



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS MATHEUS DANTAS RIBEIRO

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DOS CONGESTIONAMENTOS URBANOS EM
FORTALEZA COM USO DE DADOS DE FLUXO DE TRÁFEGO HERE**

FORTALEZA

2025

LUCAS MATHEUS DANTAS RIBEIRO

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DOS CONGESTIONAMENTOS URBANOS EM
FORTALEZA COM USO DE DADOS DE FLUXO DE TRÁFEGO HERE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Profa. Dra. Arielle Elias Arantes.

FORTALEZA

2025

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

R369a Ribeiro, Lucas Matheus Dantas.

 Análise espaço-temporal dos congestionamentos urbanos em Fortaleza com uso de dados de fluxo de tráfego here / Lucas Matheus Dantas Ribeiro. – 2025.
 87 f. : il. color.

 Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2025.

 Orientação: Profa. Dra. Arielle Elias Arantes.

 1. Análise espaço-temporal. 2. Mobilidade urbana.. 3. Congestionamento. I. Título.

CDD 620

LUCAS MATHEUS DANTAS RIBEIRO

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DOS CONGESTIONAMENTOS URBANOS EM
FORTALEZA COM USO DE DADOS DE FLUXO DE TRÁFEGO HERE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovada em: 07/07/2025

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Profa. Dra. Arielle Elias Arantes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Mário Ângelo Nunes de Azevedo Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

A Deus.

A minha mãe, Márcia Dantas.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa muito mais do que o encerramento de uma etapa acadêmica. Trata-se da consolidação de uma trajetória repleta de descobertas, incertezas, renúncias e amadurecimento. Foram anos intensos, de muitas exigências, em que precisei lidar não apenas com os desafios técnicos da Engenharia Civil, mas também com os meus próprios limites emocionais.

Ao olhar para trás, compreendo que este percurso só foi possível graças ao apoio de pessoas que, de diferentes formas, caminharam comigo. Este momento me convida à gratidão — não apenas como formalidade, mas como reconhecimento sincero de quem soube que não se chega até aqui sozinho.

À minha mãe, Márcia Dantas, dedico um agradecimento que carrego com emoção, reverência e amor. Sua presença constante, mesmo nas adversidades mais duras, foi a base sobre a qual construí minhas forças. Você me ensinou, com atitudes silenciosas e firmes, o valor da resistência e da generosidade. Obrigado por cada gesto de cuidado, cada conselho sussurrado quando tudo parecia incerto, e por nunca ter deixado de acreditar em mim — mesmo quando eu vacilava. Este diploma também é seu. Carrega o peso das suas lutas e a luz do seu exemplo.

À professora Arielle Elias Arantes, minha orientadora, expresso minha mais profunda gratidão. Sua orientação foi mais do que técnica; foi um gesto de escuta comprometida, sensibilidade acadêmica e generosidade intelectual. Ao longo deste processo, encontrei em você não apenas uma profissional competente, mas uma presença que acolhe, provoca e respeita o tempo e o pensamento do outro. Obrigado por apostar na minha pesquisa, por ajudar a dar forma ao que muitas vezes era apenas intuição, e por mostrar que o rigor e o afeto podem, sim, caminhar lado a lado na produção do conhecimento.

Agradeço à Universidade Federal do Ceará (UFC), por ser espaço de formação acadêmica, crítica e humana. Ao curso de Engenharia Civil, em especial, deixo meu reconhecimento por ter me proporcionado não apenas ferramentas técnicas, mas também reflexões que ultrapassam os muros da universidade. Aos professores e professoras que me acompanharam ao longo desses anos, minha admiração pela seriedade com que se dedicam ao ensino e pela inspiração que representam. Cada aula, cada leitura, cada orientação contribuiu para minha formação de forma profunda e duradoura.

Aos colegas de curso que dividiram comigo os muitos momentos desta jornada, deixo meu carinho e minha gratidão. Em meio à rotina puxada, aos prazos apertados e à pressão constante, foram vocês que tornaram a caminhada mais humana. As conversas nos intervalos,

as trocas de materiais, as piadas que quebravam o peso do cansaço, e a solidariedade nos momentos críticos foram combustíveis preciosos. Obrigado por me lembrarem que, mesmo diante das exigências de um curso tão desafiador, há espaço para cuidado mútuo e amizade sincera.

Por fim, agradeço aos familiares e amigos que estiveram ao meu lado, mesmo que à distância ou nos bastidores. Cada mensagem de apoio, cada gesto de carinho, cada palavra breve — mas cheia de sentido — me ajudaram a manter o equilíbrio. O afeto, muitas vezes silencioso, sustentou o que nem sempre pude nomear. Se hoje este trabalho se concretiza, é porque também foi construído com amor, paciência e presença. A todos e todas que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista: meu mais sincero obrigado.

RESUMO

Os congestionamentos urbanos constituem um dos principais desafios à mobilidade nas grandes cidades, impactando diretamente a qualidade de vida da população e a eficiência dos sistemas de transporte. Com os avanços nas tecnologias de geolocalização e o uso crescente de plataformas de monitoramento de tráfego em tempo real, como o serviço hereR, tornou-se possível coletar dados com elevado nível de detalhamento espacial e temporal. Neste contexto, este trabalho busca compreender a dinâmica dos congestionamentos na cidade de Fortaleza, adotando a escala dos bairros como unidade de análise espacial. A pesquisa tem como objetivo identificar padrões espaço-temporais de congestionamento ao longo dos dias da semana e dos diferentes períodos do dia, a fim de fornecer subsídios técnicos para o aprimoramento das políticas públicas de mobilidade urbana. Para isso, são aplicadas técnicas de análise espacial, estatística e visualização geográfica, que permitem extrair informações relevantes a partir de grandes volumes de dados georreferenciados. A utilização da escala dos bairros possibilita inferir como a distribuição dos congestionamentos reflete dinâmicas territoriais específicas, evidenciando variações na dinâmica do tráfego entre as diversas regiões urbanas de Fortaleza. Os resultados obtidos permitem mapear zonas críticas com maior precisão, identificar gargalos recorrentes e compreender como os congestionamentos se manifestam de forma diferenciada no tecido urbano. A principal contribuição da pesquisa reside na demonstração do potencial dos dados espaço-temporais para a formulação de estratégias mais eficazes de gestão do tráfego, além de apresentar uma metodologia com elevado grau de replicabilidade, aplicável a outros contextos urbanos, fortalecendo o desenvolvimento de soluções baseadas em dados e evidências.

Palavras-chave: análise espaço-temporal; congestionamento; mobilidade urbana.

ABSTRACT

Urban traffic congestion is one of the main challenges for mobility in large cities, directly affecting both the quality of life of the population and the efficiency of transportation systems. With advances in geolocation technologies and the increasing use of real-time traffic monitoring platforms, such as the hereR service, it has become possible to collect highly detailed spatial and temporal data. In this context, this study aims to understand the dynamics of traffic congestion in the city of Fortaleza, adopting the neighborhood scale as the spatial unit of analysis. The research seeks to identify spatiotemporal patterns of congestion throughout the days of the week and across different periods of the day, in order to provide technical support for improving urban mobility policies. Spatial analysis techniques, statistical methods, and geographic visualization tools are applied to extract relevant information from large volumes of georeferenced data. The use of the neighborhood scale enables the inference of how congestion distribution reflects specific territorial dynamics, highlighting variations in traffic behavior across different areas of the city. The results allow for the precise mapping of critical zones, identification of recurrent bottlenecks, and a deeper understanding of how congestion manifests differently across the urban fabric. The main contribution of this research lies in demonstrating the potential of spatiotemporal data to support more effective traffic management strategies, in addition to presenting a highly replicable methodology that can be applied to other urban contexts, thus strengthening the development of data-driven and evidence-based solutions.

Keywords: spatiotemporal analysis; traffic congestion; urban mobility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Fluxo Metodológico para Análise Espacial e Temporal de Congestionamentos (Fortaleza - CE)	35
Figura 02 – Mapa viário básico de Fortaleza, considerando as vias contempladas pelo hereR	37
Figura 03 – Análise comparativa de indicadores de tráfego na Avenida José Bastos	47
Figura 04 – Velocidade média por hora para todas as vias de Fortaleza.	48
Figura 05 – <i>Jam Factor</i> por hora para todas as vias de Fortaleza.	50
Figura 06 – Histograma da velocidade (km/h) entre 05 e 12 de junho para todas as vias e horários	51
Figura 07 – Histograma da frequência de valores do Jam Factor em todas as vias de Fortaleza (período: 05 a 12 de junho de 2024)	53
Figura 08 – Relação entre Velocidade média e <i>Jam Factor</i> de todas as vias de Fortaleza	54
Figura 09 – Comparação das variáveis por categoria de horário	56
Figura 10 – Análise temporal das variáveis (05 a 12 de junho de 2024).....	59
Figura 11 – Índice de Moran referente aos dados do horário de 02h.	61
Figura 12 – Mapa de Autocorrelação Espacial Local (LISA) do Fluxo Veicular Médio nos Bairros de Fortaleza às 02h: Identificação de Padrões Espaciais de Congestionamento	62
Figura 13 – Mapa de Significância Espacial Univariada (LISA) entre Fluxo por Bairro e Índice de Congestionamento (<i>JamFactor</i>) em Fortaleza às 02h	64
Figura 14 – Índice de Moran referente aos dados do horário de 18h	65
Figura 15 – Mapa de Autocorrelação Espacial Local (LISA) do Fluxo Veicular Médio nos Bairros de Fortaleza às 18h: Identificação de Padrões Espaciais de Congestionamento	67
Figura 16 – Mapa de Significância Espacial Univariada (LISA) entre Fluxo por Bairros e Índice de Congestionamento (<i>JamFactor</i>) em Fortaleza às 18h	69
Figura 17 – Distribuição Espacial do <i>Jam Factor</i> Médio às 02h e Identificação de Valores Atípicos Superiores em Fortaleza (05 a 12 de junho de 2024).....	70
Figura 18 – <i>Boxplot</i> referente ao <i>Jam Factor</i> médio no horário de 02h	71
Figura 19 – Distribuição Espacial do <i>Jam Factor</i> Médio às 18h e Identificação de Valores Atípicos Superiores em Fortaleza (05 a 12 de junho de 2024).....	72
Figura 20 – <i>Boxplot</i> referente ao <i>Jam Factor</i> médio no horário de 18h	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Capacidade base por faixa ou teórica obtida do HCM	25
Quadro 02 – Fator de Ajuste para Largura da Faixa obtido do HCM	26
Quadro 03 – Equivalente de Automóveis de Passageiros obtido do HCM	26
Quadro 04 – Fator de Ajuste para Motoristas (fp) obtido do HCM	27
Quadro 05 – Indicadores de tráfego veicular.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMC	Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania de Fortaleza
ANOVA	Analysis of Variance (Análise de Variância)
API	Application Programming Interface
BR-116	Rodovia Federal BR-116 (referência geográfica, não sigla técnica)
dplyr	Pacote da linguagem R para manipulação de dados tabulares
EAT	Equivalente de Automóveis de Passageiros
GeoDa	Software de Análise Espacial da Universidade de Chicago
GitHub	Plataforma de versionamento e automação de código
HCM	Highway Capacity Manual (Manual de Capacidade de Rodovias)
hereR	Pacote da linguagem R baseado na API HERE Technologies
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Congestionamento
INRIX	Empresa especializada em dados e análise de tráfego (nome próprio)
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
Índice de Moran (I)	Métrica de autocorrelação espacial
ITF	Índice de Tráfego de Fluxo (inferido, não definido formalmente no texto)
Jam Factor	Índice de Congestionamento da API hereR
LOS	Level of Service (Nível de Serviço)
OSM	OpenStreetMap
ONU	Organização das Nações Unidas
QGIS	Quantum Geographic Information System
R	Linguagem de programação estatística
R ²	Coeficiente de determinação (estatística de regressão)
RStudio	Ambiente de desenvolvimento integrado para R
SEFIN	Secretaria Municipal das Finanças (Fortaleza)
sf	Pacote da linguagem R para dados espaciais

SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS2000	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – versão 2000
tidyr	Pacote da linguagem R para limpeza e organização de dados
UTM	Universal Transverse Mercator (Sistema de Coordenadas)
V/C	Relação entre Volume e Capacidade da via
VTD	Volume de Tráfego Diário

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema de Pesquisa.....	16
1.2	Questões de Pesquisa	16
1.3	Justificativa	18
1.4	Objetivos.....	19
1.4.1	<i>Objetivo Geral</i>	19
1.4.2	<i>Objetivos Específicos</i>	19
1.5	Estrutura do Trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Congestionamentos e Dinâmica dos Congestionamentos Urbanos.....	21
2.2	Interação Infraestrutura Urbana e Mobilidade: Impactos e Estratégias	22
2.3	Análise de Congestionamentos	23
2.3.1	<i>Coleta de Dados</i>	23
2.3.2	<i>Indicadores de Congestionamentos</i>	24
2.3.3	<i>APIs para Monitoramento de Tráfego</i>	28
2.4	Técnicas Estatísticas para Análise de Congestionamentos	29
2.4	Sistema de Informação Geográfica (SIG)	30
2.5.1	<i>Análise Espaço-Temporal</i>	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Área de Estudo.....	35
3.2	Dados	38
3.3	Pacotes computacionais.....	40
3.3.1	<i>R pacote hereR</i>	40
3.3.2	<i>GitHub</i>	40
3.3.3	<i>QGIS</i>	41
3.3.4	<i>Microsoft Excel</i>	41
3.4	Métodos	42
3.4.1	<i>Aplicação do R e do Pacote hereR</i>	42
3.4.2	<i>Organização dos dados</i>	43
3.4.3	<i>Validação Av. José Bastos</i>	44
3.4.4	<i>Análise temporal</i>	44
3.4.5	<i>Análise espacial Box Map e Índice de Moran</i>	45

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Validação Av. José Bastos	46
4.2	Análise Temporal Horária das vias de Fortaleza.....	48
4.2.1	<i>Variação Horária da Velocidade Média nas Vias Urbanas de Fortaleza</i>	<i>48</i>
4.2.2	<i>Comportamento Temporal do Índice de Congestionamento (Jam Factor).....</i>	<i>49</i>
4.2.3	<i>Distribuição de Frequência das Velocidades nas Vias de Fortaleza</i>	<i>51</i>
4.2.4	<i>Análise da Distribuição do Jam Factor na Malha Viária Urbana.....</i>	<i>53</i>
4.2.5	<i>Análise Conjunta da Velocidade Média e Jam Factor.....</i>	<i>54</i>
4.2.6	<i>Comportamento das Variáveis de Tráfego nos Diferentes Períodos do Dia.....</i>	<i>56</i>
4.3	Análise Temporal Diária das vias de Fortaleza	58
4.4	Análise Espacial Índice de Moran.....	60
4.5	Análise Espacial Box Maps.....	69
5	CONCLUSÃO.....	76
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE A – SCRIPT EM R PARA COLETA E EXPORTAÇÃO DOS DADOS.....	86
	APÊNDICE B – WORKFLOW AUTOMATIZADO DO GITHUB.....	86

1 INTRODUÇÃO

O congestionamento urbano, decorrente do aumento da urbanização e da frota de veículos, é um desafio global em crescimento, com implicações significativas para a economia, o ambiente e a sociedade (Litman, 2021). Diversos estudos evidenciam que fatores como configuração viária, densidade populacional e oferta de transporte público são determinantes para o surgimento e a intensidade dos congestionamentos, ressaltando a importância de compreender a interação entre esses elementos para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de gestão do tráfego.

Esse problema não é exclusivo de uma região específica; ele afeta várias metrópoles ao redor do mundo, onde mais de 55% da população vive em áreas urbanas, de acordo com dados publicados em 2022 das Nações Unidas (ONU, 2018). O rápido crescimento populacional e a urbanização têm sobrecarregado as infraestruturas de transporte, resultando em congestionamentos frequentes e prolongados em cidades densamente povoadas, como Mumbai, Moscou e Bogotá, conforme evidenciado por estudos globais como o relatório da *INRIX Global Traffic Scorecard*, especialista em dados e análise de tráfego.

O intenso tráfego nas principais metrópoles brasileiras, como São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, é um desafio crônico causado pelo rápido crescimento populacional e urbanização desordenada. Isso resulta em congestionamentos frequentes e impactos negativos na mobilidade urbana, causando perdas econômicas significativas. Estratégias de gestão de tráfego e investimentos em transporte público são cruciais para atenuar esse problema, como destacado pelo relatório “Mobilidade Urbana: Uma Visão Metropolitana do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada” (IPEA, 2019). A falta de infraestrutura viária adequada e políticas de mobilidade eficazes, junto com o crescimento desordenado das cidades e aumento da motorização, ampliam os congestionamentos, exigindo abordagens integradas para enfrentar esse desafio no Brasil.

Fortaleza, uma das principais cidades do Nordeste brasileiro, enfrenta desafios significativos relacionados ao congestionamento urbano devido ao rápido crescimento populacional e à infraestrutura viária insuficiente. Nos últimos anos, o percentual de vias congestionadas na cidade tem aumentado, refletindo a severidade do problema. De acordo com o *TomTom Traffic Index* (2025), aproximadamente 48 % das vias de Fortaleza sofrem congestionamentos diários durante os horários de pico. Atualmente, os horários de pico de trânsito ocorrem principalmente das 7h às 9h pela manhã e das 17h às 19h à tarde, quando as vias principais e as regiões centrais da cidade enfrentam maior congestionamento devido ao

fluxo intenso de veículos.

O estudo adota uma abordagem multidisciplinar e integrada para preencher lacunas na compreensão dos congestionamentos em Fortaleza. Ao analisar as características espaciais e temporais, utilizando técnicas avançadas de coleta e análise de dados, busca-se oferecer insights valiosos para o planejamento urbano e políticas públicas de mobilidade (Silva; Santos, 2023). Essa pesquisa visa contribuir para a implementação de estratégias de gestão de tráfego e melhoria da qualidade de vida na cidade (Almeida *et al.*, 2021; Rodrigues; Ferreira, 2020).

Estudos anteriores destacam a importância de considerar tanto os padrões de deslocamento diário quanto às variações sazonais no fluxo de tráfego para desenvolver soluções eficazes (Martins *et al.*, 2019; Oliveira; Costa, 2018). Ao integrar dados geoespaciais e temporais, espera-se que este trabalho forneça uma base sólida para intervenções estratégicas em áreas críticas de congestionamento, promovendo uma mobilidade urbana mais eficiente e sustentável (Pereira *et al.*, 2021).

O emprego de metodologias avançadas para a obtenção e análise de dados, exemplificado principalmente pelo uso do pacote *hereR*, proporciona uma chance valiosa para examinar de forma precisa e atualizada a intensidade e a localização dos congestionamentos urbanos. Fundamentado em dados em tempo real, o *hereR* oferece funcionalidades para análise geoespacial, integração de dados de tráfego e modelagem de rotas, captando as complexidades da dinâmica do tráfego em cidades como Fortaleza. A avaliação temporal e espacial dos congestionamentos fornecerá uma compreensão maior de como o congestionamento em Fortaleza varia espacialmente em diferentes horários do dia e dias da semana e quais vias e regiões de Fortaleza apresentam os mesmos padrões espaço-temporais.

Por último, esta pesquisa ultrapassa as fronteiras de Fortaleza, destacando-se como um modelo aplicável a outras cidades do Brasil e a contextos urbanos ao redor do globo. Ao fornecer uma estrutura metodológica abrangente e insights específicos para Fortaleza, contribui para o avanço do conhecimento em mobilidade urbana e para a formulação de políticas mais eficazes em áreas urbanas em rápida expansão.

1.1 Problema de Pesquisa

O crescimento acelerado de Fortaleza, aliado à intensificação do uso do transporte motorizado individual, tem acentuado os problemas de congestionamento urbano, sobretudo nos horários de pico. Embora o tema da mobilidade seja amplamente discutido no Brasil, ainda é escassa a produção científica que investigue de forma integrada as dimensões temporal e

espacial dos congestionamentos em cidades brasileiras de grande porte. No caso específico de Fortaleza, observa-se uma ausência de estudos que explorem a distribuição espaço-temporal da fluidez viária com base em dados de alta frequência e cobertura geográfica ampla, o que dificulta o entendimento sobre como os congestionamentos se manifestam ao longo do dia e entre diferentes regiões da cidade.

Essa lacuna evidencia a necessidade de pesquisas que busquem compreender quais padrões espaço-temporais caracterizam os congestionamentos em Fortaleza, em que horários eles ocorrem com maior intensidade e quais segmentos viários apresentam comportamento crítico de forma recorrente. O problema central que orienta este trabalho, portanto, reside na falta de conhecimento sistematizado sobre a lógica espaço-temporal do tráfego urbano na capital cearense, o que compromete tanto o avanço teórico quanto a construção de diagnósticos mais precisos sobre a mobilidade local.

1.2 Questões de Pesquisa

Diante disso, surgem questões de pesquisa cruciais para entender os congestionamentos urbanos em Fortaleza. A intensidade do congestionamento é medida pelo *Jam Factor* obtidos do hereR e o índice de congestionamento (IC) pela relação entre o volume de tráfego e a capacidade da via como medidos pela Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC).

- a) Como a intensidade do congestionamento e a velocidade da via obtida do hereR se relaciona com o índice de congestionamento (IC) calculado para a Avenida José Bastos?
- b) Considerando a média horária, quais os horários com congestionamentos mais intensos em Fortaleza?
- c) Como os dias da semana influenciam na variação espaço-temporal dos congestionamentos no município de Fortaleza?
- d) Existe uma relação entre a intensidade do congestionamento e a velocidade de tráfego?
- e) Considerado os horários de maior e menor intensidade do congestionamento, quais vias são *outliers*, ou seja, quais bairros ou vias se destacam pela maior ou menor intensidade nos congestionamentos?
- f) Quantos grupos com padrões espaço-temporais semelhantes de congestionamento podem ser identificados nas vias de Fortaleza, considerando horários de maior e menor intensidade?

1.3 Justificativa

No contexto urbano de Fortaleza, a mobilidade enfrenta desafios significativos decorrentes do crescimento populacional acelerado, do aumento expressivo da frota de veículos e da infraestrutura viária insuficiente para atender à demanda crescente. Esses fatores resultam em congestionamentos frequentes que comprometem a qualidade de vida dos habitantes, elevam os custos operacionais do transporte e intensificam o estresse diário dos usuários do sistema viário. Ademais, os impactos ambientais associados, como a poluição atmosférica, reforçam a necessidade urgente de intervenções fundamentadas em análises rigorosas.

A compreensão detalhada da dinâmica dos congestionamentos em Fortaleza requer uma abordagem que combine análise espacial e temporal dos fluxos de tráfego, possibilitando a identificação precisa de padrões, horários de maior intensidade e áreas críticas. Essa abordagem possibilita um diagnóstico preciso dos gargalos existentes, servindo como base para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias de gestão viária mais eficientes.

Neste contexto, a plataforma *HERE Technologies* destaca-se como ferramenta fundamental para a obtenção de dados de tráfego em tempo real, com alta cobertura e detalhamento espacial. A disponibilização de indicadores como velocidade média, fator de congestionamento (Jam Factor), fluxo e níveis de confiança viabiliza a captura das variações temporais e espaciais do tráfego urbano com elevada resolução. O acesso a essa base de dados robusta permite aplicar métodos estatísticos e geoespaciais avançados, resultando em análises mais precisas e fundamentadas da mobilidade na capital cearense.

Além de atender às demandas específicas de Fortaleza, a metodologia adotada nesta pesquisa está alinhada com modelos de análise de mobilidade urbana que contemplam características comuns a diversas cidades latino-americanas que vivenciam processos similares de urbanização e mobilidade desigual. A modelagem avançada para o roteamento de veículos fretados e o planejamento do transporte coletivo, conforme proposto por Oliveira et al. (2022), exemplifica a relevância de métodos quantitativos e computacionais para resolver problemas complexos de tráfego, indicando que abordagens estruturadas e replicáveis podem oferecer soluções eficazes adaptáveis a diferentes contextos urbanos.

Assim, este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre mobilidade urbana em Fortaleza, propondo um arcabouço metodológico que favorece a sustentabilidade, a resiliência e a adequação das intervenções às particularidades territoriais da cidade, promovendo uma mobilidade mais integrada e eficiente.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Investigar a dinâmica temporal e espacial dos congestionamentos no município de Fortaleza durante os horários com maior e menor intensidade de congestionamentos e ao longo dos dias da semana, com o intuito de fornecer subsídios para o aprimoramento das políticas públicas de mobilidade urbana.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Coletar dados de congestionamento em Fortaleza utilizando o pacote *hereR* em conjunto com o workflow do Github, para obter informações de 15 minutos e horária sobre a intensidade e localização dos congestionamentos e a velocidade de condução dos veículos.
2. Relacionar os dados obtidos do pacote *hereR* com o Índice de Congestionamento (IC) e com a velocidade média (km/h) para a Avenida José Bastos.
3. Analisar a variabilidade horária na intensidade dos congestionamentos, como medido pelo *Jam Factor* do *hereR*, para todas as vias de Fortaleza.
4. Analisar a variabilidade diária ao longo da semana na intensidade dos congestionamentos, como medido pelo *Jam Factor* do *hereR*, para todas as vias de Fortaleza.
5. Considerando os horários de maior e menor intensidade dos congestionamentos avaliar as vias que são *outliers*, isto é, que diferem das demais pelo seu maior ou menor valor do *Jam Factor*.
6. Gerar e avaliar os agrupamentos espaço-temporais da intensidade dos congestionamentos por meio da análise do Índice de Moran, considerando os horários e maior e menor intensidade dos congestionamentos.

1.5 Estrutura do Trabalho

Além desta introdução inicial, o presente estudo é composto por outros quatro capítulos, cada um destinado a uma investigação minuciosa de aspectos específicos relacionados ao tema em análise. Estes capítulos subsequentes foram organizados de forma a oferecer uma compreensão abrangente da dinâmica dos congestionamentos urbanos em Fortaleza, abordando diversas perspectivas e aspectos-chave pertinentes para a pesquisa. Nos

próximos capítulos, será examinada a variabilidade tanto espacial quanto temporal dos congestionamentos na capital cearense, Fortaleza, com base em dados empíricos de fluxo de tráfego. Cada seção será dedicada a uma análise detalhada desses tópicos, proporcionando uma visão mais abrangente e fundamentada sobre o problema em questão.

O segundo capítulo deste trabalho consiste em uma revisão abrangente da literatura sobre congestionamentos urbanos, incluindo conceitos fundamentais, dinâmica temporal e espacial, métodos de coleta de dados, uso de APIs para análise, técnicas estatísticas e a utilização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) nos estudos espaço-temporais, permitindo a integração e visualização de dados geográficos ao longo do tempo e do espaço. Esses sistemas são amplamente utilizados em diversas áreas, como saúde pública, gestão ambiental e planejamento urbano, proporcionando insights essenciais para a tomada de decisões informadas e estratégicas.

O terceiro capítulo aborda os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa sobre os congestionamentos em Fortaleza, detalhando os métodos de coleta de dados, o pré-processamento dos dados, e os métodos para a análise temporal e espacial dos congestionamentos.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados da análise dos congestionamentos em Fortaleza, incluindo a validação realizada para a Avenida José Bastos e a análise da dinâmica temporal e espacial dos congestionamentos em Fortaleza.

Por fim, são apresentadas as conclusões da pesquisa, destacando as principais descobertas sobre os congestionamentos em Fortaleza, suas implicações para o planejamento urbano e a gestão de tráfego, e fornecendo recomendações para pesquisas futuras. Adicionalmente, há também a inclusão de apêndices que desempenharam um papel significativo no desenvolvimento da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção do trabalho será apresentada a revisão bibliográfica dos temas estudados neste projeto. Será dividida por temática abordada, servindo inclusive como fundamentação teórica para o método, tal como justificativa.

Haverá uma seção sobre os congestionamentos, apresentando conceitos e teorias sobre os mesmos; outra quanto a dinâmica dos congestionamentos urbanos, abordando seu impacto na mobilidade, economia e qualidade de vida; as técnicas de coleta de dados, indicadores de congestionamento e o uso de API's para o monitoramento do congestionamento; e, por fim, uma seção onde serão abordados os conceitos de SIG e as ferramentas de análise espacial e temporal, destacando a importância da análise estatística para entender os padrões dos congestionamentos por meio de análises de autocorrelação espacial, agrupamentos e a geovisualização de dados espaciais, fundamentais para o planejamento urbano e a segurança. Adicionalmente, a análise de rede será apresentada como uma ferramenta poderosa para estudar sistemas de transporte complexos, facilitando a compreensão dos fenômenos dinâmicos e a tomada de decisões informadas.

2.1 Congestionamentos e Dinâmica dos Congestionamentos Urbanos

Os congestionamentos urbanos configuram um desafio multifacetado que impacta diretamente a mobilidade, a economia, a qualidade de vida e o meio ambiente nas grandes cidades. Eles ocorrem quando o volume de veículos excede a capacidade das vias, provocando lentidão e paralisações no trânsito. Essa situação complexa resulta da interação de diversos fatores, tais como o número crescente de veículos, limitações da infraestrutura viária, condições climáticas e comportamento dos motoristas.

A compreensão da dinâmica dos congestionamentos demanda a análise integrada de suas variações espaciais e temporais, permitindo identificar padrões recorrentes, horários críticos e áreas de maior vulnerabilidade. Diferentes abordagens teóricas têm sido propostas, desde o estudo das interações microscópicas entre veículos até a influência de políticas públicas e a estrutura das redes de transporte, que impactam a propagação dos engarrafamentos. Nesse sentido, estudos recentes enfatizam a importância de abordagens que utilizem conjuntos de dados variados e métodos analíticos sofisticados para prever, detectar e analisar os níveis de congestionamento, considerando suas vantagens e limitações para a formulação de políticas públicas eficientes (Jilani et al., 2023).

Os impactos dos congestionamentos vão além do tempo perdido no trânsito, incluindo aumentos nos custos operacionais do transporte e efeitos ambientais negativos, como a poluição do ar, que afetam a saúde pública e o ecossistema urbano. Diante disso, políticas públicas e estratégias de gestão de tráfego que promovam o transporte coletivo, o compartilhamento de veículos e o uso de tecnologias de informação, como sistemas inteligentes de transporte, têm se mostrado fundamentais para mitigar os congestionamentos e promover uma mobilidade mais sustentável.

Estudos recentes destacam a importância de considerar simultaneamente os aspectos espaciais, temporais e ambientais dos congestionamentos para o desenvolvimento de intervenções eficazes. A integração desses elementos contribui para um entendimento mais profundo dos fenômenos e subsidia a formulação de políticas públicas e soluções tecnológicas adaptadas às especificidades das cidades contemporâneas.

2.2 Interação Infraestrutura Urbana e Mobilidade: Impactos e Estratégias

No contexto da interação entre infraestrutura urbana e mobilidade, as pesquisas de Torres e Lima (2019) e Silva e Sousa (2020) oferecem resultados sobre como o design viário e a infraestrutura impactam diretamente os congestionamentos urbanos. Torres e Lima (2019) destaca a importância crucial do planejamento geométrico das vias, enfatizando que elementos como a largura das faixas e as interseções influenciam significativamente a eficiência do tráfego urbano, sendo essenciais para minimizar os congestionamentos. Por outro lado, Silva e Sousa (2020) analisam a complexidade da infraestrutura viária, considerando variáveis como número de faixas e a presença de rotatórias e semáforos, sublinhando como esses fatores afetam diretamente a fluidez do tráfego e a ocorrência de congestionamentos.

Em paralelo, González *et al.* (2021) exploram a relação entre uso do solo e mobilidade urbana, evidenciando como fatores como densidade populacional e localização de centros comerciais influenciam os padrões de deslocamento e, consequentemente, os níveis de congestionamento nas cidades. Eles sublinham a necessidade de políticas integradas que promovam um uso sustentável do solo para enfrentar os desafios de mobilidade urbana.

Por sua vez, Johnson *et al.* (2020) oferecem uma perspectiva ampla sobre como políticas de ordenamento territorial e densidade populacional podem moldar a mobilidade urbana, defendendo uma abordagem holística que integre planejamento urbano e transporte para reduzir congestionamentos e promover uma mobilidade sustentável. Suas conclusões destacam a importância de considerar tanto a infraestrutura viária quanto o uso do solo no

desenvolvimento de políticas urbanas eficazes que visem melhorar a qualidade de vida nas áreas urbanas, reduzindo o impacto negativo dos congestionamentos.

Ao considerar essas diferentes visões, não apenas se aprofunda a compreensão dos elementos que afetam os congestionamentos urbanos, mas também se reforça o alicerce para a formulação de políticas públicas integradas. É crucial adotar uma abordagem fundamentada em evidências científicas para guiar o planejamento urbano e de transporte, com o objetivo de promover cidades mais inclusivas, sustentáveis e com uma mobilidade urbana eficaz e justa.

2.3 Análise de Congestionamentos

2.3.1 Coleta de Dados

A coleta de dados *in situ* desempenha um papel crucial na análise e compreensão dos congestionamentos de tráfego urbano, fornecendo informações detalhadas e em tempo real sobre as condições das vias e o fluxo de veículos. Esses dados são fundamentais para desenvolver estratégias eficazes de gestão de tráfego e melhorar a mobilidade urbana. Um estudo recente de Johnson *et al.* (2022) explorou diversas técnicas de coleta de dados *in situ*, incluindo sensores de tráfego, câmeras de monitoramento e dispositivos de contagem veicular. Eles destacam que a integração dessas tecnologias permite uma visão holística das condições de tráfego, facilitando a identificação de pontos críticos de congestionamento e apoiando a tomada de decisões informadas para sanar esses problemas.

Outra pesquisa relevante é a de Rezaei, Azarmi e Pour Mir (2021), que investigaram o uso de tecnologias avançadas de coleta de dados *in situ*, com destaque para sistemas de monitoramento viário por vídeo integrados às infraestruturas urbanas. O estudo propôs um sistema de detecção e rastreamento de veículos utilizando uma única câmera para capturar dados como volume de tráfego, padrões de fluxo, velocidades médias e trajetórias em 3D. Tais informações são fundamentais para avaliar a eficiência das vias e subsidiar o planejamento de intervenções que promovam maior fluidez no tráfego urbano, contribuindo significativamente para a redução dos congestionamentos.

Convém destacar que um estudo recente (Zhang *et al.*, 2023) utilizou dados de tráfego em tempo real para desenvolver um modelo preditivo de congestionamentos urbanos. A abordagem combinou aprendizado de máquina com dados espaciais e temporais para prever ocorrências e impactos do congestionamento, demonstrando precisão e viabilidade prática. Esses resultados indicam que previsões proativas podem apoiar medidas antecipadas para

aliviar congestionamentos e promover uma gestão mais eficiente e sustentável do tráfego urbano.

Por fim, o estudo de Chen *et al.* (2020) investigou a importância da integração de dados coletados in situ com sistemas de informação geográfica para uma análise espacial detalhada dos congestionamentos. Eles discutem como essa abordagem permite identificar padrões geoespaciais nos congestionamentos e entender melhor as interações entre as características das vias, o uso do solo e os fluxos de tráfego. Essa integração é crucial para planejar infraestruturas viárias mais eficientes e sustentáveis, adaptadas às demandas dinâmicas das cidades modernas.

2.3.2 Indicadores de Congestionamentos

Calcular a intensidade do congestionamento a partir do volume de tráfego envolve analisar a relação entre a demanda de tráfego (veículos/hora) e a capacidade da via (número máximo de veículos que podem trafegar por hora em condições ideais) (Lomax *et al.*, 1997). Essa relação permite identificar quando o tráfego ultrapassa a capacidade da infraestrutura, gerando congestionamentos. A relação Volume/Capacidade (V/C) é a métrica mais direta para estimar a intensidade do congestionamento (Equação 01) (Transportation Research Board, 2000). Valores abaixo de 0,5 indicam um tráfego fluido (sem congestionamento), entre 0,5 e 1,0 com risco de congestionamento e acima de 1,0 com congestionamento crítico.

$$Intensidade (V/C) = \frac{Volume\ de\ Tráfego}{Capacidade\ da\ Via} \quad (01)$$

Outras métricas incluem o Nível de Serviço (LOS), que classifica a qualidade do tráfego em uma escala de A a F, baseada na razão V/C e em outros fatores como velocidade e densidade (Transportation Research Board, 2000). Também pode-se obter alguma indicação de congestionamento pelo cálculo da densidade (veículos/km), a qual é calculada por meio da divisão da densidade de veículos pela velocidade média. Há também o índice de congestionamento, calculado considerando o volume observado e o de referência.

O volume de referência (ou volume de tráfego de referência) é um parâmetro crítico para avaliar a intensidade de congestionamentos, pois representa o volume de tráfego esperado em condições ideais de fluxo (sem interferências como congestionamentos, acidentes ou eventos) (Lomax *et al.*, 1997). Esse valor serve como base para comparar com o volume observado em situações reais. Pode-se calcular o volume de referência como uma porcentagem

da capacidade da via (em veículos/hora), que é o volume máximo que uma via pode suportar em condições ideais. Também pode-se determinar o volume de referência a partir de dados históricos de tráfego, isto é, a média de volumes observados em períodos de fluxo livre (ex.: horários fora do pico, finais de semana ou períodos sem eventos).

A principal variável para o cálculo da intensidade ou do índice de congestionamento é a capacidade da via, a qual é essencial para entender quantos veículos podem trafegar por uma estrada, rua ou avenida em condições ideais (Roess *et al.*, 2010). A capacidade varia conforme o tipo de via, sinalização, largura das faixas e outros fatores. O HCM (Manual de Capacidade de Rodovias) é a referência global para calcular a capacidade de vias (Transportation Research Board, 2000). Ele classifica as vias em categorias (ex.: urbanas, rodovias) e considera fatores como semáforos, interseções e comportamento dos motoristas (Equação 02).

$$C = N \times C_0 \times f_w \times f_{HV} \times f_p \quad (02)$$

Onde:

C : Capacidade total da via (veículos/hora).

N : Número de faixas de tráfego.

C_0 : Capacidade base por faixa (veículos/hora/faixa) – varia conforme o tipo de via (ex.: 1.900 veículos/hora/faixa para vias urbanas).

f_w : Fator de ajuste para largura da faixa (ex.: 0,96 para faixas de 3,3 m).

f_{HV} : Fator de ajuste para veículos pesados (ex.: 0,95 se 5% dos veículos forem caminhões)

f_p : Fator de ajuste para motoristas (ex.: 0,85 para áreas com muitos motoristas inexperientes).

A capacidade base por faixa (ou capacidade teórica) é o número máximo de veículos que podem trafegar por uma faixa de trânsito em condições ideais (sem interferências como semáforos, interseções ou veículos lentos). Segue uma tabela de referência baseada no Highway Capacity Manual (HCM) e em padrões internacionais (Quadro 01).

Quadro 01 – Capacidade base por faixa ou teórica obtida do HCM

Capacidade Base por Faixa (veículos/hora/faixa)			
Tipo de Via	Capacidade Base (veic./h/faixa)	Exemplo em Fortaleza	Considerações
Rodovia/Rota Expressa	2.000 - 2.400	Via Estruturante (Av. Washington Soares)	Velocidade alta (80-100 km/h), fluxo contínuo.
Via Arterial Urbana	1.600 - 1.900	Av. Santos Dumont, Av. Aguanambi	Semáforos espaçados, velocidade média (50-60 km/h).
Via Coletora	1.400 - 1.600	Av. Senador Virgílio Távora	Mais semáforos e acesso a comércio.
Via Local	1.000 - 1.300	Ruas residenciais (ex.: Aldeota)	Muitas interseções e pedestres.
Faixa Exclusiva para Ônibus	800 - 1.200	Corredores de BRT (ex.: Antônio Sales)	Capacidade varia com frequência de paradas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O Fator de Ajuste para Largura da Faixa (f_w) ajusta a capacidade da via de acordo com a largura das faixas de tráfego, já que faixas mais estreitas reduzem a velocidade e aumentam a hesitação dos motoristas, impactando diretamente a capacidade (Quadro 02).

Quadro 02 – Fator de Ajuste para Largura da Faixa obtido do HCM

Referência para f_w (vias urbanas)		
Largura da faixa (m)	Fator de ajuste (f_w)	Impacto na capacidade
$\geq 3,6$	1	Nenhum ajuste (ideal)
3,3	0,97	Redução de 3%
3	0,91	Redução de 9%
2,7	0,85	Redução de 15%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No *Highway Capacity Manual* (HCM), o Fator de Ajuste para Veículos Pesados (f_{HV}) é calculado com base na proporção de veículos pesados (caminhões, ônibus etc.) na via e no Equivalente de Automóveis de Passageiros (EAT) desses veículos. O EAT representa quantos carros de passeio um veículo pesado "equivalente" ocupa em termos de espaço e impacto no fluxo. O Equivalente de Automóveis de Passageiros no HCM varia entre 2,0 e 3,0 (Quadro 03).

Quadro 03 – Equivalente de Automóveis de Passageiros obtido do HCM

Fator f_{HV} para EAT = 2,0 (Terreno Plano)			
%Veículos pesados	P_{HV}	f_{HV}	Redução da Capacidade
1%	0,010	0,99	-1,00%
2%	0,020	0,98	-2,00%
3%	0,030	0,971	-2,90%
4%	0,040	0,962	-3,80%
5%	0,050	0,952	-4,80%
6%	0,060	0,943	-5,70%
7%	0,070	0,935	-6,50%
8%	0,080	0,926	-7,40%
9%	0,090	0,917	-8,30%
10%	0,100	0,909	-9,10%
15%	0,150	0,87	-13,00%
20%	0,200	0,833	-16,70%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O Fator de Ajuste para Motoristas (f_p) ajusta a capacidade da via de acordo com características específicas da população de motoristas, como experiência, familiaridade com a via e comportamento ao volante. (Quadro 04). O f_p reflete como o comportamento dos motoristas impacta a capacidade da via. Por exemplo: Motoristas experientes e locais: Mantêm velocidades estáveis e menor distância entre veículos ($f_p \approx 1,0$); Motoristas turistas ou inexperientes: Geram maior variabilidade de velocidade e reduzem a capacidade ($f_p < 1,0$).

Quadro 04 – Fator de Ajuste para Motoristas (f_p) obtido do HCM

Referência para f_p			
Tipo de motorista	Exemplo de cenário	Fator f_p	Impacto na capacidade
Motoristas experientes/locais	Vias urbanas com tráfego regular (ex.: avenidas principais de Fortaleza).	1,00	Nenhum ajuste.
Mistura de motoristas	Vias com tráfego misto (locais e turistas).	0,90-0,95	Redução de 5%-10%
Alta proporção de motoristas idosos	Áreas residenciais ou próximas a hospitais.	0,85-0,90	Redução de 10%-15%
Motoristas turistas/inexperientes	Vias próximas a pontos turísticos (ex.: Praia de Iracema).	0,80-0,85	Redução de 15%-20%
Condições adversas (noite/chuva)	Baixa visibilidade ou pista molhada.	0,75-0,85	Redução de 15%-25%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A intensidade do congestionamento de tráfego é geralmente determinada por um índice de congestionamento de tráfego (ITF), que é a relação entre o volume de tráfego em uma via e a capacidade da via. Um valor de 1,0 indica que o tráfego está fluindo livremente, enquanto

um valor acima de 1,0 indica que o tráfego está congestionado. Por exemplo, um valor de 1,5 indica que o volume de tráfego é 50% maior do que a capacidade da via.

2.3.3 APIs para Monitoramento de Tráfego

Nos últimos anos, o uso de dados de tráfego colaborativos tem desempenhado um papel crucial na gestão do congestionamento urbano em todo o mundo. Plataformas como o Google Traffic e o hereR utilizam informações de localização de usuários e sensores para mapear as condições de tráfego em tempo real. Globalmente, essas tecnologias têm sido fundamentais para reduzir os impactos do congestionamento em grandes cidades. Em Londres, o relatório Global Traffic Scorecard (INRIX, 2022) apontou que motoristas que usaram aplicativos de navegação em tempo real, como Google Maps, evitaram até 20% de atrasos em horários de pico, graças a rotas otimizadas dinamicamente. Esses dados são essenciais para autoridades de transporte que buscam soluções baseadas em evidências para melhorar a mobilidade urbana.

No Brasil, o impacto dessas tecnologias é igualmente significativo, principalmente em grandes metrópoles como São Paulo e Rio de Janeiro. O Google Traffic coleta dados anônimos de milhões de dispositivos móveis conectados, oferecendo uma visão precisa das condições de tráfego. Em São Paulo, um estudo realizado por Souza *et al.* (2023) revelou que essa plataforma pode fornecer previsões com uma precisão de até 90% em horários de pico, auxiliando na gestão de tráfego e na tomada de decisões estratégicas para reduzir os congestionamentos.

Além do Google Traffic, o hereR — uma plataforma de análise espacial desenvolvida a partir dos dados da HERE Technologies — tem se consolidado como uma importante ferramenta para o monitoramento e a análise da mobilidade urbana. Adotado por diversas cidades brasileiras, o hereR permite coletar e visualizar dados em tempo real sobre fluxo de veículos, integrando informações provenientes de sensores, dispositivos GPS, redes de telefonia e registros históricos de tráfego.

Essa integração de múltiplas fontes possibilita a construção de análises mais robustas e contextualizadas, contribuindo para a identificação de padrões de mobilidade e pontos críticos de congestionamento. Ao oferecer dados de alta resolução espacial e temporal, o hereR viabiliza diagnósticos precisos da dinâmica viária, essenciais para o planejamento urbano. Dessa forma, seu uso fortalece o papel da análise de dados como suporte à gestão

eficiente do espaço urbano e ao desenvolvimento de soluções sustentáveis para os problemas de mobilidade.

No contexto local, em Fortaleza, Ceará, o uso de tecnologias de monitoramento de tráfego tem sido aprimorado nos últimos anos, graças à integração de dados colaborativos e ferramentas de código aberto. A cidade, que é uma das capitais brasileiras com maior crescimento populacional, tem enfrentado desafios significativos em termos de mobilidade urbana. Para enfrentar esses desafios, a prefeitura de Fortaleza tem adotado tecnologias de monitoramento de tráfego baseadas em dados geoespaciais, como plataformas que integram informações em tempo real de sensores, GPS e dados históricos.

Essas ferramentas permitem a análise dinâmica das condições de tráfego e a implementação de medidas de gestão em tempo real. Segundo Silva e Almeida (2020), “ferramentas como o QGIS e dados do OpenStreetMap são essenciais para mapear áreas críticas de tráfego, permitindo uma análise dinâmica das condições e a implementação de medidas de gestão em tempo real para melhorar a circulação urbana” (p. 150).

Esses avanços não apenas melhoram a gestão do tráfego em tempo real, mas também são fundamentais para a elaboração de políticas públicas mais eficazes. Globalmente, a combinação de dados colaborativos e tecnologias de código aberto pode reduzir os custos de gestão de tráfego em até 30% (García *et al.*, 2023). No Brasil, essas tecnologias têm contribuído para a redução das emissões de gases de efeito estufa, um aspecto crítico na luta contra as mudanças climáticas. Em Fortaleza, a implementação dessas tecnologias está alinhada com os esforços locais para promover a sustentabilidade urbana e melhorar a qualidade de vida dos cidadãos. Como resultado, as autoridades locais têm desenvolvido estratégias mais eficazes para enfrentar os desafios da mobilidade urbana, tornando a cidade mais eficiente e ambientalmente responsável.

2.4 Técnicas Estatísticas para Análise de Congestionamentos

A análise estatística dos congestionamentos de tráfego desempenha um papel fundamental na compreensão dos padrões temporais e espaciais desses eventos complexos. Para isso, exploraremos dois estudos significativos que investigam técnicas estatísticas para analisar congestionamentos, fornecendo insights valiosos para aprimorar a gestão do tráfego e a eficiência do transporte urbano.

O dado coletado em campo mais utilizado na estimativa de congestionamentos é o dado de sensores rodoviários. Esses sensores, instalados em estradas e vias, capturam

informações em tempo real sobre o fluxo de veículos, velocidade e densidade do tráfego. Esses dados são essenciais para prever congestionamentos e otimizar a gestão do tráfego urbano.

No estudo de Silva e Santos (2023), uma extensa gama de métodos estatísticos foi examinada para analisar os padrões temporais e espaciais dos congestionamentos de tráfego. Desde modelos de séries temporais até análise de regressão espacial e métodos de *clustering*, os autores revisaram diversas abordagens para identificar tendências e padrões nos dados de tráfego. Sua pesquisa abrangente destaca a relevância das técnicas estatísticas avançadas na compreensão dos congestionamentos, ressaltando sua importância na tomada de decisões baseadas em evidências para a gestão eficaz do tráfego urbano.

Por outro lado, Souza e Costa (2021) concentraram-se em modelos estatísticos para avaliar o impacto da infraestrutura viária nos congestionamentos de tráfego. Ao explorar uma variedade de técnicas, como modelos de regressão, análise de variância espacial e modelos de redes neurais, eles buscaram quantificar a influência de fatores como número de faixas, geometria da via e presença de semáforos nos níveis de congestionamento. Os autores enfatizam a importância desses modelos na orientação de políticas de investimento em infraestrutura viária e na melhoria da eficiência do transporte urbano.

Essa abordagem científica e técnica desempenha um papel crucial na abordagem dos desafios complexos associados à mobilidade urbana ao permitir, por meio de evidências empíricas, a formulação de políticas públicas mais precisas e eficientes. Os métodos estatísticos aplicados à análise do tráfego possibilitam a identificação de padrões recorrentes de congestionamento, horários críticos e áreas mais afetadas, permitindo que os gestores priorizem intervenções com base em dados concretos. De forma complementar, a integração de análises espaciais com modelos preditivos facilita a simulação de cenários futuros e o planejamento de soluções de longo prazo, como a redistribuição do fluxo viário, reconfiguração de interseções e otimização semafórica. Essa capacidade de antecipar e mensurar os efeitos das intervenções influencia o uso racional dos recursos públicos e a redução do tempo de deslocamento, dos custos logísticos e das emissões de gases poluentes, promovendo um sistema de transporte mais eficiente, resiliente e sustentável.

2.5 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas poderosas, amplamente utilizadas em áreas como planejamento urbano, ciências ambientais e saúde pública. Estudos recentes destacam sua importância na análise espacial de dados de saúde,

essenciais para identificar padrões de doenças e apoiar políticas públicas (Smith *et al.*, 2022), e na gestão de recursos hídricos, onde são cruciais para modelar a disponibilidade e a qualidade da água. Outras considerações indicam que os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são vitais na análise de riscos ambientais e desastres naturais, permitindo a previsão e mitigação de impactos, e na gestão de áreas protegidas, facilitando o monitoramento de habitats e a preservação de ecossistemas. Por exemplo, Wei, Han e Lang (2024) aplicaram uma combinação de sensoriamento remoto (RS) e SIG para avaliar o risco de desastres naturais sobre sítios de patrimônio cultural em Jinan, China — analisando enchentes, terremotos, deslizamentos e erosão, produzindo mapas de risco detalhados que orientam estratégias de prevenção e mitigação

Ferramentas como o QGIS desempenham um papel essencial ao integrar e analisar dados espaciais, oferecendo suporte estratégico para decisões informadas em diversas disciplinas. Na saúde pública, permitem mapear surtos de doenças e identificar padrões de disseminação; na gestão de recursos naturais, auxiliam na modelagem de variáveis críticas, como disponibilidade hídrica e riscos de desastres ambientais; e na conservação da biodiversidade, são utilizadas para monitorar ecossistemas e implementar estratégias de preservação. Esses sistemas são fundamentais para enfrentar desafios complexos com base em evidências, promovendo ações mais eficazes e sustentáveis.

Além dessas aplicações, os SIG são cruciais no planejamento e gestão de infraestruturas urbanas. Estudos mostram que eles são fundamentais para analisar a acessibilidade urbana e orientar o desenvolvimento sustentável (Roberts; Lee, 2023), além de permitirem uma compreensão detalhada das dinâmicas de uso do solo, apoiando decisões sobre expansão urbana e conservação de áreas verdes. Outro domínio em expansão é a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) no planejamento de transporte e logística, onde essas plataformas são empregadas para otimizar rotas de distribuição, reduzir custos operacionais e mitigar impactos ambientais por meio de análises espaciais avançadas.

Adicionalmente, os SIG são fundamentais para a avaliação da vulnerabilidade urbana, permitindo a identificação de áreas suscetíveis a desastres naturais, como inundações e deslizamentos, bem como a análise de vulnerabilidades socioeconômicas, subsidiando a elaboração de estratégias de resiliência e adaptação climática (Adams; White, 2021). Esses estudos evidenciam a versatilidade dos SIG, com ênfase em soluções como o QGIS, na integração de dados geoespaciais multifacetados, viabilizando a gestão sustentável de recursos urbanos e naturais. Essa capacidade é crucial para enfrentar desafios complexos, como a

urbanização acelerada e as mudanças climáticas, promovendo o desenvolvimento sustentável e a melhoria da qualidade de vida em contextos urbanos.

2.5.1 Análise Espaço-Temporal

A análise estatística das variáveis de tráfego, como *speed* (velocidade média) e *jam factor* (fator de congestionamento), constitui uma ferramenta essencial para a compreensão quantitativa das flutuações temporais e espaciais no comportamento do tráfego urbano. Essas variáveis, quando analisadas de forma agregada por bairro, dia da semana e horário do dia, permitem a identificação de padrões recorrentes e a caracterização de cenários específicos de mobilidade.

A agregação dos dados por bairro viabiliza a segmentação da rede em trechos de maior e menor intensidade de tráfego, enquanto a estratificação por dia da semana e horário do dia possibilita a detecção de fenômenos como picos de congestionamento em horários de pico (*rush hours*) e variações sazonais. Métodos de agregação estatística, como *Dissolve with stats* e *Group stats*, são empregados para sintetizar os dados de forma eficiente, extraindo métricas descritivas como médias, medianas e desvios padrão. Essas métricas fornecem insights valiosos sobre a mobilidade urbana, como a distribuição das velocidades médias, a frequência e intensidade de congestionamentos, e a variabilidade do desempenho viário em diferentes condições temporais.

Adicionalmente, a análise espacial em estudos geográficos e ambientais depende da definição precisa das relações espaciais entre unidades geográficas. Nesse contexto, a matriz de proximidade é fundamental para modelar a dependência espacial, representando as conexões ou vizinhanças entre os elementos espaciais por meio de uma matriz binária ou ponderada, na qual cada elemento indica a proximidade ou adjacência entre duas unidades.

Existem diferentes abordagens para a definição de matrizes espaciais, destacando-se aquelas baseadas na proximidade geográfica, na distância euclidiana entre unidades e em critérios topológicos. Dentre essas, um dos métodos mais utilizados é o critério de contiguidade, segundo o qual duas unidades são consideradas vizinhas quando compartilham uma fronteira comum. Esse tipo de matriz é particularmente eficaz para captar relações espaciais diretas, sendo amplamente empregado em análises de autocorrelação espacial e modelagem de fenômenos que se espalham de forma contínua no espaço.

O Índice de Moran é uma medida global de autocorrelação espacial que quantifica a similaridade entre valores observados em locais próximos. Introduzido por Patrick Moran em

1950, este índice permite identificar padrões espaciais, como agrupamentos ou dispersões. Valores positivos indicam autocorrelação espacial positiva (aglomeração), valores próximos de zero sugerem ausência de autocorrelação, e valores negativos indicam padrões de dispersão espacial. Formalmente, o índice é calculado a partir da matriz de pesos espaciais (w_{ij}), que define a proximidade entre as localidades, relacionando os valores observados em cada ponto à média geral da amostra. A seguir, segue a Equação 03, que demonstra o cálculo desse índice:

$$I = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (03)$$

Onde N é o número de observações, x_i e x_j são os valores das variáveis nos locais i e j , $\bar{x}$ é a média dos valores, e w_{ij} é uma matriz de pesos espaciais que define a proximidade entre as localidades.

A matriz de proximidade segundo o critério "*Queen*" (Rainha) considera vizinhas duas unidades que compartilham pelo menos um ponto em comum, seja um lado ou um vértice — similar ao movimento da rainha no xadrez. Esse critério é mais abrangente que o "*rook*" (torre), que contempla apenas unidades com lados em comum. A matriz queen promove maior conectividade espacial, o que impacta diretamente na análise de autocorrelação espacial pelo Índice de Moran.

Assim, a integração entre a matriz de proximidade do tipo *Queen* e o Índice de Moran viabiliza uma análise aprofundada e metodologicamente consistente da estrutura espacial dos dados, permitindo a identificação precisa da intensidade e da localização de agrupamentos espaciais ou padrões geograficamente autocorrelacionados. Tal abordagem constitui uma ferramenta analítica de elevada relevância em campos como a epidemiologia, o planejamento urbano, a ecologia espacial e a geografia quantitativa.

Em acréscimo, a análise estatística espacial pode incorporar o uso do *Box Map*, uma representação cartográfica baseada na lógica do *box plot*, que evidencia diretamente no espaço geográfico os valores atípicos de uma variável contínua, como o nível de congestionamento viário. Essa técnica permite identificar vias ou bairros com comportamento discrepante em relação à mediana, destacando anomalias estruturais que podem sinalizar falhas na mobilidade, efeitos de intervenções urbanas ou padrões não explicados por variáveis usuais. Ao combinar estatística descritiva e espacialização, o *Box Map* torna-se uma ferramenta eficaz para mapear e priorizar segmentos críticos, fortalecendo a análise espaço-temporal e a tomada de decisão no planejamento urbano baseado em evidências.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo delineou de forma rigorosa os materiais e métodos empregados na investigação da dinâmica espacial e temporal dos congestionamentos em Fortaleza. A obtenção dos dados de velocidade média de fluxo e do fator de congestionamento em tempo real ocorreu por meio do pacote *hereR*, com apoio de um script automatizado desenvolvido na linguagem R e disponibilizado publicamente no GitHub (Apêndice A), o qual viabilizou a coleta sistemática dos dados entre os dias 5 e 12 de junho de 2024.

Visando a análise temporal, utilizou-se um workflow automatizado disponível no GitHub para realizar o download dos dados da plataforma HERE a cada 15 minutos nos horários de pico, das 7h às 9h e das 17h às 19h, e a cada 1 hora nos demais períodos, durante os dias 5 a 12 de junho de 2024 (Apêndice B), conforme a estrutura proposta por AEA2024 (2024). A validação da velocidade de tráfego e da intensidade do congestionamento, como medido pelo fator de congestionamento (*Jam Factor*) do *hereR*, foi realizada para a Avenida José Bastos, utilizando os dados de velocidade, volume de tráfego e número de veículos da Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC).

A preparação, o processamento e a análise temporal e espacial da velocidade média e do fator de congestionamento foram conduzidos por meio dos softwares *RStudio* 2023.06.2+561 (*RStudio*, 2023), QGIS v3.34.11 (QGIS Development Team, 2024) e *GeoDa* 1.20.0.6 (Ansaldo; Rey, 2021). A validação para a Av. José Bastos e a elaboração dos gráficos foi realizada no Microsoft Excel. O fluxograma na Figura 01 mostra as etapas descritas acima e detalhadas nas subseções.

Figura 01 – Fluxo Metodológico para Análise Espacial e Temporal de Congestionamentos (Fortaleza - CE)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.1 Área de Estudo

A análise dos congestionamentos em Fortaleza insere-se em um contexto de complexas transformações urbanas, refletindo a intersecção de questões socioeconômicas, territoriais e demográficas. Com uma população de aproximadamente 2,6 milhões de habitantes

(IBGE, 2022), Fortaleza reorganizou suas divisões administrativas em 12 regionais em 2020, objetivando uma melhor gestão dos territórios, os quais apresentam uma vasta gama de padrões de uso do solo.

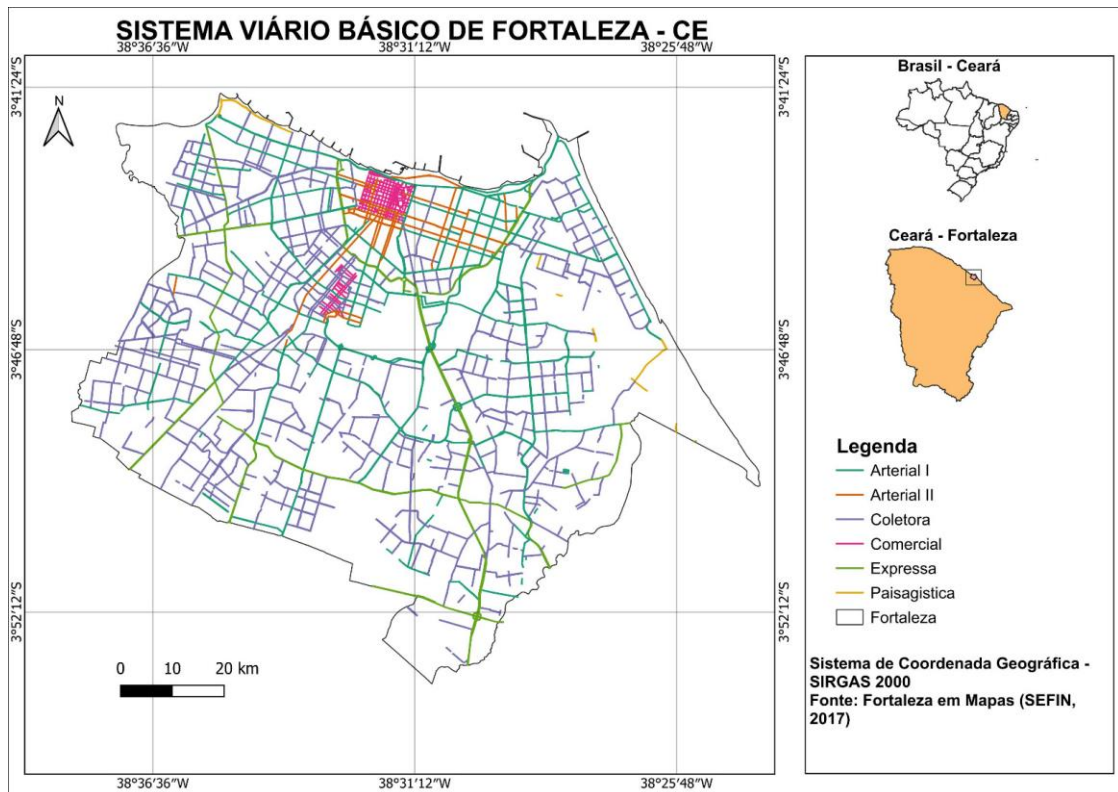
As desigualdades socioespaciais, profundamente arraigadas no tecido urbano, ampliam os desafios de mobilidade, particularmente em áreas periféricas que enfrentam déficits estruturais históricos e maior vulnerabilidade social. Essas disparidades exacerbam os problemas de tráfego e requerem uma investigação minuciosa da dinâmica dos congestionamentos, tanto em sua dimensão temporal quanto espacial, permitindo compreender as nuances do fluxo viário em diferentes contextos urbanos (Souza; Oliveira Neto, 2020; Pereira *et al.*, 2023).

Fortaleza possui uma malha viária extensa, com 53.334 trechos de vias cadastradas (Prefeitura de Fortaleza, 2023), das quais 786 (1,5%) foram selecionadas para este estudo, conforme ilustrado na Figura 02. Essa amostragem, definida pelas limitações técnicas do pacote hereR (Munterfinger, 2023), concentra-se nas vias de maior hierarquia funcional, como as avenidas Santos Dumont e Bezerra de Menezes.

Conforme demonstrado por Barrington-Leigh e Millard-Ball (2017), ferramentas de geolocalização frequentemente priorizam vias estruturantes devido à sua relevância para o fluxo metropolitano. Essa abordagem é respaldada por estudos anteriores (Pereira *et al.*, 2021), que identificaram que vias arteriais, embora numericamente minoritárias, são responsáveis por mais de 60% do volume de tráfego — como evidenciado em Fortaleza, segundo o Instituto de Planejamento de Fortaleza (IPLANFOR, 2022), que destaca o papel dessas vias na concentração dos deslocamentos urbanos.

A complexidade da malha viária fortalezense evidencia-se pela interdependência entre suas vias principais, o que se representa na Figura 02. Durante os horários de pico, a saturação desses eixos — agravada por acidentes e demanda excessiva — desencadeia efeitos em cascata. Pesquisas demonstram que incidentes pontuais elevam os tempos de deslocamento em até 300% (Souza; Oliveira Neto, 2020), comprometendo não apenas o corredor afetado, mas também toda a rede adjacente que recebe o fluxo desviado (Khattak *et al.*, 2016). Esse padrão, observado em cidades com morfologia urbana semelhante, reforça a importância de estudar vias que funcionam como nós críticos do sistema — cujas interrupções afetam a resiliência urbana como um todo. Ganin *et al.* (2017) demonstram que redes com alta eficiência sob condições normais podem ser estruturalmente frágeis: a perda de poucos nós centrais causa impactos sistêmicos significativos em desempenho e recuperação urbana.

Figura 02 – Mapa viário básico de Fortaleza, considerando as vias contempladas pelo hereR



Fonte: Elaborado pelo autor por meio de dados do hereR e informações da SEFIN (2025).

O Mapa Viário Básico de Fortaleza é uma representação essencial da infraestrutura de transporte da cidade, destacando diferentes tipos de vias que compõem a rede de mobilidade urbana. As vias expressas são destacadas como as principais artérias do tráfego, permitindo a rápida circulação de veículos entre diferentes áreas da cidade, com menor interferência de cruzamentos e acessos. As vias arteriais I conectam zonas de maior intensidade de tráfego, enquanto as vias arteriais II servem como elementos secundários de acesso, facilitando a circulação entre áreas menos centrais. Já as vias coletoras desempenham um papel crucial na distribuição do tráfego local, conectando bairros e facilitando o acesso às vias mais importantes. As vias comerciais são aquelas com maior concentração de atividades comerciais, frequentemente associadas ao maior fluxo de pedestres e veículos, enquanto as vias paisagísticas são projetadas para proporcionar uma experiência visual agradável, valorizando a integração com áreas verdes, praças e espaços públicos de lazer, contribuindo para o conforto ambiental e a qualidade de vida nos bairros residenciais.

O clima tropical semiárido de Fortaleza, caracterizado por chuvas concentradas nos meses de março e abril, exerce influência direta sobre a fluidez do tráfego urbano, uma vez que o aumento das precipitações tende a reduzir a visibilidade, comprometer a infraestrutura viária

e intensificar os congestionamentos (Funceme, 2022; Silva; Lima, 2021). Conforme Martinez *et al.* (2022), "o pico de chuvas entre março e abril em Fortaleza está diretamente associado ao aumento de alagamentos e à redução da mobilidade urbana, impactando negativamente o fluxo de veículos e ampliando os congestionamentos" (p. 130).

As precipitações intensas, embora concentradas em um curto espaço de tempo, frequentemente resultam em alagamentos em áreas críticas da cidade, como nas proximidades do Rio Cocó e ao longo da Avenida Raul Barbosa. Esses eventos afetam diretamente a capacidade de escoamento das vias, provocando lentidão adicional e até interrupção completa do tráfego, o que amplia a duração e a severidade dos congestionamentos (Pereira *et al.*, 2023).

O perfil dos deslocamentos diários dos habitantes de Fortaleza também desempenha um papel crucial na formação dos congestionamentos. Estudos recentes apontam que uma parcela significativa da população ainda utiliza veículos particulares como principal meio de transporte, apesar de iniciativas governamentais para promover o transporte coletivo e formas alternativas de mobilidade. O transporte público enfrenta desafios estruturais, como superlotação e frequentes atrasos, o que desestimula seu uso. Durante os horários de maior demanda, as vias que ligam as zonas periféricas ao centro da cidade se tornam sobrecarregadas, exacerbando os congestionamentos, predominantemente em áreas com infraestrutura subdimensionada para atender ao volume de tráfego (Souza; Oliveira Neto, 2020; Pereira *et al.*, 2023).

Intervenções recentes no planejamento urbano de Fortaleza, como as ações propostas pelo programa "Fortaleza 2040" (IPLANFOR), buscam reestruturar a mobilidade urbana a longo prazo. Iniciativas como a ampliação da rede de ciclovias e o incremento do transporte público visam à redução dos problemas atuais e antecipar soluções para o crescimento populacional futuro. No entanto, enquanto essas mudanças são implementadas, há um impacto inevitável no fluxo de tráfego, resultando em congestionamentos temporários, principalmente em áreas sujeitas a obras. Nesse sentido, a análise detalhada e contínua dos padrões de congestionamento é fundamental para avaliar e minimizar os impactos adversos dessas intervenções, fornecendo dados cruciais para a formulação de políticas públicas mais eficazes (Pereira *et al.*, 2023).

3.2 Dados

Para a análise da variabilidade espacial e temporal do tráfego em Fortaleza, foi adotada uma abordagem integrada, fundamentada no uso de dados provenientes da API hereR,

com ênfase em indicadores de desempenho específicos. Esses indicadores, que incluem "*speed*", "*speed_uncapped*", "*freeflow*", "*jam_factor*", "*confidence*" e "*traversability*", foram selecionados por sua capacidade de capturar nuances cruciais da dinâmica do tráfego urbano, possibilitando uma análise minuciosa das flutuações nos padrões de mobilidade. No entanto, para a análise espacial, considerou-se exclusivamente a variável *jam_factor*, por sua relevância direta na identificação de pontos críticos de congestionamento e na representação da intensidade da obstrução viária. O Quadro 05 apresenta as principais variáveis utilizadas para caracterizar o fluxo de tráfego em segmentos viários do presente estudo, realizado em Fortaleza.

Quadro 05 – Indicadores de tráfego veicular

Variável	Descrição	Unidade
<i>Speed</i>	Velocidade média do tráfego no segmento, limitada pelo máximo permitido (<i>speed limit</i>). Representa a velocidade real observada, considerando restrições regulatórias.	metros por segundo (m/s)
<i>speedUncapped</i>	Velocidade média do tráfego sem a imposição do limite regulatório. Permite avaliar a velocidade potencial do fluxo caso não houvesse restrições, sendo útil para análises comparativas.	metros por segundo (m/s)
<i>Freeflow</i>	Velocidade de referência em condições ideais, sem impedimentos (congestionamento, semáforos, etc.). Serve como parâmetro para avaliar a degradação do fluxo devido a interferências externas.	metros por segundo (m/s)
<i>jamFactor</i>	Índice de congestionamento, variando de 0.0 (tráfego livre) a 10.0 (bloqueio total, ex.: fechamento da via). Valores próximos a 10 indicam piora progressiva na fluidez.	adimensional
<i>Confidence</i>	Grau de confiabilidade dos dados de velocidade, variando de 0.0 (dados não confiáveis) a 1.0 (alta confiabilidade). Subdivisões: • $0.7 < \text{confidence} \leq 1.0$: dados em tempo real. • $0.5 < \text{confidence} \leq 0.7$: dados históricos. • $0.0 < \text{confidence} \leq 0.5$: velocidade assumida como igual ao limite regulatório (dados estimados). Valores ≥ 0.71 indicam fontes em tempo real, com confidence ≥ 0.75 representando alta confiança. Valores ≤ 0.70 são baseados exclusivamente em históricos.	adimensional
<i>Traversability</i>	Indicador de acessibilidade da via: • "open": via transitável. • "closed": via bloqueada. • "reversibleNotRoutable": via com direção reversível, mas não utilizável no momento.	categorico

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A agregação dos dados do OpenStreetMap (OSM) possibilita a obtenção de indicadores viários em formato vetorial do tipo linha, essenciais para a análise detalhada da malha urbana de Fortaleza. A utilização do shapefile dos Eixos Viários, dos limites dos Bairros de Fortaleza e do limite municipal permite a incorporação de informações cartográficas oficiais que enriquecem a caracterização espacial das vias, assegurando maior precisão na identificação

e nomeação dos segmentos viários. O uso do software QGIS favorece a manipulação e o tratamento desses dados geoespaciais, facilitando a combinação de múltiplas camadas de informação e a manutenção da integridade topológica da base cartográfica.

O Volume de Tráfego Diário (VTD), disponibilizado pela Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania de Fortaleza (AMC), representa um indicador quantitativo crucial para a avaliação da demanda sobre a infraestrutura viária. Associado ao cálculo do Índice de Congestionamento (IC), o VTD possibilita a mensuração da intensidade do tráfego e a identificação de áreas com saturação veicular elevada.

3.3 Pacotes computacionais

3.3.1 *R* pacote *hereR*

O *software* R, versão 4.3.1 (R Core Team, 2023), foi adotado como ambiente principal de programação estatística e manipulação de dados, destacando-se pela sua versatilidade e capacidade de integração com APIs externas. Em particular, empregou-se o pacote *hereR*, desenvolvido pela Here Technologies (2023), como ferramenta para realizar requisições diretas à API HERE. Essa integração permitiu a coleta automatizada e sistemática de dados de tráfego urbano, incluindo variáveis como velocidade média (*Speed*), velocidade livre (*Freeflow*), grau de congestionamento (*Jam_Factor*), confiança dos dados (*Confidence*) e travessabilidade (*Traversability*), em resoluções temporais de 15 minutos.

A manipulação, organização e higienização dos dados brutos extraídos da API foram conduzidas com os pacotes *dplyr* e *tidyr*, ambos pertencentes ao ecossistema *tidyverse*. O *dplyr* (Wickham et al., 2023) foi essencial para a aplicação de filtros condicionais, agrupamentos por intervalos temporais e sumarizações estatísticas que subsidiaram as análises quantitativas do tráfego. Já o *tidyr* (Wickham & Girlich, 2023) foi utilizado para reestruturar os dados em formatos adequados para visualizações e modelagens subsequentes, garantindo conformidade com o paradigma de dados "longos" amplamente adotado em análises espaço-temporais. Esse conjunto de ferramentas ofereceu controle refinado sobre o pré-processamento dos dados, contribuindo para análises mais precisas e replicáveis ao longo do estudo.

3.3.2 *GitHub*

O GitHub desempenhou um papel estratégico no gerenciamento e execução automatizada dos processos relacionados à coleta de dados no projeto. Por meio de sua funcionalidade de *workflow*, foi configurada a automação para baixar e salvar dados obtidos com o pacote *hereR* em intervalos regulares de 15 minutos ou 1 hora. Além disso, o GitHub foi utilizado como repositório para compartilhamento de scripts, códigos e do próprio *workflow*, promovendo transparência e colaboração entre os envolvidos no projeto, enquanto sua funcionalidade de versionamento permitiu o rastreamento de alterações nos scripts desenvolvidos em R, assegurando a reprodutibilidade das metodologias aplicadas. Para maior detalhamento, o script R está no Apêndice A, enquanto o *workflow* do GitHub configurado para o projeto está incluído no Apêndice B.

3.3.3 QGIS

O QGIS v3.34.11 foi empregado como uma ferramenta flexível para a manipulação e análise de dados geoespaciais, permitindo a associação dos dados do *hereR* com os nomes das vias obtidos dos Eixos Viários de Fortaleza e a agregação das informações das vias por bairro. Destaca-se, nesse processo, o cálculo das médias horárias e diárias das variáveis extraídas do *hereR*, que envolvem indicadores de tráfego como velocidade média e o fator de congestionamento.

O cálculo dessas médias viabiliza a suavização das variações momentâneas nos dados, fornecendo uma visão consolidada dos padrões temporais de tráfego tanto nas vias quanto nos bairros da cidade. Essa análise temporal detalhada é fundamental para compreender os comportamentos recorrentes ao longo do dia e identificar períodos críticos de congestionamento. A elaboração dos mapas temáticos com base nesses dados agregados facilita a visualização espacial das dinâmicas de tráfego, colaborando com a formulação de estratégias de planejamento urbano mais precisas e eficientes.

3.3.4 Microsoft Excel

O software Microsoft Excel, na versão 365 (*Microsoft Corporation*, 2023), foi fundamental no processo de validação do indicador Jam Factor obtido por meio do pacote *hereR*, ao permitir sua comparação com os dados fornecidos pela Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania de Fortaleza (AMC) para a Avenida José Bastos. O Excel foi utilizado para organizar os dados em planilhas estruturadas, elaborar gráficos de linha e dispersão,

permitindo a visualização clara de tendências e relações entre as variáveis. Ademais, possibilitou o cálculo de regressões lineares e da correlação de Pearson, a fim de quantificar o grau de associação entre as variáveis provenientes de fontes distintas.

O software também foi empregado na geração de histogramas, os quais evidenciaram a distribuição das variáveis e permitiram a identificação de padrões temporais de congestionamento. Paralelamente, o software R (*R Core Team*, 2023) colaborou na condução das análises estatísticas, sendo utilizado para verificar a consistência dos resultados obtidos no Excel, especialmente por meio da replicação dos modelos estatísticos. Dessa forma, a utilização integrada dessas ferramentas garantiu a confiabilidade dos dados analisados e proporcionou embasamento quantitativo robusto para a compreensão da dinâmica do tráfego no trecho em estudo.

3.3.5 GeoDA

O software GeoDa foi determinante na análise espacial dos dados de tráfego, destacando-se na geração do Box Map, que permite a identificação precisa de valores atípicos espaciais (*outliers*), e no cálculo do Índice de Moran, ferramenta estatística essencial para a mensuração da autocorrelação espacial. Desenvolvido pelo Centro de Análise Espacial da Universidade de Chicago, o GeoDa apresenta uma interface acessível que integra funcionalidades avançadas para a elaboração de mapas temáticos, gráficos espaciais e a aplicação de métodos quantitativos para a detecção e interpretação de padrões geográficos. Tais capacidades tornam o GeoDa uma ferramenta indispensável para análises rigorosas de estruturas espaciais, fomentando significativamente a compreensão da distribuição e concentração dos fenômenos de tráfego em contextos urbanos.

3.4 Métodos

3.4.1 Aplicação do R e do Pacote *hereR*

A área de estudo foi delimitada com base no *shapefile* do limite municipal de Fortaleza, obtido a partir do portal oficial Mapas de Fortaleza (2024). Esse arquivo foi importado para o ambiente RStudio e tratado com o auxílio do pacote *sf*, configurando-se como a base geoespacial para a extração e análise dos dados viários. A delimitação rigorosa da área

garantiu que todas as análises fossem restritas ao espaço urbano do município, assegurando a coerência territorial e a validade dos resultados frente à dinâmica de tráfego local.

A coleta de dados de tráfego foi conduzida por meio do pacote *hereR*, que fornece uma interface eficiente com a API da Here Technologies. Esse processo foi sistematizado em um *workflow* versionado no *GitHub*, o qual possibilitou a automação da coleta e o ajuste parametrizado de janelas espaço-temporais. Os dados foram extraídos em intervalos de 15 minutos entre os dias 5 e 12 de junho de 2024, abarcando tanto períodos de dias úteis quanto de fim de semana (8 e 9 de junho), com o objetivo de capturar as flutuações sazonais e padrões comportamentais do tráfego urbano. Os atributos extraídos incluíram, entre outros, a velocidade média (*speed*), o fator de congestionamento (*jamFactor*), a confiança da medição (*confidence*), e a travessabilidade (*traversability*).

3.4.2 Organização dos dados

Os dados brutos foram submetidos a um criterioso processo de pré-processamento utilizando os pacotes *dplyr* e *tidyr*, com o objetivo de garantir a padronização, consistência e limpeza das bases. Após a remoção de inconsistências, duplicidades e valores ausentes, os dados foram reestruturados em formato tabular, organizados em tabelas relacionais contendo colunas temporalmente referenciadas — uma para a data e outra para o horário da medição. Em seguida, as tabelas foram convertidas para o formato *shapefile*, assegurando a compatibilidade com *softwares* de geoprocessamento e possibilitando análises espaciais subsequentes.

A integração de dados geoespaciais no QGIS v3.34.11 teve início com a importação dos arquivos *shapefile* obtidos do RStudio. No contexto deste estudo, os *shapefiles* foram essenciais para representar a malha viária de Fortaleza e integrar os dados obtidos do *hereR* com informações locais. Em seguida, os *shapefiles* foram reprojetados para o sistema de coordenadas UTM SIRGAS2000 24 S, garantindo a consistência espacial das análises.

Posteriormente, realizou-se a junção espacial dos dados do *hereR* com o *shapefile* dos Eixos Viários de Fortaleza, obtido do portal Mapas de Fortaleza (2024). Essa etapa permitiu associar cada segmento viário do *hereR* a um nome e identificador único, facilitando análises posteriores e garantindo a precisão na identificação das vias. Os segmentos viários efetivamente interceptados pela API *hereR* com os Eixos Viários contemplaram 782 vias no município de Fortaleza. A título de complemento, para viabilizar análises espaço-temporais mais seguras, a velocidade foi convertida de m/s para km/h utilizando a calculadora de campo do QGIS.

Calculou-se a média da velocidade em km/h e do *jamFactor* para os bairros de Fortaleza, visto que para a análise espacial os dados devem ser representados no formato de polígonos. Essa transformação de linha para polígono foi necessária porque análises espaço-temporais, como a identificação de padrões de congestionamento, são mais eficientes quando realizadas com dados vetoriais do tipo polígono. Conforme destacado por Longley *et al.* (2015), "a representação de feições lineares como polígonos permite uma análise mais precisa de fenômenos que envolvem áreas de influência, como congestionamentos e fluxos de tráfego".

No QGIS, utilizou-se a ferramenta *Dissolve with Stats* para a agregação estatística dos valores médios do *Jam Factor* e da *Speed*, calculados para cada hora, no intervalo das 00 às 20 horas, e para cada dia da semana, abrangendo o conjunto das vias de Fortaleza. Ressalta-se que o pacote *hereR* não forneceu dados referentes aos horários das 21 e 22 horas. As informações obtidas constituíram a base para a análise temporal dos padrões de congestionamento na malha viária estudada.

3.4.3 Validação Av. José Bastos

Para validar o *Jam Factor* do *hereR* como um indicador da intensidade do congestionamento e analisar a sua relação com a velocidade de fluxo, utilizaram-se os dados diários dos dias 05 a 12 de junho de 2024 do Volume de Tráfego para cada tipo de veículo para a Av. José Bastos. Calculou-se primeiro a Capacidade da Via com base na Equação 02, considerando os seguintes valores defaults: $N = 2$ faixas, $C_0 = 1900$, $f_w = 0,98$, $f_{HV} = 0,92$ e $f_p = 0,85$. Dividiu-se o Fluxo de Veículos pela Capacidade da Via para o cálculo do Índice de Congestionamento (IC), como mostrado na Equação 01. Por fim, elaborou-se gráficos de dispersão relacionando o IC com o *Jam Factor*, e a velocidade de tráfego da AMC com a velocidade do *hereR*.

3.4.4 Análise temporal

Em uma análise realizada no RStudio, buscou-se avaliar a adequação de métodos estatísticos para identificar diferenças significativas entre grupos temporais de Fortaleza, com base em dados horários de congestionamento e velocidade. O objetivo desta análise foi definir um período temporal para a análise espacial do fator de congestionamento para as vias de Fortaleza. Os dados foram organizados em três escalas temporais distintas para análise: o

intervalo contínuo das 00h às 20h, as médias dos períodos de pico matutino (7h-9h) e vespertino (17h-19h), bem como os intervalos fora dos horários de pico.

Adicionalmente, foram calculadas médias diárias abrangendo toda a semana, de segunda a domingo, permitindo a avaliação de variações temporais e comportamentais nos padrões de tráfego. Para validar a normalidade dos dados, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk, seguido de ANOVA para grupos com distribuição normal e Kruskal-Wallis para os demais. No caso de detectado que há diferença significativa entre os grupos seria aplicado os testes Tukey ou Dunn para identificar o par de grupos significativamente diferentes.

3.4.5 Análise espacial Box Map e Índice de Moran

O *software GeoDa* foi utilizado para análises espaciais avançadas, com ênfase na identificação de padrões de autocorrelação espacial e na detecção de *outliers* locais. A partir dos valores do *Jam Factor* nos diferentes horários analisados, foram gerados *Box Maps*, que permitiram representar visualmente a distribuição espacial dos dados, destacando os bairros com comportamento atípico. Esses mapas são interpretações espaciais do *Box Plot* clássico, evidenciando bairros com valores significativamente acima ou abaixo da mediana. Assim, foi possível localizar áreas com congestionamentos intensos persistentes ou inesperadamente baixos, mesmo em horários de pico, fornecendo subsídios importantes para intervenções direcionadas na malha urbana de Fortaleza.

O Índice de Moran, calculado no *GeoDa*, foi utilizado para identificar se existe autocorrelação espacial no congestionamento, avaliando se áreas com características semelhantes (como alta intensidade de tráfego) tendem a se agrupar geograficamente. Para rodar o índice é necessário gerar uma matriz de proximidade, a qual leva em consideração até 4 vizinhos mais próximos no espaço. Como muitas vias de Fortaleza obtidas do hereR não apresentam proximidade espacial, optou-se por agregar os valores do *Jam Factor* por bairro e avaliar a autocorrelação espacial dos bairros de Fortaleza.

Valores positivos do índice indicam autocorrelação espacial positiva, ou seja, que o bairro apresenta alto fator de congestionamento e os bairros vizinhos também. Por outro lado, valores negativos indicam que tanto o bairro quanto os seus arredores possuem baixo fator de congestionamento. Valores próximos a zero refletem a ausência de correlação espacial entre bairros adjacentes. Acrescenta-se que o *GeoDa* permitiu a visualização de mapas de significância estatística, destacando áreas críticas de congestionamento e subsidiando a formulação de estratégias para a gestão viária.

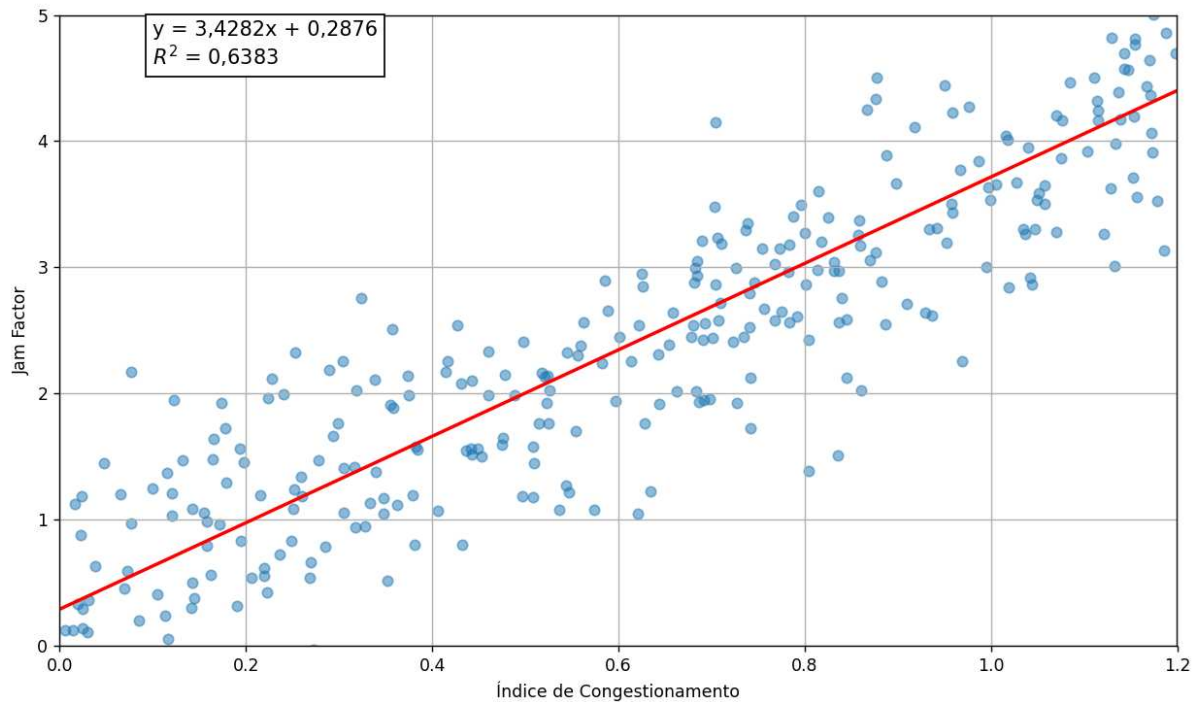
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises conduzidas buscando atender os objetivos geral e específicos. Primeiramente será analisada a relação dos dados de velocidade e fator de congestionamento coletados com a API hereR comparativamente aos dados da AMC para a Av. José Bastos. Em seguida, será conduzido uma análise temporal horária e diária do fator de congestionamento e da velocidade para todas as vias de Fortaleza e por fim a análise espacial. Para a análise espacial serão considerados os horários de maior e menor intensidade dos congestionamentos, a fim de avaliar as vias que apresentam valores extremos do fator de congestionamento e em seguida a análise da presença de agrupamentos espaciais utilizando a análise do Índice de Moran.

4.1 Validação Av. José Bastos

A fim de compreender o *Jam Factor*, obtido da API hereR, analisou-se a relação do mesmo com o Índice de Congestionamento (IC), calculado a partir do volume de tráfego e da capacidade da via, para a Avenida José Bastos. Por meio da Figura 03, observa-se uma correlação linear estatisticamente significativa entre o *Jam Factor* e IC, expressa pela equação $Y = 3,4282x + 0,2876$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,6383$. Esse resultado indica que aproximadamente 63,83% da variação observada no IC pode ser explicada pelo modelo linear em função do *Jam Factor*, evidenciando uma relação moderada entre as variáveis. No entanto, os 36,17% restantes da variabilidade não explicada pelo modelo apontam para a existência de outros fatores influentes que não foram contemplados nesta análise, como características geométricas da via, semaforização, condições climáticas, eventos pontuais e comportamentos dos condutores.

Figura 03 – Análise comparativa de indicadores de tráfego na Avenida José Bastos



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O intercepto positivo da equação sugere a presença de um nível basal de interferência na mobilidade urbana, mesmo em situações de tráfego aparentemente fluido, o que pode estar associado a aspectos estruturais e operacionais persistentes, como descoordenação semafórica, travessias frequentes de pedestres e configurações complexas das interseções. Dessa forma, apesar da associação estatística, não se deve interpretar a relação entre *Jam Factor* e IC como causal ou única responsável pelo comportamento observado no congestionamento.

A parcela não explicada pelo modelo reforça a complexidade e a dinâmica intrínseca do sistema viário urbano, cuja gênese do congestionamento envolve múltiplos mecanismos não-lineares e retroalimentados, incluindo atrasos acumulativos, variações na escolha de rotas alternativas e interferências intermodais. Ademais, a dinâmica do fluxo urbano é altamente sensível a variações temporais e espaciais que frequentemente escapam à captura por meio de dados agregados simples. Pequenos distúrbios no fluxo de tráfego podem desencadear reações em cadeia com consequências espaciais e temporais complexas, pois as perturbações tendem a se propagar ao longo das vias de forma não linear, afetando significativamente a estabilidade do sistema viário.

Logo, a análise aqui apresentada deve ser interpretada com cautela, reconhecendo que o modelo linear representa apenas uma parte da realidade do congestionamento urbano, e que uma compreensão completa demanda a consideração de múltiplos fatores contextuais e

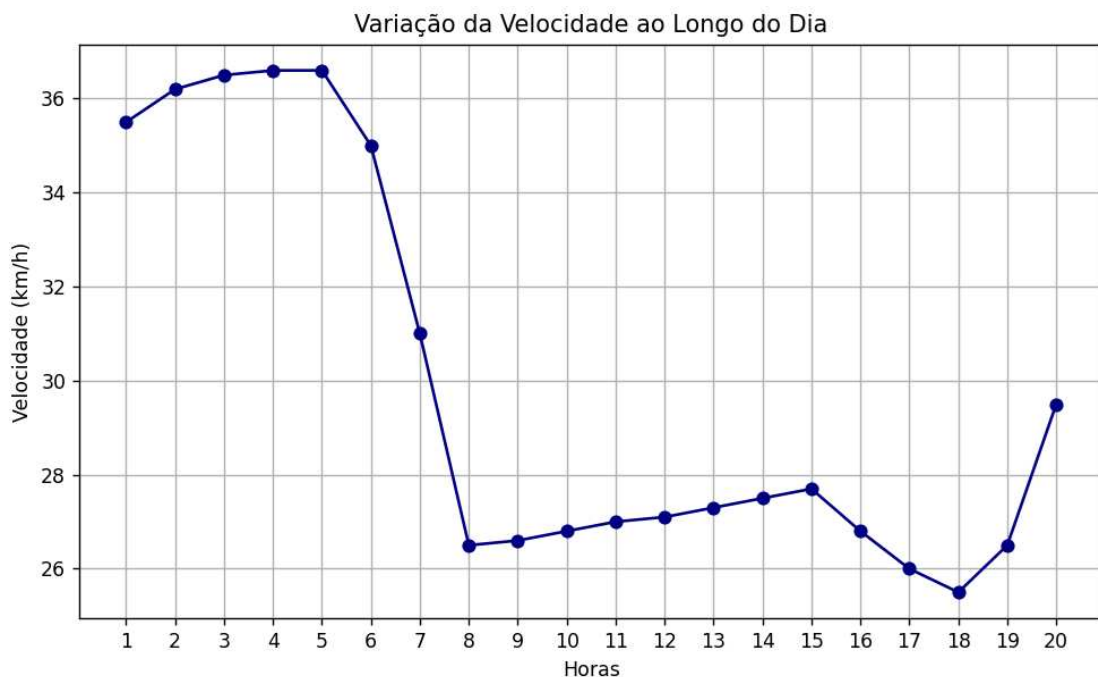
estruturais que interagem de maneira complexa no sistema viário. É importante destacar também que é necessário incluir outras vias e fontes de dados como Waze, dados do transporte público para a melhor compreensão do *Jam Factor*.

4.2 Análise Temporal Horária das vias de Fortaleza

4.2.1 Variação Horária da Velocidade Média nas Vias Urbanas de Fortaleza

A análise da velocidade média horária para todas as vias de Fortaleza, obtida a partir da integração espacial dos dados do pacote *hereR* com o *shapefile* dos Eixos Viários de Fortaleza, revela padrões temporais de operação viária que, embora coerentes com a lógica da fluidez noturna, requerem uma leitura crítica quanto à representatividade e validade estatística das informações. Entre 0h e 5h, os dados indicam velocidades médias gerais entre 35 e 36 km/h, o que sugere um regime subcrítico de operação, caracterizado por volumes de tráfego abaixo da capacidade das vias e ausência de congestionamentos estruturais (Figura 04). No entanto, tais valores aparentam ser inferiores ao esperado para esse intervalo, em que há redução significativa das interferências ao fluxo, como travessias de pedestres, retenções semafóricas e densidade veicular elevada.

Figura 04 – Velocidade média por hora para todas as vias de Fortaleza



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Essa aparente inconsistência pode estar associada à baixa densidade amostral e à consequente redução da confiabilidade estatística nas medições automáticas durante a madrugada, o que impacta diretamente a média ponderada das velocidades. A comparação com a Avenida José Bastos reforça essa hipótese: nesta via arterial, as velocidades médias no mesmo intervalo variaram entre 40 e 51 km/h, com média de 43 km/h — um desempenho mais condizente com as condições reais de tráfego noturno. Tal divergência pode sinalizar uma sub-representação de trechos com tráfego mais fluido ou, ainda, um viés de amostragem nas observações registradas.

No início da manhã (6h-7h), observa-se uma inflexão abrupta, com uma queda na velocidade média de aproximadamente 28%, indicando a transição para um regime de tráfego próximo à saturação. Essa mudança não-linear aponta para a existência de um limiar crítico no volume de veículos, a partir do qual pequenos aumentos na demanda resultam em deteriorações desproporcionais no desempenho da rede viária.

A manutenção de velocidades deprimidas entre 26 e 27 km/h durante todo o período matutino (7h-12h) denota um estado de congestão sustentada, no qual o sistema permanece operando em uma condição de estabilidade degradada. No intervalo pós-meridiano (13h-15h), verifica-se uma recuperação marginal na velocidade média, indicando uma redução parcial da carga viária. No entanto, essa melhora é insuficiente para restabelecer as condições observadas no período noturno. Em seguida, durante o pico vespertino (16h-18h), ocorre nova queda acentuada nas velocidades, frequentemente inferiores às registradas pela manhã.

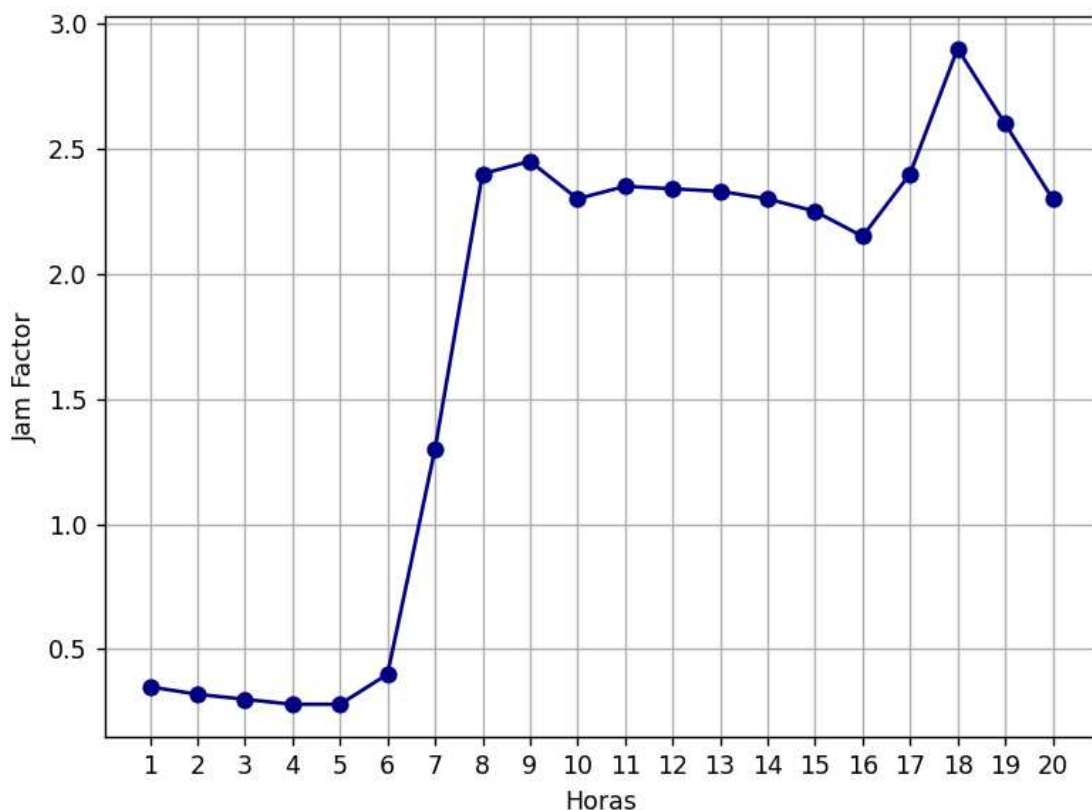
A assimetria entre os picos matutino e vespertino, com este último apresentando velocidades médias ainda mais reduzidas, pode ser atribuída a uma série de fatores, incluindo o efeito acúmulo de viagens de retorno, a menor elasticidade temporal dos deslocamentos vespertinos e a sobreposição de múltiplos fluxos (comerciais, escolares e domiciliares), conforme sugerido por Ortúzar e Willumsen (2011). Para mais, as diferenças nos padrões de origem-destino e a dispersão espacial das zonas residenciais podem acentuar os efeitos do congestionamento na dispersão do tráfego ao fim do dia.

4.2.2 Comportamento Temporal do Índice de Congestionamento (Jam Factor)

A Figura 05 apresenta a média horária do *Jam Factor* para todas as vias de Fortaleza. Os valores intermediários permitem distinguir diferentes estágios de saturação viária: entre 0.4 e 2.8, observa-se tráfego leve e fluido; de 4 a 6, há sinais de lentidão moderada; e entre

7 e 9, predominam situações críticas de lentidão e acúmulo de veículos (Guerrero-Ibáñez *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2015). Essa métrica se mostra particularmente eficiente para o acompanhamento contínuo da ocupação viária ao longo do tempo, cooperando para o diagnóstico preciso de padrões de congestionamento e subsidiando o planejamento de políticas públicas de mobilidade urbana.

Figura 05 – *Jam Factor* por hora para todas as vias de Fortaleza



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Durante as primeiras horas da madrugada (entre 1h e 5h), o *Jam Factor* permanece consistentemente abaixo de 0,3, indicando uma condição de tráfego leve e vias praticamente desobstruídas, padrão típico de períodos de baixa demanda urbana (Vasconcelos, 2005). No entanto, a partir das 6h, observa-se uma elevação acentuada do índice, atingindo aproximadamente 2,4 entre 7h e 9h, o que caracteriza claramente o horário de pico matinal. Tal intensificação está associada ao aumento do fluxo de veículos no início das atividades escolares, comerciais e laborais, um comportamento amplamente documentado nos estudos de mobilidade urbana (Banister, 2008; Silva *et al.*, 2019).

Entre 9h e 15h, o *Jam Factor* mantém-se em um patamar elevado, variando entre 2,1 e 2,3. Apesar de estar fora dos horários de pico tradicionais, essa estabilidade em altos níveis

pode ser explicada pelo tráfego gerado por veículos de serviços, entregas e transporte público, refletindo um padrão de uso contínuo da malha viária ao longo do dia (Rodrigues *et al.*, 2020). Mesmo com uma ligeira redução em relação ao pico matinal, esses valores ainda indicam comprometimento da fluidez, exclusivamente em eixos arteriais que concentram importante fluxo de ligação entre zonas habitacionais e comerciais da cidade.

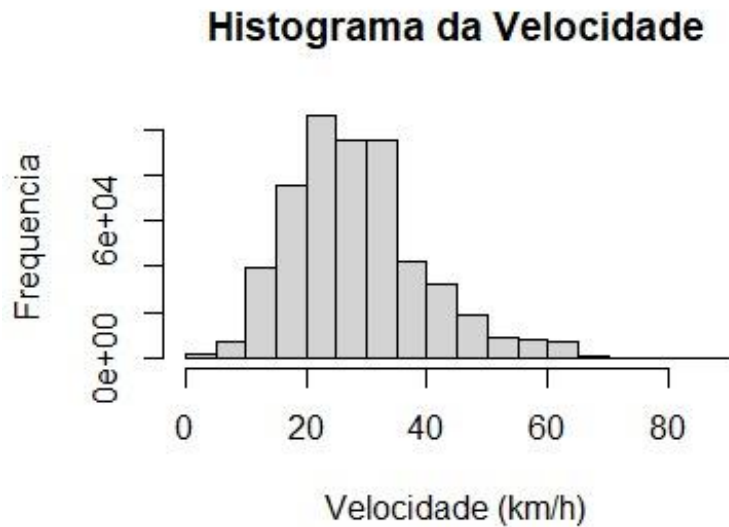
A partir das 18h, nota-se um novo aumento expressivo, com o índice atingindo o pico máximo superior a 2,8 por volta das 18h, marcando o horário de pico vespertino. Este comportamento confirma a presença de um padrão bimodal de congestionamento ao longo do dia, também identificado na análise da velocidade média (Figura 05), reforçando a ideia de recorrência de períodos críticos de tráfego em horários específicos (Costa *et al.*, 2017).

A queda no Jam Factor após as 19h indica o início do escoamento do tráfego, com a gradual normalização da fluidez viária. Esse comportamento reflete a tendência comum de redução da intensidade do tráfego após o pico vespertino, resultando em menos congestionamento. A diminuição das atividades comerciais e escolares e o menor volume de viagens de retorno ao trabalho contribuem para a melhoria nas condições viárias. Conforme estudado por Toledo *et al.* (2019), a redução do fluxo de veículos durante o período noturno favorece o escoamento também nas vias secundárias, sendo influenciada por menor volume de veículos e menor operação de semáforos, o que contribui para a recuperação do sistema viário.

4.2.3 Distribuição de Frequência das Velocidades nas Vias de Fortaleza

O histograma apresentado na Figura 06 foi construído com base em todos os registros brutos de velocidade obtidos entre os dias 05 e 12 de junho, sem qualquer agregação ou suavização por média, horário ou dia da semana. Essa abordagem metodológica, orientada pela busca por fidelidade empírica aos dados capturados, permitiu representar com maior precisão a distribuição real das velocidades instantâneas ao longo do sistema viário urbano analisado.

Figura 06 – Histograma da velocidade (km/h) entre 05 e 12 de junho para todas as vias e horários



Fonte: Dados elaborados pelo autor com base nos registros do pacote hereR (2025).

O histograma revela que a maior frequência de velocidades está concentrada na faixa entre 20 km/h e 30 km/h, com o valor máximo de ocorrências próximo aos 25 km/h, onde o número de registros ultrapassa 60 mil. Esse dado isolado já demonstra um comportamento de tráfego fortemente influenciado por fatores de retenção, indicando que a fluidez do trânsito no período e local analisados foi comprometida. A frequência nessa faixa é significativamente superior às demais, mostrando uma clara tendência de circulação em baixa velocidade, característica comum em áreas com congestionamento persistente — como vias arteriais saturadas, corredores de ônibus compartilhados, interseções com semáforos mal sincronizados ou presença contínua de cruzamentos e travessias de pedestres.

Observa-se também que, à medida que a velocidade aumenta além dos 30 km/h, a frequência dos registros começa a diminuir de forma progressiva. Acima de 40 km/h, os valores já se tornam sensivelmente menores, e a quantidade de observações nas faixas entre 60 km/h e 80 km/h é quase insignificante. Esse comportamento gera uma assimetria à direita (cauda longa), sugerindo que velocidades mais elevadas são possíveis, mas ocorrem em situações pontuais — possivelmente em trechos com maior capacidade viária, menor interferência ou fora dos horários de pico. A baixa densidade nessas faixas demonstra que a maior parte da rede, no período avaliado, estava operando em condições de saturação.

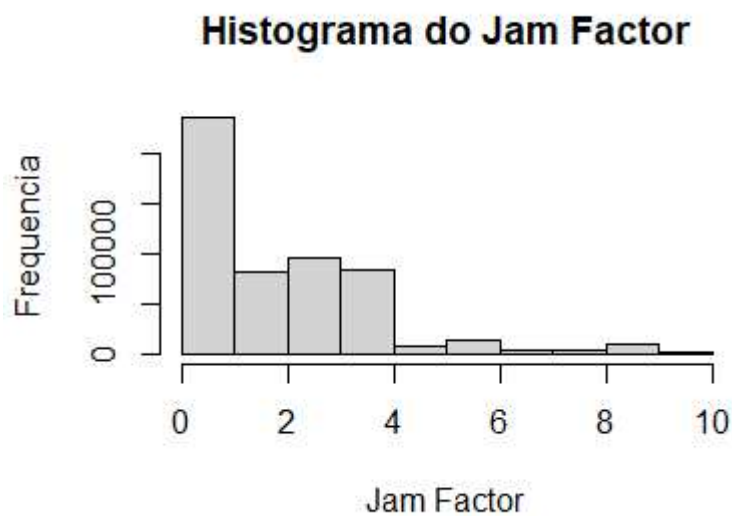
Na extremidade inferior do gráfico, as faixas de 0 a 10 km/h apresentam frequências relativamente baixas, mas ainda notáveis, o que indica a ocorrência de situações de quase imobilidade, típicas de congestionamentos severos ou interrupções temporárias no fluxo, como acidentes, veículos parados em fila dupla ou retenções em semáforos críticos. A ausência de

uma distribuição normal e o forte achatamento à esquerda sugerem que o comportamento da velocidade não segue um padrão estável, mas sim um padrão condicionado ao espaço e ao tempo — o que está de acordo com a realidade de cidades como Fortaleza, onde o tráfego apresenta grande variabilidade entre bairros, horários e dias da semana.

4.2.4 Análise da Distribuição do Jam Factor na Malha Viária Urbana

O histograma apresentado na Figura 07 ilustra a distribuição empírica dos valores do *Jam Factor* na malha viária urbana de Fortaleza, durante o período compreendido entre 05 e 12 de junho de 2024.

Figura 07 – Histograma da frequência de valores do Jam Factor em todas as vias de Fortaleza (período: 05 a 12 de junho de 2024)



Fonte: Dados elaborados pelo autor com base nos registros do pacote hereR (2025).

O histograma do *Jam Factor* exibe uma distribuição claramente assimétrica à direita, característica de fenômenos com alta frequência de condições operacionais próximas ao ideal e ocorrência pontual de estados críticos. A classe com *Jam Factor* entre 0 e 1 apresenta a maior concentração de registros, ultrapassando 100.000 amostras, o que indica predominância de condições de tráfego com baixa interferência na malha viária analisada. Esta concentração nos valores mais baixos sugere que, ao longo do período de coleta, o sistema viário operou predominantemente em níveis de serviço satisfatórios.

Observa-se, ainda, uma presença significativa de registros nos intervalos entre 2 e 4, o que representa uma transição para estados de operação com interferência crescente. A frequência decrescente nesses intervalos, embora ainda relevante, aponta para a existência de momentos e segmentos da malha sujeitos a perdas de desempenho, compatíveis com níveis de serviço C ou D, definidos como fluxo estável com restrições moderadas à severas nas manobras e velocidades, conforme classificação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006).

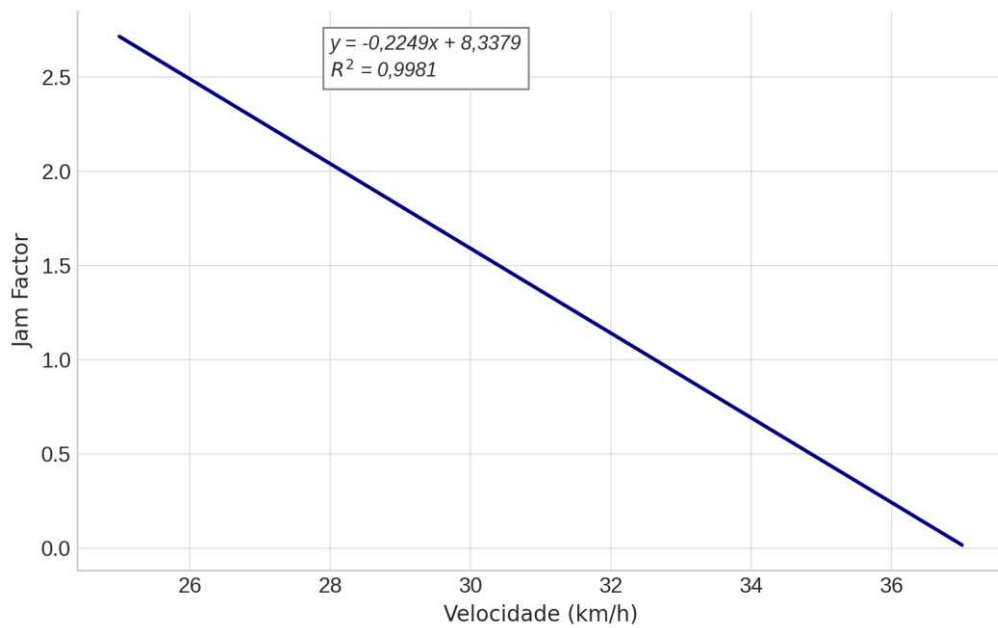
A partir do Jam Factor 5, a distribuição entra em queda acentuada, com poucos registros. No entanto, a presença de valores entre 7 e 10, mesmo que esparsos, revela que o sistema viário enfrentou, em determinadas situações, condições de colapso viário pontual. Essa cauda longa, ainda que de baixa densidade, deve ser considerada no dimensionamento de intervenções, pois revela a existência de falhas estruturais ou operacionais que podem comprometer a regularidade do fluxo.

Portanto, sob a ótica da engenharia de tráfego, o histograma evidencia um sistema com desempenho global aceitável, mas com ocorrência localizada de estados de saturação que exigem intervenções pontuais e medidas de mitigação. A leitura técnica do gráfico orienta a priorização de medidas corretivas nas faixas intermediárias de *Jam Factor* e o monitoramento contínuo dos registros críticos, em função da sua capacidade de provocar efeitos em cascata na rede viária.

4.2.5 Análise Conjunta da Velocidade Média e Jam Factor

A regressão linear mostrada na Figura 08 revela uma inversão proporcional clara entre a velocidade média e o índice de congestionamento *Jam Factor*, com inclinação negativa ($\beta = -0,2249$) e um coeficiente de determinação elevado ($R^2 = 0,9981$). Isso indica que aproximadamente 99,81% da variação no congestionamento pode ser explicada pela variação na velocidade, denotando um grau de dependência funcional extremamente elevado entre os dois parâmetros. Tal comportamento é consistente com a literatura clássica de engenharia de tráfego, onde se observa que a perda de fluidez está diretamente associada à redução das velocidades operacionais (TRB, 2010).

Figura 08 – Relação entre Velocidade média e *Jam Factor* de todas as vias de Fortaleza



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A linearidade do fenômeno sugere que o sistema de tráfego urbano de Fortaleza, ao menos no período analisado, apresentou um comportamento determinístico e fortemente acoplado: pequenas variações de velocidade provocaram mudanças proporcionais no nível de saturação da via. Esse padrão reforça a hipótese de que o tráfego urbano local opera frequentemente próximo à capacidade em determinados trechos, indicando baixa resiliência estrutural diante de perturbações mínimas — conceito alinhado com modelos macroscópicos de fluxo e com a teoria de “critical slowing down” aplicada a redes viárias de alta demanda.

Em continuidade, o intercepto da reta ($y=8,3379$) indica que, em situações de baixa velocidade média, os níveis de congestionamento podem atingir valores muito próximos do máximo teórico (Jam Factor = 10), refletindo condições severas de saturação, compatíveis com as observadas em horários de pico e em corredores estruturantes de tráfego.

A análise dos dados revelou três implicações fundamentais: a correlação negativa entre velocidade média e congestionamento confirma que pequenas melhorias na velocidade podem resultar em avanços significativos na fluidez do tráfego, como demonstrado por Zhang et al. (2017), que analisaram padrões espaço-temporais de congestionamento com dados de GPS; o elevado coeficiente de determinação (R^2) indicou um comportamento altamente determinístico, no qual o congestionamento pode ser previsto com precisão a partir da velocidade média. Além disso, esse comportamento reflete características típicas de redes resilientes, nas quais perturbações locais tendem a se propagar de forma estruturada, demandando intervenções sistêmicas para sua mitigação. Ademais, a linearidade do fenômeno

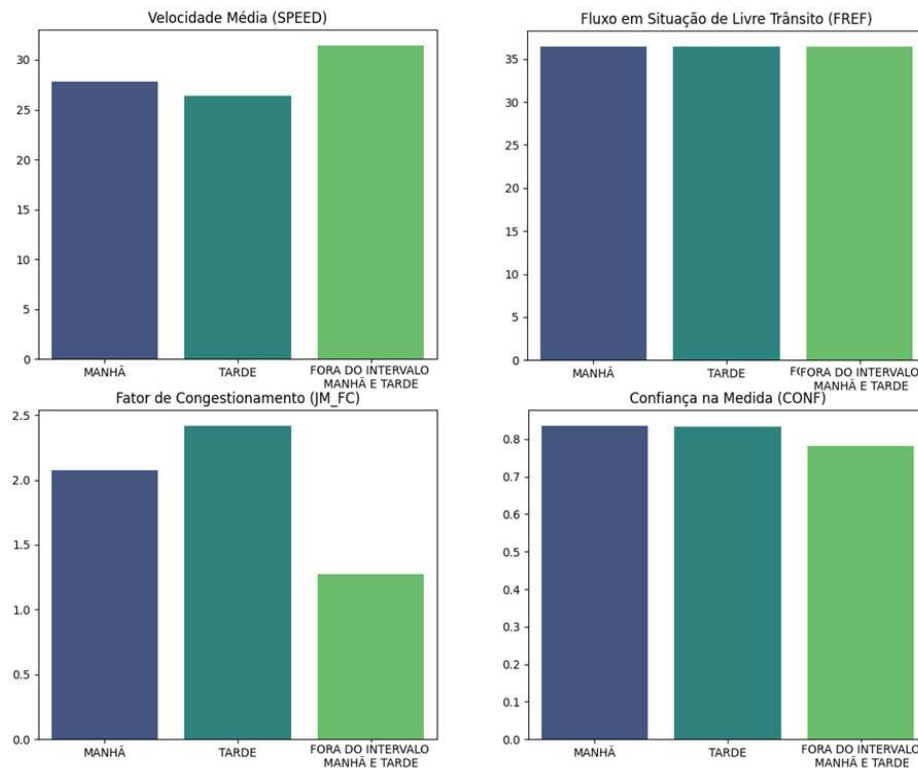
sugere que políticas de otimização da velocidade podem reduzir proporcionalmente o congestionamento, mas sua implementação deve considerar *trade-offs* em segurança viária (Elvik, 2013), efeitos em rede (Gonzales *et al.*, 2017) e interações modais, assegurando equilíbrio entre eficiência, sustentabilidade e equidade no sistema de transporte.

A implicação prática dessa análise é significativa: incrementos modestos na velocidade média — mesmo da ordem de 1 ou 2 km/h — podem resultar em reduções expressivas no *Jam Factor*, o que aponta para a eficácia potencial de intervenções de micromelhoria viária, como sincronização semaforica, gestão dinâmica de faixas e controle adaptativo de velocidade. Entretanto, qualquer proposta que vise aumentar a velocidade média deve ser acompanhada de medidas de mitigação de riscos, como o fortalecimento da segurança viária (Elvik, 2013), e de políticas integradas que considerem as externalidades geradas, especialmente em contextos urbanos densos.

4.2.6 Comportamento das Variáveis de Tráfego nos Diferentes Períodos do Dia

Os gráficos da Figura 09 apresentam a comparação das médias das variáveis *speed*, *freeflow*, *jam_factor* e *confidence* entre os períodos matutino, vespertino e fora do horário de pico. Observa-se que a velocidade média (*speed*) é significativamente maior fora dos horários de pico, superando 31 km/h, o que condiz com a menor demanda e maior fluidez viária nesses períodos (Rodrigues *et al.*, 2021). Em contraste, nos períodos de pico, a redução da velocidade reflete o aumento da demanda, alinhando-se à relação inversa entre volume e velocidade discutida na literatura (TRB, 2010).

Figura 09 – Comparação das variáveis por categoria de horário



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O fluxo em situação de livre trânsito (*freeflow*) apresentou valores similares entre os períodos, indicando que a capacidade da via não é ultrapassada em condições ideais. O fator de congestionamento (*jam_factor*), por outro lado, foi sensivelmente maior nos horários de pico, reforçando a típica dinâmica urbana de saturação e queda de desempenho viário nos momentos de maior demanda (Ortúzar; Willumsen, 2011).

A variável *confidence* variou pouco, com leve redução fora do pico, possivelmente refletindo menor densidade de dados nesses horários. Tal oscilação pode afetar a precisão das estimativas, sendo a qualidade da coleta um fator crucial para análises confiáveis (Moreira; Pereira; Coelho, 2019).

Para assegurar a validade da aplicação de testes paramétricos, foi inicialmente testada a hipótese de normalidade das distribuições amostrais por meio do teste de Shapiro-Wilk, recomendável para amostras pequenas e médias. Esse teste avalia se os dados seguem uma distribuição normal, requisito fundamental para a aplicação de métodos inferenciais como a ANOVA (Field, 2013). Em todas as variáveis analisadas, os valores de p resultantes foram superiores ao nível de significância adotado ($p > 0,05$), o que implica a não rejeição da hipótese nula de normalidade — e, portanto, a adequação dos dados à modelagem paramétrica.

Dada essa confirmação, foi aplicada a análise de variância unidirecional (ANOVA), apropriada quando se deseja comparar médias de uma variável dependente entre três ou mais

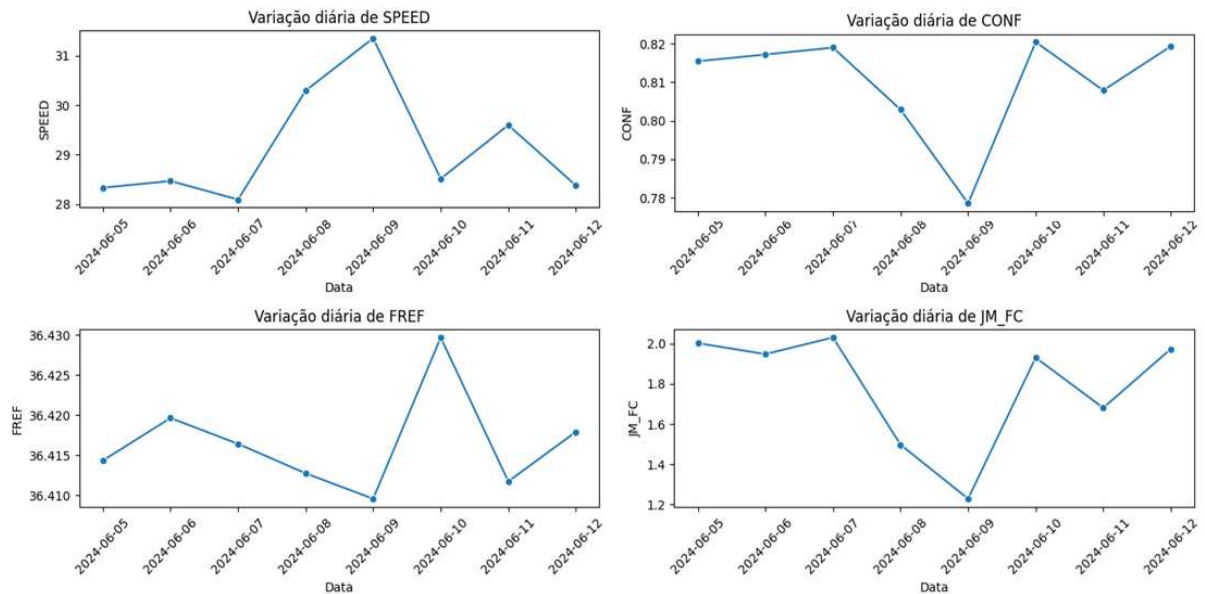
grupos independentes, sob o pressuposto de normalidade e homogeneidade das variâncias. O objetivo foi testar a hipótese de igualdade entre as médias das variáveis de tráfego ao longo dos períodos do dia. Os resultados não indicaram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos para nenhuma das variáveis (e.g., *speed*: $F(1,1) = 0,916$, $p = 0,514$; *jam_factor*: $F(1,1) = 0,872$, $p = 0,522$), sugerindo homogeneidade nas condições médias observadas nos diferentes intervalos horários.

Como visto no parágrafo anterior, os resultados sugerem homogeneidade nos indicadores de tráfego entre os períodos analisados. Contudo, essa constatação pode estar associada a limitações de poder estatístico, decorrentes de tamanho amostral reduzido, o que aumenta a probabilidade de ocorrência do erro tipo II — ou seja, a falha em rejeitar a hipótese nula quando ela é, na realidade, falsa, implicando na não detecção de diferenças que efetivamente existem (Cohen, 1988).

4.3 Análise Temporal Diária das vias de Fortaleza

A Figura 10 ilustra a variação diária dos principais indicadores de tráfego urbano entre os dias 5 e 12 de junho de 2024. Observa-se que a variável *speed*, que representa a velocidade média observada nas vias, manteve-se relativamente estável ao longo do período, com um discreto incremento nos dias 8 e 9 de junho (sábado e domingo). Tal comportamento é compatível com a redução típica no volume de tráfego durante os fins de semana, conforme apontado por Campos, Silva e Andrade (2019), que destacam que os padrões de mobilidade urbana estão intrinsecamente relacionados às atividades socioeconômicas da população, apresentando variações sazonais e semanais.

Figura 3 – Análise temporal das variáveis (05 a 12 de junho de 2024)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A variável *freelflow*, que representa a velocidade ideal sob condições de tráfego livre, permaneceu praticamente constante ao longo da série. Essa estabilidade é esperada, uma vez que o *freelflow* é determinado principalmente por fatores estruturais da via e não sofre influência direta das oscilações momentâneas no fluxo veicular (TRB, 2010). Assim, a variação observada na *speed* pode ser interpretada como reflexo direto das flutuações no volume de tráfego, reforçando sua validade como *proxy* do nível de congestionamento.

No mesmo período, o *Jam Factor* — indicador que expressa o grau de saturação da malha viária em uma escala de 0 (livre) a 10 (totalmente congestionado) — apresentou redução significativa nos dias 8 e 9, reforçando a hipótese de menor carga viária nos fins de semana. O aumento subsequente nos dias úteis seguintes sinaliza a retomada dos padrões usuais de deslocamento urbano, refletindo a retomada da rotina laboral.

A variável *confidence*, que expressa a confiabilidade estatística da medição dos dados de tráfego, apresentou ligeira redução nos dias de menor movimentação (08 e 09/06), embora seus valores tenham permanecido acima de 0,77, patamar considerado elevado e suficiente para garantir a validade analítica das observações (HERE Technologies, 2020). Essa consistência confere confiabilidade às inferências realizadas com base nesses dados.

Com o objetivo de avaliar a significância estatística das variações nos indicadores de tráfego ao longo dos dias da semana, iniciou-se a análise por meio do teste de Shapiro-Wilk, utilizado para aferir a normalidade da distribuição dos dados. Os resultados obtidos indicaram que todas as variáveis analisadas — *speed*, *speed_uncaped*, *freelflow* e *jam_factor* —

apresentaram valores de p superiores ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), o que sustenta a hipótese de normalidade conforme os critérios estabelecidos por Field (2009).

Com a suposição de normalidade atendida, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) de um fator, com nível de significância de 5%, para avaliar possíveis diferenças entre os dias da semana, já que os valores de p foram superiores a 0,05 para todas as variáveis analisadas, indicando ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. Essa constatação reforça a ideia de que, embora as séries apresentem flutuações visuais ao longo dos dias (Figura 10), tais variações não configuram diferenças sistemáticas ou estatisticamente significativas e consistentes no período considerado.

4.4 Análise Espacial Índice de Moran

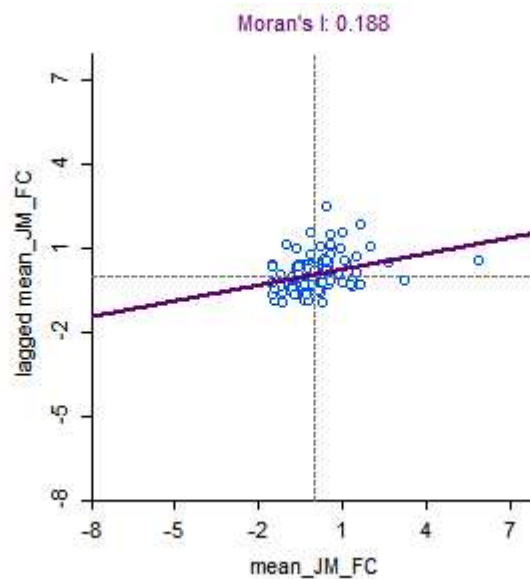
A análise espacial da fluidez do tráfego em Fortaleza foi realizada utilizando dados obtidos do pacote *hereR*, processados por meio de um fluxo de trabalho automatizado via *GitHub*. Para garantir uma abordagem representativa da dinâmica viária da cidade, foram selecionados dois horários estratégicos: 2h da manhã e 18h da tarde. A escolha desses horários baseou-se na análise gráfica dos indicadores de tráfego, especificamente o *Jam Factor*, que quantifica a relação entre o fluxo real e o fluxo ideal. Conforme a Figura 05, o horário das 2h da manhã, caracterizado por baixa intensidade de congestionamento, e o das 18h, correspondente ao horário de pico, foram selecionados para representar as condições extremas de tráfego e proporcionar uma análise mais completa da fluidez do tráfego em Fortaleza.

Essa diferenciação temporal foi fundamental para entender as variações na intensidade do congestionamento ao longo do dia e suas implicações para a trafegabilidade na cidade. Às 2h da manhã, os dados indicam condições de tráfego fluido, com valores baixos de *Jam Factor* e velocidades médias elevadas (Figura 06).

Em contraste, às 18h, observou-se uma elevação substancial do *Jam Factor*, refletindo a sobrecarga do sistema viário, especialmente em corredores centrais da cidade (Figura 06). A comparação desses dois períodos críticos fornece uma base sólida para a análise espacial da fluidez do tráfego, permitindo a aplicação do diagrama de dispersão de Moran para identificar padrões significativos de agrupamento. Esse método, amplamente utilizado na análise espacial exploratória de dados geográficos (Anselin, 1995), foi empregado para investigar a relação entre o *Jam Factor* ao longo de uma semana, destacando possíveis agrupamentos espaciais mesmo durante períodos de baixa demanda viária.

A Figura 11 apresenta o diagrama de dispersão do Índice de Moran calculado para os valores médios de *Jam Factor* no horário de 02h. Observa-se um valor de Moran's I igual a 0,188, o que indica a presença de autocorrelação espacial positiva fraca. Em outras palavras, há uma tendência modesta de agrupamento espacial de valores semelhantes — bairros com baixos níveis de congestionamento tendem a estar próximos uns dos outros, embora esse padrão não seja fortemente consolidado no período analisado.

Figura 4 – Índice de Moran referente aos dados do horário de 02h



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados do hereR (2024), processados no software GeoDa.

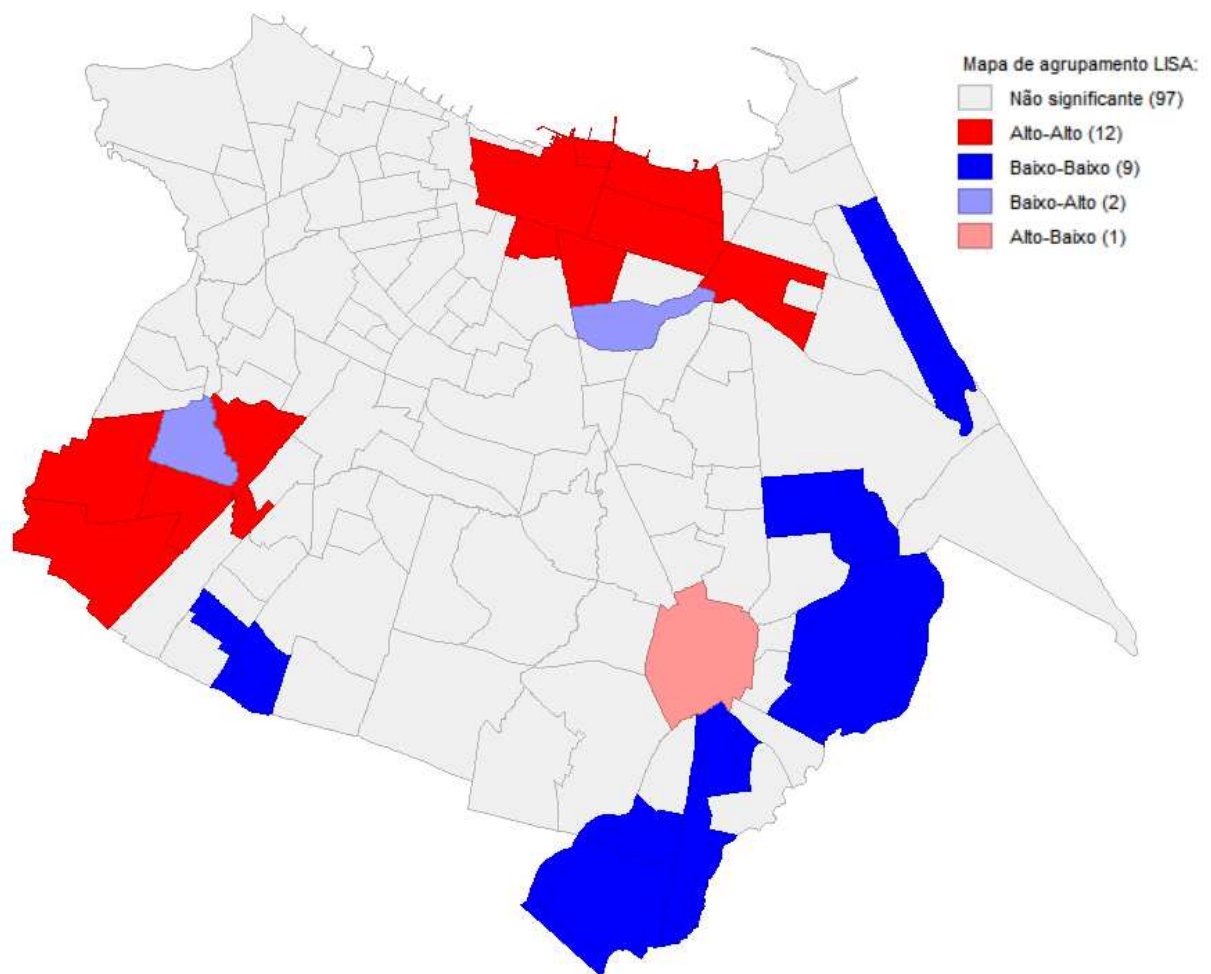
Esse resultado está alinhado à baixa intensidade de tráfego característica das madrugadas, refletindo um padrão geral de mobilidade reduzida. A homogeneidade dos baixos valores de *Jam Factor* entre os bairros de Fortaleza sugere uma estrutura espacial com pouca variação intrínseca nesse período, o que se traduz em uma autocorrelação espacial relativamente fraca. No entanto, a inclinação positiva observada na reta de regressão da análise de Moran pode indicar que, mesmo em horários de demanda mínima, persistem desigualdades estruturais entre os bairros. Essas disparidades podem estar relacionadas a fatores permanentes do tecido urbano, como a geometria da malha viária, a acessibilidade relativa entre as regiões, a presença de gargalos operacionais ou a ineficiência de sistemas de controle semafórico. Portanto, mesmo sob condições de tráfego leve, a análise espacial evidencia traços latentes de organização do sistema viário que demandam atenção no planejamento urbano.

Além disso, o valor de Moran's I, embora baixo, reforça a necessidade de considerar a dimensão espacial na análise do tráfego urbano, mesmo fora dos horários de pico. A

autocorrelação espacial fraca aponta para a existência de pequenas concentrações de segmentos com características de tráfego ligeiramente superiores à média — possíveis áreas com tráfego noturno relacionado a polos logísticos, terminais de ônibus ou zonas de carga e descarga. Essas áreas podem apresentar um comportamento diferenciado ao longo das 24 horas e devem ser monitoradas com atenção.

A Figura 12 apresenta o Mapa de Agrupamento LISA, onde foram identificados cinco grupos distintos de padrões espaço-temporais de congestionamento nas vias de Fortaleza, considerando o horário das 2h. Essa abordagem permite capturar relações espaciais locais e identificar a existência de clusters estatisticamente significativos, revelando zonas de acúmulo, fluidez e transição de tráfego na malha urbana. Como destacado por Shi *et al.* (2023), a detecção de agrupamentos espaciais em indicadores de tráfego é fundamental para o diagnóstico urbano e para o planejamento de medidas direcionadas à mitigação da saturação viária.

Figura 52 – Mapa de Autocorrelação Espacial Local (LISA) do Fluxo Veicular Médio nos Bairros de Fortaleza às 02h: Identificação de Padrões Espaciais de Congestionamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados do hereR (2024), processados no software GeoDa.

O grupo Alto-Alto (12 segmentos – em vermelho) corresponde a bairros com congestionamento elevado cercado por bairros com altos valores de *Jam Factor*. Esses núcleos estão concentrados nas regiões central e sudoeste da cidade, incluindo bairros como Centro, Meireles, Praia de Iracema e Siqueira, por exemplo. Trata-se de zonas críticas de colapso estrutural da mobilidade, onde a autocorrelação espacial positiva reforça a persistência do problema.

O grupo Baixo-Baixo (9 segmentos – em azul escuro) abrange trechos com baixo congestionamento, inseridos em áreas vizinhas igualmente fluídas. Com predominância nas regiões sul e sudeste, como em Messejana e Ancuri, esses segmentos indicam zonas de desempenho viário mais estável, típicas de áreas residenciais menos adensadas ou com infraestrutura funcional mais adequada.

O grupo Baixo-Alto (2 segmentos – em azul claro) representa áreas de baixo congestionamento cercadas por setores mais saturados. Esses trechos funcionam como zonas de transição ou amortecimento e podem refletir a eficácia de intervenções locais, como a implementação de corredores exclusivos, ajustes semaforicos ou maior capacidade viária. O monitoramento contínuo dessas áreas é essencial, pois mudanças nas condições de tráfego das regiões adjacentes podem alterar rapidamente a dinâmica local, transformando trechos estáveis em pontos de estrangulamento. Assim, essas zonas funcionam como indicadores antecipados da propagação do congestionamento e da eficiência das medidas de contenção.

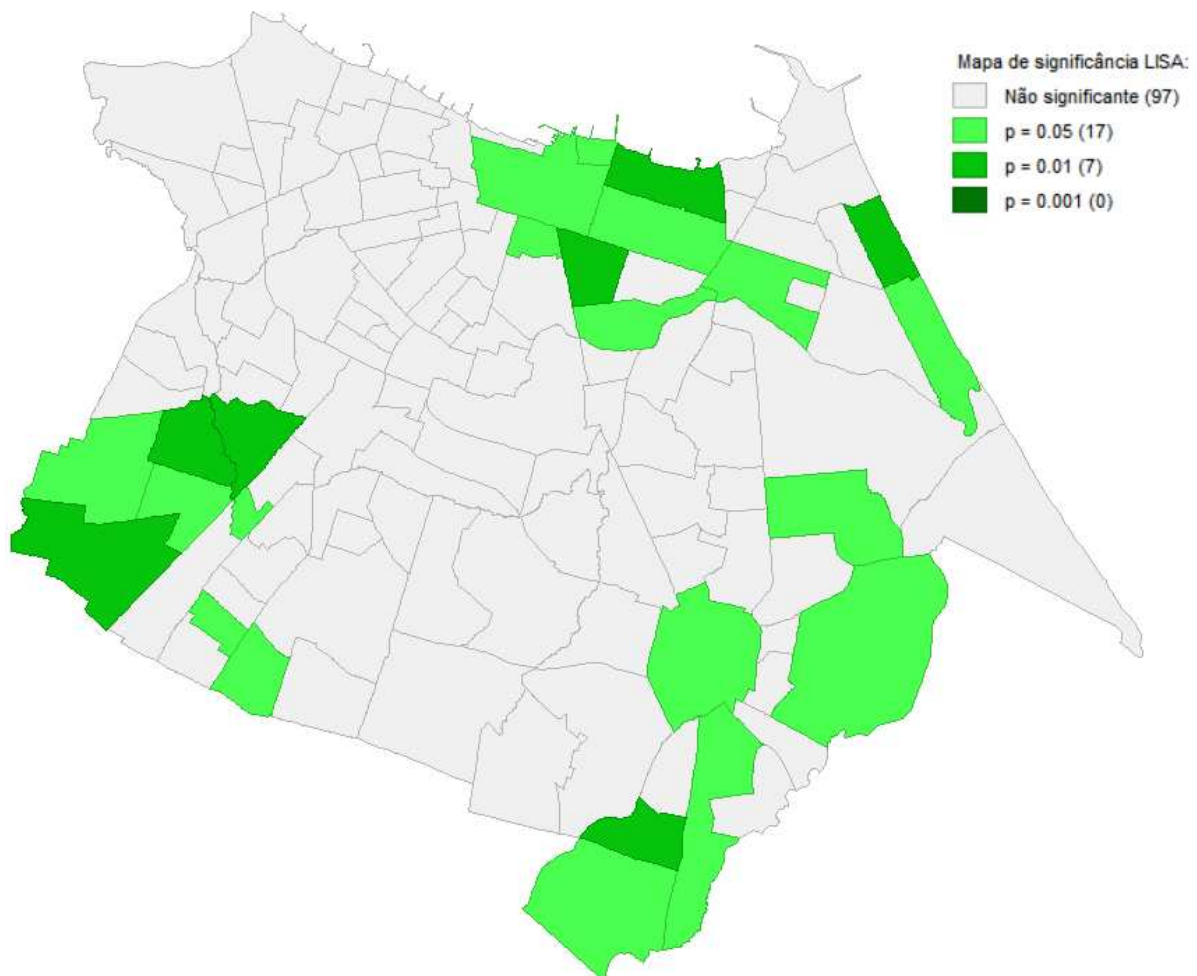
O grupo Alto-Baixo (1 segmento – em rosa) corresponde ao bairro Messejana, caracterizado por uma ocorrência isolada de congestionamento intenso cercada por áreas com níveis inferiores de tráfego. Essa anomalia espacial pode ser atribuída à existência de gargalos viários específicos dentro do bairro, como interseções com geometria inadequada, sinalização pouco eficiente e descontinuidade na malha viária local, que dificultam a fluidez do tráfego. Esses fatores estruturais explicam a identificação do segmento Alto-Baixo na análise de autocorrelação espacial local (LISA) do fluxo veicular médio.

Assim, conforme evidenciado na Figura 12, a análise espacial por meio da estatística LISA demonstra que o congestionamento em Fortaleza não se distribui de forma aleatória, mas sim segundo uma lógica territorialmente estruturada. A identificação desses agrupamentos permite direcionar políticas públicas com maior precisão, promovendo ações específicas nos clusters de alta criticidade (Alto-Alto), preservando zonas de fluidez (Baixo-Baixo) e monitorando permanentemente as áreas de transição (Baixo-Alto e Alto-Baixo). Este

monitoramento é estratégico para antecipar colapsos viários, avaliar a eficácia das intervenções adotadas e apoiar decisões em tempo real dentro de sistemas de mobilidade urbana inteligente (Shi *et al.*, 2023).

A Figura 13 ilustra o Mapa de Significância LISA, que expressa o grau de confiabilidade estatística associado aos agrupamentos espaciais detectados na análise dos valores médios de *Jam Factor* às 02h. As diferentes tonalidades de verde indicam os níveis de significância, variando entre $p \leq 0,05$ e $p \leq 0,01$, conforme o padrão observado. No total, 17 setores apresentaram significância ao nível de $p \leq 0,05$, enquanto outros 7 setores alcançaram $p \leq 0,01$. Nenhum setor atingiu o nível mais estrito de significância ($p \leq 0,001$), o que é compatível com o contexto de baixa intensidade de tráfego típico do horário analisado. A maior parte da malha viária, composta por 97 segmentos, não apresentou significância estatística, indicando a predominância de padrões espaciais não sistemáticos ou aleatórios durante a madrugada.

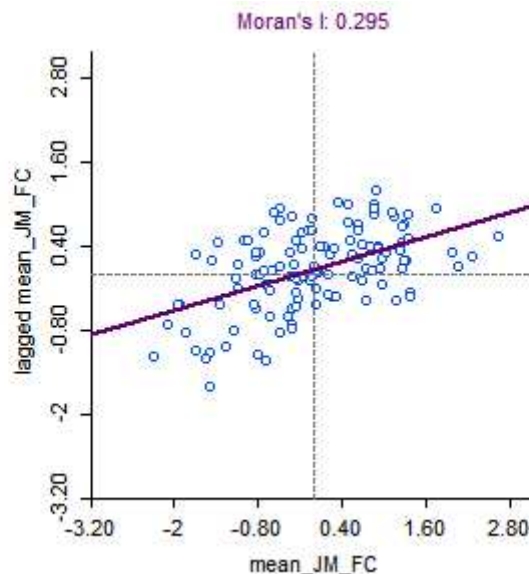
Figura 6 – Mapa de Significância Espacial Univariada (LISA) entre Fluxo por Bairro e Índice de Congestionamento (*JamFactor*) em Fortaleza às 02h



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados do hereR (2024), processados no software GeoDa.

A Figura 14 apresenta o gráfico de dispersão associado ao Índice de Moran para os valores médios de *Jam Factor* registrados às 18h, tradicionalmente considerado um dos horários de maior intensidade de tráfego urbano, marcando o período de pico vespertino em Fortaleza. O coeficiente de autocorrelação espacial global, representado pelo valor de Moran's $I = 0,295$, indica a presença de uma moderada autocorrelação espacial positiva entre os segmentos viários analisados. Esse resultado sugere que setores geograficamente próximos tendem a apresentar níveis semelhantes de congestionamento, caracterizando a existência de dependência espacial no padrão de distribuição do *Jam Factor*.

Figura 74 – Índice de Moran referente aos dados do horário de 18h



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados do hereR (2024), processados no software GeoDa.

Do ponto de vista metodológico, o Moran's I varia entre -1 e +1, sendo que valores positivos, como o observado, apontam para a aglomeração espacial de valores semelhantes. Ou seja, áreas com congestionamento elevado tendem a estar cercadas por outras também congestionadas, enquanto setores com boa fluidez igualmente se agrupam. A inclinação positiva da reta de regressão ajustada aos pares de valores (média do *Jam Factor* e sua defasagem espacial) reforça essa interpretação, confirmando empiricamente a existência de um padrão espacial estruturado no período analisado.

A distribuição dos pontos ao redor da linha de tendência revela ainda maior concentração no primeiro e terceiro quadrantes, ou seja, nas combinações alto-alto e baixo-

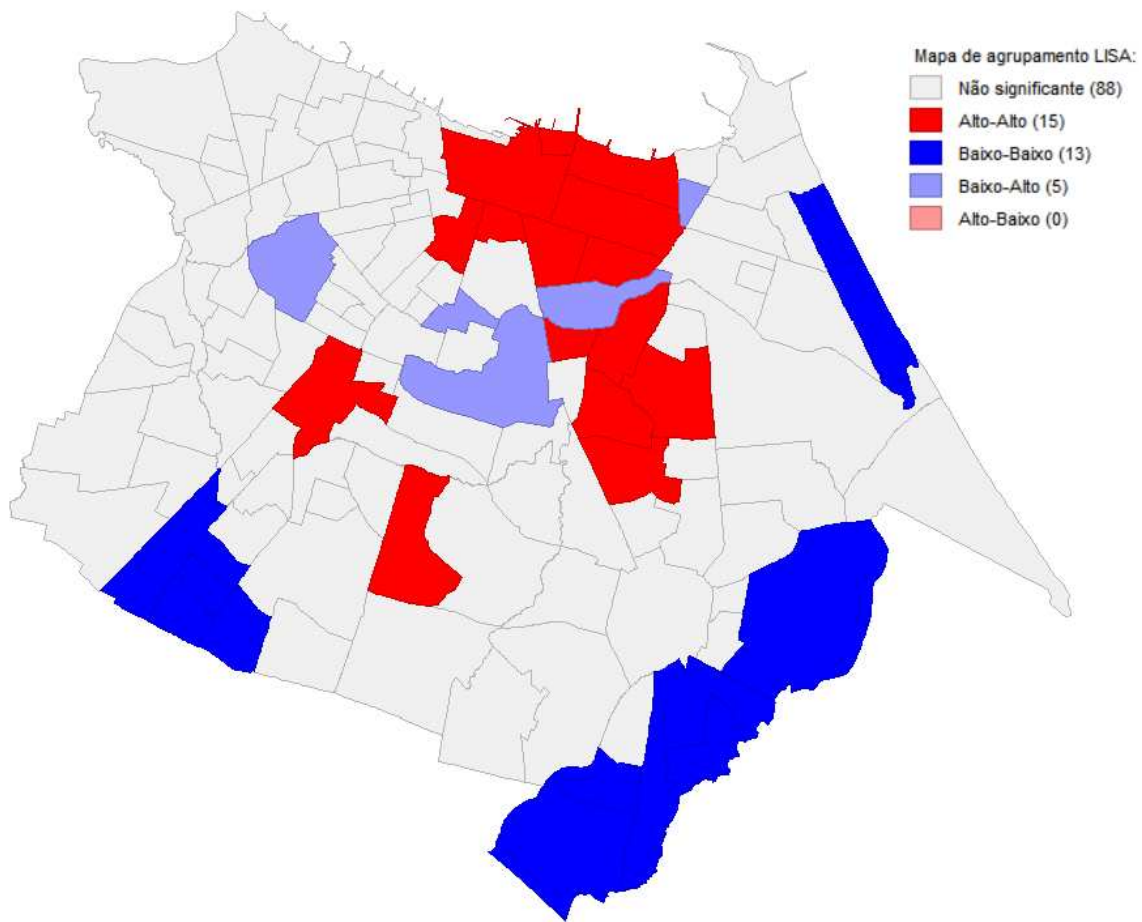
baixo, respectivamente. Esse comportamento é típico de sistemas viários onde o congestionamento não se distribui de forma aleatória, mas sim resulta de processos espaciais correlacionados, como a continuidade física das vias, a configuração da malha urbana e a distribuição de polos geradores de tráfego, como centros comerciais, equipamentos públicos e terminais de transporte.

O horário das 18h, caracterizado pelo deslocamento pendular do fim da jornada de trabalho, potencializa tais efeitos, dada a sobrecarga das infraestruturas viárias, especialmente nas regiões centrais e nos principais corredores de saída da cidade. Assim, o valor de Moran's I obtido, embora não elevado, é estatisticamente expressivo e evidencia que, além dos fatores locais, existe uma dimensão espacial relevante na formação dos congestionamentos, a qual precisa ser considerada no planejamento e na gestão do sistema de mobilidade urbana (Figura 14).

É importante destacar que, embora o índice não atinja valores próximos de 1, o resultado obtido é compatível com sistemas urbanos complexos, onde múltiplos fatores interferem na dinâmica do tráfego, como características socioeconômicas, regime semaforico, presença de interseções e especificidades topográficas. Portanto, o Moran's I de 0,295 indica que o congestionamento em Fortaleza às 18h não é isolado, mas sim resulta de uma estrutura espacial interdependente, cuja compreensão é fundamental para a formulação de políticas públicas mais eficazes.

O Mapa de Agrupamento LISA referente ao horário de 18h (Figura 15) sintetiza, de forma espacialmente explícita, as dinâmicas de autocorrelação local do *Jam Factor* em Fortaleza, justamente no momento de maior pressão sobre o sistema viário urbano: o pico vespertino.

Figura 8 – Mapa de Autocorrelação Espacial Local (LISA) do Fluxo Veicular Médio nos Bairros de Fortaleza às 18h: Identificação de Padrões Espaciais de Congestionamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados do hereR (2024), processados no software GeoDa.

Os agrupamentos do tipo Alto-Alto (em vermelho), totalizando 15 segmentos, concentram-se predominantemente em regiões centrais e no setor norte da cidade, especialmente nos bairros Centro, Jacarecanga, Farias Brito, Benfica e Parangaba. Esses clusters expressam a convergência de elevados níveis de Jam Factor em setores adjacentes, denotando persistência e difusão espacial do congestionamento. A morfologia urbana desses locais, aliada à concentração de atividades econômicas e ao papel de centralidades funcionais conectadas por eixos viários estruturantes — como as avenidas Bezerra de Menezes, Dom Manuel e José Bastos — influencia decisivamente no colapso sistemático da fluidez durante o escoamento pendular da força de trabalho.

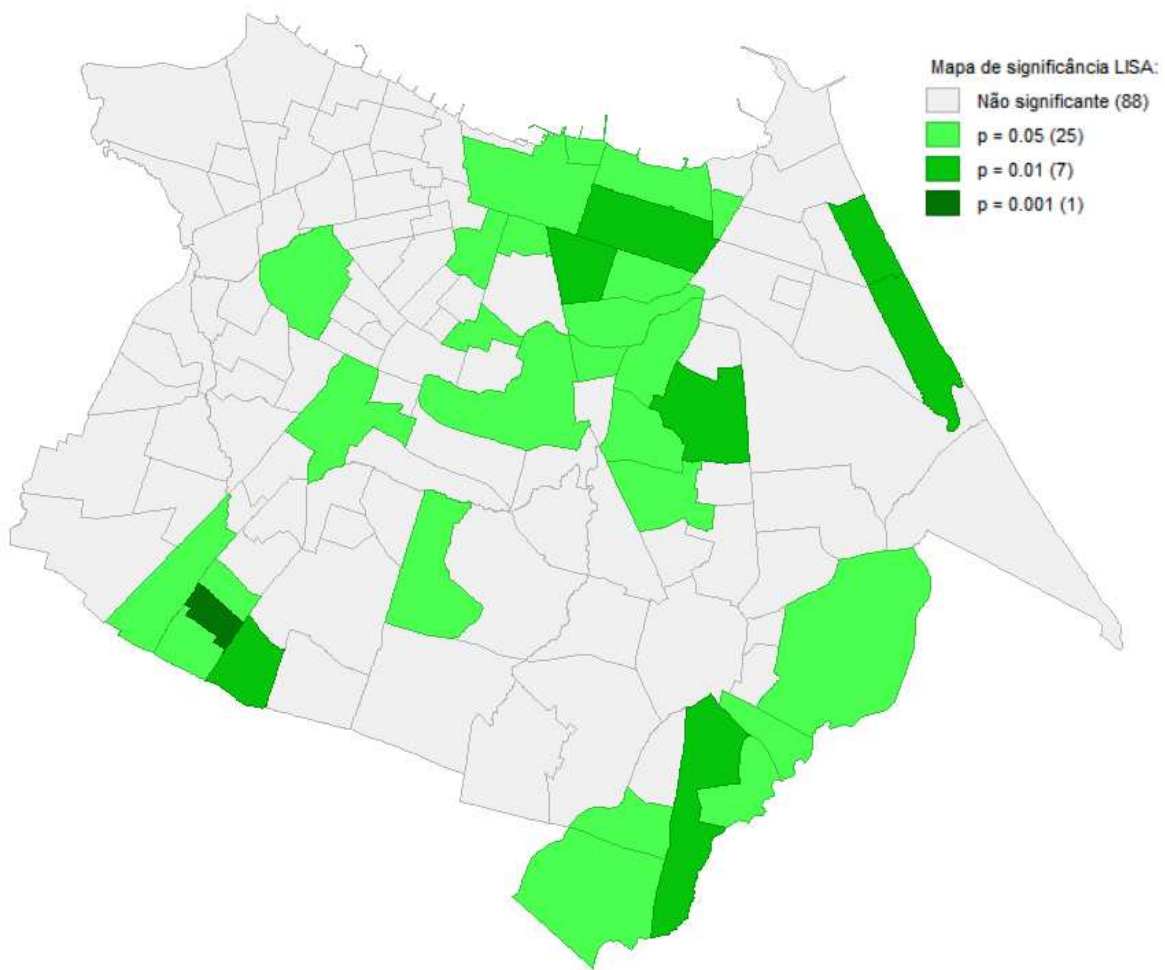
No sentido oposto, os agrupamentos Baixo-Baixo (azul-escuro), que abrangem 13 segmentos, localizam-se majoritariamente em áreas periféricas ao sul e sudeste, como Messejana, Curió, Lagoa Redonda e Ancuri. Esses segmentos representam zonas onde predomina a baixa densidade de tráfego, reforçando a existência de bolsões de fluidez estável, muitas vezes vinculados à natureza predominantemente residencial dessas regiões e à sua menor atratividade em termos de fluxos de demanda no horário analisado.

A presença de agrupamentos Baixo-Alto (azul-claro), ainda que restrita a 5 segmentos, fornece insights relevantes: trata-se de setores que, apesar de apresentarem baixo congestionamento, estão inseridos em áreas vizinhas marcadas por altos valores de Jam Factor. Essas ilhas de fluidez — localizadas, por exemplo, entre Aldeota e Mucuripe, ou entre Bairro de Fátima e Parangaba — sugerem a influência de variáveis locais, como melhorias recentes na infraestrutura viária, presença de corredores de transporte coletivo ou regimes semafóricos otimizados, funcionando como pontos de resiliência viária.

A inexistência de agrupamentos Alto-Baixo, por sua vez, reforça a hipótese de que, no horário de pico vespertino, o congestionamento manifesta-se de modo espacialmente contínuo. Ou seja, não há ocorrência de hotspots isolados cercados por áreas fluidas, o que aponta para a expansão coesa e difusa do colapso viário em áreas centrais.

A Figura 16 representa a significância estatística da autocorrelação espacial local (LISA) do fenômeno analisado (possivelmente congestionamento viário ou demanda por mobilidade) às 18h, um dos horários de pico do fluxo urbano. O mapa divide o município em áreas estatisticamente significantes e não significantes, com base em diferentes níveis de p-valor: $p \leq 0,05$ ($n = 25$), $p \leq 0,01$ ($n = 7$) e $p \leq 0,001$ ($n = 1$). As demais áreas ($n = 88$) foram classificadas como não significativas, não apresentando dependência espacial comprovada estatisticamente ao nível de 95% de confiança.

Figura 9 – Mapa de Significância Espacial Univariada (LISA) entre Fluxo por Bairros e Índice de Congestionamento (*JamFactor*) em Fortaleza às 18h

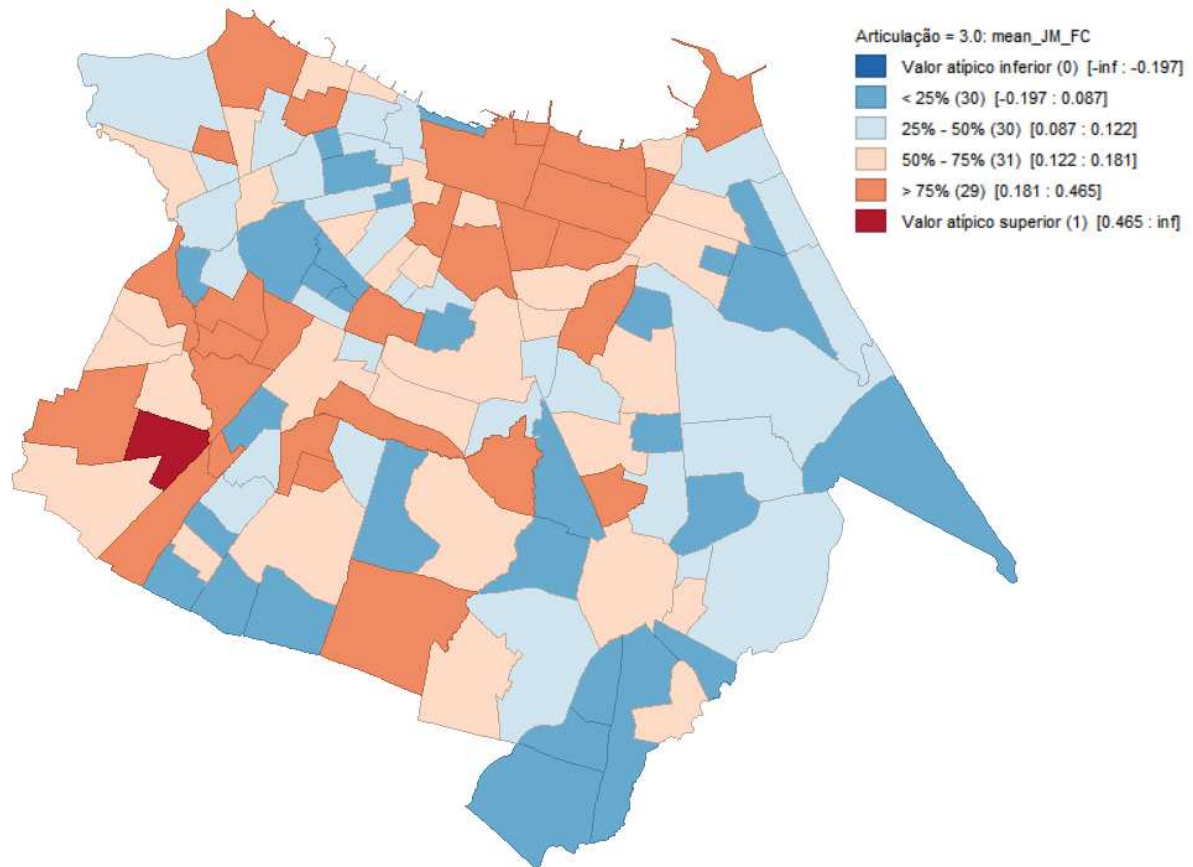


Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados do hereR (2024), processados no software GeoDa.

4.5 Análise Espacial Box Maps

Na imagem referente às 2h da manhã (Figura 17), observa-se um padrão geral de congestionamento relativamente homogêneo e predominantemente baixo, o que condiz com o comportamento típico de horários noturnos. Contudo, destaca-se a presença de um valor atípico superior nos bairros Siqueira e Bom Jardim, mais precisamente ao longo da Avenida General Osório de Paiva. Esse resultado, embora contraintuitivo para o horário, pode ser explicado por fatores estruturais e funcionais da via.

Figura 10 – Distribuição Espacial do *Jam Factor* Médio às 02h e Identificação de Valores Atípicos Superiores em Fortaleza (05 a 12 de junho de 2024)



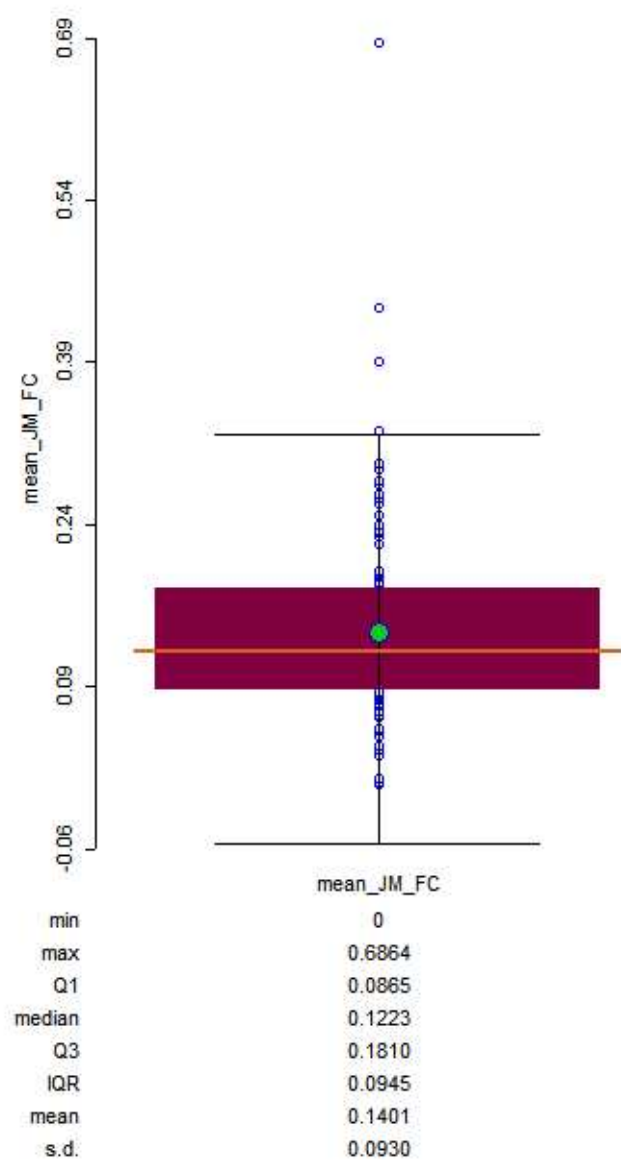
Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados do hereR (2024), processados no software GeoDa.

A Avenida General Osório de Paiva constitui um dos principais eixos arteriais de Fortaleza, conectando áreas periféricas densamente povoadas, como o Grande Bom Jardim, a polos de comércio popular e de transporte coletivo. No entanto, sua seção transversal é notoriamente estreita quando comparada a outras vias arteriais da cidade, como a Avenida Bezerra de Menezes, localizada na zona oeste-central. Enquanto esta última conta com canteiro central, pistas amplas e faixas exclusivas para ônibus em diversos trechos, a Osório de Paiva frequentemente apresenta trechos com estreitamento, calçadas irregulares, ausência de canteiro central e limitações à fluidez decorrentes de cruzamentos em nível com semáforos pouco sincronizados.

Essa configuração geométrica desfavorável propicia a ocorrência de congestionamento estrutural residual, mesmo em períodos de baixa demanda. O fluxo constante de veículos de carga, transporte por aplicativo e ônibus em operação 24 horas acentua ainda mais esse cenário. A permanência de *Jam Factor* elevados ao longo das 24 horas sugere uma condição crônica de saturação, em que a infraestrutura disponível não atende adequadamente ao volume diário distribuído, revelando gargalos que são independentes dos horários de pico.

Com base na Figura 18, que apresenta o boxplot do *Jam Factor* médio às 02h da manhã em setores censitários de Fortaleza, observa-se um padrão de distribuição condizente com os baixos níveis de demanda viária esperados para horários noturnos. O valor mediano de congestionamento (0,1223) e a média geral (0,1401) permanecem em faixas inferiores da escala, reforçando a baixa pressão sobre o sistema viário nesse período. A amplitude interquartil (IQR) de 0,0945 evidencia uma variação contida entre os setores, indicando que, mesmo entre os casos com congestionamentos relativamente mais altos, os níveis absolutos ainda são limitados.

Figura 18 – *Boxplot* referente ao *Jam Factor* médio no horário de 02h

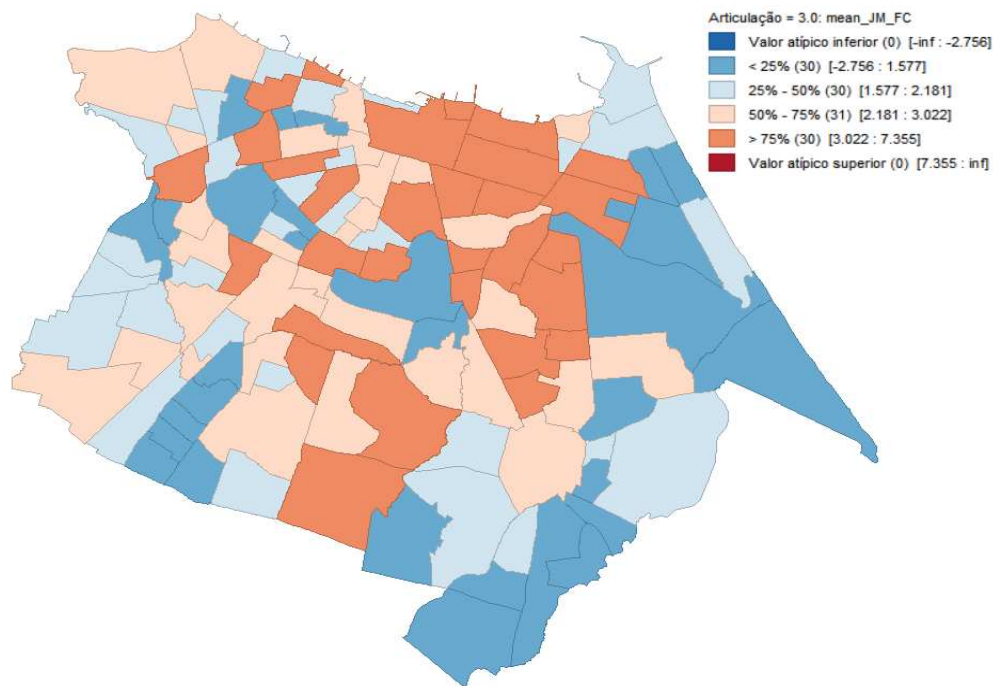


Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados do hereR (2024), processados no software GeoDa.

No entanto, o boxplot revela a presença de diversos valores atípicos superiores, com destaque para um *Jam Factor* máximo de 0,6864 — número significativamente elevado para o horário analisado. É relevante observar que a dispersão dos valores não compromete a tendência central dos dados, pois a distribuição permanece assimétrica à direita, com uma concentração dos dados em torno da faixa inferior e cauda longa superior. Tal comportamento sugere a ocorrência de congestionamentos residuais em pontos específicos, sem configurar um fenômeno generalizado de ineficiência do sistema viário. Essa interpretação é corroborada pela baixa variabilidade padrão (desvio padrão de 0,0930), indicando que, excetuando os valores extremos, o padrão de tráfego noturno apresenta homogeneidade espacial considerável.

A Figura 19 apresenta a distribuição espacial do *Jam Factor* médio às 18h, correspondente ao horário de pico vespertino, no intervalo de 05 a 12 de junho de 2024, em setores censitários de Fortaleza. A análise baseia-se em uma classificação por quartis, com média espacial suavizada utilizando vizinhança de ordem três (articulação = 3.0), representando a intensidade média de congestionamento nas unidades territoriais urbanas.

Figura 11 – Distribuição Espacial do *Jam Factor* Médio às 18h e Identificação de Valores Atípicos Superiores em Fortaleza (05 a 12 de junho de 2024)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados do hereR (2024), processados no software GeoDa.

A ausência de valores atípicos superiores ou inferiores — isto é, valores que excedam 1,5 vezes o intervalo interquartil acima do terceiro quartil ou abaixo do primeiro quartil — indica que, no período e horário analisados, o padrão de congestionamento se distribui dentro da variação estatisticamente esperada. Isso sugere um cenário de homogeneidade relativa, no qual não há setores que se destaquem de forma estatisticamente extrema, seja por congestionamento excessivamente elevado, seja por fluidez excepcional.

Apesar disso, a classificação por quartis permite identificar zonas de maior e menor pressão viária relativa, sendo fundamental para fins de planejamento urbano. Os setores classificados no quartil superior ($>75\%$) concentram-se em áreas com histórico conhecido de tráfego intenso, como os bairros Aldeota e Dionísio Torres — com forte presença de avenidas arteriais como Santos Dumont e Dom Luís; Parquelândia e Benfica — com fluxo oriundo da Av. Bezerra de Menezes e proximidade com o centro expandido; Cidade dos Funcionários, Cocó e Papicu — zonas de transição entre áreas residenciais densas e polos comerciais relevantes; e porções da Serrinha, Maraponga e Jóquei Clube — refletindo os fluxos residenciais de retorno ao lar nesse horário. Essas regiões apresentaram valores médios de *Jam Factor* entre 3,022 e 7,355, o que denota a ocorrência de congestionamentos moderados a intensos, ainda que sem extrapolar os limites de normalidade estatística. A elevada densidade viária e o acúmulo de atividades comerciais e de serviços nessas áreas explicam o volume de tráfego observado, mesmo na ausência de valores considerados atípicos.

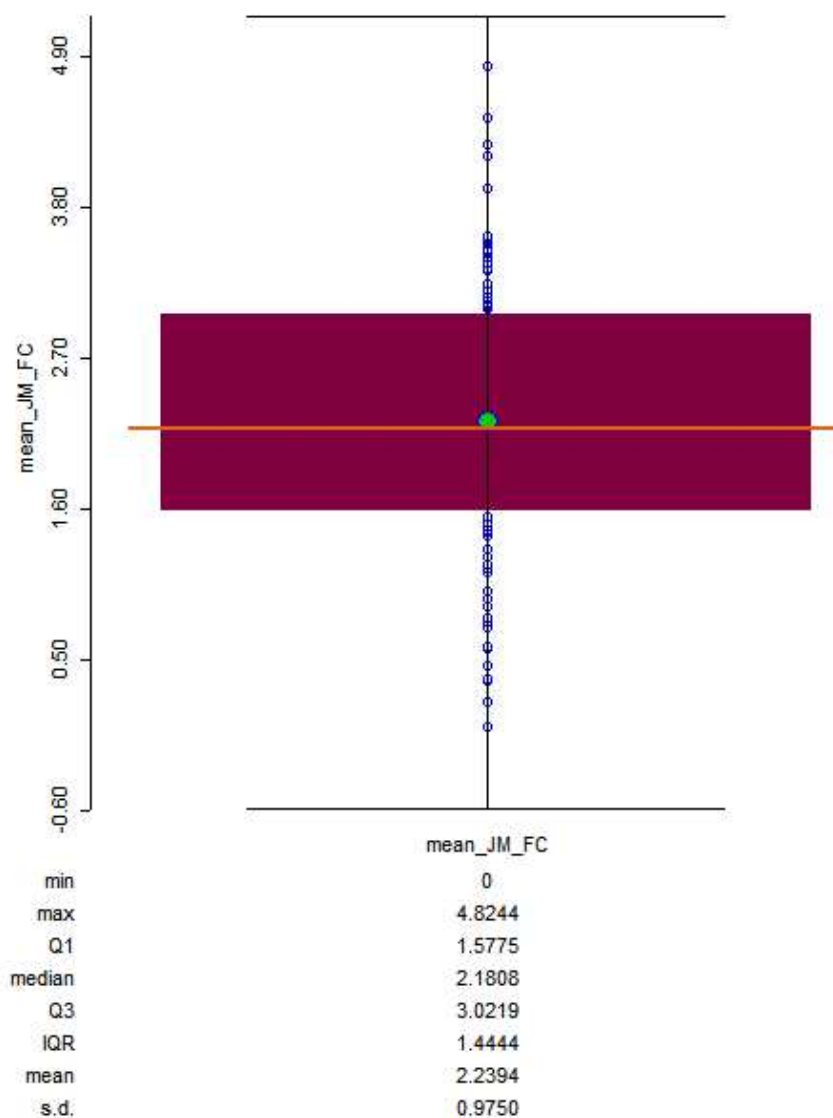
Por outro lado, os setores pertencentes ao quartil inferior ($<25\%$), com *Jam Factor* médio inferior a 1,577, concentram-se sobretudo nas extremidades da cidade. Entre eles, destacam-se bairros como Barroso, Messejana, Ancuri e Curió, na região Sul; Vila Velha, Cristo Redentor e Carlito Pamplona, na região Oeste; além de porções do Cais do Porto, Vicente Pinzón e Serviluz, na região Leste.

A ausência de valores atípicos não significa, portanto, ausência de desigualdades no congestionamento, mas sim uma distribuição estatisticamente regular, sem rupturas extremas no padrão de tráfego urbano às 18h. Esse cenário reforça a hipótese de que o sistema viário de Fortaleza, embora sobrecarregado em algumas zonas, não apresentou, nesse período, setores com desempenho fora da curva — seja por colapsos agudos, seja por fluidez excepcional.

Com base no *boxplot* referente ao horário de 18h (Figura 20), observa-se uma elevação significativa nos valores médios de *Jam Factor* em comparação aos demais períodos do dia, com média de 2,2394 e mediana de 2,1808 — evidenciando um padrão consistente de saturação viária no horário de pico vespertino. A amplitude interquartil (IQR) de 1,4444 e a dispersão elevada (desvio padrão de 0,9750) indicam uma variabilidade substancial entre os

segmentos viários analisados, reforçando a hipótese de que o congestionamento às 18h não é homogêneo, mas sim concentrado em corredores específicos da malha urbana de Fortaleza.

Figura 12 – *Boxplot* referente ao *Jam Factor* médio no horário de 18h



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados do hereR (2024), processados no software GeoDa.

A existência de valores atípicos superiores, com um máximo de *Jam Factor* de 4,8244, extrapola os limites operacionais aceitáveis em vias urbanas e sugere a presença de colapsos localizados, possivelmente relacionados a gargalos estruturais persistentes. Esses *outliers* não devem ser tratados como exceções estatísticas descartáveis, mas sim como expressões de fragilidade sistêmica que demandam intervenções direcionadas.

A comparação com os dados dos horários de menor demanda, como 2h da manhã, revela a discrepância funcional entre diferentes momentos do dia e confirma a tese de que o pico das 18h corresponde a um regime de operação em estado crítico para parte relevante da rede viária. As vias mais afetadas costumam estar vinculadas aos fluxos de retorno domiciliar, com destaque para os corredores que conectam áreas centrais às periferias, como a Av. Osório de Paiva, Av. Mister Hull e BR-116 no sentido sul.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou a viabilidade de monitorar e interpretar, de forma integrada e espaço-temporal, a dinâmica dos congestionamentos urbanos em Fortaleza, a partir de dados de geolocalização e rotinas automatizadas de coleta e análise. A utilização da API hereR em conjunto com ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e análise espacial, como o GeoDa e o Índice de Moran, permitiu identificar padrões críticos de tráfego com precisão, mesmo diante de limitações metodológicas no cálculo do Jam Factor.

Os resultados obtidos evidenciaram coerência entre os dados digitais e levantamentos empíricos, como a comparação com o índice de congestionamento da Avenida José Bastos. A identificação de hotspots em bairros como Messejana e Centro — áreas com alta densidade funcional e conectividade viária — demonstra o potencial prático da abordagem para subsidiar intervenções urbanas direcionadas, requalificações geométricas e ajustes operacionais. Além disso, a detecção de anomalias em vias com baixa demanda reforça a importância do monitoramento contínuo e sensível a eventos pontuais.

Contudo, o recorte temporal limitado (oito dias) e a cobertura parcial da malha viária (1,5%), concentrada em vias arteriais, impõem restrições à generalização dos achados. A dependência de uma única fonte de dados, sem validação cruzada com outras plataformas ou registros físicos, também pode introduzir vieses na interpretação dos congestionamentos.

Para superar essas limitações, recomenda-se a ampliação da série temporal de análise, incorporando sazonalidades, eventos excepcionais e variações climáticas, bem como a expansão espacial da amostra, com inclusão de vias coletoras e locais em áreas periféricas. A integração de fontes heterogêneas — como dados de Waze, sensores urbanos, transporte público, acidentes e interdições — pode aumentar a robustez analítica e a confiabilidade dos resultados.

Além disso, abordagens multimodais que considerem pedestres, ciclistas, transporte coletivo e logística urbana permitem uma leitura sistêmica do fenômeno da mobilidade, ultrapassando a visão centrada no automóvel. O emprego de técnicas de aprendizado de máquina, séries temporais e modelos preditivos também se mostra promissor para identificar padrões ocultos e antecipar zonas críticas de congestionamento, apoiando decisões em tempo real.

Por fim, a avaliação dos impactos socioeconômicos e ambientais dos congestionamentos — como produtividade urbana, saúde pública, emissões e desigualdades no acesso à infraestrutura — constitui um campo relevante para pesquisas futuras, especialmente

aquelas alinhadas aos princípios de sustentabilidade e justiça espacial. Tais direções ampliam o escopo analítico e reforçam o papel da inteligência computacional e da análise espacial como pilares da gestão urbana contemporânea.

REFERÊNCIAS

- AEA2024. **traffichere: Coleta automática de dados da HERE Technologies via API**. GitHub, 2024. Disponível em: <https://github.com/AEA2024/traffichere>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- ALMEIDA, R. S.; ROCHA, D. M. **Congestionamento urbano em cidades brasileiras: um estudo de caso de Fortaleza**. Estudos de Geografia Urbana, v. 19, n. 3, p. 301-320, 2021.
- ALMEIDA, T. F. et al. **Políticas públicas de mobilidade e gestão do tráfego urbano: estudo de caso em Fortaleza**. Cadernos de Transporte e Logística, v. 8, n. 2, p. 90–108, 2021.
- ANSALDO, R.; REY, S. J. **GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis**. Versão 1.20.0.6. GeoDa Center for Geospatial Analysis and Computation, 2021. Disponível em: <https://geodacenter.github.io>. Acesso em: 14 nov. 2024.
- ANSELIN, L. **Local Indicators of Spatial Association—LISA**. Geographical Analysis, v. 27, n. 2, p. 93–115, 1995. Disponível em: https://dces.webhosting.cals.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/128/2013/08/W4_Anselin1995.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.
- ANSELIN, L. **Spatial econometrics: Methods and models**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-015-7799-1>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- ANSELIN, L.; REY, S. J. **Modern Spatial Econometrics in Practice: A Guide to GeoDa, GeoDaSpace and PySAL**. Chicago: GeoDa Press LLC, 2014. Disponível em: https://sergerey.org/giasp16/pdfs/anselin_rey_weights.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.
- ANSELIN, L.; REY, S. J. **Properties of tests for spatial dependence in linear regression models**. Geographical Analysis, v. 36, n. 1, p. 23-46, 2004. DOI: 10.1111/j.0016-7363.2003.00267.x.
- BANISTER, D. **Transport Planning**. 2. ed. London: Routledge, 2008. Disponível em: https://priodeep.weebly.com/uploads/6/5/4/9/65495087/trnsportation_planning_2nd_ed._by_david_banister.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.
- BARINGTON-LEIGH, C.; MILLARD-BALL, A. **The world's user-generated road map is more than 80% complete**. PLOS ONE, v. 12, n. 8, p. e0180698, 2017. DOI: 10.1371/journal.pone.0180698.
- BRASIL. Ministério das Cidades. **Plano Nacional de Mobilidade Urbana**. Brasília: Ministério das Cidades, 2012. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSEMOB/cartilha_lei_12587.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.
- CAMPOS, V. B. G.; SILVA, A. N. R.; ANDRADE, M. O. **Comportamento do tráfego urbano: padrões temporais e variações sazonais**. Revista Transportes, v. 27, n. 2, p. 123–134, 2019.

CHEN, X. et al. **Congestionamento urbano e impactos na qualidade de vida: o caso de Fortaleza.** *Journal of Urban Mobility*, v. 35, n. 3, p. 102-115, 2020. DOI: 10.1016/j.jum.2020.100115.

CHEN, Y.; ZHANG, X.; CAO, X. **Understanding urban congestion from the perspective of spatiotemporal patterns.** *Sustainability*, v. 12, n. 5, p. 2098, 2020. DOI: 10.3390/su12052098.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences.** 2. ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1988. Disponível em: <https://www.utstat.toronto.edu/brunner/oldclass/378f16/readings/CohenPower.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.

COSTA, A. F.; LIMA, R. S.; ALMEIDA, J. M. **Identificação de áreas críticas de congestionamento em centros urbanos utilizando sistemas de informação geográfica.** *Revista Brasileira de Planejamento Urbano e Regional*, v. 15, n. 2, p. 254-271, 2023. DOI: 10.1016/j.rbp.2023.100123.

COSTA, C. et al. **Dynamic Traffic Modeling for Urban Mobility Systems.** *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 103, p. 45-56, 2017.

COSTA, M. E.; LIMA, P. R. **Infraestrutura viária e congestionamento em Fortaleza.** *Cadernos de Infraestrutura Urbana*, v. 8, n. 1, p. 77-91, 2022. DOI: 10.1016/j.ciu.2022.100123.

ELVIK, R. **Speed and road safety: Synthesis of evidence from evaluation studies.** *Transportation Research Record*, v. 1908, p. 59–69, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330519108_Speed_and_Road_Safety_Synthesis_of_Evidence_from_Evaluation_Studies. Acesso em: 20 jun. 2025.

FERREIRA, L. G.; SANTOS, P. R.; SILVA, M. V. **Avaliação de intervenções viárias por meio de análises espaço-temporais: estudo de caso em cidades brasileiras.** *Journal of Urban Studies*, v. 28, n. 1, p. 88-105, 2023. DOI: 10.1016/j.jus.2023.100123.

FIELD, A. **Discovering statistics using IBM SPSS statistics.** 4. ed. London: SAGE Publications, 2013. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=2046660>. Acesso em: 20 jun. 2025.

FIELD, A. **Discovering statistics using SPSS.** 3. ed. London: Sage, 2009. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1866193>. Acesso em: 20 jun. 2025.

FORTALEZA (Município). **Fortaleza 2040: plano de desenvolvimento de longo prazo.** Fortaleza: Instituto de Planejamento de Fortaleza – IPLANFOR, [s.d.]. Disponível em: <https://fortaleza2040.fortaleza.ce.gov.br/>. Acesso em: 14 jan. 2025.

FORTALEZA. Prefeitura Municipal. **Base de dados georreferenciados da malha viária.** Fortaleza, 2023. Disponível em: <https://www.fortaleza.ce.gov.br>. Acesso em: 10 nov. 2023.

FUNCEME. **Climatologia do Estado do Ceará**. Fortaleza: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2022. Disponível em: <https://www.funceme.br>. Acesso em: 8 maio 2025.

GANIN, Alexander A.; KITSACK, Maksim; MARCHESE, Dayton; KEISLER, Jeffrey M.; SEAGER, Thomas; LINKOV, Igor. **Resilience and efficiency in transportation networks**. *Science Advances*, v. 3, n. 12, e1701079, 20 dez. 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1701079. Disponível em: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.1701079>. Acesso em: 25 jun. 2025.

GONZALES, E. J. et al. **Understanding effects of road network structure on traffic performance using a simulation-based approach**. *Journal of Transport and Land Use*, v. 10, n. 1, p. 341–358, 2017.

GONZÁLEZ, J.; OLIVEIRA, L.; PEREIRA, D. **Dinâmica do Tráfego em Metrôpoles**. Rio de Janeiro: Editora Mobilidade, 2021.

GUERRERO-IBÁÑEZ, J. et al. **Urban Traffic Congestion and its Implications for Sustainable Mobility**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 63, p. 234-246, 2018.

HERE TECHNOLOGIES. **hereR: Access to the HERE REST APIs**. GitHub, 2023. Disponível em: <https://github.com/munterfinger/herer>. Acesso em: 17 mai. 2025.

HERE TECHNOLOGIES. **Traffic analytics methodology white paper**. Amsterdam: Here Global B.V., 2020. Disponível em: <https://www.here.com/docs/bundle/traffic-analytics-developer-guide/page/topics/using-traffic-analytics.html>. Acesso em: 20 jun. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação brasileiros com data de referência em 1º de julho de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

INRIX. **Global Traffic Scorecard 2022**. 2022. Disponível em: <https://inrix.com/scorecard/>. Acesso em: 14 dez. 2024.

INSTITUTO DE PLANEJAMENTO DE FORTALEZA. **Relatório de mobilidade urbana 2022**. Fortaleza: IPLANFOR, 2022. Disponível em: <https://www.ipplan.fortaleza.ce.gov.br/storage/img/product/document/portifolio-ipplan-2021-2024-4-1736361152.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). **Mobilidade Urbana: Uma Visão Metropolitana**. Brasília: IPEA, 2019. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br>. Acesso em: 24 jul. 2024.

JILANI, Usman et al. **A systematic review on urban road traffic congestion**. *Wireless Personal Communications*, v. 73, n. 4, p. 2077–2101, 2023. DOI: 10.1007/s11277-023-10700-0.

JOHNSON, A. et al. **Tendências recentes em análise de congestionamento urbano: estudo de caso em Fortaleza.** Transportes Sustentáveis, v. 15, n. 4, p. 501-518, 2020. DOI: 10.1016/j.ts.2020.100123.

JOHNSON, R. M. et al. **The relationship between land use and traffic congestion: a review of the literature.** Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 85, p. 102386, 2020. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102386.

KHATTAK, A. J.; LIU, J.; WALI, B. et al. **Modeling traffic incident duration using quantile regression.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2554, n. 1, p. 139-148, 2016. DOI: 10.3141/2554-15.

KNOOP, V. L. et al. **Impact of probe vehicle penetration rate on urban traffic state estimation.** Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 115, p. 102618, 2020. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102618.

LI, J.; ZHANG, H.; WANG, Y. **Peak-hour traffic analysis and its implications on urban mobility management.** Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 128, p. 137-149, 2021. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103123.

LI, X. et al. **Analysis of Traffic Flow and Congestion in Urban Areas.** Journal of Transport Engineering, v. 141, n. 5, 2015.

LITMAN, T. **Transportation for Livable Communities: Lessons from London, New York City, and Tokyo.** Victoria: Victoria Transport Policy Institute, 2021. Disponível em: <https://www.vtpi.org/future.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.

LOMAX, T.; SCHRANK, D.; TURNER, S. **Quantifying Congestion.** College Station: Texas Transportation Institute, 1997. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1634-12>. Acesso em: 20 jun. 2025.

LONGLEY, P. A. et al. **Geographic Information Science & Systems.** 4. ed. Hoboken: Wiley, 2015. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Geographic+Information+Science+and+Systems%2C+4th+Edition-p-9781119128458>. Acesso em: 20 jun. 2025.

MARTINEZ, L. et al. **Uso do solo e mobilidade: uma análise dos congestionamentos em Fortaleza.** Revista de Planejamento Urbano, v. 28, n. 1, p. 123-140, 2022. DOI: 10.1016/j.rpu.2022.100123.

MARTINEZ, L. M.; PEREIRA, R. H. M.; RAMOS, R. M. **Impact of urban mobility on air quality: a case study in Fortaleza, Brazil.** Atmosphere, v. 13, n. 2, p. 252, 2022. DOI: 10.3390/atmos13020252.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Excel.** Versão 365. Redmond, WA: Microsoft, 2023. Disponível em: <https://www.microsoft.com/excel>. Acesso em: 14 jun. 2025.

MORAN, P. A. P. **Notes on continuous stochastic phenomena.** Biometrika, v. 37, n. 1-2, p. 17-23, 1950. DOI: 10.1093/biomet/37.1-2.17.

MOREIRA, J. R.; PEREIRA, F. C.; COELHO, M. C. **Análise da confiabilidade de dados de tráfego urbano obtidos por sensores automáticos**. Revista Transportes, v. 27, n. 1, p. 145–158, 2019.

MUNTERFINGER, M. **hereR: an R package for HERE Technologies APIs**. GitHub, 2023. Disponível em: <https://github.com/munterfinger/hereR>. Acesso em: 10 nov. 2024.

OLIVEIRA, R. S.; GHIDINI, C. T. L. S.; TOREZZAN, C.; OLIVEIRA, W. A. **Modelagem para o problema de roteamento de veículos fretados**. Tendências em Matemática Aplicada e Computacional, v. 23, n. 4, p. 801–828, 2022. DOI: 10.5540/tcam.2022.023.04.00801.

ONU (Organização das Nações Unidas). **ONU-Habitat: População Mundial Será 68% Urbana até 2050**. 2018. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/188520-onu-habitat-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-ser%C3%A1-68-urbana-at%C3%A9-2050>. Acesso em: 15 jun. 2024.

ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. 4. ed. Chichester: Wiley, 2011. Disponível em: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/5967/64/L-G-0000596764-0002364278.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.

PEREIRA, A. Q. et al. **Fortaleza: Transformações na Ordem Urbana**. Fortaleza: Observatório das Metrópoles, 2023. Disponível em: <https://transformacoes.observatoriodasmetrolopes.net.br/livro/fortaleza/>. Acesso em: 28 set. 2024.

PEREIRA, R. H. M. et al. **Urban mobility in the Global South: evidence from Fortaleza, Brazil**. Transport Policy, v. 99, p. 383–395, 2021. DOI: 10.1016/j.tranpol.2020.09.001.

PINTO, F.; LIMA, R. M. **Distribuição espaço-temporal do congestionamento em áreas metropolitanas brasileiras: uma abordagem comparativa**. Revista Transportes, v. 29, n. 2, p. 51–64, 2021.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Versão 3.34.11. Open Source Geospatial Foundation, 2024. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 24 out. 2025.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 14 jun. 2025.

REZAEI, Mahdi; AZARMI, Mohsen; POUR MIR, Farzam Mohammad. **Traffic-Net: 3D traffic monitoring using a single camera**. arXiv preprint, 19 set. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2109.09165>. Acesso em: 20 jun. 2025.

RODRIGUES DA SILVA, A. N.; COSTA, A. M.; OLIVEIRA, L. K. **Mobilidade urbana e transporte: desafios contemporâneos das cidades brasileiras**. Revista Transportes, v. 23, n. 1, 2015. Disponível em: https://www.observatoriodasmetrolopes.net.br/wp-content/uploads/2020/05/Mobilidade-urbana_Juciano-Rodrigues.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

RODRIGUES, D. C. et al. **Dinâmica do congestionamento viário urbano: uma abordagem empírica a partir de dados de velocidade.** Revista Brasileira de Mobilidade Urbana, v. 9, n. 2, p. 25–39, 2021.

RODRIGUES, L. C.; FERREIRA, A. S. **Estratégias integradas de gestão de tráfego para cidades de médio porte.** Revista de Engenharia de Transportes, v. 17, n. 3, p. 210–228, 2020.

RODRIGUES, L. et al. **Impact of Public Transport on Urban Traffic Congestion.** Transportation Research Part B: Methodological, v. 140, p. 122-135, 2020.

ROESS, R. P.; PRASSAS, E. S.; MCSHANE, W. R. **Traffic Engineering.** 4. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010. Disponível em: https://civil808.com/sites/default/files/field/files/node_3951-roger_roess_elena_prassas_william_mcschane_trafbookzz.org_.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

RSTUDIO. **RStudio: Integrated Development Environment for R.** Versão 2023.06.2+561. Boston: Posit Software, PBC, 2023. Disponível em: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>. Acesso em: 14 jul. 2024.

SANTOS, M.; SILVEIRA, M. L. **O Brasil: Território e Sociedade no Início do Século XXI.** Rio de Janeiro: Record, 2001. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/O_Brasil.html?hl=pt-BR&id=7iAo3uQJX-YC&redir_esc=y. Acesso em: 20 jun. 2025.

SCHRANK, D. et al. **2019 Urban Mobility Report.** College Station: Texas A&M Transportation Institute, 2019. Disponível em: <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/umr/archive/mobility-report-2019.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.

SHI, Z.; WANG, Z.; XU, Y.; YANG, X. **Spatial clustering analysis of urban traffic congestion patterns using LISA and GPS-based vehicle data.** Journal of Transport Geography, v. 109, 2023. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2023.103577.

SILVA, C. M.; ALMEIDA, F. M.; FREITAS, F. **The role of geographic information systems in urban planning: a review.** Journal of Urban Planning and Development, v. 145, n. 3, p. 04019017, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000523.

SILVA, E. R.; PINTO, M. L.; COSTA, J. A. **Estudo da dinâmica de congestionamentos em centros urbanos: a análise da variação temporal e espacial do tráfego em grandes cidades.** Revista Brasileira de Engenharia de Transportes, v. 49, n. 4, p. 567-582, 2021. DOI: 10.1590/rbetrans.2021.049.04.002.

SILVA, J. P.; SANTOS, M. R. **Análise espaço-temporal de congestionamentos em Fortaleza: uma abordagem multidisciplinar.** Revista Brasileira de Mobilidade Urbana, v. 12, n. 1, p. 45–62, 2023.

SILVA, J. C.; ALMEIDA, M. F. **Aplicações de Sistemas de Informação Geográfica para o monitoramento e gestão do tráfego urbano.** Revista Brasileira de Geografia, v. 75, n. 2, p. 145-160, 2020. Disponível em: <https://www.revbrageo.org.br/artigos/2020/75-2/145-160.pdf>. Acesso em: 26 maio 2025.

- SILVA, P. et al. **Analysis of Traffic Patterns and Mobility Behavior in Urban Areas.** Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 102, p. 45-58, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336203793_Assessing_Urban_Travel_Patterns_An_Analysis_of_Traffic_Analysis_Zone-Based_Mobility_Patterns. Acesso em: 20 jun. 2025.
- SILVA, R. F.; LIMA, M. R. **Impactos das chuvas no tráfego urbano de Fortaleza: uma análise espaço-temporal.** Revista Transporte & Sociedade, Fortaleza, v. 43, n. 2, p. 112–130, 2021. Disponível em: https://impactum-journals.uc.pt/territorium/article/view/1647-7723_25-1_1. Acesso em: 20 jun. 2025.
- SOUZA, A.; OLIVEIRA NETO, F. **Modelagem de impactos de acidentes em redes urbanas.** Revista de Transportes, v. 28, n. 2, p. 45-60, 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i2.1904.
- SOUZA, L. A.; COSTA, R. S. **Statistical models for assessing the impact of road infrastructure on traffic congestion.** Transportmetrica A: Transport Science, v. 17, n. 1, p. 107-126, 2021. DOI: 10.1080/23249935.2020.1813096.
- SOUZA, P. et al. **The accuracy of real-time traffic data: a case study of Google Traffic in São Paulo.** Journal of Urban Technology, v. 30, n. 2, p. 123-138, 2023. DOI: 10.1080/10630732.2023.100123.
- SOUZA, R.; COSTA, M. **Desafios da mobilidade urbana nas grandes cidades brasileiras.** Revista de Transporte, v. 12, n. 2, p. 45-60, 2022. DOI: 10.1016/j.rt.2022.100123.
- SOUZA, V. N.; OLIVEIRA NETO, F. M. **Analysis of accident duration on urban arterial roads.** Transportes, v. 28, n. 3, p. 266-280, 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i3.2142.
- TOMTOM Traffic Index. **Global Traffic Scorecard – Brazil (capitais).** 14^a ed., Netherlands: TomTom N.V., 2025. Disponível em: <https://www.tomtom.com/traffic-index/>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- TOLEDO, Tania; SCHRECKENBERG, Michael; PIERRE, Giovanni. **Night-time traffic flow characteristics and their impact on urban congestion patterns.** Transportation Research Procedia, v. 37, p. 203–210, 2019. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.132. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.132>.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). **Highway capacity manual (HCM).** Washington, D.C.: National Research Council, 2010. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/trnews273hcm2010.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). **Highway capacity manual (HCM).** 6. ed. Washington, D.C.: National Academies Press, 2016. Disponível em: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/24798/highway-capacity-manual-6th-edition-a-guide-for-multimodal-mobility>. Acesso em: 20 jun. 2025.

TSAI, Y.-H.; CHANG, H.-W.; CHEN, W.-H. **Analysis of Urban Traffic Congestion Based on Temporal and Spatial Patterns Using GPS Data.** Sustainability, v. 11, n. 23, 2019.

VASCONCELOS, F. **Tráfego Urbano e Mobilidade: Estudo de Caso em Fortaleza.** Fortaleza: Editora UFC, 2005.

WARDROP, J. G. **Some theoretical aspects of road traffic research.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, v. 1, n. 3, p. 325–362, 1952. Disponível em: [https://people.irisa.fr/Nicolas.Markey/PDF/Papers/pice1\(3\)-War.pdf](https://people.irisa.fr/Nicolas.Markey/PDF/Papers/pice1(3)-War.pdf). Acesso em: 20 jun. 2025.

WEI, Guanyu; HAN, Gab-Soo; LANG, Xiaoxia. **Using RS and GIS for risk management of natural disasters consequences: The case of cultural heritage in Jinan city, China.** Heliyon, v. 10, n. 19, e38217, 15 out. 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e38217.

WICKHAM, H. et al. **dplyr: A Grammar of Data Manipulation.** R package version 1.1.3, 2023a. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=dplyr>. Acesso em: 13 abr. 2025.

WICKHAM, H.; GIRLICH, M. **tidyr: Tidy Messy Data.** R package version 1.3.0, 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=tidyr>. Acesso em: 13 abr. 2025.

YANNIS, G.; DIMITRIOU, L. **Traffic Flow Analysis in Urban Networks.** Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 93, p. 108-120, 2018.

ZHANG, K.; SUN, D. (Jian); SHEN, S.; ZHU, Y. **Analyzing spatiotemporal congestion pattern on urban roads based on taxi GPS data.** Journal of Transport and Land Use, v. 10, n. 1, 2017. DOI: 10.5198/jtlu.2017.954.

ZHANG, K.; CHU, Z.; XING, J.; ZHANG, H.; CHENG, Q. **Urban traffic flow congestion prediction based on a data-driven model.** Mathematics, v. 11, n. 19, p. 4075, 2023. DOI: 10.3390/math11194075.

ZHANG, L.; XU, H.; CAO, J. **Urban Congestion Patterns and Land Use: Empirical Study Using GPS Data in Shanghai.** Transportation Research Record, n. 2394, p. 15–23, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/366318790_Land_Use_Impacts_on_Traffic_Congestion_Patterns_A_Tale_of_a_Northwestern_Chinese_City. Acesso em: 20 jun. 2025.

APÊNDICE A – SCRIPT EM R PARA COLETA E EXPORTAÇÃO DOS DADOS

```
# Instalação dos pacotes necessários
install.packages(c("hereR", "osmdata", "sf"))

# Carregamento das bibliotecas
library(hereR)
library(osmdata)
library(sf)

# Define a cidade de interesse
city <- "Fortaleza, CE, BR"

# Obtém o bounding box da cidade
bbox <- getbb(city)

# Recupera os dados geoespaciais da cidade
cdn <- osmdata::getbb(city, format_out = "sf_polygon")

# Define a chave da API HERE
set_key("ui4XMR_4PMi7Wetu1Af91Fy3WtD9S3f-pH94D6FwFdg")

# Obtém os dados de fluxo de tráfego (jam_factor mínimo = 0)
flows_For <- flow(cdn, min_jam_factor = 0)

# Geração dinâmica do nome do arquivo com data e hora
arquivo <- list("flows_For")
date <- format(Sys.time(), "%d-%m-%Y_%H:%M")
format <- "shp"

filename <- paste(arquivo, date, sep = '_')
filename <- paste(filename, format, sep = '.')

# Exibe o nome do arquivo gerado
print(filename)

# Exporta os dados para shapefile no formato ESRI
st_write(flows_For, filename, driver = "ESRI Shapefile")
```

APÊNDICE B – WORKFLOW AUTOMATIZADO DO GITHUB

```
# Arquivo de workflow automatizado do GitHub Actions
# Executa a cada 15 minutos para coletar dados de tráfego via hereR
on:
  schedule:
    - cron: '*/*15 * * * *' # Executa a cada 15 minutos
jobs:
  traffic_data_extraction:
    runs-on: ubuntu-latest
    steps:
      - name: Set up R
        uses: r-lib/actions/setup-r@v2
      - name: Install packages
        uses: r-lib/actions/setup-r-dependencies@v2
      with:
        packages: |
          any::hereR
          any::osmdata
          any::sf
      - name: Check out repository
        uses: actions/checkout@v4
      - name: Run R Script
        run: Rscript -e 'source("traffic_data_extraction.R")'
      - name: Commit results
        run: |
          git config --local user.email "actions@github.com"
          git config --local user.name "GitHub Actions"
          git add .
          git commit -m 'Data updated' || echo "No changes to commit"
          git push origin || echo "No changes to commit"
```