodology for appraisal of land use master plans: An empirical case study of wuhan, china. **Land Use Policy**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 69, p. 193–203, dez. 2017. ISSN 02648377.

YAN, L.; LUO, X.; ZHU, R.; SANTI, P.; WANG, H.; WANG, D.; ZHANG, S.; RATTI, C. Quantifying and analyzing traffic emission reductions from ridesharing: A case study of shanghai. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], Elsevier Ltd, v. 89, dez. 2020. ISSN 13619209.

YOON, S.; MOON, Y.; JEONG, J.; PARK, C. R.; KANG, W. A network-based approach for reducing pedestrian exposure to PM 2.5 induced by road traffic in seoul. **Land**, MDPI, v. 10, out. 2021. DOI:10.3390/land10101045.

ZANCHIN, B. C. **Análise do algoritmo A* (a estrela) no planejamento de rotas de veículos autônomos**. 2018. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

ZHANG, K.; FREY, H. C. Road grade estimation for on-road vehicle emissions modeling using light detection and ranging data. **Journal of the Air and Waste Management Association**, [s.l.], v. 56, p. 777–788, 2006. ISSN 21622906.

ZHANG, K.; BATTERMAN, S. Air pollution and health risks due to vehicle traffic. **Science of the Total Environment**, [s.l.], Elsevier B.V, v.450-451, p. 307–316, 2013. DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.01.074

ZHANG, R.; MATSUSHIMA, K.; KOBAYASHI, K. Can land use planning help mitigate transport-related carbon emissions? a case of Changzhou. **Land Use Policy**, [s.l.], v. 74, p. 32-40, 2018.

APÊNDICE A – ROTEIRO PARA ELABORAÇÃO DOS PERFIS LOGÍSTICOS

Abaixo segue um roteiro de apoio para elaboração de Perfis Logísticos segundo à metodologia seguida no estudo atual como forma de impulsionar testes e replicações em estudos futuros. Vale ressaltar que existem várias formas de fazer esse passo a passo, principalmente no quesito clusterização e que o roteiro se refere inteiramente ao método utilizado nesse estudo.

1. Definição da Área de Estudo (País, Estado, Cidade, Bairro);
2. Definição da unidade de agregação tendo como base o fenômeno que se pretende estudar associado ao nível de agregação das variáveis disponíveis. Podem ser setores censitários, bairros, zonas de tráfego, hexágonos, por exemplo;
3. Escolha das variáveis que serão utilizadas nos perfis logísticos, podendo apontar desde caracterização social e econômica, até variáveis mais específicas relacionadas ao fenômeno, como características da infraestrutura ou acessibilidade logística;
4. Espacialização das variáveis para a área de estudo e para o nível de agregação escolhidos;
5. Cada região possui um valor para cada variável e estas serão, uma a uma, classificadas em uma curva ABC. Os maiores valores (20 por cento do total) correspondem ao "A", 30 por cento, ao "B" e 50 por cento, ao "C";
6. Após a adequação de cada variável na curva ABC, estas serão agrupadas de acordo com o que representam (se variável econômica, social, de acessibilidade, de educação, de renda...);
7. Dentro de cada grupo definir quando ele pode ser A, B ou C. Por exemplo: O grupo vai ser A quando todas as variáveis pertencentes a ele para a região forem A, ou A e B. Essa etapa é precedida por uma análise dos dados de forma cautelosa para entendimento das características existentes; Depois disso, definir os perfis que se espera obter, por exemplo "Perfil 1: maior atividade econômica (A) e menor acessibilidade (C)". Todas as regiões que se adequarem a isso serão classificadas como Perfil 1, por exemplo.