



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

JOANA MAIA FERNANDES BARROSO

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE TEMPORAL DOS FLUXOS ORIGEM-DESTINO E
DO VOLUME DE TRÁFEGO VEICULAR NA CIDADE DE FORTALEZA-CE**

FORTALEZA

2018

JOANA MAIA FERNANDES BARROSO

ANÁLISE DA VARIABILIDADE TEMPORAL DOS FLUXOS ORIGEM-DESTINO E DO
VOLUME DE TRÁFEGO VEICULAR NA CIDADE DE FORTALEZA-CE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Moraes de Oliveira Neto.

FORTALEZA

2018

JOANA MAIA FERNANDES BARROSO

ANÁLISE DA VARIABILIDADE TEMPORAL DOS FLUXOS ORIGEM-DESTINO E DO
VOLUME DE TRÁFEGO VEICULAR NA CIDADE DE FORTALEZA-CE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Aprovada em: 30/11/2018.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Elievam Bessa Júnior
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

AGRADECIMENTOS

À natureza livre da realidade que permite que tudo seja e não seja ao mesmo tempo.

Aos meus pais e meu irmão que me deram todo o amor e compreensão que puderam, e que me acompanham desde que comecei essa viagem nessa vida, sempre me apoiando e me incentivando em todas as compartimentações da vida criadas pelo ser humano. E aos meus cachorros José e Maria, dois anjos que me guiam todos os dias.

Ao Gabriel Trujillo, um anjo que veio da Venezuela para me mostrar que eu sou capaz de fazer coisas que eu nunca acreditei.

Ao professor Felipe Loureiro, que, ao responder a um e-mail meu em 2015, abriu as portas e me acolheu no Petran onde eu pude me encontrar profissionalmente, tornando tudo isso possível, além de ser uma grande inspiração como profissional, professor e ser humano em todos os momentos e de ter me direcionado e orientado do início até o final deste processo.

Ao meu orientador, professor Moraes, por todos os ensinamentos, pela paciência, amizade, disponibilidade e fé que depositou em mim como pessoa e pesquisadora, sempre me incentivando e me inspirando a ser melhor pessoal e profissionalmente.

Aos professores Anselmo e Elievam, pelas importantes contribuições durante e ao final deste trabalho.

Aos demais professores do Planejamento, Bruno, Flávio, Mário, Manoel e Uchôa, pelos ensinamentos dentro e fora de sala de aula.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes, dona Maria, dona Eliania, dona Clélia, Zacarias e os demais pelo apoio nas atividades diárias.

Ao grupo de pesquisa MITUS (Modelagem Integrada do Transporte e Uso do Solo), por toda a ajuda e companheirismo e pelas ricas discussões e que abriram meu horizonte de pensamento em relação ao planejamento de transportes.

Ao João Lucas, que, além de ter sido essencial para o sucesso deste trabalho, me inspira todos os dias com sua generosidade a ser uma pessoa melhor e uma profissional dedicada.

Às minhas amigas companheiras de vida maravilhosas, Bia, Julie, Lisel, Vanessa, e Ximena, que me acompanharam desde o início desse período e até hoje.

Aos Gardens, grupo iniciado por Sameque, companheiros de angústias e felicidades no último ano que passei no GTTEMA, trazendo leveza e suporte durante o final deste processo.

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

RESUMO

A compreensão dos padrões de deslocamento viário da população de uma área urbana é de fundamental importância para o planejamento de transportes. A partir dessa compreensão, é possível formular e aplicar modelos para previsão da demanda por transportes para então subsidiar a tomada de decisão em relação a políticas públicas no ambiente urbano. Duas das variáveis que compõem esse padrão são o volume de tráfego e os fluxos origem-destino (OD). A partir disso, esta pesquisa tem como objetivo geral analisar a variabilidade temporal do volume de tráfego e dos fluxos OD na cidade de Fortaleza-CE utilizando dados provenientes do sistema de fiscalização eletrônica instalado na malha viária da cidade. Para isto, foram propostas e aplicadas duas etapas metodológicas: consolidação dos dados, com o objetivo de extrair séries temporais do volume e do fluxo OD dos dados de fiscalização eletrônica, e análise exploratória com o objetivo de analisar a variabilidade das séries obtidas na primeira etapa. Ao final desta pesquisa, foi obtido como resultado a compreensão dos padrões de variabilidade do tráfego na área de estudo, em um nível global, incluindo variações temporais ao longo do dia e espaciais em relação à localização na rede viária e os fatores que podem influenciar nessa variação, fornecendo uma contribuição sobre o fenômeno, assim como sobre o método de análise para o tipo de dado utilizado.

Palavras-chave: tráfego urbano, variabilidade do tráfego, volume de tráfego, fluxo OD.

ABSTRACT

Understanding the patterns of road displacement of the population from an urban area is of fundamental importance for transportation planning. From this understanding it is possible to formulate and apply models for demand forecasting, and then to subsidize decision making in relation to public policies in the urban environment. Two of the variables that compose this pattern are the traffic volume and the origin-destination (OD) flows. From this, this research has as general objective to analyze the temporal variability of traffic volume and OD flows in the city of Fortaleza-CE using data from the electronic surveillance system installed in the city's road network. For this, two methodological steps were proposed and applied: data consolidation, with the objective of extracting time series of volume and OD flow from the data of electronic control, and exploratory analysis where we sought to analyze the variability of the series obtained in the first stage. At the end of this research it was obtained as a result the understanding of the patterns of traffic variability in the study area, at a global level, including temporal variations throughout the day and spatial in relation to the location in the road network and factors that may influence this variation, providing a contribution on the phenomenon, as well as on the method of analysis for the type of data used.

Keywords: urban traffic, traffic variability, traffic volume, OD flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O modelo clássico de transporte quatro etapas	21
Figura 2 – Relação entre a alocação de tráfego e a estimação da matriz OD	22
Figura 3 – Evolução ao longo do tempo dos fluxos em arcos (rede não congestionada - $\delta = 3$), $\theta = 0,10$, $\alpha = 0,5$ e $\beta = 0,5$	26
Figura 4 – Evolução ao longo do tempo dos fluxos em arcos (rede congestionada, $\delta = 4$)	26
Figura 5 – Estimativa de fluxos no par OD 10-16 (fluxo alto) pelo modelo proposto	30
Figura 6 – Estimativa de fluxos no par OD 10-16 (fluxo alto) pelo modelo GLS	30
Figura 7 – Estimativa de fluxos no par OD 1-10 (fluxo médio) pelo modelo proposto ...	31
Figura 8 – Séries representativas dos volumes observados e modelados	33
Figura 9 – Perfis diários de variação entre dias da semana	34
Figura 10 · Perfis médios de unidade de tempo de viagem ao longo de 24 terças-feiras de 6 de janeiro de 2009 a 18 de agosto de 2009	36
Figura 11 · ST-ACF para o pico da manhã nas ordens espaciais 0, 1, 2 e 3	37
Figura 12 · ST-ACF para o entre pico nas ordens espaciais 0, 1, 2 e 3	37
Figura 13 · ST-ACF para o pico da tarde nas ordens espaciais 0, 1, 2 e 3	38
Figura 14 · Variação anual do momento de tráfego diário médio na área de estudo comparativamente á evolução da frota (mês de abril de cada ano)	40
Figura 15 · Perfis de variação mensal relativa do VMD por arco	41
Figura 16 · Perfis de variação mensal absoluta do VMD (dias úteis de 2003) por sentido	de 41

	via	
Figura 17	· Análise de variância das médias mensais de volume diário (dias úteis de 2003) na Avenida Dom Manuel – sentido norte-sul	42
Figura 18	· Perfis de variação diária relativa do VMD por arco	43
Figura 19	· Perfis de variação diária relativa do VMD por arco	43
Figura 20	· Distribuição horária do volume de tráfego médio por mês em uma seção da avenida Virgílio Távora em 2003	45
Figura 21	· Distribuição horária do volume de tráfego médio por dia da semana em uma seção da avenida da Abolição em 2003	45
Figura 22	· Superfície espaço-temporal típica de fluxo de tráfego horário (veículos/hora) da Av. Rui Barbosa	46
Figura 23	· Usos do solo do município de Fortaleza	50
Figura 24	· População e densidade populacional por bairro em 2010	50
Figura 25	· Empregos totais por bairro	51
Figura 26	· Produção e atração de viagens no pico da manhã e maiores linhas de desejo de viagens	52
Figura 27	· Equipamentos de fiscalização eletrônica distribuídos na malha viária de Fortaleza	53
Figura 28	· Equipamentos de fiscalização eletrônica por	54

	bairro	
Figura 29	· Subdivisão de Fortaleza em regiões	55
Figura 30	· Distribuição dos equipamentos em regiões	56
Figura 31	· Distribuição dos equipamentos nas novas regiões propostas	56
Figura 32	· Proposta metodológica	59
Figura 33	· Trecho de arquivo de registro de fiscalização eletrônica da empresa Atlanta .	61
Figura 34	· Etapas metodológicas da consolidação da base de dados	64
Figura 35	· Procedimentos de filtragem para seleção de equipamentos com volume aceitável	65
Figura 36	· Associação entre regiões	68
Figura 37	· Procedimentos de filtragem para seleção de equipamentos com volume aceitável	70
Figura 38	· Distribuição horária do volume no corredor da Avenida João Pessoa/Avenida da Universidade	74
Figura 39	· Distribuição horária do volume no corredor da Avenida Abolição/Avenida Presidente Castelo Branco	74
Figura 40	· Distribuição horária do volume no corredor da Avenida Raimundo Neri/Avenida Coronel Carvalho	74
Figura 41	· Equipamentos selecionados para a extração do volume de tráfego	75
Figura 42	· Localização de equipamentos na região de	76

	estudo					
Figura 43	· Região Central. Equipamento AT096. Sentido leste-oeste					76
Figura 44	· Região Central. Equipamento 01385207. Sentido sul-norte					76
Figura 45	· Região Nordeste. Equipamento 01385161. Sentido norte-sul					77
Figura 46	· Região Nordeste. Equipamento 01385245. Sentido leste-oeste					77
Figura 47	· Região Noroeste. Equipamento AT092. Sentido leste-oeste					77
Figura 48	· Região Noroeste. Equipamento AT217. Sentido oeste-leste					78
Figura 49	· Região Sudoeste. Equipamento 01385223. Sentido norte-sul					78
Figura 50	· Região Sudoeste. Equipamento AT041. Sentido oeste-leste					78
Figura 51	· Região Sul. Equipamento 01385236. Sentido sul-norte					79
Figura 52	· Região Sul. Equipamento FS120. Sentido norte-sul					79
Figura 53	· Variação da proporção de leitura e para o equipamento FS072					81
Figura 54	· Variação da proporção de leitura e para o equipamento FS075					81
Figura 55	· Equipamentos selecionados para extração do fluxo OD no pico da manhã					82
Figura 56	· Equipamentos selecionados para extração do fluxo OD no entre pico					82

Figura 57 .	Equipamentos selecionados para extração do fluxo OD no pico da tarde	83
Figura 58 .	Distribuição dos tempos de viagem para as associações central-nordeste para o pico da manhã	84
Figura 59 .	Distribuição dos tempos de viagem para as associações sudoeste-central para o pico da manhã	84
Figura 60 .	Distribuição dos tempos de viagem para as associações sudoeste-sul para o pico da manhã	85
Figura 61 .	Fluxo OD no par nordeste-central	86
Figura 62 .	Fluxo OD no par noroeste-central	86
Figura 63 .	Fluxo OD no par sudoeste-central	86
Figura 64 .	Fluxo OD no par sul-central	87
Figura 65 .	Fluxo OD no par central-nordeste	87
Figura 66 .	Fluxo OD no par central-noroeste	87
Figura 67 .	Fluxo OD no par central-sudoeste	88
Figura 68 .	Fluxo OD no par central-sul	88
Figura 69 .	Fluxo OD no par nordeste-noroeste	88

Figura 70	·	Fluxo	OD	no	par	noroeste- sudeste	89
Figura 71	·	Fluxo	OD	no	par	sudeste- sul	89
Figura 72	·	Fluxo	OD	no	par	sul- noroeste	89
Figura 73	·	Resumo da sazonalidade mensal para os equipamentos da região central					91
Figura 74	·	Resumo da sazonalidade mensal para os equipamentos das regiões periféricas					92
Figura 75	·	Resumo da sazonalidade diária para os equipamentos da região central					93
Figura 76	·	Resumo da sazonalidade diária para os equipamentos das regiões periféricas					94
Figura 77	·	Autocorrelação de lag 1 para os equipamentos no pico da manhã					95
Figura 78	·	Autocorrelação de lag 1 para os equipamentos no entre pico					96
Figura 79	·	Autocorrelação de lag 1 para os equipamentos no pico da tarde					97
Figura 80	·	Resumo da média dos coeficientes de variação dos volumes nos equipamentos					98
Figura 81	·	Resumo da sazonalidade mensal para os pares no sentido periferia-central ...					99
Figura 82	·	Resumo da sazonalidade mensal para os pares no sentido central-periferia ...					100
Figura 83	·	Resumo da sazonalidade mensal para os pares no sentido periferia-periferia .					100
Figura 84	·	Resumo da sazonalidade diária para os pares no sentido periferia-					101

central

- Figura 85 · Resumo da sazonalidade diária para os pares no sentido central-
periferia 102
- Figura 86 · Resumo da sazonalidade diária para os pares no sentido periferia-
periferia ... 102
- Figura 87 – Resumo da média dos coeficientes de variação dos fluxos OD entre regiões . 105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Hipóteses sobre a intensidade da variabilidade do volume de tráfego	57
Quadro 2 – Hipóteses sobre a intensidade da variabilidade do fluxo OD	57
Quadro 3 – Campos presentes nos arquivos de fiscalização eletrônica	61
Quadro 4 – Códigos de classificação de perfil veicular	62
Quadro 5 – Autocorrelação de lag 1 para as séries de fluxo OD no pico da manhã	103
Quadro 6 – Autocorrelação de lag 1 para as séries de fluxo OD no entre pico	104
Quadro 7 – Autocorrelação de lag 1 para as séries de fluxo OD no pico da tarde	104
Quadro 8 – Hipóteses x resultados sobre a intensidade da variabilidade do volume de tráfego	106
Quadro 9 – Hipóteses x resultados sobre a intensidade da variabilidade do fluxo OD ...	107

SUMÁRIO

CAPITULO 1: INTRODUÇÃO	17
1.1 Contextualização	17
1.2 Problema e Questões de Pesquisa	19
1.3 Objetivos e Definição do Escopo	20
1.4 Estrutura do Texto	21
CAPITULO 2: VARIABILIDADE DO TRÁFEGO	22
2.1 A Representação da Variabilidade do Tráfego na Modelagem da Demanda	23
2.1.1 Alocação Dinâmica Dia-a-Dia do Tráfego em Redes de Transportes	25
2.1.2 Modelos Dinâmicos de Estimativa da Matriz OD	30
2.2 Estudos Empíricos sobre a Variabilidade do Tráfego	34
2.2.1 Análise dos Padrões de Tráfego para Previsão da Demanda	34
2.2.2 Análises Exploratórias da Variabilidade do Tráfego	36
2.2.3 Análise da Variabilidade do Tráfego em Fortaleza-CE	41
2.3 Conclusões	49
CAPITULO 3: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	51
3.1 A Cidade de Fortaleza-CE	51
3.2 Definição da Região de Estudo	56
3.3 Hipóteses Sobre a Dinâmica do Tráfego em Fortaleza-CE	59
CAPITULO 4: PROPOSTA METODOLÓGICA	61
4.1 Consolidação dos Dados	62
4.1.1 Natureza dos Dados	62
4.1.2 Etapas Metodológicas	64
4.2 Análise Exploratória	72
CAPITULO 5: RESULTADOS	75
5.1 Extração das Variáveis	75
5.2 Análise da Variabilidade	92
5.2.1 Séries de Volume de tráfego	92
5.2.1 Fluxos OD	100
5.3 Discussão	107
CAPITULO 6: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	110
6.1 Contribuições	110
6.2 Limitações	111
6.2 Recomendações	112
REFERÊNCIAS	113

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os sistemas de transportes consistem na interação entre elementos de oferta, que fornecem oportunidades de deslocamentos, e elementos de demanda, que utilizam a infraestrutura ofertada para realizar viagens. A demanda por viagens é o resultado de decisões individuais tomadas a partir de interações entre as atividades econômicas e sociais de uma determinada área e de fatores comportamentais e evolutivos como objetivos pessoais, preferências, conhecimento e experiências dos usuários do sistema. A compreensão de como esses usuários tomam decisões ao longo do tempo é a base para estudos de previsão da demanda, e, de acordo com Habtemichael e Cetin (2016), a capacidade de prever a tempo e com precisão a evolução do tráfego é muito importante nas aplicações de gerenciamento e controle de tráfego. Stathopoulos e Karlaftis (2001) destacam algumas dessas aplicações que vão desde prover informações em tempo real para usuários da rede de transportes através de ITS (*Intelligent Transportation Systems*) com o objetivo de aliviar congestionamentos e diminuir tempos de viagem, até a elaboração de estratégias de gerenciamento de tráfego e estacionamento, a investigação de benefícios potenciais em horários de trabalho flexíveis, e a avaliação dos efeitos ambientais do congestionamento do tráfego.

Além disso, segundo Cascetta (2009), o conhecimento do padrão de deslocamento dos usuários é essencial para a formulação e implementação de modelos que representem os elementos que compõem o sistema de transportes, e que auxiliem na tomada de decisão quanto a intervenções na oferta do sistema. Mudanças ocorridas no nível de serviço do transporte ofertado ou no sistema de atividades dos grandes centros urbanos afetam diretamente os padrões de deslocamento da população local. Pitombeira Neto (2015) afirma que seria necessário modelar a variação dinâmica da demanda para prever o comportamento futuro do sistema ou avaliar o impacto de intervenções no sistema ao longo do tempo. Dois tipos de variação temporal da demanda podem ser observadas, a variação dia-a-dia e a variação ao longo do dia. Este trabalho irá analisar a variação do fluxo veicular, como também dos deslocamentos entre regiões da cidade em determinados períodos do dia. Por conta disso, o foco será na análise da variação do tráfego dia-a-dia.

O padrão de deslocamento viário urbano de uma cidade pode ser representado principalmente por duas variáveis: os fluxos origem-destino (OD) que indicam a quantidade

de viagens realizadas entre zonas de uma região de estudo, e o volume de tráfego que indica a demanda em nós e arcos da rede de transportes. Tanto a distribuição dos fluxos OD como a magnitude dos volumes representam informações básicas para o planejamento e projeto de transportes, bem como para o gerenciamento e controle do tráfego (Cremer e Keller, 1987).

Os fluxos OD são resultado das decisões de viagem de uma população com o objetivo de realizar atividades localizadas no espaço urbano. Em contraste com os dados de volume que são facilmente coletados por dispositivos de contagem, os fluxos OD demandam muito esforço para serem medidos diretamente, sendo necessárias entrevistas individuais, levantamentos de placas ou fotografias aéreas. Diante disto, houve um esforço considerável no passado para desenvolver métodos que fornecem estimativas para os fluxos OD a partir de contagens de tráfego nos arcos de uma rede de transportes. Uma vez que estas contagens não são suficientes para determinar uma matriz OD de viagens única, mas estabelecem apenas um conjunto de equações subdeterminadas, várias formas de suposições adicionais e conhecimento a priori são usadas para levar o cálculo a uma solução única (Cremer e Keller, 1987). Dentro do contexto da obtenção da matriz OD por meios indiretos, Oliveira Neto et al., (2016) destacam as premissas e limitações dos principais métodos de reconstrução da matriz OD sintética. Uma das premissas se refere à representação do padrão de deslocamento (fluxos OD) por um processo de Poisson ou até mesmo por um processo determinístico. Entretanto, a verificação empírica dessa premissa e a avaliação das suas implicações no resultado da modelagem são questões que não foram ainda amplamente exploradas na literatura.

A variável volume de tráfego surge como resultado dos fluxos OD e da alocação desses fluxos na rede, e pode ser definida como o total de veículos que trafega em uma seção da via em uma determinada faixa ou direção durante um intervalo específico de tempo (McShane e Roess, 2004). As premissas dos modelos de alocação de tráfego giram em torno de três aspectos principais: o aprendizado do desempenho da rede pelos usuários ao longo do tempo, o conhecimento dos usuários sobre rotas alternativas na rede, e o comportamento dos usuários em relação a mudanças de rotas devido a alterações no desempenho do sistema. Essas premissas refletem diretamente no padrão de variabilidade do volume de tráfego resultante dos modelos. Segundo Walting e Cantarella (2013), é crescente o interesse de pesquisadores em modelos de redes de transportes que representam explicitamente o comportamento adaptativo dia-a-dia dos usuários.

Atualmente, existem alguns tipos de dados que podem ser utilizados para se obter informações sobre os padrões de deslocamento de uma população, como dados de publicações

em redes sociais ou de telefonia móvel, que podem gerar informações sobre o deslocamento dos usuários desses serviços, dados de sistemas GPS (*Global Positioning System*) ou de leituras de placas veiculares, que fornecem informações sobre o deslocamento de veículos na malha viária, e dados de bilhetagem eletrônica que podem auxiliar na compreensão dos deslocamentos dos usuários de transporte público. Contudo, esses dados são muitas vezes de difícil acesso, tendo um alto custo ou indisponibilidade em algumas localidades.

Na cidade de Fortaleza/CE existem aproximadamente trezentos equipamentos de fiscalização eletrônica distribuídos na malha viária, localizados principalmente nas vias arteriais de maior fluxo veicular. Esses equipamentos registram a passagem de cada veículo e realizam a leitura e registro das placas de uma proporção dos veículos detectados. A partir desses dados, que são disponibilizados pela Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania de Fortaleza (AMC), é possível extrair dados do volume veicular registrado por cada um dos equipamentos, assim como associar leituras de placas entre equipamentos de regiões distintas da cidade e obter informações acerca dos fluxos OD entre elas.

1.2 Problema e Questões de Pesquisa

Os estudos sobre os padrões de mobilidade de uma população carecem de dados acerca dos fluxos de deslocamento entre zonas da cidade, sendo esses fluxos obtidos através de pesquisas domiciliares ou por meios indiretos através da modelagem Quatro Etapas ou reconstrução da matriz OD sintética. Em nenhum desses casos é possível analisar a variabilidade do fenômeno, dado que a matriz OD obtida corresponde a um dia típico ou a uma estimativa do fluxo OD médio dos dias típicos. Por conta disso, os padrões de deslocamento vêm sendo estudados com foco na variabilidade do volume de tráfego que possui bases de dados amplamente disponíveis para grandes centros urbanos.

Oliveira (2004) realizou uma análise dos padrões de variação temporais e espaciais do volume de tráfego em vias arteriais da cidade de Fortaleza, contribuindo para o esclarecimento das tendências de evolução do fluxo de tráfego a curto e longo prazo e na identificação de condições típicas anuais, mensais, diárias e horárias. Com esta análise é possível subsidiar ações de planejamento operacional e estratégico, assim como apoiar a tomada de decisão na gestão do tráfego urbano.

Este trabalho pretende ir além da compreensão do fenômeno da variabilidade do volume de tráfego ao longo do dia, e investigar como se dá a variabilidade dia-a-dia dos volumes e dos fluxos OD na cidade de Fortaleza, a partir dos dados disponíveis de detecção

de veículos e de leitura de placas na malha viária urbana provenientes dos equipamentos de fiscalização eletrônica. Com esta análise espera-se, além de contribuir para o planejamento operacional, que seja possível avançar na compreensão da dinâmica do tráfego para auxiliar na formulação e utilização de modelos de alocação dinâmica de tráfego e de estimação da matriz OD sintética.

A partir da problemática apresentada, tem-se como questão de pesquisa central: como se dá a variabilidade dia-a-dia do volume de tráfego e dos fluxos OD entre regiões da cidade de Fortaleza-CE? Devido à natureza dos dados utilizados na pesquisa, surge a questão: como extrair as variáveis volume de tráfego e fluxo OD de dados coletados por equipamentos de fiscalização eletrônica? Em seguida, a partir dos dados extraídos, é possível levantar o seguinte questionamento: qual o nível de variabilidade dia-a-dia nas séries temporais do volume de tráfego e dos fluxos OD? E, por fim, dados os resultados da análise temporal, como esse padrão de deslocamento varia entre os diferentes pares OD e regiões da cidade?

1.3 Objetivos e Definição do Escopo

A partir das questões de pesquisa formuladas anteriormente, este trabalho tem como objetivo geral analisar a variabilidade temporal dia-a-dia do padrão de deslocamento viário, que inclui o fluxo OD e o volume de tráfego entre regiões da cidade de Fortaleza-CE. Para atingir o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Propor e aplicar um método de extração dos fluxos OD e do volume de tráfego utilizando dados de coleta automática de dados disponíveis;
- Identificar níveis de variabilidade temporal dia-a-dia nos fluxos OD e nos volumes entre zonas e em diferentes regiões da cidade;
- Comparar os padrões de variabilidade temporal para os fluxos OD e para os volumes nos arcos entre os diferentes pares OD e regiões da cidade.

Em função do tipo e da disponibilidade dos dados, o escopo deste trabalho se limitará a estudar os deslocamentos referentes ao tráfego motorizado urbano que compreende todos os veículos que circulam pela malha viária urbana de Fortaleza e que são detectados pelos equipamentos de fiscalização eletrônica instalados, sem distinção do tipo de veículo (carros, motos, ônibus e caminhões), excluindo os dados de equipamentos que operam em faixas exclusivas de ônibus. Quanto ao período de análise, foram disponibilizados pela AMC

dados de fiscalização eletrônica coletados entre os anos de 2013 a 2017. Entretanto, serão utilizados nesta pesquisa apenas os dados referentes ao ano de 2017. Esta decisão foi tomada primeiramente por conta das intervenções que vêm sendo realizadas na malha viária da cidade de Fortaleza desde o ano de 2013, o que pode ter levado a uma mudança nos padrões de deslocamento ao longo desses anos, e também devido à modernização e consequente maior precisão dos equipamentos em relação à detecção de veículos e leitura de placas, trazendo um potencial maior de confiabilidade aos resultados da pesquisa.

1.4 Estrutura do Texto

O texto deste trabalho de dissertação está estruturado em cinco capítulos. O primeiro apresenta a contextualização da problemática abordada, juntamente com as questões de pesquisa, os objetivos e a definição do escopo do trabalho. O capítulo 2 consiste na revisão da literatura abordando as premissas sobre a variabilidade do volume e do fluxo OD na modelagem da demanda e métodos de análise da variabilidade temporal do tráfego. No capítulo 3 é realizada a caracterização da área de estudo e o levantamento de hipóteses sobre a variabilidade do tráfego em Fortaleza-CE. No capítulo 4 é descrita a proposta metodológica para alcançar os objetivos apresentados anteriormente. O capítulo 5 apresenta resultados obtidos ao final da pesquisa. Por fim, no capítulo 6 são relatadas as considerações finais, destacando as contribuições e limitações do estudo e as recomendações para trabalhos futuros.

CAPITULO 2: VARIABILIDADE DO TRÁFEGO

Neste capítulo será apresentada a revisão da literatura acerca de duas temáticas principais que irão apoiar a construção da proposta metodológica. A primeira se refere às premissas assumidas na modelagem da demanda para a representação das variáveis que compõem o tráfego, mais especificamente, como os modelos de alocação dinâmica e de estimação da matriz OD sintética consideram a dinâmica do tráfego. Na segunda seção serão apresentados estudos empíricos sobre a variabilidade do tráfego, destacando as técnicas de análise, as variáveis analisadas, e as conclusões acerca do fenômeno.

Na perspectiva probabilística do fenômeno de deslocamentos urbanos assume-se que as decisões de viagens variam consideravelmente dia-a-dia e que, portanto, o padrão de deslocamentos deve ser considerado um fenômeno aleatório (Vardi, 1996; Lo et al., 1996; Hazelton, 2001). Esta premissa é consistente com as condições atuais de viagens no meio urbano, caracterizadas pela diversidade das atividades socioeconômicas que resultam na realização de deslocamentos com propósitos diversos. Até mesmo viagens com propósitos mais corriqueiros, como por motivo trabalho, podem sofrer variações quanto às decisões de deslocamento em alguns segmentos da população. Neste contexto, tem-se interesse em conhecer não só os fluxos OD médios, mas também como estes variam dia-a-dia.

Além das decisões de motivo e de quando viajar, existem as decisões com relação às rotas escolhidas a cada dia. A variabilidade dessas escolhas é de essencial interesse para os gestores do tráfego urbano, para auxiliar no controle do tráfego em tempo real e na avaliação de intervenções operacionais na rede. Diversos modelos têm sido propostos na literatura com intuito de representar o carregamento de uma rede transportes assumindo a premissa básica de que os usuários buscam escolher rotas de menor caminho ou impedância de viagem. A consideração de que existe uma variação na escolha de rotas dia-a-dia a partir da experiência e da percepção dos usuários sobre o desempenho da rede de transportes tem sido abordada de em diversos estudos teóricos verificados a partir de simulações computacionais.

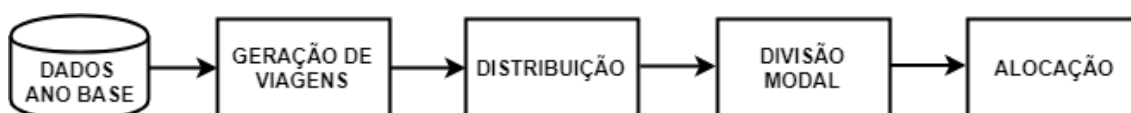
Tanto as variações dos fluxos OD quanto a dinâmica na escolha de rotas resultam em variações nos fluxos em arcos da rede. Esta dinâmica é prevista pelos modelos propostos na literatura, tanto de estimação de matrizes OD, quanto de alocação dinâmica, apesar de ainda serem incipientes os estudos que verifiquem de forma empírica estes resultados. A seguir serão descritos os principais modelos de alocação dinâmica dia-a-dia e de estimação de matrizes OD, juntamente com as premissas comportamentais e de variação do fenômeno.

2.1 A Representação da Variabilidade do Tráfego na Modelagem da Demanda

Durante o processo de modelagem da demanda são assumidas algumas premissas sobre como as variáveis volume de tráfego e fluxo OD se comportam ao longo do tempo. Nesta seção serão exploradas as premissas assumidas quanto à variabilidade do tráfego na formulação dos modelos de alocação dinâmica e de estimação da matriz OD sintética. Inicialmente, será apresentada a relação entre as duas variáveis estudadas na modelagem da demanda tradicional, e, em seguida serão revisados os modelos de demanda e suas premissas em relação à dinâmica do tráfego.

A modelagem da demanda chamada clássica foi consolidada nos anos 1960 e continua sendo utilizada no planejamento de transportes atualmente, praticamente sem alterações, apesar dos avanços nas técnicas de modelagem. A sequência do modelo clássico, mostrada na Figura 1, consiste em quatro sub-modelos: o de geração de viagens, que estima o total de viagens produzidas e atraídas por cada zona da região de estudo, o de distribuição que atribui as viagens geradas a zonas de origem e de destino, produzindo uma matriz de viagens, o de divisão modal, que divide as viagens da matriz entre diferentes modos, e, por fim, o modelo de alocação, que atribui viagens aos arcos da rede (Ortúzar e Willumsen, 2011).

Figura 1 – O modelo clássico de transporte quatro etapas.

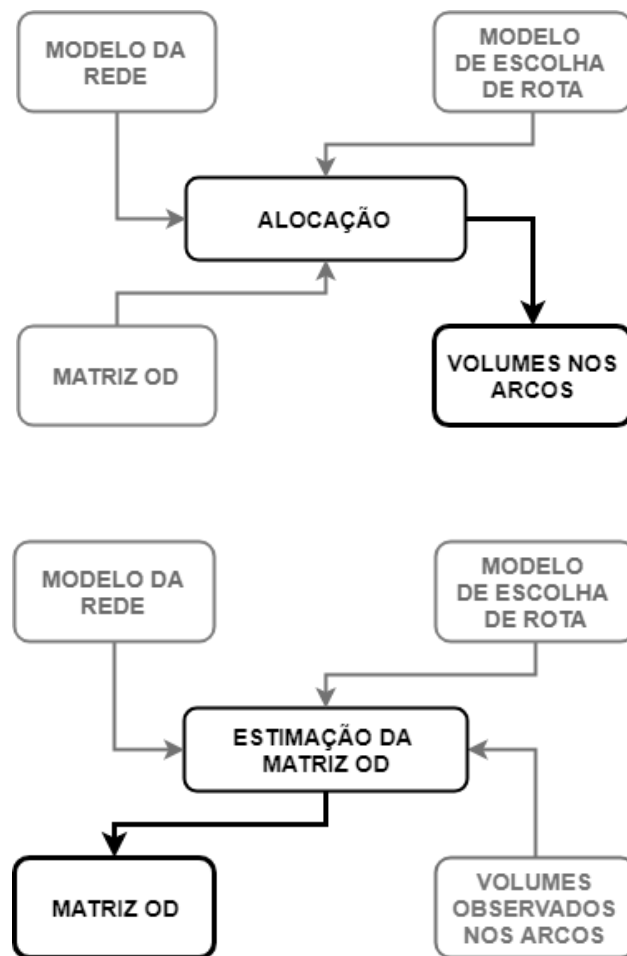


Fonte: Adaptado de Ortúzar e Willumsen (2011).

Como dito no capítulo 1, a obtenção da matriz de deslocamentos de uma região geralmente se dá através de um processo dispendioso, tanto financeiramente quanto em relação ao tempo necessário para a coleta de dados. Além disso, segundo Oliveira Neto et al. (2016), esses métodos geralmente não resultam em um padrão representativo da população dos deslocamentos, dado que apenas uma pequena proporção de viagens é observada para um dia típico do tráfego, resultando em muitos pares OD nulos ou com poucas viagens, composta por uma única realização dos fluxos OD. Nesse contexto, a obtenção de uma matriz OD sintética a partir de volumes de tráfego observados surge como alternativa aos métodos tradicionais de pesquisa domiciliar e levantamento de placas para se obter a matriz OD de uma região.

A matriz OD sintética pode ser utilizada no processo de modelagem da demanda na etapa de distribuição de viagens, para auxiliar na calibração de modelos ou na validação da matriz OD resultante da modelagem. Em seguida, essa matriz será uma das entradas para o modelo de alocação escolhido. O problema da estimação da matriz OD sintética pode ser considerado como o inverso do problema de alocação, apresentados na Figura 2. Os modelos de alocação calculam volumes de tráfego nos arcos de uma rede de transportes a partir de fluxos OD e de modelos de escolha de rota. Já os modelos de estimação da matriz OD calculam fluxos OD partindo de volumes de tráfego observados nos arcos de uma rede, e de modelos de escolha de rota (Cascetta, 2009).

Figura 2 – Relação entre a alocação de tráfego e a estimação da matriz OD.



2.1.1 Alocação Dinâmica Dia-a-Dia do Tráfego em Redes de Transportes

A alocação do tráfego tem como base uma relação matemática de condição de consistência dos volumes de tráfego observados numa rede de transportes. Para uma dada rede composta por I arcos conectando J pares de zonas de tráfego, a relação fundamental entre os fluxos OD e os volumes de tráfego nos arcos é expressa como na Equação (1):

$$\mathbf{v} = \mathbf{M}\mathbf{x} \quad (1)$$

Em que \mathbf{v} é um vetor de volumes de tamanho igual ao número de arcos com volumes observados; \mathbf{M} é a matriz de utilização dos arcos, ou de alocação do tráfego na rede, em que um elemento m_{ij} é igual à proporção do fluxo no par OD j que usa o arco i ; e \mathbf{x} é um vetor de tamanho J que representa o padrão de deslocamento na rede, em que cada elemento x_j é o fluxo de viagens para o par OD j . A matriz de alocação \mathbf{M} pode ser composta por dois fatores relacionados às possíveis rotas utilizadas para as viagens; isto é, de posse do conjunto de K rotas possíveis na rede, a relação (1) também pode ser expressa conforme a Equação (2):

$$\mathbf{v} = \mathbf{\Delta P}\mathbf{x} \quad (2)$$

Sendo \mathbf{P} a matriz de escolha de rotas ou de proporção, na qual cada elemento p_{kj} representa a proporção da demanda j que utiliza a rota k ; e $\mathbf{\Delta}$ é a matriz de incidências arco-rota, cujos elementos δ_{ik} assumem valor 1 se o arco i pertence à rota k e 0 caso contrário. Note que o vetor de fluxos nas rotas, denotado por \mathbf{h} , é dado por $\mathbf{h} = \mathbf{P}\mathbf{x}$.

Durante muitos anos o processo de alocação de tráfego foi representado por modelos que se apoiaram no paradigma do equilíbrio estacionário de Wardrop (1952) para caracterizar a situação atual ou para prever os impactos de intervenções na oferta dos sistemas de transportes, tanto na abordagem de equilíbrio determinístico do usuário (DUE) quanto na abordagem de equilíbrio estocástico do usuário (SUE). Mais recentemente, os modelos de alocação dinâmica (DTA) incorporaram a variação temporal dos fluxos OD ao longo do dia ao paradigma do equilíbrio. Entretanto, estas abordagens assumem a premissa implícita de um mundo imutável ao longo dos dias, ou, pelos menos, a premissa de que o padrão do tráfego não é afetado por essas mudanças. Neste caso, considera-se que a após um certo período de utilização, a rede atinge um estado estável, cuja matriz \mathbf{P} é constante.

Ao contrário disso, o conceito de dinâmica dia-a-dia considera, nos modelos de alocação dinâmica, a natureza adaptativa das escolhas dos usuários e do sistema de transportes ao longo de períodos sucessivos semelhantes como dias, semanas ou meses (Watling e Cantarella, 2013). Oliveira Neto *et al.* (2016) destacam que a matriz de escolha de rotas \mathbf{P} pode variar dia-a-dia conforme a dinâmica das escolhas de rotas, principalmente em redes com restrição de capacidade. A matriz \mathbf{P} é função da percepção e da previsão dos indivíduos em relação ao desempenho da rede a cada dia, e este desempenho depende do nível de carregamento dos arcos da rede. No processo de alocação dinâmica dia-a-dia, assume-se que os indivíduos aprendem sobre o desempenho da rede ao longo tempo, ajustando os custos das rotas incorridos em dias anteriores, e influenciados pelo hábito, podendo ou não mudar de rotas. Também se considera que os indivíduos conhecem o conjunto de alternativas de rotas para realizar as viagens, podendo ou não ajustar o desempenho de cada rota a cada dia, conforme as viagens realizadas em períodos anteriores.

Como trabalhos pioneiros nesta abordagem dinâmica dia a dia destaca-se o trabalho de Cascetta e Cantarella (1993). Cantarella e Watling (1995) apresentam uma discussão conceitual sobre modelos de alocação dinâmica dia-a-dia, analisando os efeitos da variação de parâmetros dos modelos sobre a distribuição de frequência e a autocorrelação do volume de tráfego resultante. Os autores consideram como premissa que os usuários não têm conhecimento prévio dos custos de viagem, e supõe-se que eles façam suas escolhas de acordo com uma previsão de custos das rotas, resultante de processos de memória e aprendizagem, geralmente complementados por informações trocadas com outros usuários e possivelmente por sistemas de informações. Na análise foram considerados três casos: processo determinístico, que ignora flutuações aleatórias da demanda, processo estocástico com memória agregada, em que os usuários ajustam o custo de todas as rotas possíveis, e modelo estocástico com memória desagregada, no qual o usuário atualiza o custo previsto somente para a rota escolhida no período anterior. O processo determinístico analisado por Cantarella e Watling (1995), a partir de experimentos computacionais é como descrito nas Equações (3-4).

$$\mathbf{Y}_t = \beta \mathbf{\Delta}^T c(\mathbf{\Delta} \mathbf{X}_{t-1}) + (1 - \beta) \mathbf{Y}_{t-1} \quad (3)$$

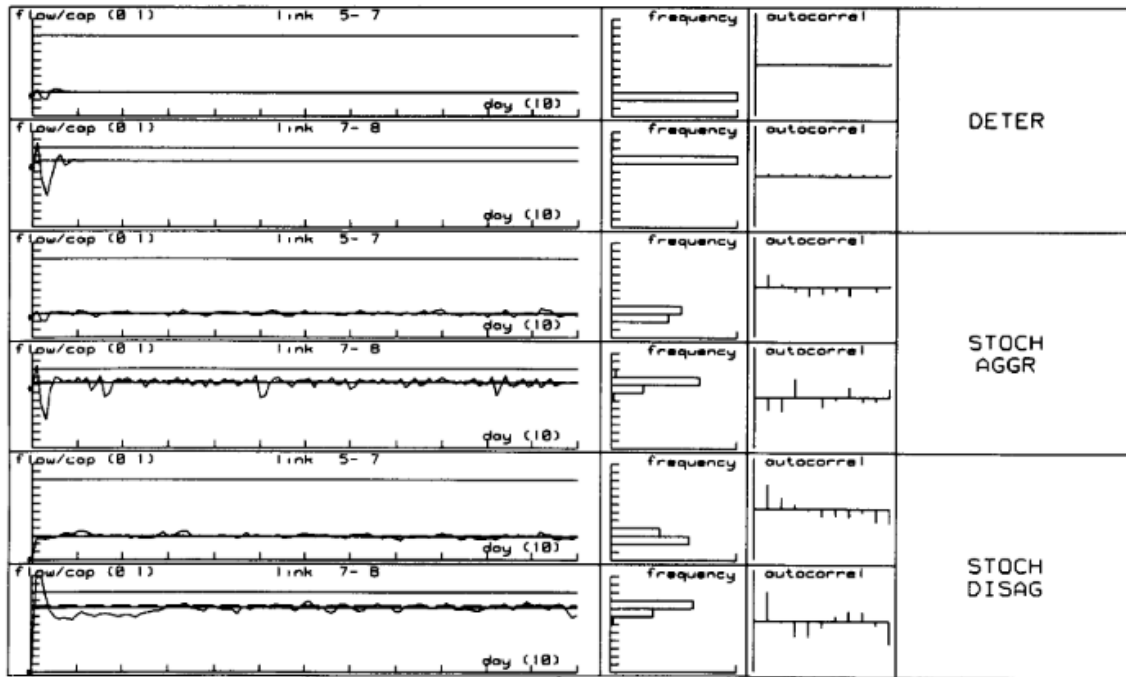
$$\mathbf{X}_t = \alpha \mathbf{D} p(\mathbf{Y}_t) + (1 - \alpha) \mathbf{X}_{t-1} \quad (4)$$

Onde \mathbf{Y} é um vetor de custos previstos nas rotas, \mathbf{X} é um vetor de fluxos nas rotas, \mathbf{D} é uma matriz diagonal que representa a demanda fixa de viagens entre os pares OD, α corresponde à proporção de indivíduos que consideram mudar de rota, β corresponde ao efeito do aprendizado dos indivíduos sobre o desempenho da rede, e $p(\mathbf{Y}_{t-1})$ é um modelo de probabilidade de escolha de rotas do tipo *logit* ou *probit* com um parâmetro de dispersão σ , que representa a variação da percepção dos indivíduos sobre o desempenho da rede.

Segundo Cantarella e Watling (1995), o processo de determinístico das Equações (3-4), assim como o processo estocástico, pode oscilar em torno de um estado estacionário ou de equilíbrio estocástico. Este estado da rede corresponde ao conceito de equilíbrio já bem consolidado na literatura, como definido em Daganzo e Sheffi (1977). A variação em torno deste estado depende de quanto os usuários modificam ou ajustam as rotas ao longo do tempo. Os resultados dos estudos de Cantarella e Watling (1995) mostram que o estado de fluxo nos arcos da rede está relacionado ao seu nível de congestionamento, ao nível de conhecimento da rede (conhecimento sobre o conjunto de rotas, desempenho destas e percepção dos indivíduos, σ), assim como à sensibilidade dos indivíduos representada pelo o aprendizado sobre o desempenho das rotas (β) e a propensão a escolher outras rotas dentro do conjunto de alternativas (α). Quanto mais congestionada a rede, mais sensíveis os usuários sejam ao desempenho da rede e mais propícios sejam a mudarem de rota, maior será a variabilidade do estado do fluxo nos arcos, inclusive podendo oscilar em torno de um estado que não corresponde ao equilíbrio estocástico da rede.

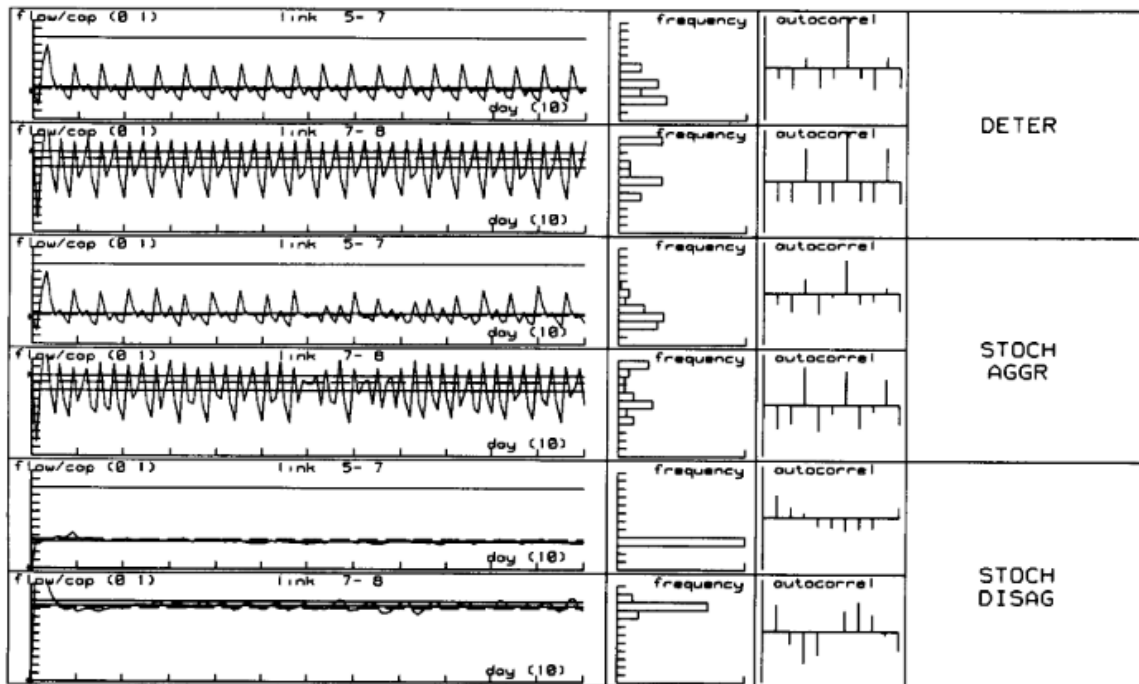
As Figuras 3 e 4, replicadas do trabalho de Cantarella e Watling (1995), ilustram como o estado do fluxo varia em certos arcos da rede de estudo, considerando dois níveis de carregamento. Os autores avaliaram a evolução do volume de tráfego ao longo do tempo, a distribuição de frequência para os primeiros 120 dias e o correlograma de fluxos em arcos com lag 1 ao 10 para cada experimento. O primeiro parâmetro analisado foi o nível de congestionamento, representado pela variável δ . As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados para $\delta = 3$ e $\delta = 4$, respectivamente, sendo $\delta = 5$ o maior valor possível sem que a capacidade dos arcos seja excedida. Os resultados foram obtidos com o parâmetro $\theta = 0,10$, relativo ao erro percebido pelos usuários nos custos das rotas, e assumindo $\alpha = 0,5$ e $\beta = 0,5$, que representam a probabilidade de reconsiderar a escolha do dia anterior, e o peso do filtro de previsão também do dia anterior, respectivamente.

Figura 3 – Evolução ao longo do tempo dos fluxos em arcos (rede não congestionada - $\delta = 3$), $\theta = 0,10$, $\alpha = 0,5$ e $\beta = 0,5$.



Fonte: Cantarella e Cascetta (1995).

Figura 4 – Evolução ao longo do tempo dos fluxos em arcos (rede congestionada, $\delta = 4$), $\theta = 0,10$, $\alpha = 0,5$ e $\beta = 0,5$.



Fonte: Cantarella e Cascetta (1995).

A análise desses resultados mostrou que, para redes não congestionadas ou moderadamente congestionadas ($\delta = 3$), o processo determinístico converge para um ponto fixo estável coincidente com o estado de equilíbrio, já o processo estocástico exibe flutuações moderadas em torno de valores médios próximos o suficiente dos fluxos de equilíbrio. Um nível mais alto de congestionamento ($\delta = 4$) desestabiliza o sistema, fazendo com que estado de fluxos nos arcos no processo determinístico oscile de forma periódica, com fluxos médios podendo diferir significativamente dos fluxos em estado de equilíbrio. O processo estocástico de memória agregada mostra um padrão bastante semelhante ao de sua contrapartida determinística e uma estrutura de correlação comparável, mesmo que o componente aleatório previna o sistema de um comportamento exatamente periódico.

Cantarella e Watling (1995) também mostram que quanto menos conhecimento da rede o usuário tiver, mais estável será variação dos fluxos nos arcos. O conhecimento da rede nestes processos corresponde à ideia de que os usuários possuem um conjunto de alternativas de rotas em que o desempenho de cada rota em dias anteriores é conhecido e ajustando. O processo estocástico de memória desagregada, em que os usuários tem menos conhecimento sobre o desempenho da rede, apresentou uma evolução no estado de fluxos na rede com flutuações baixas, distribuição unimodal e menor autocorrelação. Como afirmam Cantarella e Watling (1995), a falta memória de individual dos usuários sobre a rede funciona como o fator de amortecimento da variação, implicando que a disseminação de informação pode resultar em instabilidade na rede.

O estudo Cantarella e Watling (1995) também analisou os efeitos do aumento dos parâmetros relacionados à probabilidade de o usuário reconsiderar a escolha do dia anterior, e ao aumento no peso do filtro de previsão do dia anterior, considerando a situação de estabilidade do sistema apresentada anteriormente, o que levou o sistema a um estado de instabilidade. Por outro lado, ao reduzir os mesmos parâmetros mantendo a situação anterior de instabilidade, o sistema tende a se estabilizar, reforçando a ideia de que quanto maior a dependência de escolhas anteriores, mais o sistema será propenso à instabilidade. Já a redução do erro percebido pelos usuários sobre os custos das rotas teve um efeito similar ao do aumento do congestionamento, levando o sistema também a um comportamento mais instável. Os exemplos apresentados mostram que estratégias de controle que buscam reduzir o erro percebido pelo usuário pode levar o sistema a um estado de instabilidade. Os autores ressaltam que os resultados apresentados têm como objetivo esclarecer os efeitos de variações conjuntas em alguns parâmetros, e não de sugerir qualquer tipo de comportamento dinâmico

específico em sistemas reais. Por fim, é recomendado que sejam realizados experimentos em sistemas simples, tanto em laboratório quanto em ambientes reais, com o objetivo de analisar a evolução do sistema como um todo sob diferentes condições, incluindo eventos atípicos.

Mais recentemente, Cantarella e Walting (2016) apresentam uma discussão sobre modelos de alocação dinâmica dia-a-dia, considerando o fenômeno como sendo um processo determinístico, e buscando unificar as abordagens de tempo discreto e contínuo. Para isto, os autores destacam a especificação dos modelos, as condições que caracterizam as possíveis formas de comportamento e a relação entre as premissas dos modelos e os fenômenos no mundo real. A dinâmica dia-a-dia diz respeito à evolução de um sistema de transportes em períodos similares ao longo de dias sucessivos, sendo, portanto, ontologicamente discreto e naturalmente descrito pelo processo dinâmico de tempo discreto. Por outro lado, adotar uma representação de tempo contínuo parece mais atraente dado que, no mundo real, o tempo é tipicamente considerado contínuo. Devido à dificuldade em lidar com as duas escalas de tempo diferentes sobre as quais ocorrem interações de tráfego ao longo do dia, e atualizações de escolhas de viagem entre dias, um modelo de tempo contínuo capaz de lidar com ambos seria atraente, porém bastante complexo. Praticamente todos os modelos considerados na literatura não são tão complexos e não separam essas escalas, o que torna mais difícil de entender quais fenômenos do mundo real esses modelos pretendem capturar. Por fim, os autores recomendam a realização de estudos que busquem combinar as ferramentas teóricas com os fenômenos reais. Isso pode incluir diversos aspectos, como esclarecer o que é considerado como sendo um "dia", e como se deve lidar com eventos atípicos ou efeitos sazonais, considerando a capacidade de representação espacial e temporal das especificações comportamentais, ou considerando mais profundamente como os usuários 'aprendem' de fato, a partir da sua experiência pessoal, da experiência de outros e quaisquer outras fontes de informação.

2.1.2 Modelos Dinâmicos de Estimação da Matriz OD

As técnicas de obtenção da matriz OD sintética podem ser divididas em métodos de reconstrução e métodos de estimação. A reconstrução da matriz OD diz respeito à tentativa de recuperar a matriz exata que produziu um vetor observado de volumes em um arco em um determinado período de tempo. Por outro lado, a estimação da matriz OD refere-se de fato à estimação de parâmetros de um modelo estatístico que descreve uma população de matrizes

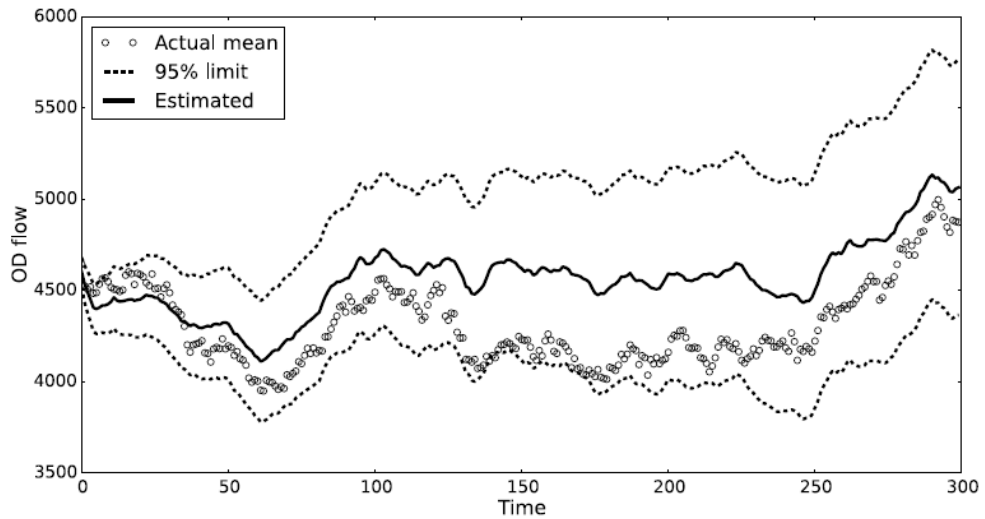
OD. Os modelos dinâmicos de estimação da matriz OD, assim como os modelos de alocação dinâmica do fluxo, podem ser classificados em duas classes de acordo com a escala de tempo adotada: ao longo do dia ou dia-a-dia. Os modelos ao longo do dia consideram a variação da demanda durante um intervalo específico de tempo dentro de um único dia, podendo variar de alguns minutos até o dia todo, e são abordados principalmente numa perspectiva de reconstrução da matriz OD através de modelos de otimização. Por outro lado, os modelos dia-a-dia estão geralmente focados na variação da demanda em um dado período repetido de tempo, normalmente o horário de pico, em uma sequência de dias, e são abordados numa perspectiva de estimação estatística (Pitombeira Neto *et al.*, 2017).

A partir da hipótese de que os modelos dinâmicos dia-a-dia fornecem melhores estimativas das matrizes OD e respondem melhor às mudanças do que os modelos estáticos, uma vez que são teoricamente capazes de explicar a evolução dos sistemas de transporte ao longo do tempo e utilizar as informações obtidas de mudanças temporais, Pitombeira Neto (2015) propõe um modelo dinâmico de estimação da matriz OD no qual assume que os fluxos OD variam dia-a-dia segundo um processo de Poisson e a média dos fluxos varia a cada dia de acordo com um processo determinístico dinâmico tal como $X_t = G \times X_{t-1} + \varepsilon_t$, onde G é uma matriz de atualização dos parâmetros, X_t é o vetor de fluxos OD no tempo t , e ε é o erro aleatório do fenômeno. Portanto, é assumido que os fluxos de OD variam como um processo dinâmico ao longo do tempo, de tal forma que os fluxos de OD no tempo atual dependem dos fluxos de OD do período anterior. Para testar a hipótese proposta foram realizados três experimentos computacionais em uma rede *Sioux Falls* que é uma abstração de uma rede real da cidade de Sioux Falls nos Estados Unidos, com dados simulados da seguinte maneira: a sequência de fluxos OD ao longo dos dias foi gerada seguindo uma caminhada aleatória gaussiana, assumindo fluxos OD médios independentes entre pares OD, e para cada período de tempo t a matriz OD média é alocada à rede gerando os volumes de observados nos arcos.

O primeiro experimento teve como objetivo avaliar se modelos dinâmicos podem reduzir o problema de subespecificação da matriz OD média, testando o modelo dinâmico proposto e uma versão dinâmica do modelo GLS (*Generalized least squares*), os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 5, 6 e 7. No segundo experimento o objetivo foi comparar modelos estáticos e dinâmicos em um cenário realista para testar se modelos dinâmicos podem produzir melhores estimativas de matrizes OD médias. Em ambos os casos foi avaliado também o impacto de informações prévias na modelagem. No terceiro

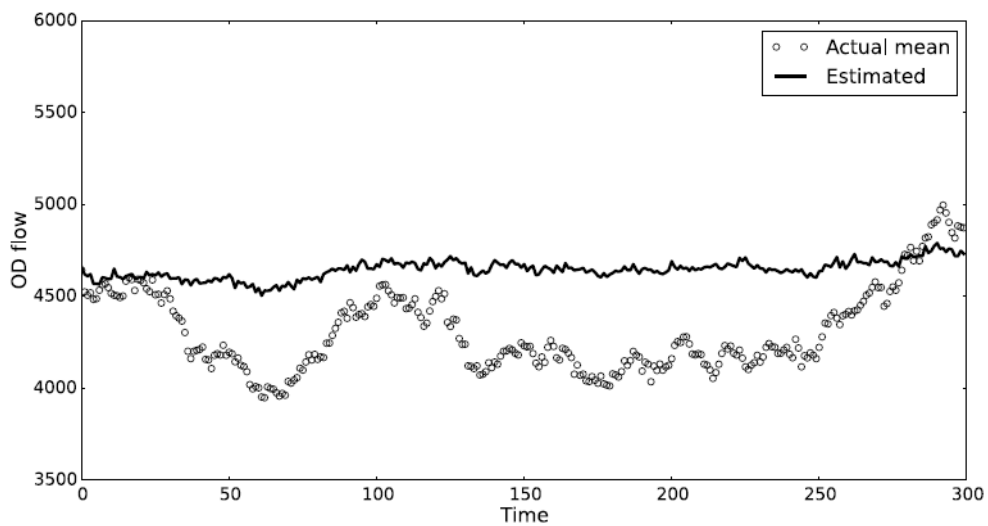
experimento foi abordado o efeito da variação da matriz de alocação no erro de estimativa, avaliando o desempenho do modelo GLS e do modelo dinâmico proposto com três casos matrizes de alocação diferentes.

Figura 5 – Estimativa de fluxos no par OD 10-16 (fluxo alto) pelo modelo proposto.



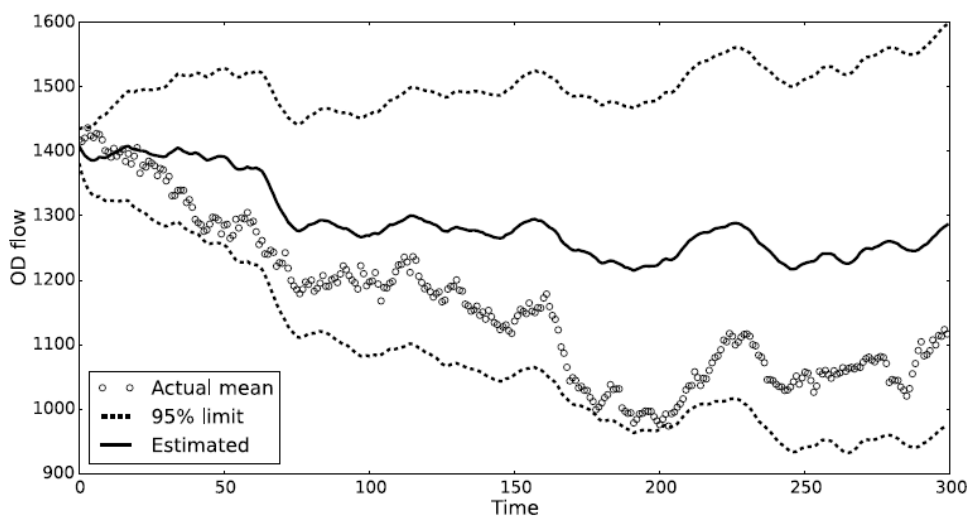
Fonte: Pitombeira Neto (2015).

Figura 6 – Estimativa de fluxos no par OD 10-16 (fluxo alto) pelo modelo GLS.



Fonte: Pitombeira Neto (2015).

Figura 7 – Estimativa de fluxos no par OD 1-10 (fluxo médio) pelo modelo proposto.



Fonte: Pitombeira Neto (2015).

As medidas utilizadas para avaliar o desempenho dos modelos foram o erro médio quadrático relativo e o erro médio quadrático absoluto. Nos resultados obtidos, os modelos dinâmicos forneceram estimativas melhores do que os modelos estáticos em casos em que foram fornecidas informações a priori. O autor atribui este resultado ao fato de que os modelos dinâmicos levam em consideração a variabilidade nos volumes dos arcos originados na variabilidade dos fluxos OD médios, enquanto que os modelos estáticos não consideram essa possibilidade. No entanto, para os casos em que não havia informações prévias os desempenhos foram semelhantes.

A partir dos modelos teóricos de estimação de matrizes OD sintéticas é possível se obter medidas como o número médio de viagens entre pares OD e suas variâncias, entretanto, segundo Pitombeira Neto et al. (2011), surge uma questão em relação à especificação dos modelos estatísticos que descrevem as variáveis aleatórias e suas premissas, dado que as aplicações apresentadas na literatura admitem modelos paramétricos matematicamente convenientes mas que podem não corresponder à realidade. Nesse ponto, os autores recomendam que se realize um esforço para compreender melhor o fenômeno da variabilidade das viagens, sob as dimensões temporal e espacial, para que seja possível especificar modelos válidos e úteis, que sejam capazes de representar a realidade em um nível de precisão aceitável, para serem utilizados no auxílio à tomada de decisão em sistemas de transportes.

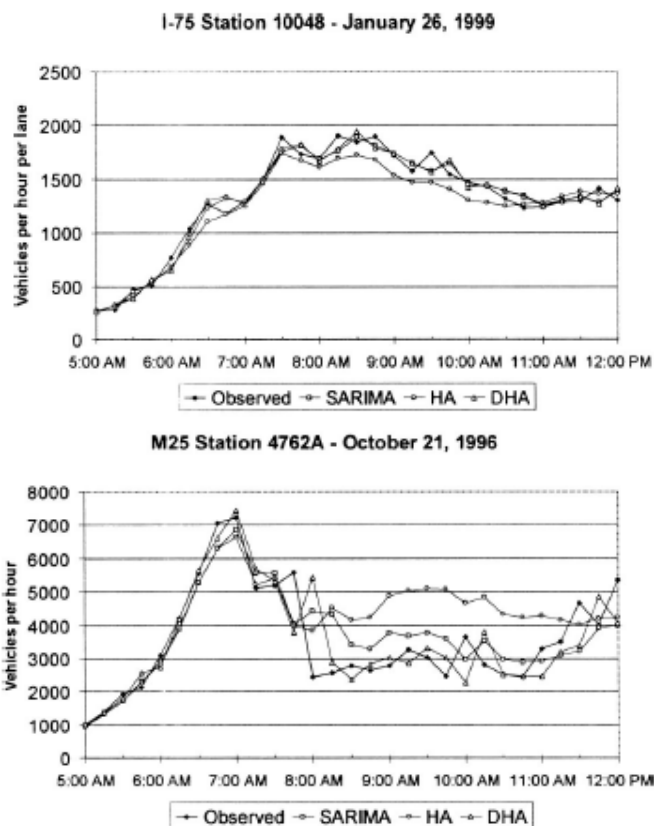
2.2 Estudos Empíricos sobre a Variabilidade do Tráfego

Na seção anterior foi explorado o conceito de variabilidade do tráfego, buscando identificar como os modelos de demanda tratam a dinâmica dos fluxos OD e dos volumes de tráfego. Em muitos dos trabalhos sobre a modelagem dos fluxos OD e dos volumes existe a recomendação de se realizar estudos práticos utilizando dados reais para tornar os modelos mais adequados à realidade modelada. Portanto, nesta seção serão revisados trabalhos que tratam de estudos empíricos sobre a variabilidade do tráfego em uma dada região, sendo dividida em três seções de acordo com o objetivo da análise. A primeira seção trata de estudos cujo objetivo é analisar diferenças nos padrões de tráfego de uma região para a formulação de modelos de previsão de demanda em curto prazo, a segunda é relativa a estudos que visam explorar as características da variabilidade espaço-temporal de variáveis do tráfego buscando compreender o fenômeno antes da formulação de modelos de demanda, e a terceira trata de um trabalho específico sobre a variabilidade do volume de tráfego na cidade de Fortaleza-CE, e irá destacar os resultados obtidos para a configuração do sistema viário dos anos analisados.

2.2.1 Análise dos Padrões de Tráfego para Previsão da Demanda

Grande parte dos trabalhos encontrados na literatura diz respeito à variabilidade dos volumes de tráfego ao longo do dia, com foco na previsão da demanda em curto prazo (*short-term forecasting*). Nesta linha de pesquisa destacam-se alguns trabalhos como o de Williams e Hoel (2003) que apresentam a base teórica para a modelagem do volume de tráfego ao longo do dia como processos sazonais auto regressivos integrados de médias móveis (ARIMA) com o objetivo de realizar previsões de curto prazo em um ITS para um local específico da rede. A hipótese teórica é apoiada por resultados empíricos utilizando dados coletados de duas localidades, uma rodovia nos Estados Unidos e outra no Reino Unido, com o objetivo de representar dois países diferentes e dois tipos diferentes de rodovias e métodos de coleta de dados. Inicialmente é realizada uma análise de correlação temporal dos dados para verificar as premissas necessárias para a modelagem ARIMA, e em seguida é realizado o ajuste dos modelos. A Figura 8 apresenta as séries temporais observadas e modeladas para as duas localidades. Min e Wynter (2011), Xia et al. (2013), e Kumar e Vanajakshi (2015) apresentam estudos similares, com diferentes propostas de modelos de séries temporais para representar e prever a variação do tráfego ao longo do dia.

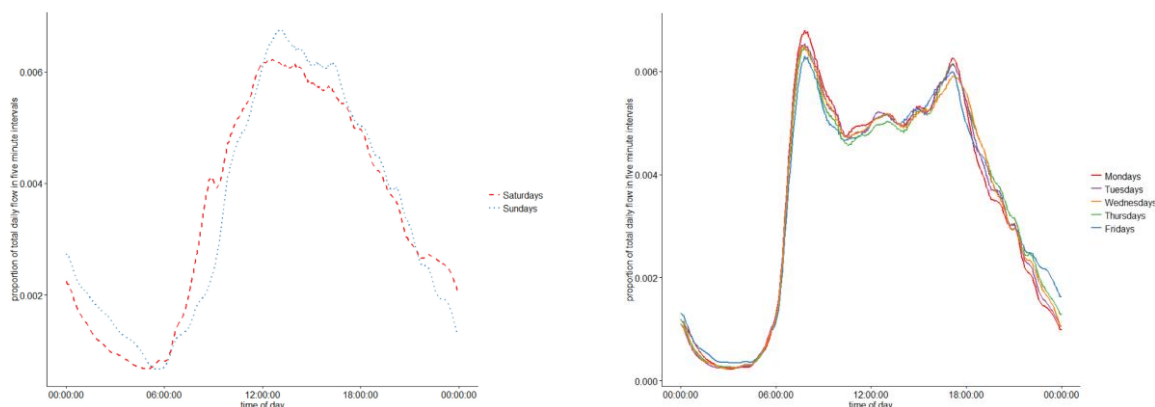
Figura 8 – Séries representativas dos volumes observados e modelados.



Fonte: Williams e Hoel (2003)

Além dos trabalhos já citados, Crawford et al. (2017) propõem um método de identificação de variações sistemáticas em perfis diários de tráfego baseado em fatores sazonais como dia da semana ou estações do ano. A partir da identificação desses padrões é possível desenvolver ou aprimorar a entrada de modelos para testar a robustez de políticas propostas, ou para auxiliar no desenvolvimento de políticas que variem de acordo com os tipos de dias identificados. Para isto, os autores propõem a aplicação de modelos de regressão linear funcionais buscando medir o impacto de variáveis explicativas conhecidas e assim examinar diretamente os efeitos sazonais dos dias da semana no volume de tráfego, separando as análises de magnitude e forma, dado que a variação desses dois aspectos possuem causas distintas. O método proposto foi aplicado para o conjunto de dados referente a dois anos de observação de volume, excluindo os feriados, em um detector na cidade de Manchester, Reino Unido. Os resultados mostram diferenças estatisticamente significativas entre os perfis diários para cada dia da semana. A Figura 9 mostra os perfis diários encontrados.

Figura 9 – Perfis diários de variação entre dias da semana



Fonte: Crawford et al. (2017)

Os estudos empíricos revisados até então, aplicam diretamente modelos de séries temporais para representar a variabilidade do tráfego, com o objetivo de previsão em curto prazo, considerando que o padrão de variabilidade do tráfego não muda ao longo do dia ou entre meses e dias da semana. A seguir será realizada a revisão de trabalhos que investigam o padrão de variabilidade dia-a-dia considerando diferentes períodos ao longo do dia, como um passo anterior à modelagem para servir como base para a aplicação de modelos de demanda adequados à realidade em questão.

2.2.2 Análises Exploratórias da Variabilidade do Tráfego

Stathopoulos e Karlaftis (2001) apresentam um estudo sobre a variabilidade do tráfego com o objetivo de responder a duas perguntas: é possível modelar variações típicas do dia-a-dia (e sazonais) dos dados de tráfego em tempo real? Como variam e quais são as distribuições das características do tráfego ao longo do dia e durante os dias da semana? Para isto foram usados dados de laços indutivos em uma área urbana da cidade de Atenas, Grécia. Os dados referentes ao volume de tráfego e ocupações foram coletados, em intervalos de 90 segundos em 140 locais de Atenas, continuamente desde 1996. Um novo conjunto de dados foi criado com medições de fluxo por faixa e para a terceira semana de cada mês no período de janeiro de 1997 a dezembro de 1999, agregados em intervalos de 15 minutos. Os dados foram agregados em três direções: fluxo médio de tráfego em direção ao distrito central de negócios (CBD), dentro da CBD e longe da CDB, desagregadas em seis períodos: de meia-noite às 6:30 da manhã, das 6:30 às 10:00 da manhã, das 10:00 às 13:30, de 1:30 às 5:00 da

tarde, das 5:00 às 8:30 da noite, e das 20:30 à meia-noite. Esses seis períodos foram resultado de muita investigação sobre padrões de viagens em Atenas.

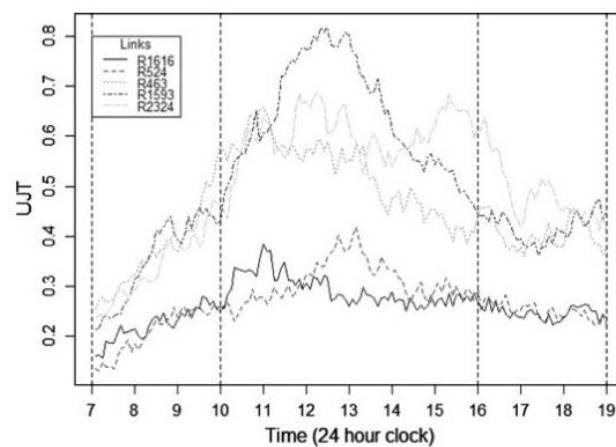
Segundo Stathopoulos e Karlaftis (2001), a distribuição das características de tráfego tem dupla importância. Primeiramente, para se obter distribuições corretas que serão utilizadas de entrada para os simuladores em tempo real que serão usados para avaliar as condições de tráfego e fornecer aos motoristas informações de rota e tempo de viagem. Em segundo lugar, o tipo de distribuição de probabilidade do fluxo de tráfego deve ser conhecido para que os testes estatísticos usados para avaliar as variações diárias sejam adequados. Em grande parte dos trabalhos anteriores que analisam as variações diárias no fluxo de tráfego os autores usaram técnicas de análise de variância (ANOVA) para testar essas variações, o que pressupõe que as variáveis examinadas sejam normalmente distribuídas.

Para a análise da variabilidade do tráfego, Stathopoulos e Karlaftis (2001) selecionaram a melhor distribuição examinando o ajuste das distribuições mais comumente disponíveis e relatando as estatísticas de teste χ^2 e Kolmogorov-Smirnov para os vários tipos de distribuição. Em todos os casos examinados, exceto um, a hipótese nula de normalidade foi rejeitada com um nível de significância de 90%. Após identificar a distribuição que mais se aproxima da média dos dados distribuídos nas três direções e nos seis períodos definidos anteriormente, foi aplicado o teste estatístico de igualdade de médias adequado para o tipo de distribuição encontrado.

Segundo Stathopoulos e Karlaftis (2001) a simulação de tráfego vem se tornando uma ferramenta de avaliação de muito importante, logo, a calibração dos modelos de simulação deve se basear em condições de tráfego realistas e existentes e nas distribuições adequadas. Com os resultados deste estudo, os autores concluíram que o tráfego é previsível no sentido de que não varia durante a semana e durante a maior parte dos meses do ano. Mesmo que o tráfego em Atenas e em outras cidades europeias seja mais leve em durante os meses de julho e agosto, devido ao período de férias do que em cidades dos EUA, por exemplo, a mesma metodologia e considerações podem ser aplicadas. As semelhanças nos fluxos de tráfego são quantificadas e podem ser incorporadas diretamente em sistemas ITS, gerando benefícios para os motoristas. Da mesma forma, Weijermars (2007) apresenta um método de identificação de perfis diários e classificação de dias da semana através de técnicas de clusterização servindo de base para previsão e gerenciamento do tráfego ou para modelagem de cenários de demanda.

Cheng et al. (2012) examinam a estrutura de autocorrelação espaço-temporal de redes viárias a fim de determinar os requisitos para a construção de modelos de previsão adequados à realidade estudada. Para isto, os autores propõem aplicar duas medidas de autocorrelação, uma global e outra local. A primeira é a função de autocorrelação espaço-temporal (ST-ACF), e a segunda é a função de correlação cruzada (CCF). Esses índices são extensões da função de autocorrelação temporal, são facilmente interpretáveis e possuem uma aplicação prática em estruturas de modelagem espaço-temporais. A variável analisada foi unidade de tempo de viagem (UJT – *Unit Jouney Time*) que corresponde ao inverso da velocidade que pode ser interpretada como o atraso ou congestionamento, sendo assim, de interesse aos gerentes do tráfego. Para a análise de autocorrelação foi selecionada uma área de 22 arcos na rede viária da cidade de Londres, Reino Unido, onde estão localizadas câmeras do *London Congestion Analysis Project (LCAP)*, um sistema de reconhecimento automático de placas, mantido pela *Transport for London (TfL)*, a partir dos quais foram coletados os dados de velocidade agregados a cada 5 minutos, e posteriormente convertidos em unidade de tempo de viagem. O período de análise consistiu em 33 terças-feiras consecutivas de 6 de janeiro a 18 de agosto de 2009, das quais 14 foram excluídas devido a falhas no sistema de coleta. A Figura 10 mostra os perfis médios de unidade de tempo de viagem dos 24 dias de observação para alguns arcos selecionados no intervalo de 07:00 às 19:00, revelando uma situação de tráfego dinâmica e heterogênea.

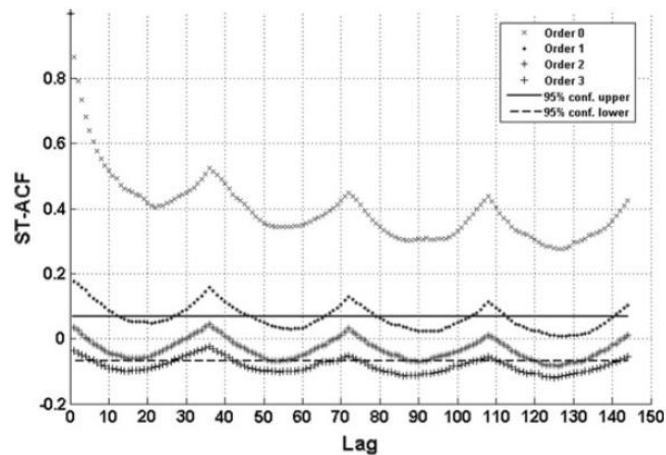
Figura 10 – Perfis médios de unidade de tempo de viagem ao longo de 24 terças-feiras de 6 de janeiro de 2009 a 18 de agosto de 2009.



Fonte: Cheng et al. (2012).

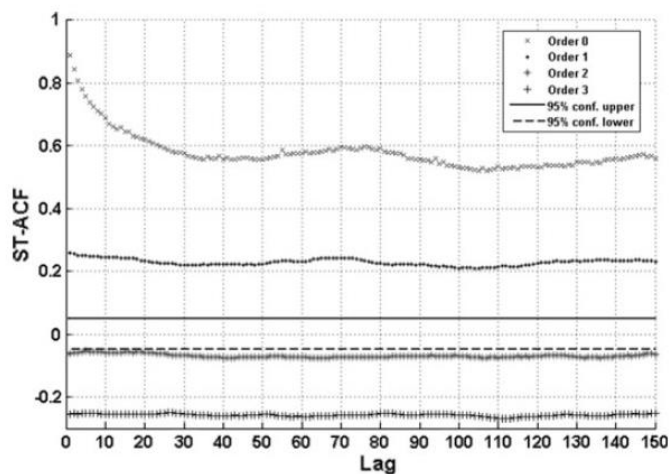
A hipótese de que o tráfego se comporta de maneira diferente em cada período de tempo ao longo do dia tem sido amplamente aceita em estudos de transporte. Para examinar como a estrutura de autocorrelação muda ao longo do dia, Cheng et al. (2012) dividiram os dados três períodos de tempo distintos: pico da manhã, entre pico e pico da tarde, conforme definido pela TfL. As Figuras 11, 12 e 13 apresentam o ST-ACF para cada um dos períodos de tempo. Sob a hipótese de estacionariedade espaço-temporal, o ST-ACF deve ser não significativo em todos os lags maiores que zero e, portanto, valores significativamente positivos indicam a presença de autocorrelação espaço-temporal.

Figura 11 – ST-ACF para o pico da manhã nas ordens espaciais 0, 1, 2 e 3.



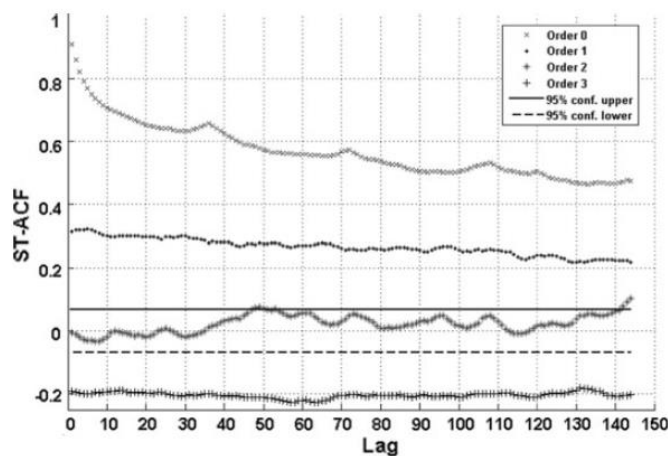
Fonte: Cheng et al. (2012).

Figura 12 – ST-ACF para o entre pico nas ordens espaciais 0, 1, 2 e 3



Fonte: Cheng et al. (2012).

Figura 13– ST-ACF para o pico da tarde nas ordens espaciais 0, 1, 2 e 3



Fonte: Cheng et al. (2012).

Ao examinarem o ST-ACF global em cada um dos períodos de tempo, Cheng et al. (2012) destacam duas descobertas principais: a força e o padrão de autocorrelação espaço-temporal são dinâmicos ao longo do tempo, refletindo os diferentes padrões de tráfego que ocorrem em cada período, e o padrão de autocorrelação espaço-temporal permanece similar, mas diminui em força ao aumentar as ordens espaciais em cada um dos períodos de tempo. Nos resultados do pico da manhã há um padrão sazonal claro presente em todos os lags espaciais, o que indica aumentos e diminuições simultâneas nas unidades de tempo de viagem na medida em que o tráfego aumenta nesse intervalo, e depois recua em direção ao período de entre pico, o que é esperado. Teoricamente, o período de entre pico deve capturar um estado de tráfego que separa os dois períodos de pico caracterizados por um retorno às condições de fluxo livre e, portanto, não deve exibir dependência sazonal. A presença de tal dependência indica que a divisão arbitrária dos dados em três períodos de tempo com base nas definições aceitas não é suficiente para isolar os estados de tráfego específicos na rede. No pico da tarde, as autocorrelações são novamente fortes, significativas e positivas na ordem espacial zero. No entanto, a força do componente sazonal é menor do que nos períodos de pico da manhã e entre pico. Isso é contrário às expectativas e sugere que a definição do período de pico da tarde não isola um estado de tráfego específico.

Cheng et al., (2012) destacam a importância da análise exploratória das séries temporais como um passo anterior à modelagem e afirmam que sem esta etapa os impactos na modelagem podem ser substanciais e difíceis de detectar, citando como exemplo a construção

de um modelo STARIMA (*Space-Time Autoregressive Integrated Moving Average*) com base na suposição de estacionariedade, porém, se o processo de variação espaço-temporal que se pretende representar for na realidade não estacionário, os resultados da modelagem provavelmente serão ruins. Devido à complexidade da estrutura de autocorrelação espaço-temporal do tráfego, a extração de um processo de estacionário no espaço e no tempo a partir dos dados provavelmente será difícil. Isso significa que modelos como o STARIMA, que se baseiam em tais suposições, provavelmente terão baixo poder preditivo. Além disso, os parâmetros globais estimados pelos quais o STARIMA e outros modelos dependem provavelmente são insuficientes para explicar todas as variações locais nos dados, dado que eles assumem que existe uma estrutura globalmente estacionária de autocorrelação espaço-temporal, quando na realidade pode não existir. A conclusão desse estudo de caso empírico mostra que a estrutura de autocorrelação da rede espaço-temporal é dinâmica no tempo e heterogênea no espaço, sendo útil para detectar arcos mais vulneráveis ou importantes na rede.

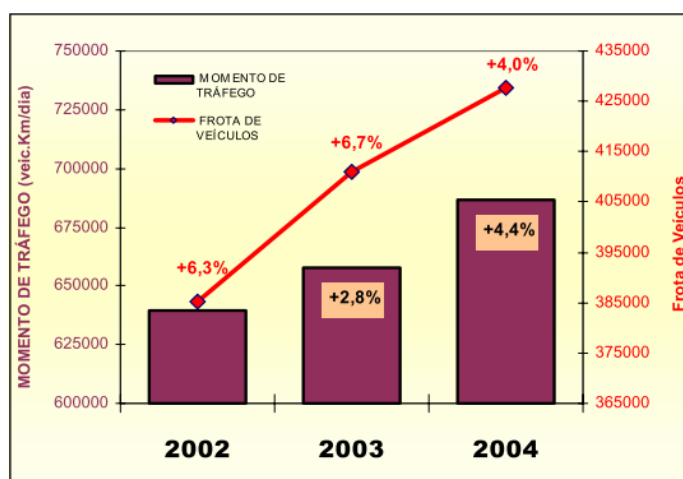
2.2.3 Análise da Variabilidade do Tráfego em Fortaleza-CE

Para a cidade de Fortaleza-CE, Oliveira (2004) identificou padrões de variação espacial e temporal dos volumes em vias arteriais utilizando dados de laços detectores instalados no pavimento que alimentam o controle semafórico em tempo real do sistema de Controle Centralizado de Tráfego de Fortaleza (CTAFOR). Para isto, o autor propõe como método a estruturação e consolidação da base de dados, seguido da aplicação de métodos estatísticos de análise dos dados de volume. Os métodos utilizados foram análises exploratórias e inferenciais em diversos níveis de agregação temporal. A comparação dos perfis de tráfego foi realizada através do levantamento de hipóteses e da Análise da Variância (ANOVA) que é um teste paramétrico de comparações de múltiplas médias. Contudo, o ANOVA paramétrico requer como pressuposto inicial que as variáveis examinadas sejam amostradas de populações normalmente distribuídas. Nesse contexto, existe a necessidade da investigação da distribuição dos dados para cada realidade local, tendo em vista os aspectos comportamentais e peculiares, inerentes a cada ambiente urbano. Assim, foi aplicado o teste Kolmogorov-Smirnov e verificada a validade do pressuposto de normalidade da distribuição da variável volume de tráfego diário. Este teste para normalidade é baseado na máxima diferença entre a distribuição amostral cumulativa e a distribuição hipotética.

O teste ANOVA foi utilizado para comparar e identificar grupos homogêneos de

VMD (Volume Médio Diário) nos níveis de agregação anual, mensal, diária e horária, seguindo esta sequência. A variação anual foi calculada em termos da variável momento de tráfego que é o VDM multiplicado pela distância do arco em questão para o mês de abril de cada ano. O resultado obtido está mostrado na Figura 14 juntamente com a evolução da frota de veículos de 2002 a 2004. A partir da avaliação do perfil de variação anual é possível verificar o nível elevado das taxas de crescimento do tráfego nas vias arteriais selecionadas, principalmente considerando a evolução do tráfego entre 2003 e 2004, período no qual a taxa de crescimento do momento de tráfego (4,4%) foi superior ao respectivo aumento relativo da frota registrada de veículos (4,0%) no município.

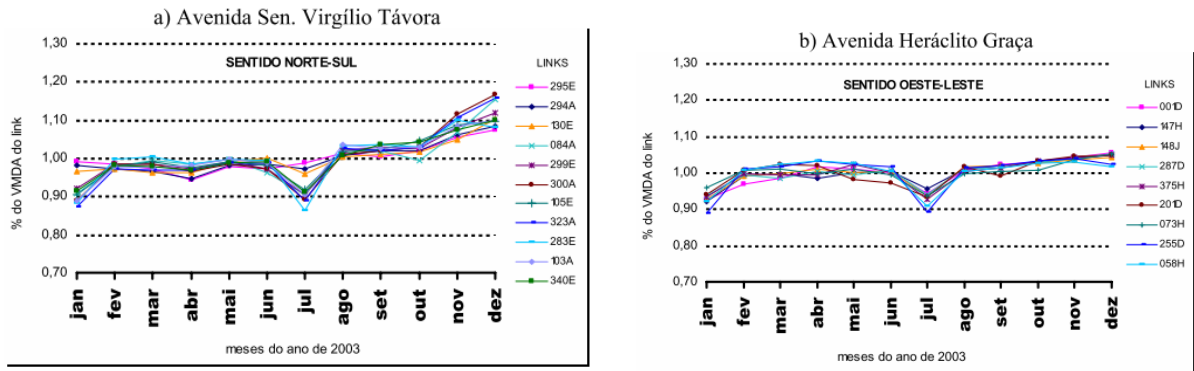
Figura 14 – Variação anual do momento de tráfego diário médio na área de estudo comparativamente à evolução da frota (mês de abril de cada ano).



Fonte: Oliveira (2004).

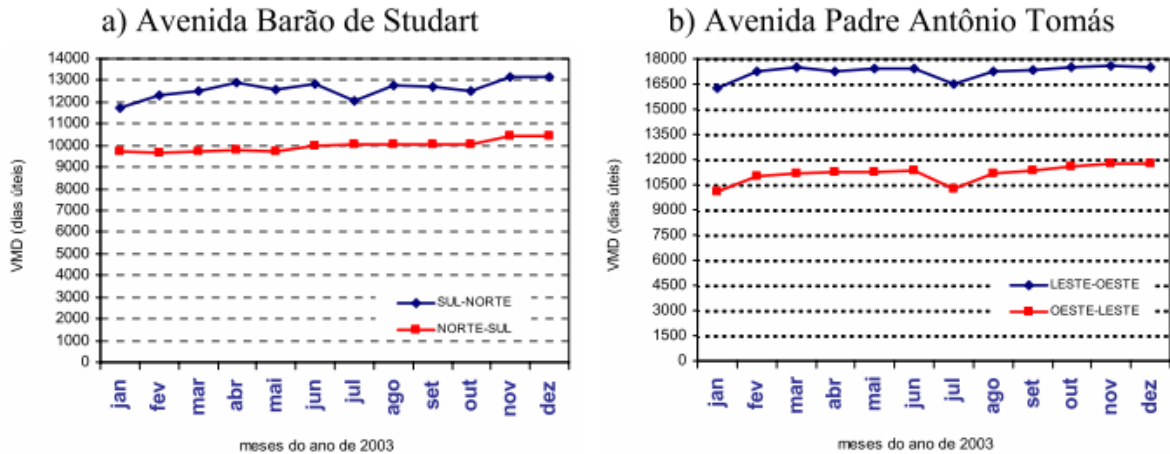
A análise da variabilidade mensal foi realizada separadamente para cada um dos arcos selecionados da rede. Os arcos analisados foram trechos de 16 vias arteriais de Fortaleza, sendo cinco nos sentidos norte-sul e sul-norte, e onze nos sentidos leste-oeste e oeste-leste, e foram utilizados dias típicos de cada mês do ano de 2003 para o cálculo do VDM. A Figura 15 apresenta a variação mensal do VDM por arco das avenidas Senador Virgílio Távora e Heráclito Graça, nos sentidos norte-sul e oeste-leste, respectivamente, enquanto a Figura 16 mostra a variação mensal do VDM para os trechos considerados homogêneos das avenidas Barão de Studart e Padre Antônio Tomás, após análise espacial dos arcos que as compõem.

Figura 15 – Perfis de variação mensal relativa do VMD por arco.



Fonte: Oliveira (2004).

Figura 16 – Perfis de variação mensal absoluta do VMD (dias úteis de 2003) por sentido de via.



Fonte: Oliveira (2004).

A análise estatística da significância da variação mensal do volume se deu com a aplicação do teste ANOVA nos VMDs mensais de cada via, por sentido. O procedimento consistiu em analisar a significância de vários grupos de meses, iniciando pelo “grupo teste” formado por todos os meses do ano, seguindo pela retirada progressiva de meses supostamente atípicos, resultando na combinação de diferentes grupos mensais, a fim de que um destes represente o conjunto de meses com VMD significativamente semelhantes de cada uma das vias. A Figura 17 exemplifica o procedimento de análise de variância de uma via.

Figura 17 – Análise de variância das médias mensais de volume diário (dias úteis de 2003) na Avenida Dom Manuel – sentido norte-sul.

ANOVA FATOR ÚNICO	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
	JANEIRO		
<i>H₀</i> : médias mensais de Volumes Diários iguais	FEVEREIRO	FEVEREIRO	FEVEREIRO
	MARÇO	MARÇO	MARÇO
<i>H₁</i> : pelo menos uma média mensal de Volumes Diários diferente	ABRIL	ABRIL	ABRIL
	MAIO	MAIO	MAIO
	JUNHO	JUNHO	JUNHO
<i>Nível de significância (α): 0,1%</i>	JULHO		
	AGOSTO	AGOSTO	AGOSTO
	SETEMBRO	SETEMBRO	SETEMBRO
	OUTUBRO	OUTUBRO	OUTUBRO
	NOVEMBRO	NOVEMBRO	
	DEZEMBRO		
Estadística F	29,197	13,034	3,622
F crítico	2,894	3,340	3,562
valor-P	0,00%	0,00%	0,21%
Julgamento	REJEITAR H ₀	REJEITAR H ₀	NÃO REJEITAR H ₀

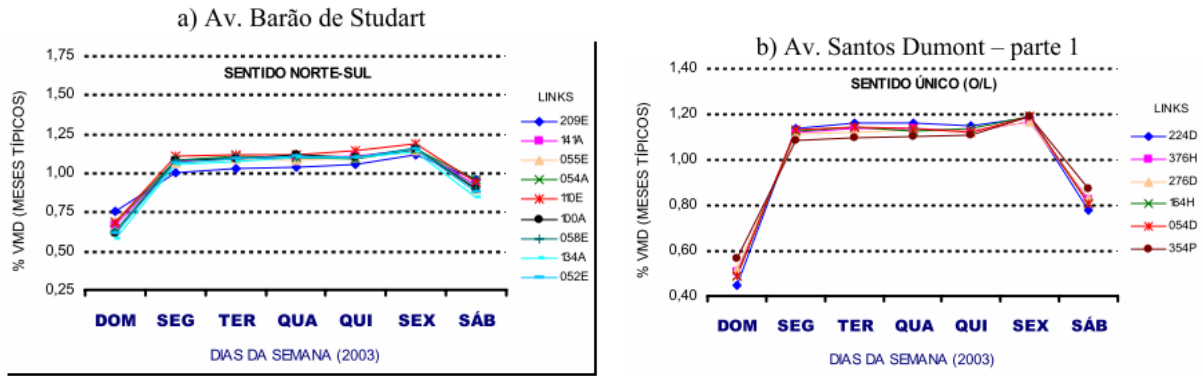
Fonte: Oliveira (2004).

A análise foi realizada sob um nível de significância de 0,1%. Uma avaliação nos testes de significância apresentados resultou na identificação e geração de cinco grupos de vias com características semelhantes de variação mensal, detalhados a seguir. O primeiro grupo é formado pelos meses “típicos” (fevereiro a junho e agosto a outubro), O segundo grupo é formado pelas vias que apresentaram um perfil com apenas os três meses reconhecidamente atípicos, ou seja, janeiro, julho e dezembro. O terceiro agrupamento resultou da coligação das vias que apresentaram um perfil mensal caracterizado por possuir apenas os meses de janeiro e julho considerados “atípicos” com relação ao VMD. Ou seja, nestas vias os meses de final de ano possuem um carregamento médio de volume significativamente semelhante aos demais meses típicos. O quarto grupo de vias é formado pelos perfis mensais de não apresentaram nenhum mês significativamente diferente, ou atípico, em relação ao VMD mensal de dias úteis. O quinto agrupamento refere-se ao conjunto formado pelas vias que apresentam um perfil mensal de variação do volume estatisticamente diferente por semestre, ou seja, apesar de apresentarem meses típicos em cada semestre, a diferença entre estes subgrupos mensais é significativa.

Em seguida foram analisados os padrões de variação do VMD ao longo dos dias da semana. As análises desta etapa correspondem aos dos meses identificados como típicos na etapa anterior. Primeiramente foi realizada a verificação da premissa de que a disposição

espacial dos arcos ao longo da via não influencia no perfil médio de variação relativa do VMD ao longo dos dias da semana. Essa atividade resultou na geração de perfis relativos de variação do VMD, por arco, em cada uma das 27 unidades de análise da amostra, conforme exemplificado na Figura 18.

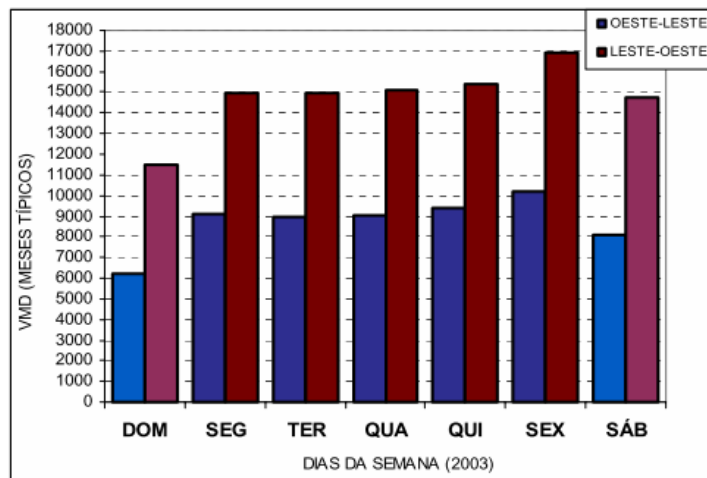
Figura 18 – Perfis de variação diária relativa do VMD por arco.



Fonte: Oliveira (2004).

Em relação ao aspecto espacial do sentido de circulação da via, verificou-se que, semelhantemente aos padrões mensais, os perfis de variação diária do tráfego também justificam a avaliação das vias segregadas por sentido. A Figura 19 ilustra uma distribuição diária do VMD nos dois sentidos.

Figura 19 – Perfis de variação diária relativa do VMD por arco.

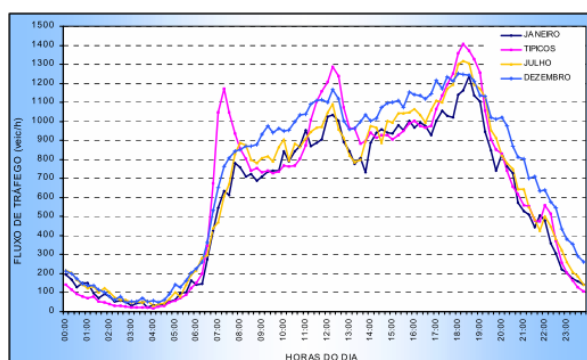


Fonte: Oliveira (2004).

Na análise estatística da significância da variação dos VMDs de meses típicos entre os dias da semana considerou-se apenas o VMD referente aos dias úteis. As análises de variância foram conduzidas em diferentes grupos de dias de semana visando à identificação dos dias de semana “típicos” em cada via, por sentido. O primeiro agrupamento refere-se ao padrão diário que se caracteriza por apresentar nos VMDs dos dias de segunda a quinta-feira ausência de diferenças significativas, sendo o grupo que contém a maioria das vias analisadas. O segundo grupo é formado pelas vias que apresentaram, adicionalmente, a segunda-feira significativamente diferente. Observa-se neste padrão que as condições de atipicidade da segunda e sexta-feira são antagônicas, ou seja, a segunda-feira apresenta o menor VMD entre os dias úteis da semana. Por fim, verificou-se um terceiro grupo presente em apenas um sentido de uma via, caracterizado por não apresentar dias úteis atípicos.

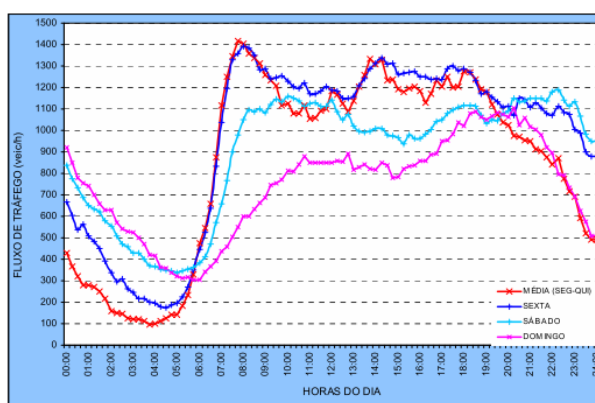
Oliveira (2004) explorou ainda os padrões de variação horários (ao longo do dia) para as vias selecionadas através de uma avaliação confirmatória nos diversos perfis horários de fluxo gerados nesta amostra e concluiu que, conforme reconhecido, o padrão de variação do volume de tráfego horário, na área de estudo, acompanha o clássico padrão urbano de viagem de “dois picos” para os dias úteis, apresentando, contudo a ocorrência de um terceiro pico na metade do dia em algumas vias, sendo uma característica marcante deste padrão de pico duplo de viagem, o aspecto essencialmente direcional, ou seja, o maior pico da manhã ocorre normalmente em uma direção, e o pico mais severo da tarde na direção oposta. Nesta etapa, o autor verificou a premissa de que a distribuição horária é influenciada pelos fatores temporais do mês e do dia da semana. Na Figura 20 é apresentado um exemplo da distribuição horária do fluxo em um segmento viário, segregado por grupos de meses. Neste perfil comparativo observa-se que nos meses atípicos, ou seja, durante as férias escolares ocorre, como esperado, a ausência de um pico concentrado no período da manhã (entre 6:30hs e 8:30hs), e verifica-se também que, no mês de dezembro o carregamento médio horário durante os períodos de entre pico é o mais intenso entre os meses, visto que ocorre uma maior distribuição do volume diário ao longo do dia. Da mesma forma, é apresentado na Figura 21 um perfil típico de variação horária de um link por dia de semana.

Figura 20 – Distribuição horária do volume de tráfego médio por mês em uma seção da avenida Virgílio Távora em 2003.



Fonte: Oliveira (2004).

Figura 21 – Distribuição horária do volume de tráfego médio por dia da semana em uma seção da avenida da Abolição em 2003.



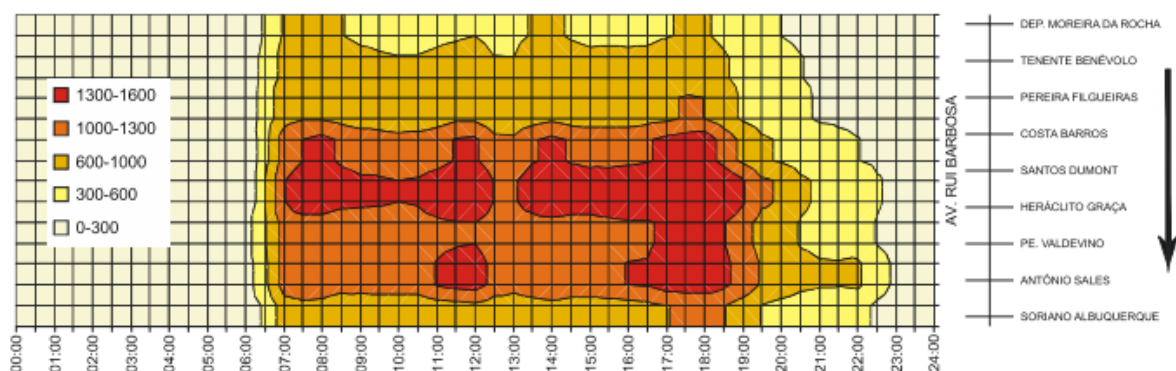
Fonte: Oliveira (2004).

A partir da distribuição horária do volume de tráfego por dia da semana verifica-se que volume típico apresenta padrões de variação distintos entre os dias da semana, sobretudo durante a sexta-feira, onde ocorre uma distribuição particular do volume diário ao longo do dia. Neste perfil da sexta-feira, observa-se inicialmente um carregamento potencialmente superior durante os períodos de entre pico, e um volume superior é observado no final do dia a partir das 20:00hs. Nos finais de semana, o perfil típico das vias apresenta uma distribuição mais uniforme ao longo do dia com a ausência de picos predominantes.

Os últimos resultados apresentados por Oliveira (2004) como parte da análise da variabilidade do tráfego na cidade de Fortaleza-CE são as superfícies de representação das dimensões espaço-tempo do comportamento típico do fluxo de tráfego nas vias selecionadas. As superfícies espaço-temporais típicas foram geradas a partir dos meses e dias de semana

definidos como típicos nas etapas anteriores. As referidas superfícies são isócronas de fluxo, possibilitando a identificação simultânea do efeito do espaço e do tempo. A Figura 22 apresenta o exemplo de uma superfície espaço-temporal de fluxo de um importante corredor arterial pertencente à rede avaliada.

Figura 22 – Superfície espaço-temporal típica de fluxo de tráfego horário (veículos/hora) da Av. Rui Barbosa.



Fonte: Oliveira (2004).

Oliveira (2004) aponta que as dimensões espacial e temporal são fundamentais e complementares para a compreensão da dinâmica do fluxo de tráfego. Nesse contexto, ele conclui que as análises relacionais e espaciais podem ambas adquirir maior robustez através de mútua integração, ou seja, a disponibilização de dados de tráfego referenciados no tempo e no espaço, especialmente fluxos de tráfego, proporcionando suporte à análise das relações entre uso do solo e mobilidade. Dada a importância da influência das condições locais nos padrões de tráfego encontrados, a avaliação dos aspectos espaciais de variação do volume de tráfego em longo prazo mostra-se útil, por exemplo, como auxílio na identificação de indícios de potenciais vetores de deslocamento e de suas tendências. O autor destaca também a relevância dos processos de estruturação e consolidação da base de dados na identificação de inconsistências e na aferição da qualidade dos dados e recomenda a avaliação dos benefícios e vantagens do emprego de técnicas de mineração de dados, análise de agrupamento e séries temporais na identificação dos padrões de variação do volume de tráfego, além de correlacionar o efeito da magnitude e variação do volume, com outras variáveis de tráfego (ex. acidentes, velocidade), considerando a natureza espaço-temporal das variáveis.

2.3 Conclusões

A partir da revisão da literatura apresentada neste capítulo, pode-se concluir que, de maneira geral, os modelos dinâmicos dia-a-dia de demanda por viagens consideram que os usuários tomam suas decisões tanto de viagens quanto de rotas em função do estado da rede e das decisões tomadas no dia anterior. Segundo Oliveira (2004), a adoção de premissas e suposições baseadas no julgamento e na experiência, frequentemente imprecisos, sobre a natureza dos dados de tráfego empregados em modelos é uma prática comum nas diversas áreas de transportes. Trabalhos sobre a modelagem da demanda, tanto da modelagem de escolha de rota (Cantarella e Watling, 1995), e da matriz OD sintética (Oliveira *et al.*, 2016) recomendam que sejam realizados estudos empíricos sobre a variabilidade do tráfego para que se possa adaptar os modelos à realidade local estudada. Com a disponibilidade crescente de dados de tráfego provenientes de sistemas de coleta automática têm surgido cada vez mais trabalhos que analisam a variabilidade do tráfego com a utilização de dados reais relativos a áreas de estudo específicas.

Boa parte das análises de variabilidade do tráfego revisadas da literatura referem-se a estudos de previsão de demanda em curto prazo. Uma das limitações desses estudos é a premissa de que a variabilidade do tráfego é constante ao longo do dia, enquanto que alguns estudos apresentados (Stathopoulos e Karlaftis, 2001; Cheng *et al.*, 2012) apontam que essa variabilidade pode ser distinta entre períodos de pico e entre pico, podendo variar também espacialmente de acordo com a região da cidade onde o arco considerado está localizado, e com a direção do movimento do fluxo. Logo, não seria adequado utilizar o mesmo modelo para representar a variação do tráfego para todos os períodos do dia, assim como para áreas de estudo distintas, sendo indicada a realização de uma análise prévia da variabilidade do tráfego de cada região para formulação e aplicação de modelos de demanda.

Além disso, muito se encontra na literatura sobre a análise da variabilidade do volume de tráfego na malha viária urbana, assim como do tempo de viagem e da velocidade, com foco na previsão da demanda em curto prazo ou na identificação de condições típicas de acordo com fatores sazonais. Porém, trabalhos contendo esta mesma análise direcionada à compreensão da variabilidade dos fluxos OD ainda são incipientes. Esta carência se deve principalmente à indisponibilidade de dados relativos a essa variável. Contudo, esta limitação está sendo contornada nos estudos mais recentes com a utilização de dados provenientes de redes sociais e leitura automática de placas com o objetivo de identificar o padrão de

deslocamento OD nas regiões onde se tem disponibilidade de dados, apesar de muitas vezes insuficientes para a realização de estudos conclusivos.

Em relação ao fenômeno na cidade de Fortaleza-CE, Oliveira (2004) apresentou contribuições importantes na compreensão da variabilidade do volume de tráfego em diferentes níveis de agregação temporal e entre diferentes localidades, através dos dados disponíveis no período da publicação do estudo. Contudo, os arcos analisados concentram-se em bairros centralizados da cidade, não tendo sido explorado a variabilidade das regiões mais periféricas da cidade. Além disso, desde a data da publicação de seu trabalho, a cidade passou por intensas mudanças no sistema urbano, tanto de atividades quanto de oferta de transportes, sendo assim, indicado realizar-se uma análise considerando a nova configuração e utilizando novos dados disponibilizados pelos órgãos de gestão do tráfego na cidade para gerar uma melhor compreensão da situação atual do padrão de deslocamento dos usuários da malha viária da cidade.

CAPITULO 3: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A proposta deste capítulo é a realização de uma caracterização da área de estudo, que neste caso se trata da cidade de Fortaleza-CE em relação à demografia, ao uso do solo e localização de atividades, à produção e atração de viagens, e à distribuição do sistema de fiscalização eletrônica na malha viária, para que seja definida em seguida, a divisão da cidade em regiões menores de interesse para o presente estudo no âmbito da compreensão da mobilidade urbana. Ao final do capítulo, e a partir da divisão proposta em regiões da cidade e da definição dos pares OD, serão levantadas hipóteses sobre a variabilidade do volume de tráfego e do fluxo OD levando em consideração a localização dos equipamentos e a direção do deslocamento.

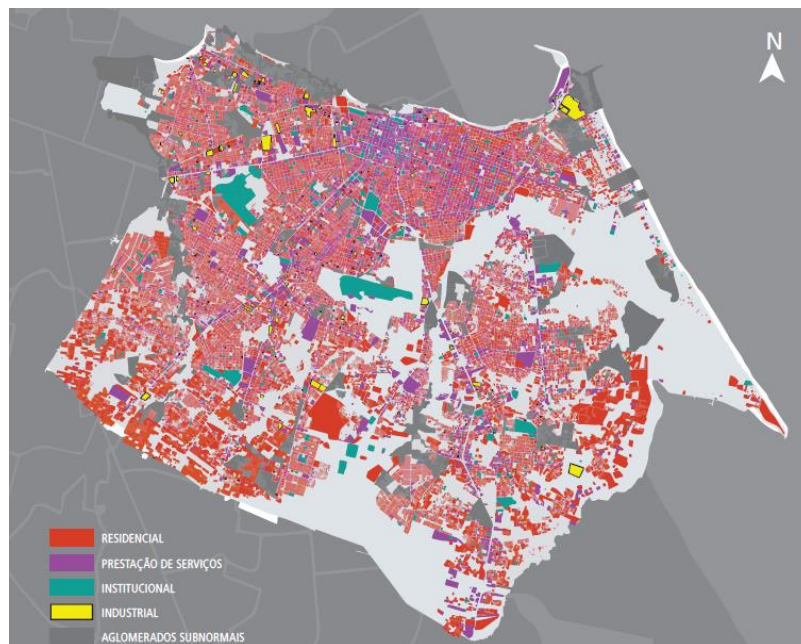
3.1 A Cidade de Fortaleza-CE

Nesta seção pretende-se apresentar uma visão geral de como o uso do solo, as atividades e o sistema de fiscalização eletrônica estão distribuídos no território da cidade, buscando identificar regiões em que se tem uma maior concentração de atividades ou residências para auxiliar na divisão posterior que será proposta. O objeto de estudo deste trabalho é a cidade de Fortaleza/CE. Fortaleza possui uma área de 314.930 quilômetros quadrados, e abrigava, em 2010, em torno de dois milhões e meio de habitantes. Em 2013, Fortaleza possuía uma frota de 908.074 veículos, dos quais mais da metade são automóveis, cerca de um quarto são motocicletas, 58.352 camionetes, 31.075 camionetas, 21.479 caminhões, 15.557 automóveis utilitários, 6.563 ônibus, 6.507 motonetas, 3.567 caminhões-trator, 3.263 micro-ônibus, além de 21.266 outros tipos de veículo (IBGE).

A seguir são apresentados mapas publicados pelo Instituto de Planejamento de Fortaleza (Iplanfor), no âmbito do projeto Fortaleza 2040 que se trata de um planejamento para a cidade de Fortaleza com estratégias a serem implementadas no curto, médio e longo prazo, tendo como horizonte o ano 2040 e contemplando as áreas urbanística, de mobilidade e de desenvolvimento econômico e social. O primeiro mapa, apresentado na Figura 23, mostra os usos do solo da cidade de Fortaleza, onde é possível observar que a ocupação espacial ocorre de forma heterogênea e desordenada tendo uma concentração maior na zona central. Esse padrão de urbanização é apoiado no zoneamento por áreas de usos especializados, que

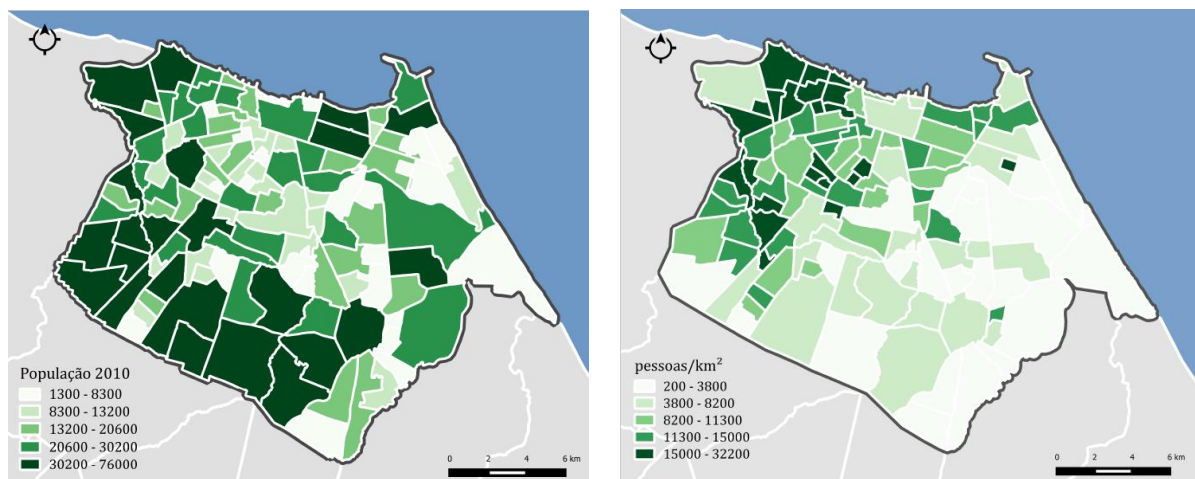
separou a moradia do trabalho e, no desenho, com escolha prioritária de atendimento às necessidades de circulação dos veículos automotores (Iplanfor, 2015). Na sequência, na Figura 24, são apresentados mapas da distribuição populacional nos bairros da cidade, sendo o da esquerda o total da população, e o da direita a densidade populacional em pessoas por quilômetro quadrado.

Figura 23 – Usos do solo do município de Fortaleza.



Fonte: Iplanfor (2015).

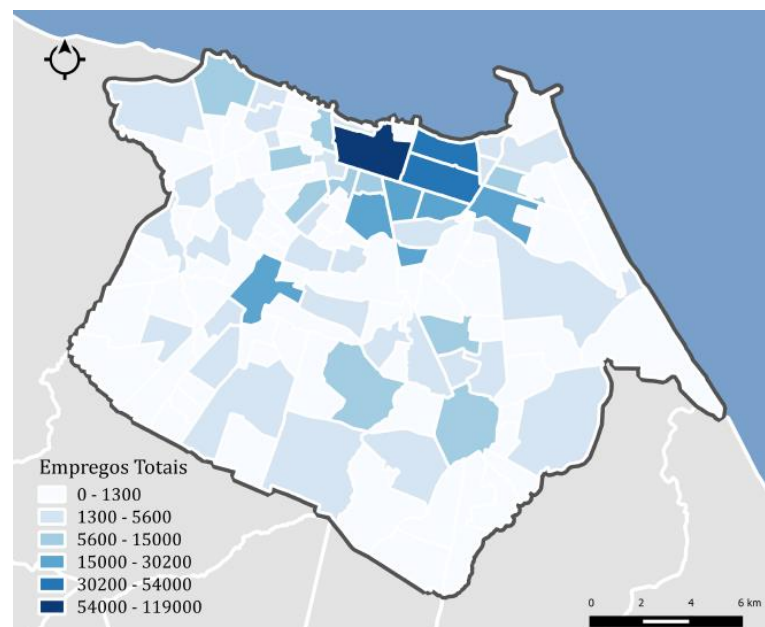
Figura 24 – População e densidade populacional por bairro em 2010.



Fonte: Iplanfor (2015).

Pelos mapas da população por bairro observa-se que os bairros periféricos, sobretudo os da região oeste e sul, são os mais populosos, que concentram mais habitantes, juntamente com alguns bairros da região norte, e da periferia leste. Já os bairros mais povoados se localizam nas áreas norte e oeste da cidade. Em relação à localização dos empregos, a Figura 25 apresenta a distribuição do total de empregos formais distribuídos nos bairros de Fortaleza.

Figura 25 – Empregos totais por bairro

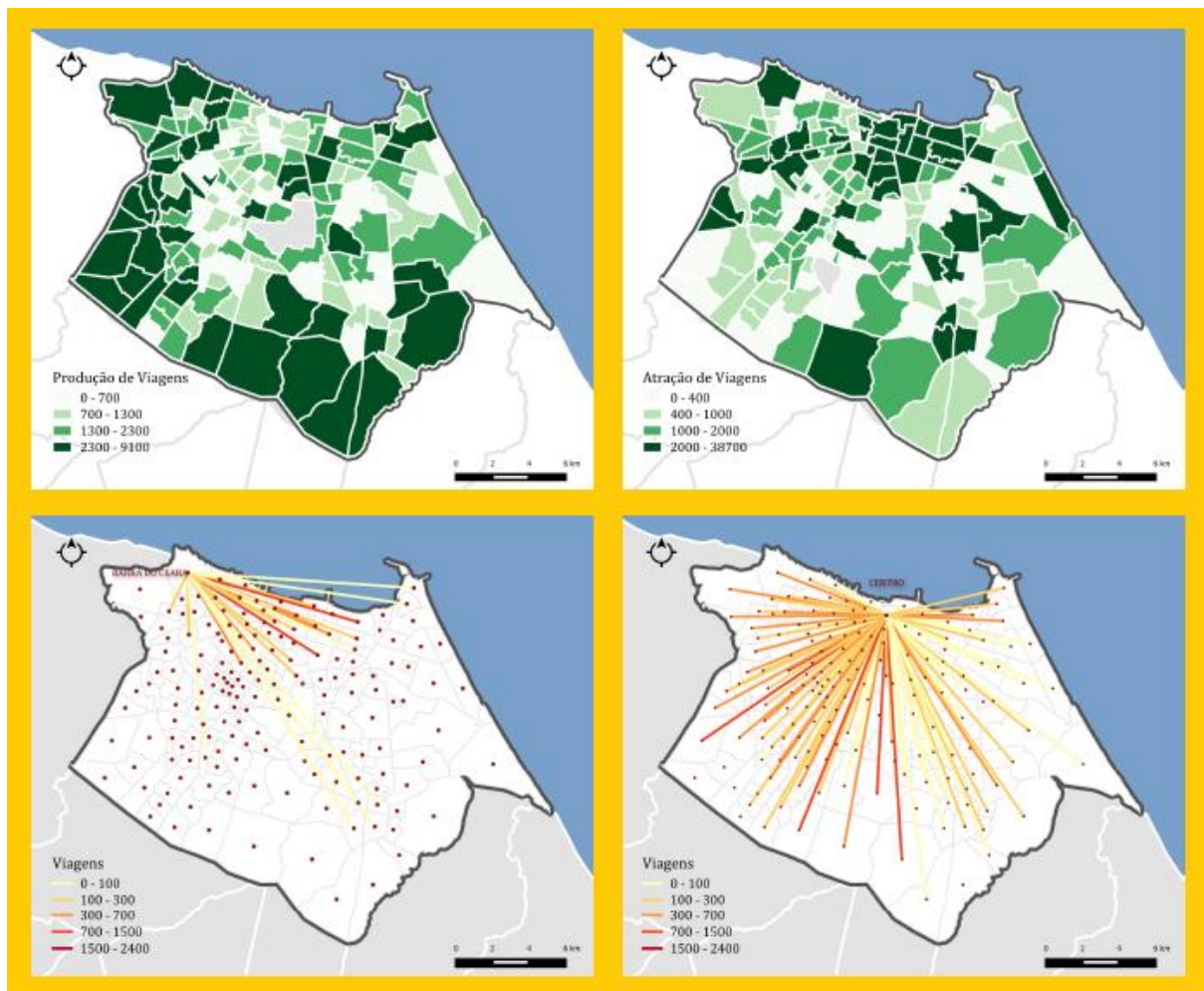


Fonte: Iplanfor (2015).

Pelo mapa pode-se observar que a maior parte dos empregos em Fortaleza está concentrada nos bairros da região norte da cidade, com alguns poucos bairros das regiões oeste, sul e leste concentrando também uma quantidade considerável de empregos formais. Em relação aos deslocamentos por motivo trabalho na cidade de Fortaleza, a Figura 26 apresenta a produção e atração de viagens por bairro, juntamente com as linhas de desejo do bairro com maior produção de viagens e do bairro com maior atração no período de pico da manhã. As zonas de maior produção de viagens estão localizadas nas regiões oeste e sul da cidade, coincidindo com as áreas de maior população, já as zonas de maior atração de viagens coincidem com as áreas de maior oferta de emprego, localizadas na região norte e nordeste de Fortaleza. Uma forte correlação pode ser observada entre a espacialização do uso do solo com

o sistema de atividades, e principalmente, com as maiores linhas de desejo de deslocamento da cidade. Diariamente têm-se grandes volumes de pessoas se deslocando da periferia para a região norte da cidade, causando os grandes congestionamentos e a superlotação de algumas linhas de transporte coletivo nos horários de pico (Iplanfor, 2015).

Figura 26 – Produção e atração de viagens no pico da manhã e maiores linhas de desejo de viagens.

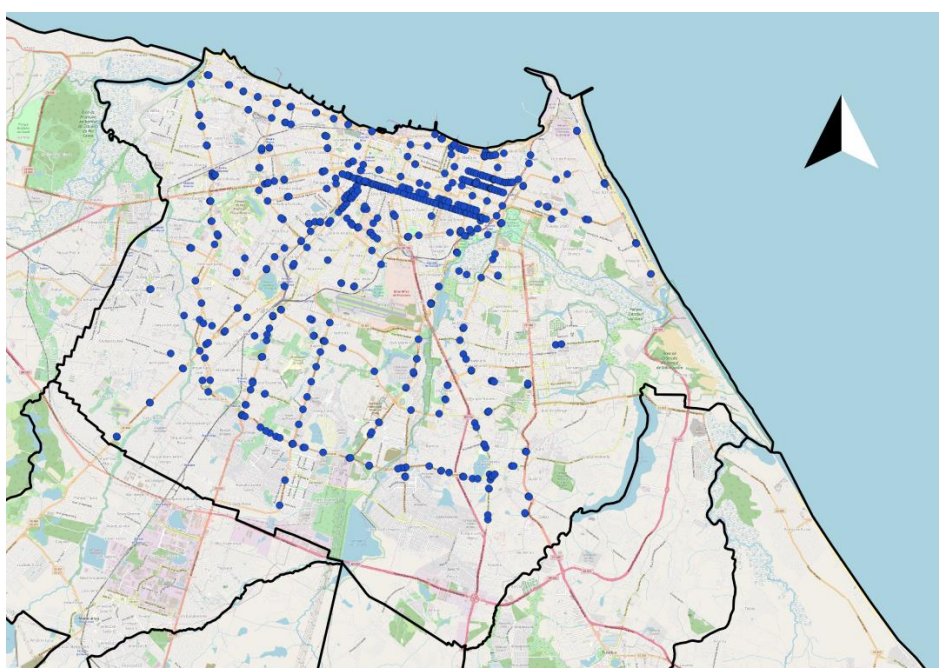


Fonte: Iplanfor (2015).

Após a exposição de algumas das características de uso do solo, atividades e mobilidade da cidade de Fortaleza, será apresentada a distribuição dos equipamentos de fiscalização eletrônica na malha viária da cidade. Os dados de tráfego coletados por estes equipamentos servirão como base para as análises do presente trabalho. A cidade de Fortaleza possui um sistema de fiscalização eletrônica de ampla cobertura com equipamentos instalados na malha sua viária administrado pela Prefeitura Municipal de Fortaleza (PMF). O sistema

consiste em três principais componentes, laços indutivos instalados no pavimento que realizam a detecção da passagem dos veículos, câmeras que filmam o tráfego com o objetivo de monitorar o tráfego e capturar as placas veiculares para fiscalização de infrações, e um software de Reconhecimento Ótico de Caracteres (OCR) que realiza a leitura das placas capturadas. A distribuição dos equipamentos ativos no ano de 2017 no território da cidade está mostrada na Figura 27, apresentando os equipamentos localizados na malha viária.

Figura 27 – Equipamentos de fiscalização eletrônica distribuídos na malha viária de Fortaleza.



Fontes: Open Street Map e AMC.

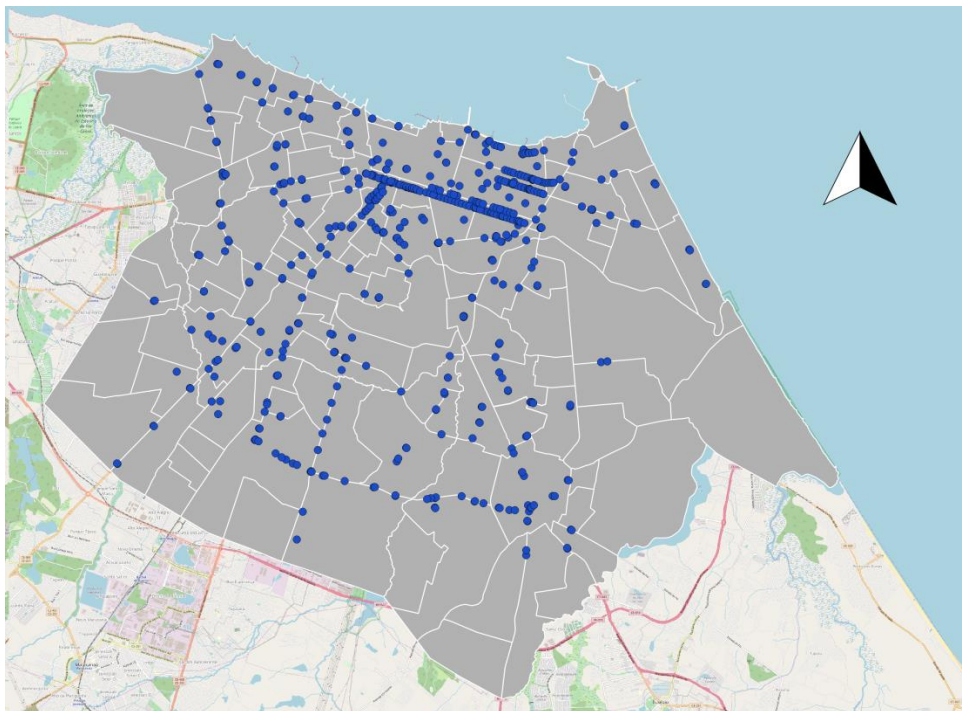
A grande maioria dos equipamentos está localizada em vias arteriais segundo a definição da Lei de Uso e Ocupação do Solo (LUOS, 2017). Existem equipamentos presentes em algumas das principais avenidas que conectam as várias regiões da cidade, incluindo: as avenidas Presidente Castelo Branco, Francisco Sá e Bezerra de Menezes/Mister Hull, conectando a região noroeste da cidade às demais, as avenidas Santos Dumont e Dom Luís conectando a região nordeste às demais, as avenidas Desembargador Moreira/Raul Barbosa para a região sul, e as avenidas José Bastos e João Pessoa para a região sudoeste. Os dados para esta pesquisa foram fornecidos pela AMC que é o órgão responsável pelo gerenciamento da maior parte do sistema de fiscalização eletrônica da cidade. Porém, os equipamentos presentes nas avenidas Washington Soares e BR-116 que fazem ligação da região sudeste às

demais, são gerenciados por órgãos diferentes dos demais equipamentos cujos dados não foram disponibilizados para a realização desta pesquisa.

3.2 Definição da Região de Estudo

Nesta seção será proposta uma divisão da cidade de Fortaleza em regiões de interesse para o estudo da variabilidade do tráfego de acordo com a distribuição dos equipamentos de fiscalização eletrônica e a localização dos empregos e residências da cidade apresentados na seção anterior. A Figura 28 mostra os equipamentos de fiscalização distribuídos no território da cidade no nível de agregação de bairros.

Figura 28 – Equipamentos de fiscalização eletrônica por bairro

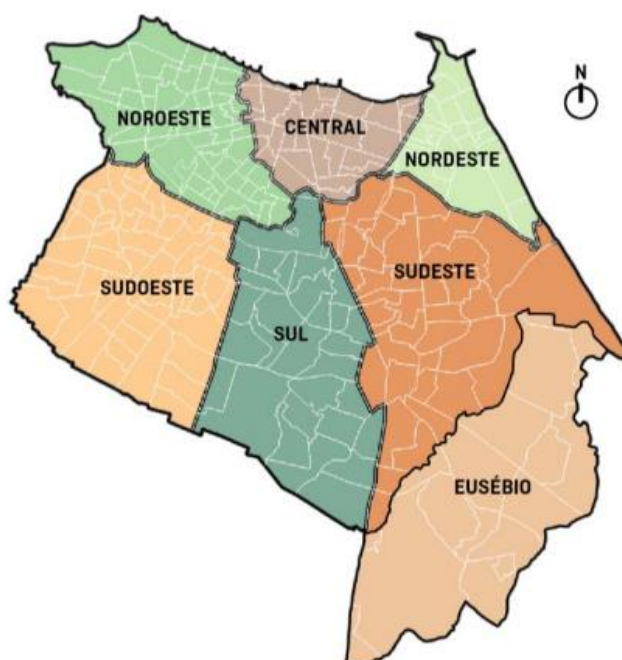


Fontes: IBGE e AMC (2017).

A partir do mapa apresentado anteriormente pode-se observar que seria inviável utilizar o nível de agregação mostrado para analisar o tráfego e os deslocamentos entre áreas da cidade utilizando os dados provenientes do sistema de fiscalização eletrônica, dado que muitos dos bairros não possuem nenhum equipamento instalado em seu território, e, além disso, os bairros são delimitados por vias, fazendo com que muitos dos equipamentos estejam

localizados nas suas fronteiras. Por conta disso, optou-se por definir de áreas com maior nível de agregação para esta análise. Para isto, inicialmente, utilizou-se a subdivisão em seis regiões proposta por Lima (2017) para análise do espraiamento urbano por autosegregação em direção à região sudeste de Fortaleza, mostrada na Figura 29.

Figura 29 – Subdivisão de Fortaleza em regiões.

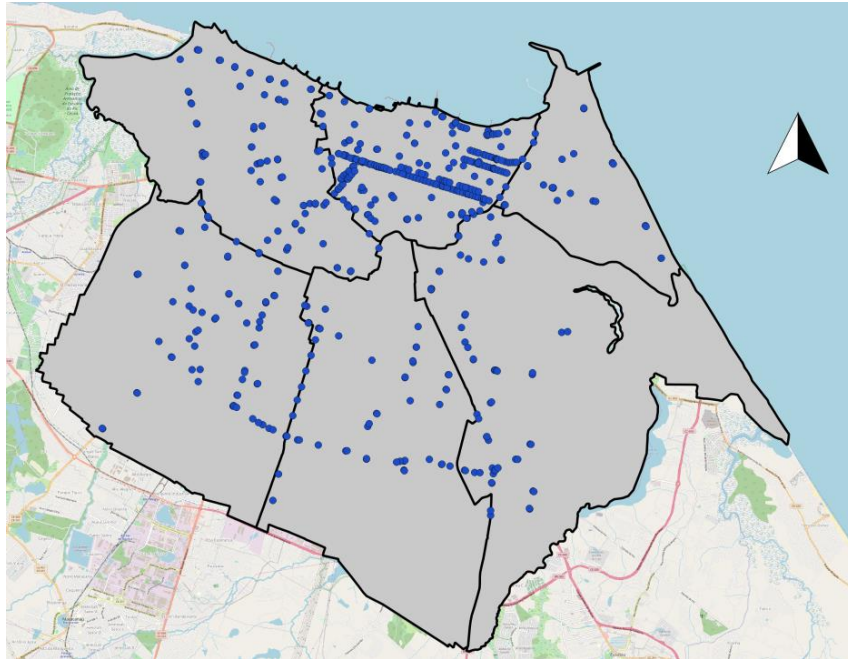


Fonte: Lima (2017)

A subdivisão adotada por Lima (2017) respeita os limites dos setores censitários segundo o IBGE (2010) e compreende uma região Central e cinco regiões periféricas denominadas Nordeste, Noroeste, Sudeste, Sudoeste e Sul, além do Eusébio, um município da região metropolitana de Fortaleza (RMF). A distribuição dos equipamentos nas regiões propostas por Lima (2017), excluindo-se o Eusébio é mostrada na Figura 30, onde se observa que a região Sudeste possui poucos equipamentos em seu território, devido à ausência de dados referentes aos equipamentos das suas principais vias de ligação com as outras regiões, que são a BR-116 e a Avenida Washington Soares. Os dados referentes a estas vias não são de responsabilidade da AMC como os demais, e não foi possível ter acesso a eles junto aos órgãos competentes para esta pesquisa. Por conta disto, foi tomada a decisão de excluir a região Sudeste da análise e de reconfigurar as regiões adjacentes para que englobassem alguns dos equipamentos presentes na região Sudeste sem descaracterizá-las. Na região Nordeste,

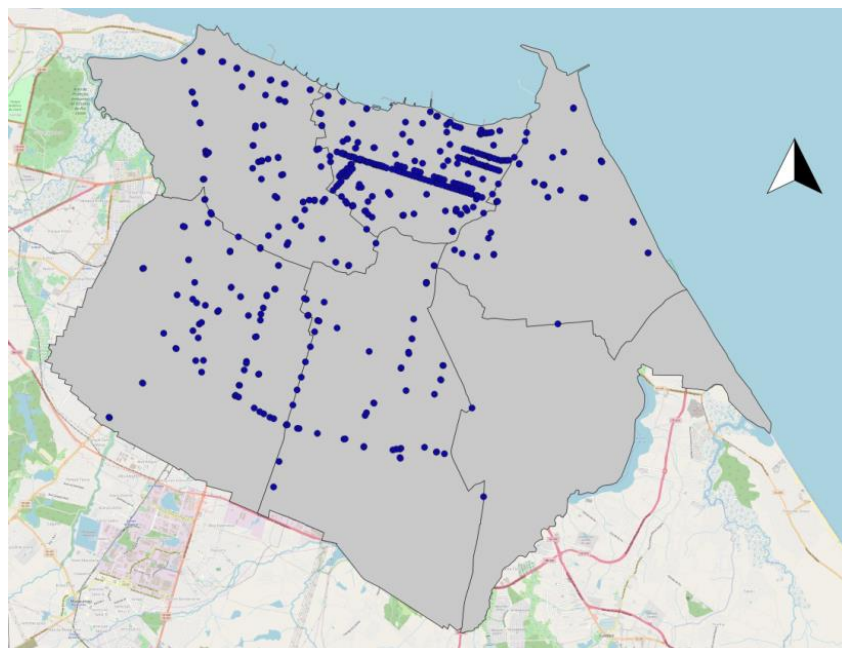
apesar de existirem poucos equipamentos ativos em relação às outras, existe uma cobertura de Fiscalização Eletrônica na Avenida Santos Dumont, que a conecta com a região Central. As novas regiões e os equipamentos estão mostrados na Figura 31.

Figura 30 – Distribuição dos equipamentos em regiões.



Fonte: Lima (2017) e AMC (2017).

Figura 31 – Distribuição dos equipamentos nas novas regiões propostas.



Fonte: Adaptado de Lima (2017) e AMC (2017).

3.3 Hipóteses Sobre a Dinâmica do Tráfego em Fortaleza-CE

A partir da revisão dos modelos de alocação dinâmica do tráfego e dos modelos de estimação da matriz OD sintética, juntamente com o conhecimento prévio do fenômeno e a caracterização da área de estudo, foram formuladas hipóteses sobre a intensidade da variabilidade do volume de tráfego, de acordo com a região, Central ou periférica (correspondendo às regiões Nordeste, Noroeste, Sudoeste e Sul), e dos fluxos OD de acordo com o sentido do fluxo, periferia-centro, centro-periferia ou periferia-periferia, para os períodos de pico da manhã, entre pico e pico da tarde de acordo com as delimitações definidas na seção anterior. A formulação das hipóteses é apresentada, para o volume de tráfego e o fluxo OD, nos Quadros 1 e 2, respectivamente, e os níveis de intensidade da variabilidade, baixa, média e alta, se referem à relação de cada variável no período t com o período $t - 1$. Para isto, foram consideradas as premissas de que a grande maioria das viagens realizadas nos horários de pico são viagens pendulares por motivo trabalho ou educação, e que no período de entre pico grande parte das viagens são por motivos outros e não são realizadas rotineiramente.

Quadro 1 – Hipóteses sobre a intensidade da variabilidade do volume de tráfego.

	Periferia	Centro
Pico da Manhã	Média	Alta
Entre Pico	Baixa	Baixa
Pico da Tarde	Média	Alta

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 2 – Hipóteses sobre a intensidade da variabilidade do fluxo OD.

	Periferia-Centro	Centro-Periferia	Periferia-Periferia
Pico da Manhã	Baixa	Baixa	Baixa
Entre Pico	Média	Média	Média
Pico da Tarde	Baixa	Baixa	Baixa

Fonte: Elaborado pela autora.

Para o volume de tráfego nos arcos, espera-se que nos horários de pico, tanto da manhã quanto da tarde, a variabilidade dia-a-dia observada nos dados seja de média a alta, o que significa dizer que se espera que haja uma dinâmica baseada na mudança de rota de um dia para o outro, a partir da experiência anterior dos usuários. Isto se justificaria devido ao intenso carregamento da rede nesses horários por conta das viagens pendulares. Em relação à localização do arco, acredita-se que os arcos localizados nas regiões periféricas tenham uma variabilidade menor do que os arcos localizados na região central devido à maior disponibilidade de rotas alternativas nesta região, o que aumenta a possibilidade de mudança de rota baseado na experiência do dia anterior pelos usuários. Com relação ao período de entre pico, se espera uma variabilidade baixa no volume dos arcos tanto da periferia quanto da região central, por conta do carregamento da rede ser menor nesses horários, o que faria com que os usuários não realizassem tantas mudanças de rota para que se fosse observada uma dinâmica considerável no período. Além disso, as viagens realizadas no entre pico não são na sua maioria rotineiras, então o volume de um dia não deve ter tanta relação com o do dia anterior.

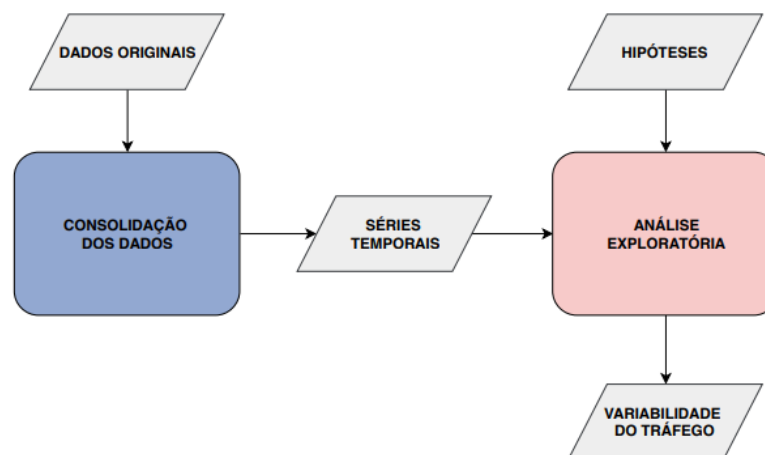
Em relação ao fluxo OD, espera-se que não haja dinâmica nas decisões de viajar e na decisão do destino da viagem nos horários de pico da manhã e da tarde, dado que nesses períodos a maior parte das viagens é pendular por motivo trabalho, portanto são de certa forma viagens compulsórias, realizadas independentemente do estado da rede ou da decisão de viagem do dia anterior, nos três sentidos analisados. Já no horário de entre pico, como as viagens são, em sua maioria, por motivo outros, não se descarta a possibilidade de se observar uma relação das viagens realizadas em um dia com as do dia anterior, também para os três sentidos de deslocamento.

Sobre a relação da variabilidade dos fluxos OD com a variabilidade do volume de tráfego espera-se que a variabilidade dos fluxos OD, caso seja considerável, influencie na variabilidade do volume, porém, não necessariamente refletindo o mesmo padrão, dado que o volume de tráfego depende também de outros fatores além do fluxo OD a partir do qual ele foi gerado, como a matriz de escolha de rotas dos usuários que é influenciada por diversos fatores comportamentais. Por exemplo, foi levantada a hipótese de que não há variabilidade considerável do volume no entre pico, enquanto que se considerou a possibilidade de se observar uma dinâmica nos fluxos OD para esse período. Caso a variabilidade do volume no entre pico seja considerável, isto pode ser atribuído à dinâmica observada no fluxo OD, se ela também ocorrer.

CAPITULO 4: PROPOSTA METODOLÓGICA

Nos capítulos anteriores foram realizadas a revisão da literatura sobre métodos de análise da variabilidade do tráfego e a caracterização da área de estudo que será objeto deste trabalho, juntamente com o levantamento de hipóteses sobre a dinâmica das variáveis volume de tráfego e fluxo OD na malha viária de Fortaleza-CE. A partir disso, neste capítulo será apresentada a proposta metodológica para alcançar os objetivos desta pesquisa. O método proposto está dividido em duas etapas principais, a consolidação dos dados e a análise exploratória das séries temporais das variáveis volume de tráfego e fluxo OD como apresentado no fluxograma da Figura 32. A etapa de consolidação dos dados tem como entrada os dados provenientes do sistema de fiscalização eletrônica instalado na cidade apresentado no capítulo anterior, e visa atingir o primeiro objetivo específico de propor um método viável para extrair as variáveis volume de tráfego e fluxo OD no formato de séries temporais dia-a-dia para possibilitar a realização de uma análise exploratória da variabilidade do tráfego na cidade de Fortaleza. As séries temporais resultantes, juntamente com as hipóteses levantadas anteriormente, serão as entradas para a análise exploratória, etapa que trata dos outros três objetivos específicos referentes às análises da variabilidade temporal e espacial das duas variáveis estudadas, e da relação entre a variabilidade do volume de tráfego e do fluxo OD. Estas duas etapas serão detalhadas nas seções seguintes deste capítulo. O processamento dos dados será realizado utilizando o software R, e as análises espaciais juntamente com a geração de mapas serão realizadas utilizando os softwares R e Qgis.

Figura 32 – Proposta metodológica.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1 Consolidação dos Dados

Nesta seção será detalhado o método proposto para a obtenção do volume de tráfego e dos fluxos OD da região de estudo. A consolidação dos dados configura uma etapa essencial para se obter dados consistentes com a realidade, e que permitirão a realização de uma análise da variabilidade do tráfego confiável. Inicialmente, a natureza dos dados originais de fiscalização eletrônica utilizados nesta pesquisa será detalhada. Em seguida, as variáveis de interesse para o estudo serão definidas, e, por fim, as etapas metodológicas da consolidação dos dados serão descritas passo a passo, desde os dados originais até a extração das séries temporais de volume e fluxo OD.

4.1.1 Natureza dos Dados

Os dados utilizados nesta pesquisa são provenientes de equipamentos de fiscalização eletrônica localizados na malha viária da cidade de Fortaleza-CE. Tal sistema pode ser classificados como um sistema de coleta automática de dados (ADC). Chu et al. (2010) destacam as propriedades dos sistemas de bilhetagem eletrônica, outro tipo de sistema ADC, que são desejáveis para instrumentos de coleta de dados de tráfego. Dentre elas, as seguintes propriedades podem ser igualmente atribuídas aos sistemas de fiscalização eletrônica:

- A estratégia de coleta de dados é passiva, ou seja, os dados são gerados automaticamente ao contrário de informações declaradas ou relatadas que são fornecidas apenas por pessoas entrevistadas.
- O sistema registra com precisão e alta resolução temporal e espacial as viagens, resultando em fidelidade de detalhes especiais e temporais nos dados obtidos.
- A coleta de dados é contínua enquanto o sistema estiver em operação.
- Dados operacionais são coletados em cada transação, permitindo a integração com o planejamento operacional.
- Cada transação é um registro individual de um veículo com detalhes operacionais, obtendo-se dados desagregados.

Tais características dos sistemas ADC os tornam ferramentas potenciais para a utilização em pesquisas de transportes para auxiliar no planejamento operacional e estratégico.

Em Fortaleza, três empresas são responsáveis pelos equipamentos do sistema de fiscalização eletrônica: Atlanta, Fotosensores e Trana. Os arquivos contendo os dados coletados que são fornecidos por cada uma das empresas através da AMC estão no formato CSV (*Comma-Separated Values*), e possuem a mesma formatação. Cada arquivo representa os dados coletados de um dia por todos os equipamentos de uma empresa, e cada linha de cada arquivo é referente à detecção de um veículo. O Quadro 3 mostra a descrição dos campos presentes nos arquivos, e a Figura 33 mostra o início do arquivo referente ao dia primeiro de janeiro de 2014 da empresa Atlanta para ilustrar o formato dos dados.

Quadro 3 – Campos presentes nos arquivos de fiscalização eletrônica.

CAMPO	DESCRIÇÃO
ID	Código de identificação do equipamento
DATA	Data de detecção do veículo
HORA	Horário de detecção do veículo
FAIXA	Faixa na qual o veículo foi detectado
V_REG	Velocidade regulamentada na via
V_DETEC	Velocidade instantânea do veículo detectado
TAMANHO	Tamanho do veículo em metros
PERFIL	Classificação do perfil veicular
PLACA	Placa criptografada do veículo detectado

Fonte: Adaptado de AMC

Figura 33 – Trecho de arquivo de registro de fiscalização eletrônica da empresa Atlanta.

ID	DATA	HORA	FAIXA	V_REG	V_DETEC	TAMANHO	PERFIL	PLACA
AT007	01/01/2014	00:00:12	2	60	52	4	2	
AT007	01/01/2014	00:00:16	2	60	53	1,7	1	
AT007	01/01/2014	00:00:22	1	60	55	1,4	1	6430da8b153fdde9
AT007	01/01/2014	00:00:22	2	60	54	3,9	2	
AT007	01/01/2014	00:00:25	2	60	52	3,8	2	

Fonte: AMC

Como mostrado, os arquivos de registro do sistema de fiscalização eletrônica contêm nove campos de informações para cada veículo registrado, que são: o código identificador do equipamento, a data e a hora do registro, a faixa na qual o veículo foi detectado, a velocidade regulamentada da via, a velocidade registrada do veículo, o tamanho

do veículo em metros estimado pelo sensor indutivo, o perfil veicular de acordo com o tamanho detectado, variando de 1 até 5, de acordo com a classificação mostrada no Quadro 4, e, por fim, a leitura da placa do veículo registrado, realizada a partir da captura da imagem da placa veicular e aplicação de um *software* de identificação de caracteres (OCR – *Optical Character Recognition*). Nos dados disponibilizados pela AMC, os registros das placas lidas estão criptografados a fim de manter a privacidade dos usuários do sistema de transportes viário da cidade. Além disso, apenas uma proporção de leitura de placas é registrada por dia, devido à limitações do processo de reconhecimento de caracteres, que é afetado por fatores como o ângulo de captura da imagem, a velocidade dos veículos e a iluminação nos locais em que os equipamentos estão instalados, que varia com a incidência solar ao longo do dia e com a iluminação pública durante a noite. As implicações dessa limitação serão exploradas na próxima seção.

Quadro 4 – Códigos de classificação de perfil veicular.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO
0	Tamanho indefinido
1	Motocicleta
2	Veículo de passeio
3	Caminhão
4	Ônibus

Fonte: Adaptado de AMC.

A partir da descrição dos dados, nota-se que o nível de agregação do fluxo veicular é o menor possível, dado que cada registro é referente à detecção de um veículo com precisão de segundos. Logo, é possível, a partir desses dados, obter o fluxo veicular a qualquer nível de agregação temporal de interesse.

4.1.2 Etapas Metodológicas

O objetivo desta seção é descrever as etapas metodológicas propostas para a obtenção de séries temporais das variáveis volume de tráfego e fluxo OD a partir dos dados originais provenientes dos sistemas de fiscalização eletrônica descritos na seção anterior. Para

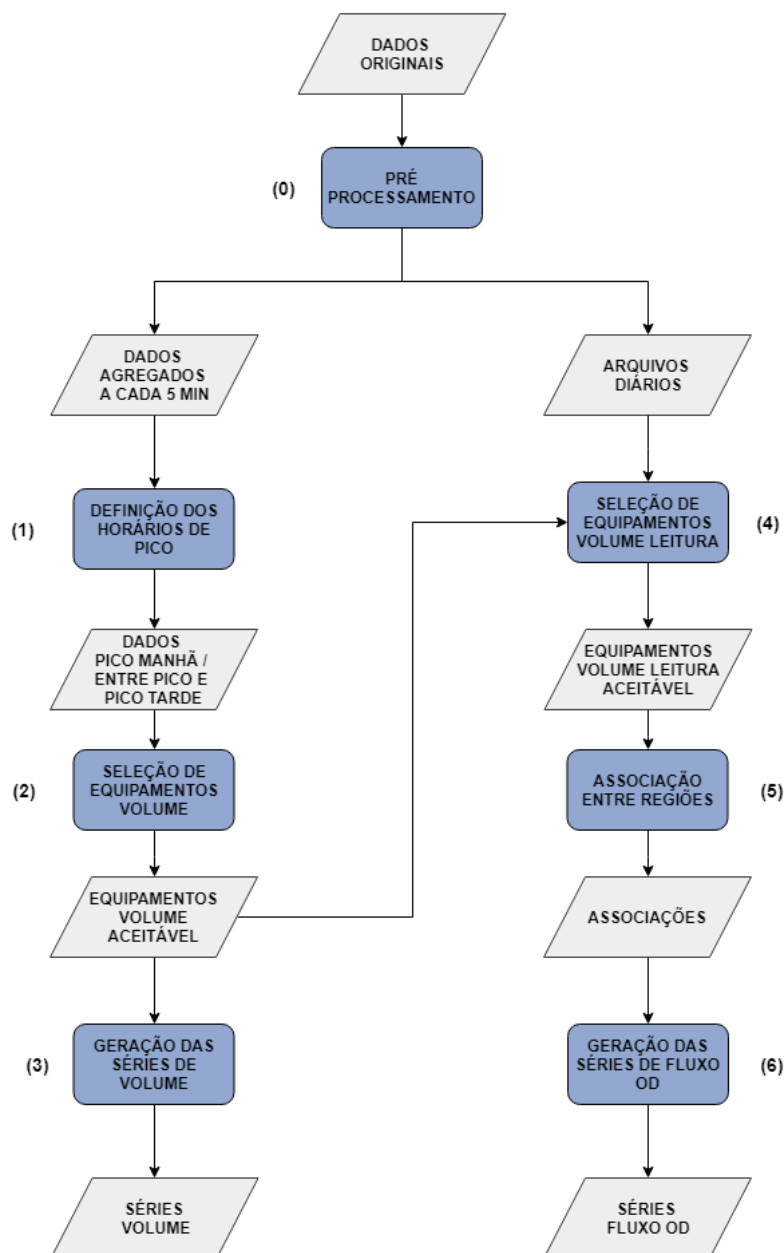
isto, inicialmente serão descritas as variáveis de interesse. Para o propósito deste estudo, os fluxos de OD são definidos como a quantidade total de viagens veiculares entre regiões da cidade em um determinado intervalo de tempo. Já o volume de tráfego é definido como uma taxa de veículos que atravessam uma seção de via urbana em um determinado intervalo de tempo. Os intervalos considerados serão definidos a partir da divisão de horários de pico e entrepico. A Figura 34 apresenta o fluxograma das etapas propostas para a consolidação da base de dados, podendo-se destacar três etapas maiores: o pré-processamento dos dados originais (0), a extração das séries temporais do volume de tráfego (1), (2) e (3) e a extração das séries temporais do fluxo OD (4), (5) e (6). As etapas propostas serão executadas utilizando-se o software R de manipulação e análise estatística de dados.

A etapa de pré-processamento (0) tem como objetivo preparar os dados para as análises de desempenho da detecção e da leitura de placas necessárias para obter uma amostra confiável das variáveis estudadas. Para isto, inicialmente os arquivos contendo detecções de um dia de cada empresa são agrupados para arquivos únicos contendo todas as detecções de todas as empresas para cada dia, que serão utilizados posteriormente na extração dos fluxos OD, excluindo finais de semana e feriados. Em seguida, as detecções contidas nos arquivos diários são agregadas em intervalos de 5 minutos, para que se possam observar variações com maiores detalhes dentro do intervalo horário, e separadas em arquivos por equipamento da região de estudo, resultando um arquivo para cada equipamento contendo todas as detecções dos dias úteis do ano de 2017 agregadas a cada 5 minutos, que serão utilizadas na extração do volume de tráfego.

A etapa seguinte (1) trata da definição dos horários de pico e entre pico. Cheng et al., (2012) utilizaram uma divisão arbitrária dos dados em três períodos de tempo baseados em definições do órgão gestor do trânsito da cidade de Londres, e concluíram, a partir dos resultados das análises de variabilidade, que os períodos pré-definidos não foram suficientes para isolar as condições distintas de tráfego, logo, é indicado que seja realizada uma análise dos dados de volume veicular para melhor definição dos períodos de pico e entre pico. Para isto, propõe-se selecionar trechos de corredores de vias arteriais no sentido periferia-centro contendo pelo menos três equipamentos de fiscalização eletrônica para identificar o horário de pico da manhã, e trechos de corredores no sentido central-periferia para identificar o pico da tarde, considerando que o maior volume de viagens ocorre nesses dois sentidos devido às viagens pendulares por motivo trabalho, de manhã em direção à região central, e de tarde retornando às demais regiões, dada a concentração de atividades e tipo de uso do solo das

regiões da cidade de Fortaleza apresentadas no capítulo anterior. Para cada corredor selecionado propõe-se analisar a distribuição média do volume a cada 5 minutos de cada um dos três equipamentos, utilizando inspeção visual para identificar o período de tempo mais carregado e relativamente uniforme de cada um dos picos. Dadas as hipóteses levantadas no capítulo anterior sobre a variabilidade do tráfego nos três períodos, pretende-se definir períodos de igual duração para os picos da manhã, da tarde e o entre pico.

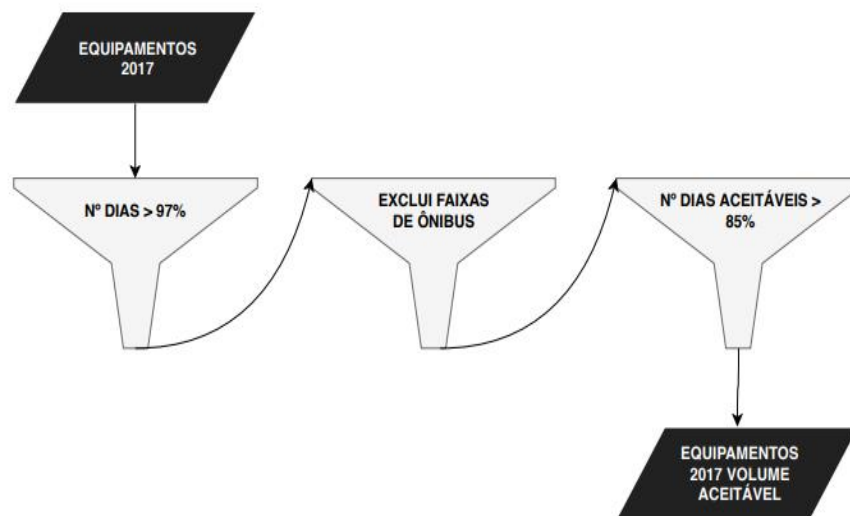
Figura 34 – Etapas metodológicas da consolidação da base de dados.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos horários de pico e entre pico definidos, a etapa seguinte (2) pretende analisar os dados de volume para identificar falhas no sistema de coleta e, com isto, eliminar da amostra os equipamentos que não atingirem um determinado critério de desempenho considerado satisfatório para cada um dos três períodos. A Figura 35 apresenta um resumo dos procedimentos de filtragem utilizados nesta etapa.

Figura 35 – Procedimentos de filtragem para seleção de equipamentos com volume aceitável.



Fonte: Elaborado pela autora.

Inicialmente, são eliminados da amostra os equipamentos contendo menos de 97% do total de dias referentes aos dias úteis do ano de 2017. Em seguida, desempenho dos equipamentos restantes será avaliado por um índice de intervalos de 5 minutos com volume diferente de zero, definido pela equação a seguir.

$$ind. vol_p = \frac{\sum intervalos_{p vol \neq 0}}{\sum intervalos} \quad (5)$$

Onde p é referente ao período do dia, pico da manhã, entre pico ou pico da tarde. Logo, o índice de intervalos com volume diferente de zero é calculado dividindo-se o total de intervalos de 5 minutos em que o volume observado foi diferente de zero em determinado período, pelo total de intervalos de 5 minutos do período. Este índice é calculado para cada dia de cada um dos equipamentos ativos no ano de 2017, excluindo-se previamente os equipamentos que se destinam à fiscalização de faixas exclusivas de ônibus, dado que quase

todos os veículos detectados nesses casos pertencem à classe ônibus, o que pode levar a um viés na amostra. Em seguida é estabelecido um critério para que o índice de volume do equipamento seja aceito. Neste caso, é adotado um valor mínimo de 90% do índice de intervalos diferentes de zero ($\text{ind.vol}_p > 90\%$), para que o dia avaliado seja considerado aceitável. Por fim, um último critério é estabelecido para a aceitação ou rejeição dos equipamentos, que consiste no equipamento ter pelo menos 85% dos dias aceitáveis. Cada um dos equipamentos terá um status de verificação para cada um dos três períodos do dia, e ao final será aceito caso tenha passado por todos os filtros nos três períodos.

A geração das séries temporais do volume de tráfego (3) envolve a realização de alguns procedimentos nos arquivos resultantes da etapa anterior referentes aos equipamentos com desempenho aceitável para os três períodos. O primeiro passo diz respeito à exclusão de dias com o volume considerado suspeito, ou *outliers* das amostras. Para isto, o a soma do volume total durante o período é comparado com limites inferiores e superiores relativos ao volume da amostra, calculados de acordo com as equações 6 e 7, respectivamente.

$$\mathbf{lim. min} = \text{mediana}(\text{volume}_p) - 3 * \text{dp}(\text{volume}_p) \quad (6)$$

$$\mathbf{lim. max} = \text{mediana}(\text{volume}_p) + 3 * \text{dp}(\text{volume}_p) \quad (7)$$

O limite mínimo é calculado a partir da mediana dos volumes da amostra para um dado período menos 3 vezes o seu desvio padrão, e o limite superior é a mediana mais três vezes o desvio padrão da amostra. Caso uma observação esteja acima do limite superior ou abaixo do inferior, ela será considerada suspeita, ou normal, caso contrário. Em seguida são calculados novos limites para as observações consideradas normais, que passam por um segundo teste e, por fim, um terceiro, que será o determinante dos *outliers* das amostras. Este esforço tem como objetivo garantir que os dados estão de fato condizentes com o volume observado no período, dado que os equipamentos estão sujeitos a falhas não somente de um dia inteiro, como também de intervalos menores de tempo. Em seguida, as observações de volume que ficaram nas amostras são convertidas para uma taxa de fluxo horário, como na equação 8. Esta conversão deve ser feita para que independentemente da duração dos períodos de pico e entre pico a medida do volume seja dada através de uma taxa fluxo horário.

$$\mathbf{fluxo\ horário} = \text{média}(12 \times \text{volume}_{5\ min}) \quad (8)$$

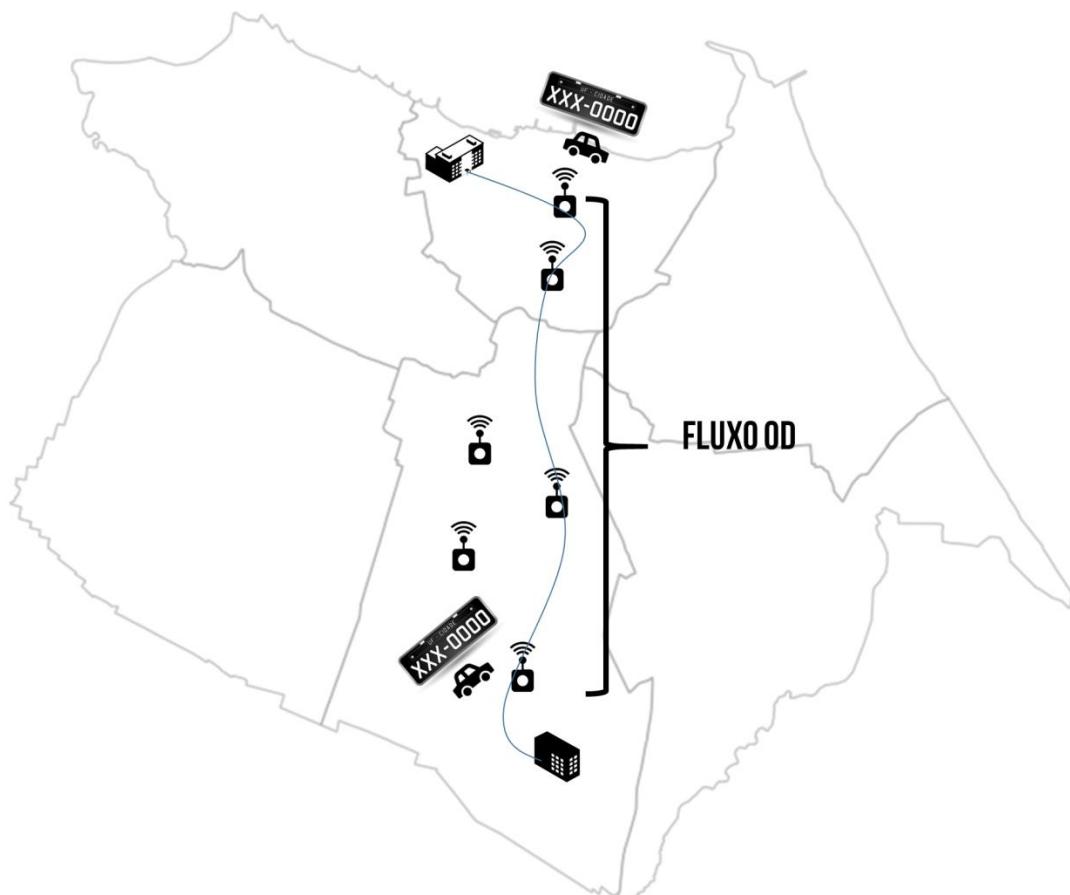
Por fim, para se obter as séries temporais do volume é necessário completar as séries com os feriados e dias suspeitos eliminados atribuindo valores “NA” (*Not Available*) aos dados faltantes que serão tratados posteriormente na análise da autocorrelação. Sem esses valores a série não teria a formatação esperada com todos os dias da semana de segunda a sexta, para a análise dia-a-dia que se pretende realizar neste trabalho.

A etapa seguinte (4) diz respeito à seleção de equipamentos adequados para a extração da variável fluxo OD a partir da amostra de equipamentos previamente selecionada para a extração do volume. Diferentemente dos dados de bilhetagem eletrônica, que registram todos os usuários do transporte público que possuem *smart cards*, o que no caso de algumas cidades corresponde à quase totalidade dos usuários do sistema, os sistemas de fiscalização eletrônica possuem a limitação de não registrarem todas as placas de veículos detectados, além de não fazerem toda a cobertura da malha viária. Devido a essa limitação, esta etapa consiste na análise de cada um dos equipamentos de fiscalização eletrônica para verificar a proporção de leituras ao longo do ano. Como se pretende capturar a variabilidade do fenômeno através desses dados, a proporção de leituras deve variar o mínimo possível para que se possa amenizar o efeito da variação do desempenho dos equipamentos na amostra.

A análise será realizada separadamente para cada um dos períodos de pico e entre pico, da seguinte maneira: primeiramente, calcula-se o desvio padrão da proporção de leitura diária para cada equipamento. Em seguida, adota-se um valor máximo para o desvio padrão da proporção de leitura, para que o equipamento seja aceito. Neste caso foi adotado um desvio padrão máximo de 12 como critério, ou seja, é considerado aceitável o equipamento cuja proporção de leitura oscila 12% a mais ou a menos em torno da proporção média. O ideal seria que não houvesse nenhuma variação na proporção de leituras ao longo do ano, porém quanto mais rígido esse critério, menor o número de equipamentos resultantes na amostra, logo, o valor adotado buscou equilibrar o compromisso existente entre confiabilidade dos dados (efeito mínimo da variação do desempenho dos equipamentos) e viabilidade da análise (quantidade de equipamentos). Além do critério do desvio padrão anual máximo, propõe-se uma análise visual de gráficos de proporção de leituras e o desvio padrão da proporção mensal juntamente com o gráfico da proporção de leitura por dia ao longo do ano. Este último passo tem como objetivo realizar uma segunda verificação nos equipamentos que não atingiram o critério, e que poderiam estar na amostra apesar disso, aumentando a quantidade de dados utilizada para se obter as séries dos fluxos OD.

Com a amostra de equipamentos definida, pode-se prosseguir para o segundo passo de extração dos fluxos OD (5), que consiste na identificação de deslocamentos realizados por veículos entre regiões da área de estudo nos períodos de pico e entre pico. Para isto, são contabilizados os deslocamentos entre equipamentos de fiscalização eletrônica presentes em regiões distintas da cidade através da associação de leituras de placas num mesmo dia e durante os períodos de estudo, ou seja, a partir dos arquivos diários de registro veicular dos equipamentos de fiscalização eletrônica, é realizado um cruzamento de placas iguais lidas em diferentes equipamentos e atribuídas a pares OD de acordo com a localização (região) do primeiro e do último registro da placa durante o período observado. A Figura 36 ilustra esse processo. Os veículos registrados em mais de dois equipamentos geram registros a mais de deslocamentos, o que é solucionado mantendo apenas o deslocamento com maior tempo de viagem.

Figura 36 – Associação entre regiões.



Fonte: Elaborado pela autora.

A grande questão nesta etapa da consolidação é como considerar o fluxo de passagem entre equipamentos da cidade como sendo um fluxo OD entre regiões. Primeiramente, por não cobrirem toda a malha viária, os equipamentos só registram uma proporção dos veículos que trafegam nos horários de pico e entre pico, logo, não é possível a magnitude dos fluxos OD analisar a partir desses dados. Dado que a proposta deste trabalho é analisar como esse fluxo varia dia-a-dia, assume-se a premissa de que essa proporção, tanto do total de veículos que trafegam na malha viária, quanto da leitura de placas se mantém constante ao longo dos dias. Em segundo lugar, assume-se que o trecho da viagem contabilizada pela associação entre o primeiro e o último registro da placa dentro do período analisado de fato teve origem na região da primeira detecção e destino na última. Por conta disso, a análise e filtragem dos tempos de viagem é o primeiro passo da última etapa relativa à geração das séries do fluxo OD descrita a seguir.

A última etapa da consolidação dos dados diz respeito à geração das séries temporais da variável fluxo OD (6), e, assim como a geração das séries do volume consiste em três passos. O primeiro passo é relativo à filtragem das observações de acordo com um critério de tempo de viagem. Inicialmente, são removidas da amostra observações com tempo de viagem menor que 30 minutos, com o objetivo de eliminar associações entre equipamentos muito próximos que tendem a gerar muitas associações, o que pode levar a um aumento nas observações por contar desses pares de equipamentos, viesando assim a amostra. Em seguida os tempos de viagem observados são comparados com os tempos de viagem em rede a partir do pacote ‘osrm’ desenvolvido por Giraud (2018) que faz parte do software R. Através deste pacote é possível obter o tempo de viagem fornecido pela plataforma *Open Street Map* (OSM) entre pontos específicos da rede viária. Assim, os tempos de viagem entre os equipamentos analisados foram comparados com os tempos de viagem observados e filtrados de acordo com o critério da equação 9:

$$0,85 \times \text{tempo}_{osm} < \textit{tempo de viagem}_{obs} < 3 \times \text{tempo}_{osm} \quad (9)$$

Esta filtragem tem como objetivo eliminar observações que sejam casos de associações geradas por leitura incorreta de placas, como tempos de viagem muito pequenos entre equipamentos distantes e vice-versa. O limite inferior de 85% do tempo fornecido pelo OSM se deve à aceitação da possibilidade de falhas de sincronização no sistema de fiscalização eletrônica, o que pode levar a uma defasagem entre os horários de equipamentos

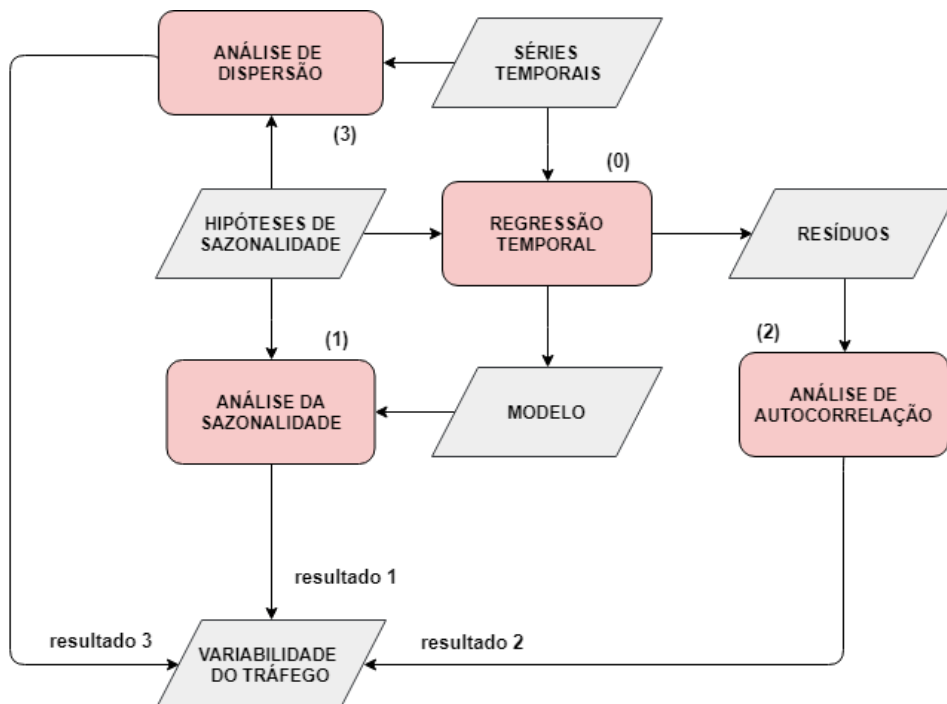
diferentes, gerando assim tempos de viagem menores do que o que de fato ocorreu.

O segundo e o terceiro passos são a identificação e exclusão de *outliers* da amostra e a complementação da série com valores faltantes para que se tenha todos os dias da semana de segunda a sexta, e são realizados da mesma forma como descrito anteriormente para a geração das séries do volume.

4.2 Análise Exploratória

Nesta etapa é realizada a análise da variabilidade dia-a-dia das variáveis volume de tráfego e fluxo OD na cidade de Fortaleza-CE, a partir das séries temporais resultantes da etapa anterior de consolidação dos dados de fiscalização eletrônica para tal propósito. A proposta de análise exploratória consiste em quatro etapas principais (0), (1), (2) e (3) ilustradas na Figura 37, que contribuem na geração de três resultados finais relativos à variabilidade do tráfego. Estes resultados serão, no final, confrontados com as hipóteses apresentadas no capítulo 3 para gerar as conclusões deste estudo.

Figura 37 – Procedimentos de filtragem para seleção de equipamentos com volume aceitável.



Fonte: Elaborado pela autora.

A primeira etapa da análise exploratória antes de gerar os resultados é a realização de uma regressão linear temporal (0) das séries obtidas na etapa anterior. O objetivo desta etapa é considerar os efeitos da sazonalidade presente nos dados e obter os coeficientes do modelo linear indicando a presença ou não dessas características para análise de sazonalidade, e os resíduos das séries para a análise posterior de correlação. A formulação do modelo tanto para o fluxo OD quanto para o volume é dada pela equação 10 a seguir.

$$\mathbf{y} = \beta_0 + \delta_0 fev + \dots + \delta_{10} dez + \delta_{11} seg + \dots + \delta_{14} qui + \varepsilon_t \quad (10)$$

Onde \mathbf{y} representa a variável explicada, o volume ou o fluxo OD, *fev* até *dez*, e *seg* até *qui* são variáveis explicativas *Dummy* representando os meses de fevereiro a dezembro, e os dias da semana de segunda-feira a quinta-feira, com seus respectivos coeficientes, δ_0 a δ_{14} . Logo, o intercepto β_0 indica o efeito do mês de janeiro e da sexta-feira.

A etapa seguinte (1) referente à análise da sazonalidade utiliza os resultados do teste de significância dos coeficientes resultantes do modelo de regressão para avaliar se nos dados utilizados para a construção do modelo pode-se considerar cada um dos meses é diferente de janeiro, e cada um dos dias da semana é diferente de sexta-feira. Para isto, os resultados são agrupados de acordo com a divisão proposta no capítulo 3 para o levantamento de hipóteses, e em seguida é calculado o percentual de coeficientes significativamente diferentes de zero para cada grupo de hipóteses. Os resultados são então comparados aos resultados obtidos por Oliveira (2004) para os grupos de meses e dias da semana significativamente diferentes.

Os resíduos do modelo de regressão temporal representam a parte aleatória dos dados modelados, sem a influência da sazonalidade dos dias da semana e dos meses do ano. A partir deles é possível analisar a dinâmica do fenômeno em si (2) através da função de autocorrelação, que indica o valor da autocorrelação nos diferentes lags temporais presentes nos dados. A função de autocorrelação é dada pela equação 11.

$$\hat{\rho}_k = \frac{\sum_{t=1}^{T-k} (y_t - \bar{y})(y_{t+k} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (11)$$

Onde k é o lag, ou seja, a defasagem temporal para a qual está sendo calculada a

autocorrelação, T é o tamanho da série temporal, y_t é a observação da série no tempo t , \bar{y} é a média da série e y_{t+k} é a observação da série no tempo t defasado pelo lag k . Por conta das considerações dos modelos de alocação dinâmica e de estimação da matriz OD revisados anteriormente, o interesse principal deste estudo é na significância da autocorrelação de lag 1, ou seja, o interesse é em verificar se o valor da autocorrelação dos dados com os dados do dia anterior na série ao longo do ano é significativa ou se a hipótese nula de que essa autocorrelação é zero se confirma. O que pode indicar, para o caso das variáveis analisadas que a decisão de viagem ou de escolha de rota é influenciada ou não pela decisão do usuário ou pelo estado da rede viária no dia anterior. Para isto, será aplicado o teste de Durbin-Watson.

Por fim, propõe-se calcular o coeficiente de variação como medida de dispersão das variáveis (3). O cálculo será feito utilizando-se os meses de fevereiro a junho, baseando-se nos resultados de Oliveira (2004) que indica que esses meses não apresentam diferenças significativas nos valores do volume médio diário (VMD).

As três medidas propostas nesta seção são propostas de indicadores para avaliar a variabilidade das variáveis analisadas e seus resultados serão, no final, confrontados com as hipóteses levantadas no capítulo 3 para apontar indícios de confirmação ou rejeição, e a partir disso se obter uma visão geral de como se dá a dinâmica do fenômeno do tráfego na cidade de Fortaleza-CE.

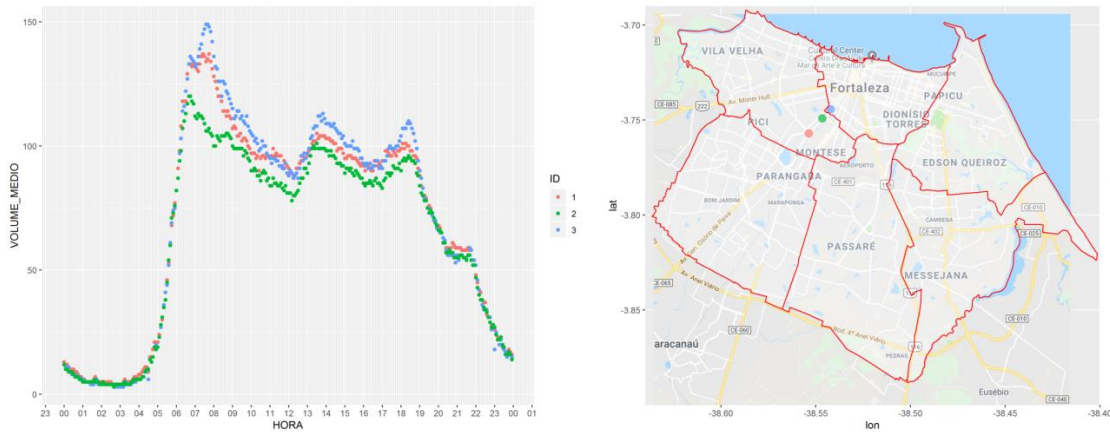
CAPITULO 5: RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do método proposto nos dados de fiscalização eletrônica, com o objetivo de analisar a variabilidade do tráfego na cidade de Fortaleza-CE. O capítulo está dividido em três seções: na primeira serão apresentados e discutidos os resultados da primeira etapa do método, a consolidação dos dados, na segunda, os resultados da análise exploratória são mostrados, e na terceira esses resultados serão confrontados com as hipóteses levantadas no capítulo 3 para que sejam tiradas conclusões acerca da dinâmica do fenômeno do deslocamento viário na região de estudo.

5.1 Extração das Variáveis

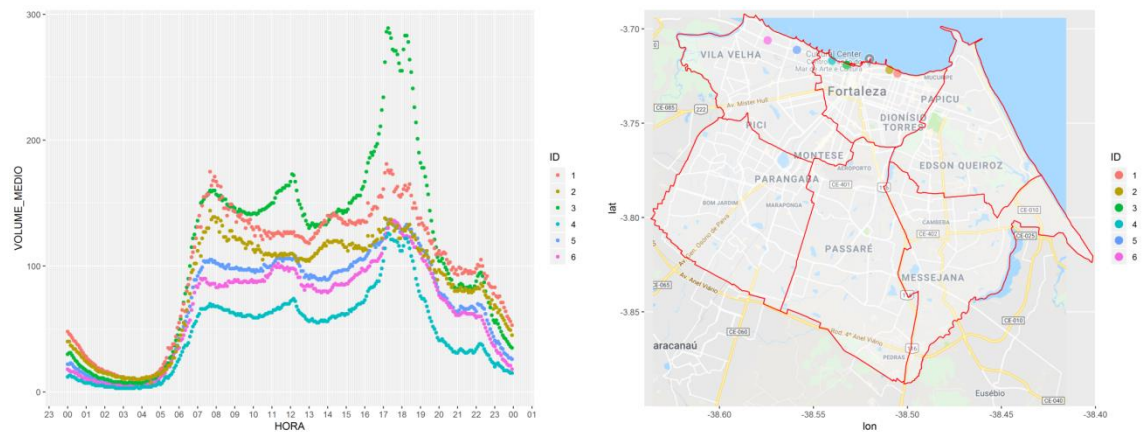
Esta seção trata dos resultados da etapa de consolidação dos dados que tem como objetivo a extração das séries temporais do volume e do fluxo OD entre regiões da cidade de Fortaleza-CE. Portanto, serão apresentados e discutidos aqui, além das séries temporais obtidas, os resultados das etapas intermediárias do método que possibilitaram que se chegasse ao resultado final. A primeira etapa depois do pré-processamento foi a definição dos horários de pico e entre pico a serem analisados. A partir dos dados pré-processados dos equipamentos presentes nos corredores selecionados foram gerados gráficos para a análise de inspeção visual e definição dos períodos de análise. As Figuras 38, 39 e 40 mostram a distribuição horária do volume coletado de equipamentos localizados nos corredores da Avenida João Pessoa/Avenida da Universidade, indo da região noroeste para a região central, da Avenida Abolição/Avenida Presidente Castelo Branco, indo da região central para a região noroeste, e da Avenida Raimundo Neri/Avenida Coronel Carvalho indo da região sudoeste para a região noroeste, respectivamente. Na Figura 38 é possível identificar o horário mais carregado do período da manhã como sendo de 6:00 às 9:00 e o horário mais carregado do período da tarde/noite pode ser identificado na Figura 39 como sendo das 16:30 às 19:30, ambos sendo observados também na Figura 40, apesar ter uma duração menor, os períodos de pico ainda podem ser incluídos nestes intervalos de 3 horas. Em todos os casos observa-se um aumento ou diminuição do volume no horário de meio-dia. Por conta disso, o horário de entre pico foi identificado como um período de volume relativamente homogêneo entre meio dia e o início do pico da tarde com igual duração de 3 horas, logo, de 13:30 às 16:30.

Figura 38 – Distribuição horária do volume no corredor da Avenida João Pessoa/Avenida da Universidade.



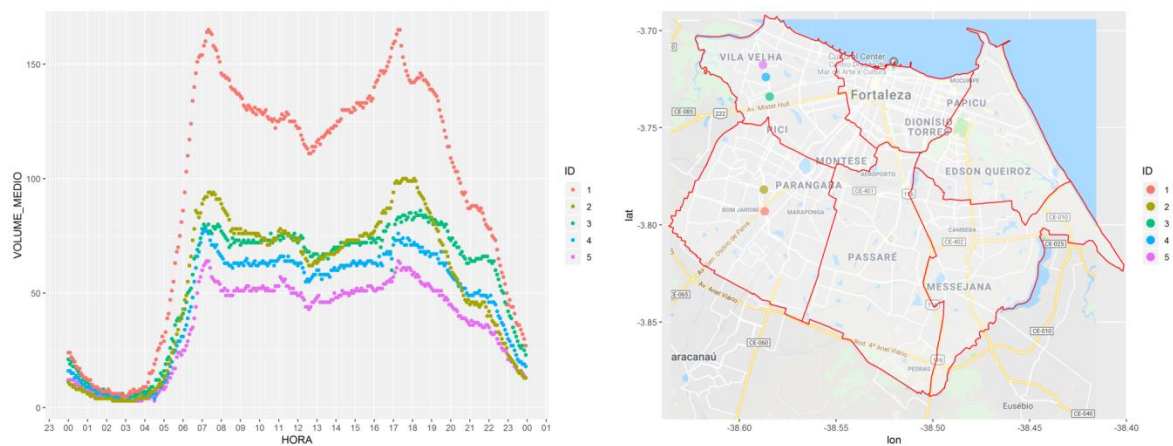
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39 – Distribuição horária do volume no corredor da Avenida Abolição/Avenida Presidente Castelo Branco.



Fonte: Elaborado pela autora.

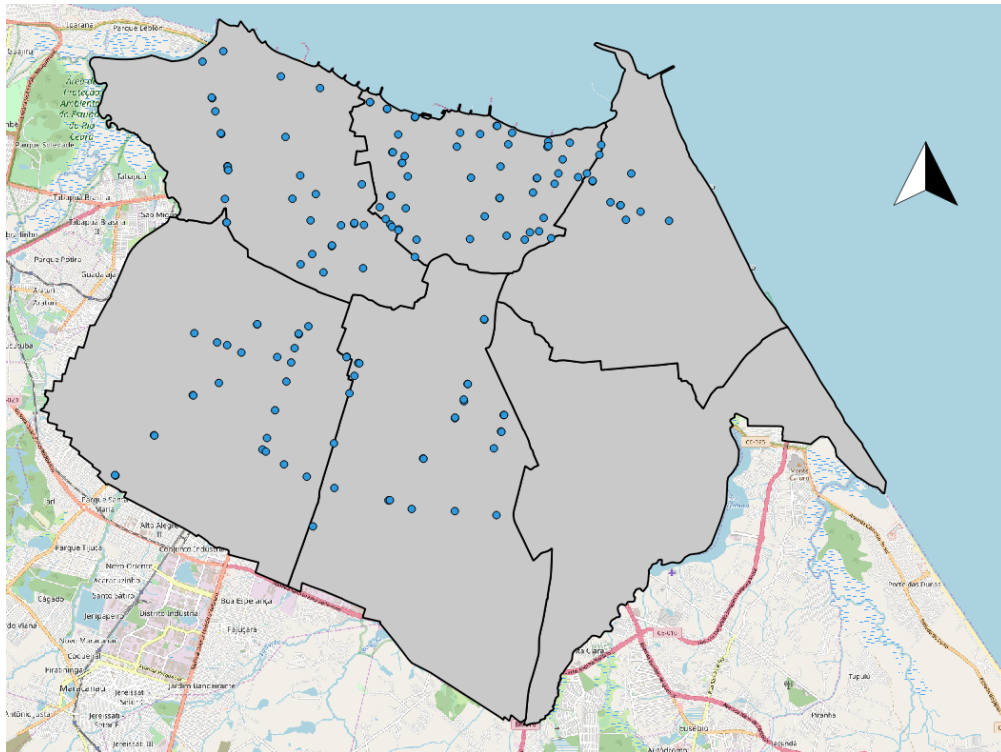
Figura 40 – Distribuição horária do volume no corredor da Avenida Raimundo Neri/Avenida Coronel Carvalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos períodos de análise definidos foi possível seguir com a avaliação dos equipamentos para os três períodos segundo os critérios definidos no capítulo 4 na etapa de seleção de equipamentos para extração do volume na seção de consolidação dos dados. Os equipamentos que passaram nos critérios para os três períodos estão mostrados na Figura 41. A distribuição de equipamentos resultante desta etapa consiste no total de 153 equipamentos de fiscalização eletrônica, sendo 54 na região central, 10 na região nordeste, 33 na região noroeste, 28 na região sudoeste, e 28 na região sul. A concentração maior de equipamentos na região central é esperada, dado que é uma área da cidade que concentra muitas atividades, logo, o tráfego é mais intenso, com maior adensamento de vias arteriais e mais fiscalização.

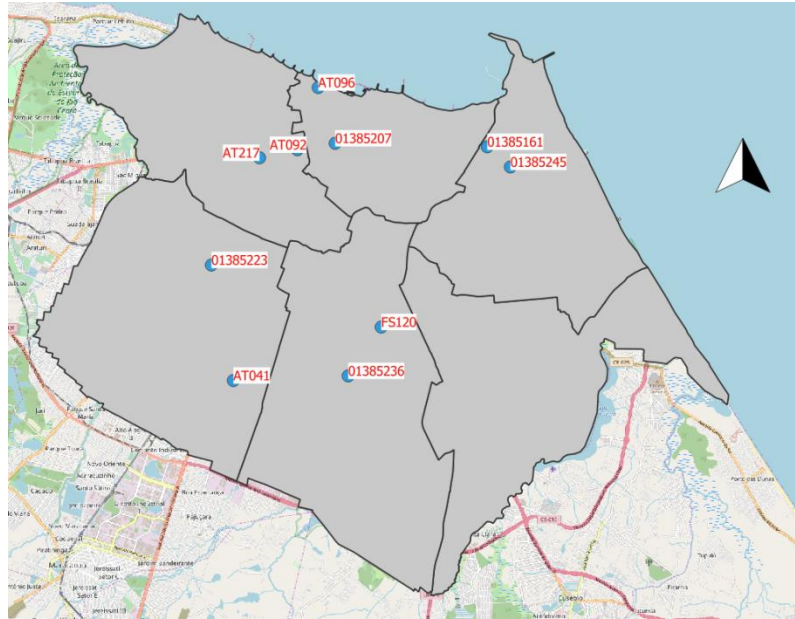
Figura 41 – Equipamentos selecionados para a extração do volume de tráfego.



Fonte: Elaborado pela autora.

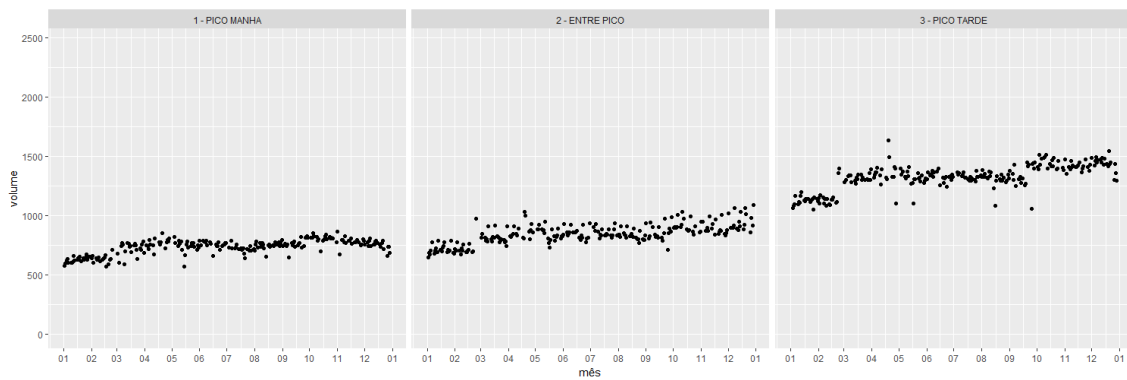
A etapa seguinte consistiu na geração das séries temporais do volume observado nos equipamentos selecionados para análise na etapa anterior através da agregação das observações por dia e da exclusão de *outliers*. Para ilustrar os resultados desta etapa, foram escolhidos dois equipamentos de cada região instalados em sentidos diferentes. A Figura 42 mostra a localização desses equipamentos e as Figuras 43 a 52 mostram os resultados obtidos das séries temporais dia-a-dia para cada um deles.

Figura 42 – Localização de equipamentos na região de estudo.



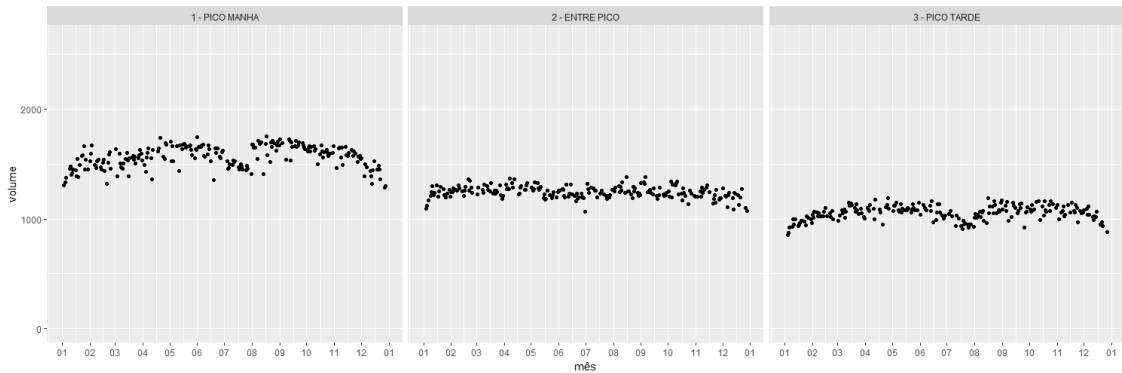
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 43 – Região Central. Equipamento AT096. Av. Presidente Castelo Branco sentido leste-oeste.



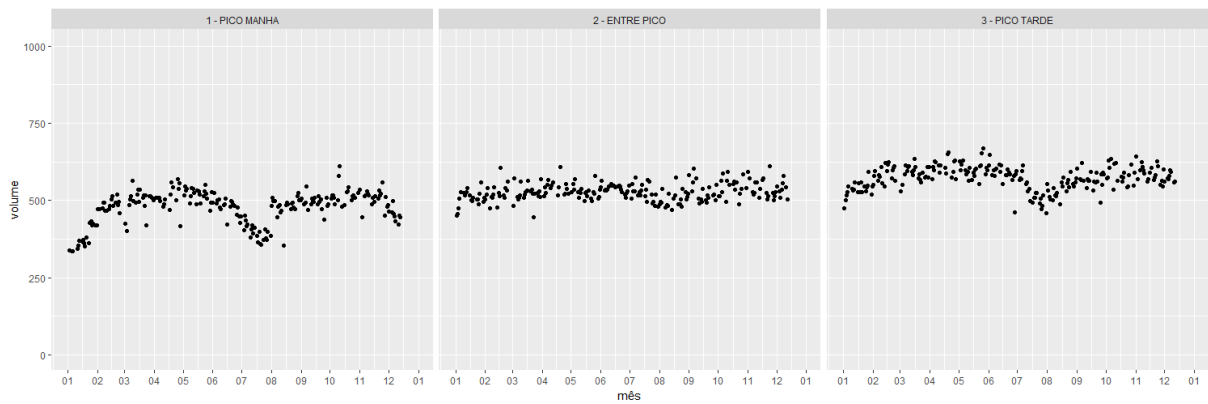
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 44 – Região Central. Equipamento 01385207. Av. da Universidade sentido sul-norte.



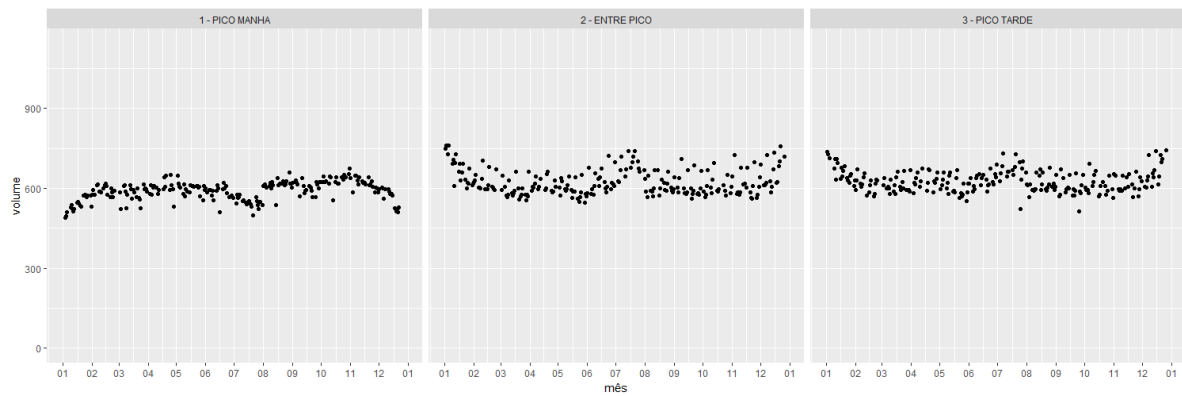
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 45 – Região Nordeste. Equipamento 01385161. Av. Engenheiro Santana Jr. sentido norte-sul.



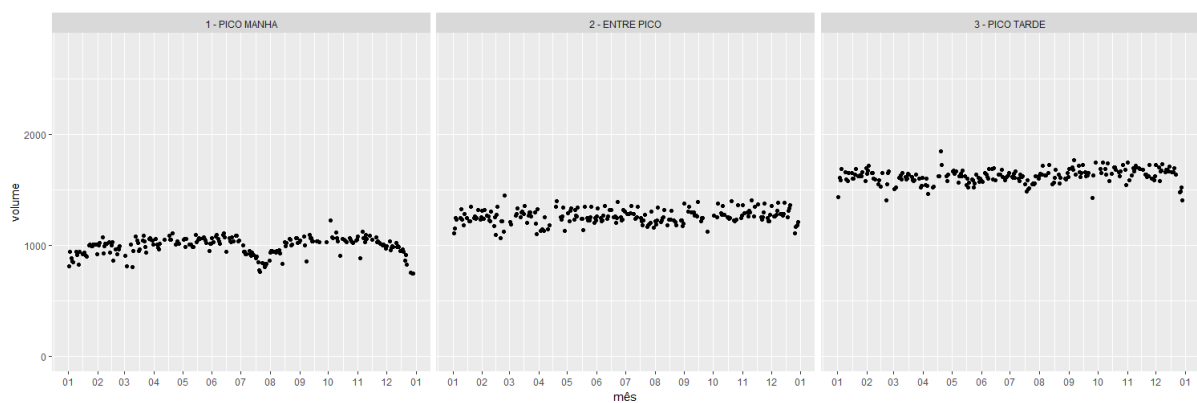
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 46 – Região Nordeste. Equipamento 01385245. Av. Santos Dumont sentido leste-oeste.



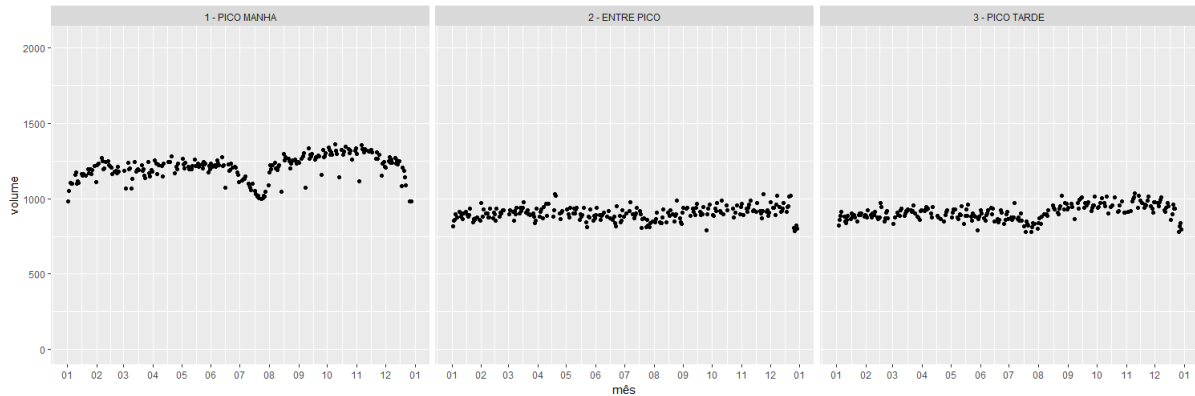
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 47 – Região Noroeste. Equipamento AT092. Av. Jovita Feitosa sentido leste-oeste.



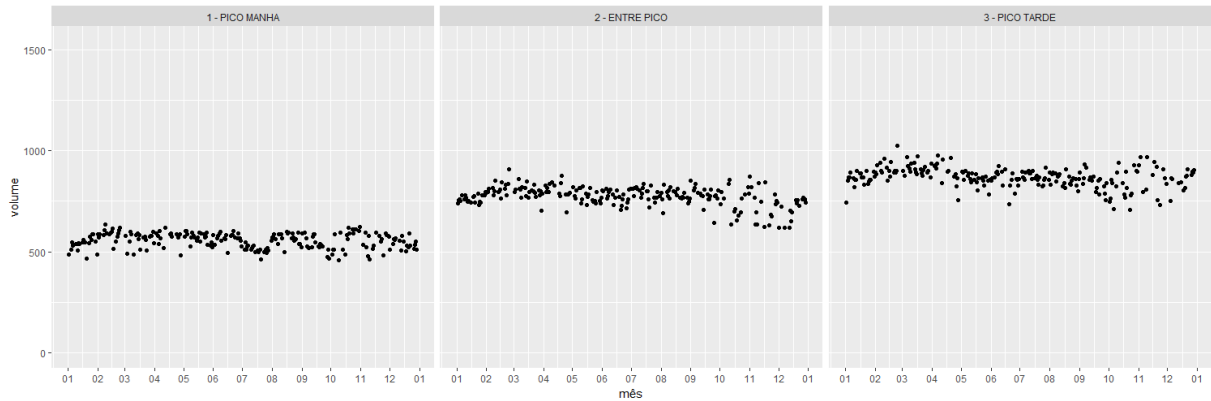
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 48 – Região Noroeste. Equipamento AT217. Av. Jovita Feitosa sentido oeste-leste.



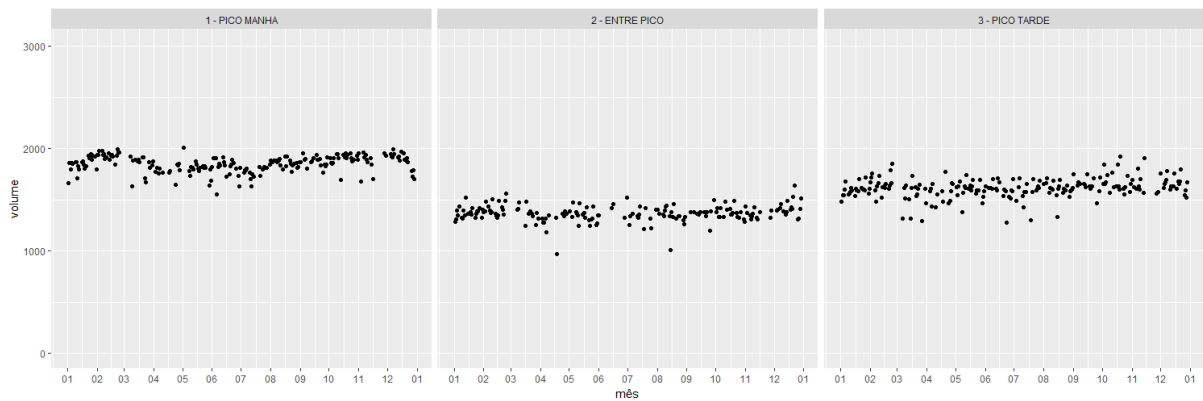
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 49 – Região Sudoeste. Equipamento 01385223. Av. Augusto dos Anjos sentido norte-sul.



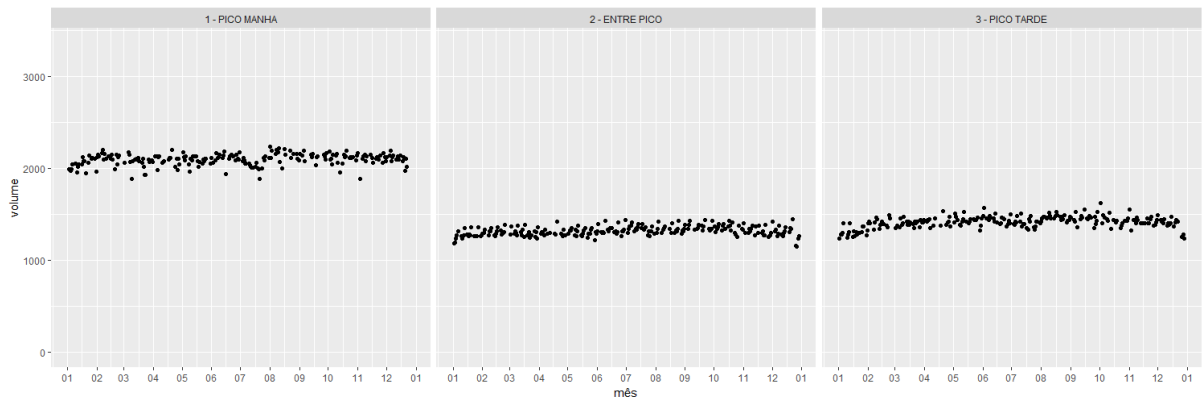
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 50 – Região Sudoeste. Equipamento AT041. Av. Presidente Costa e Silva sentido oeste-leste.



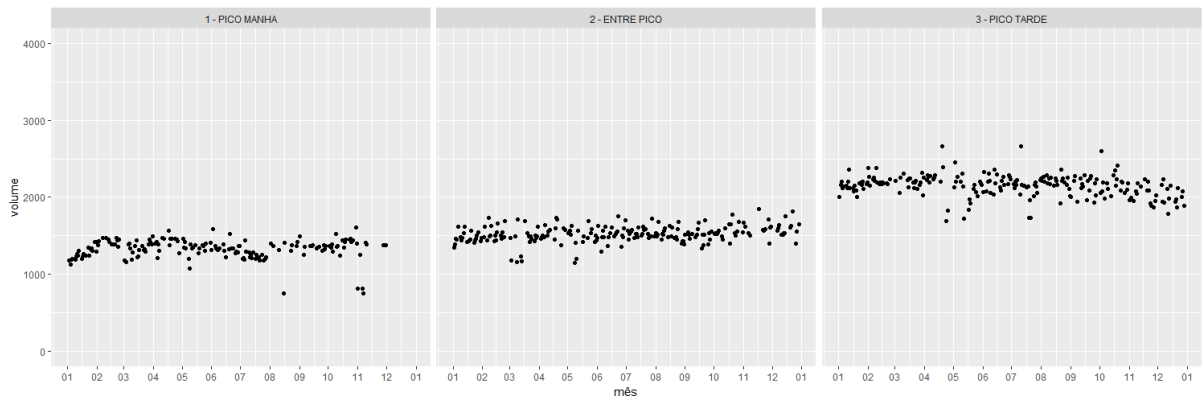
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 51 – Região Sul. Equipamento 01385236. Av. Juscelino Kubitschek sentido sul-norte.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 52 – Região Sul. Equipamento FS120. Av. Alberto Craveiro sentido norte-sul.

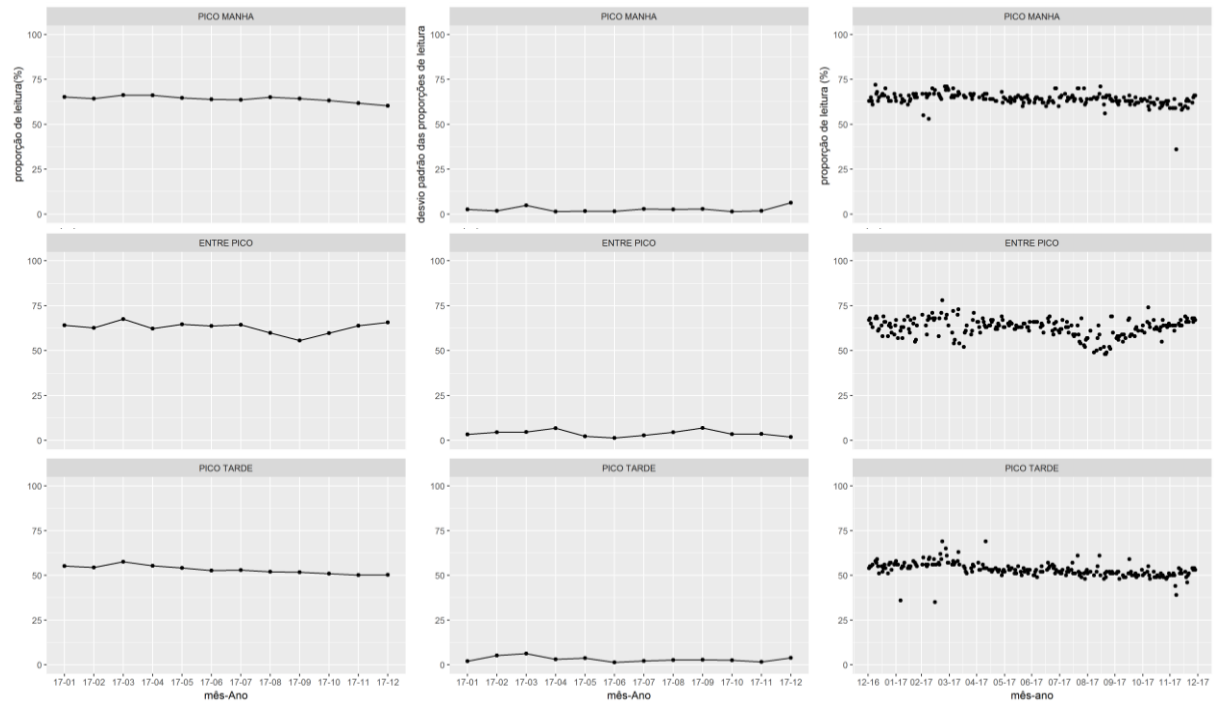


Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos resultados, e assumindo que o volume coletado pelos equipamentos de fiscalização eletrônica representa o volume real que trafega pelos arcos onde eles estão instalados, observa-se a diferença da magnitude do volume nos picos da manhã e da tarde saindo e entrando das regiões periféricas, onde se concentram mais habitantes e da região central, onde se concentra a maior parte dos empregos da cidade, o que leva a acreditar que de fato existe um fluxo pendular de viagens principalmente por motivo trabalho saindo das regiões periféricas em direção à central no pico da manhã, e o contrário no pico da tarde. Além disso, observa-se também uma variação dos meses considerados não típicos (janeiro, julho e dezembro) em relação aos demais em algumas das séries apresentadas.

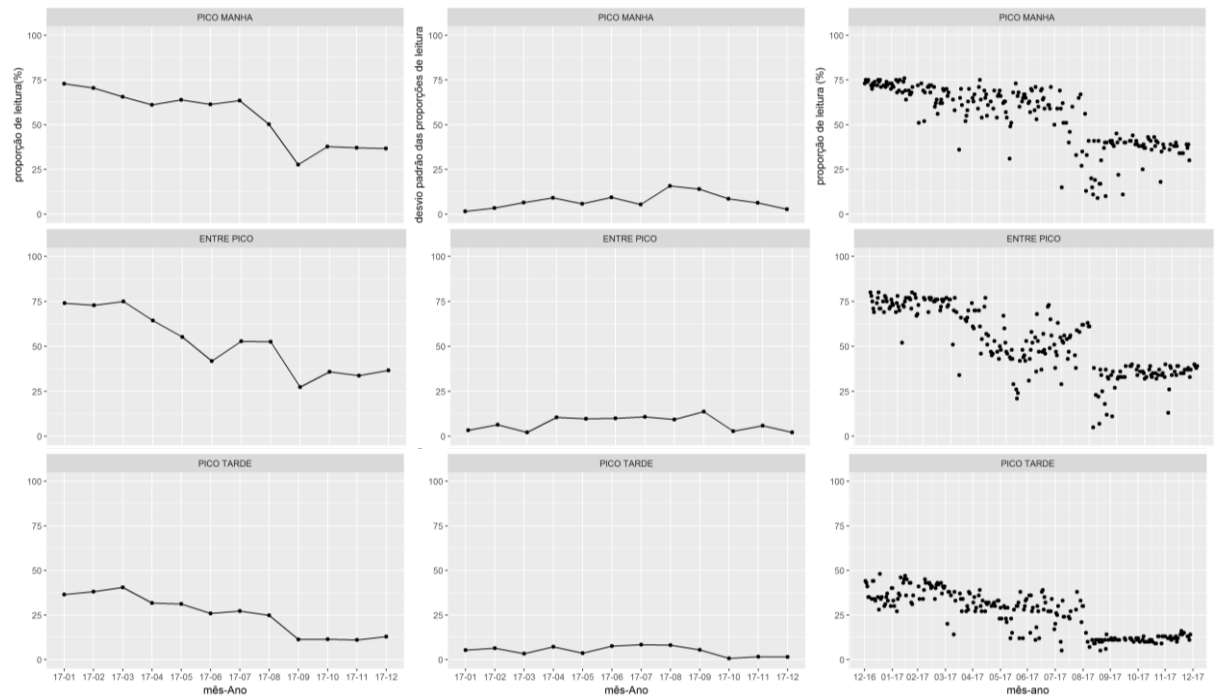
Na etapa seguinte da consolidação dos dados foi realizada a seleção de equipamentos para extração da variável fluxo OD nas regiões baseando-se na variação da proporção de leituras de placas de cada um dos equipamentos ao longo do ano de 2017 a partir dos equipamentos selecionados para a extração dos volumes. As Figuras 53 e 54 mostram os gráficos utilizados na decisão final para um equipamento que foi aceito nos três períodos (FS072) e outro que foi rejeitado nos três períodos (FS075), respectivamente. A primeira coluna corresponde à distribuição anual da média mensal da proporção de leituras, a segunda corresponde à distribuição anual do coeficiente de variação mensal da proporção de leituras, e a terceira mostra a distribuição anual da proporção de leitura diária do equipamento. Os equipamentos resultantes nas regiões de estudo para os picos da manhã, entre pico e pico da tarde estão apresentados nas Figuras 55, 57 e 57, respectivamente.

Figura 53 – Variação da proporção de leitura e para o equipamento FS072.



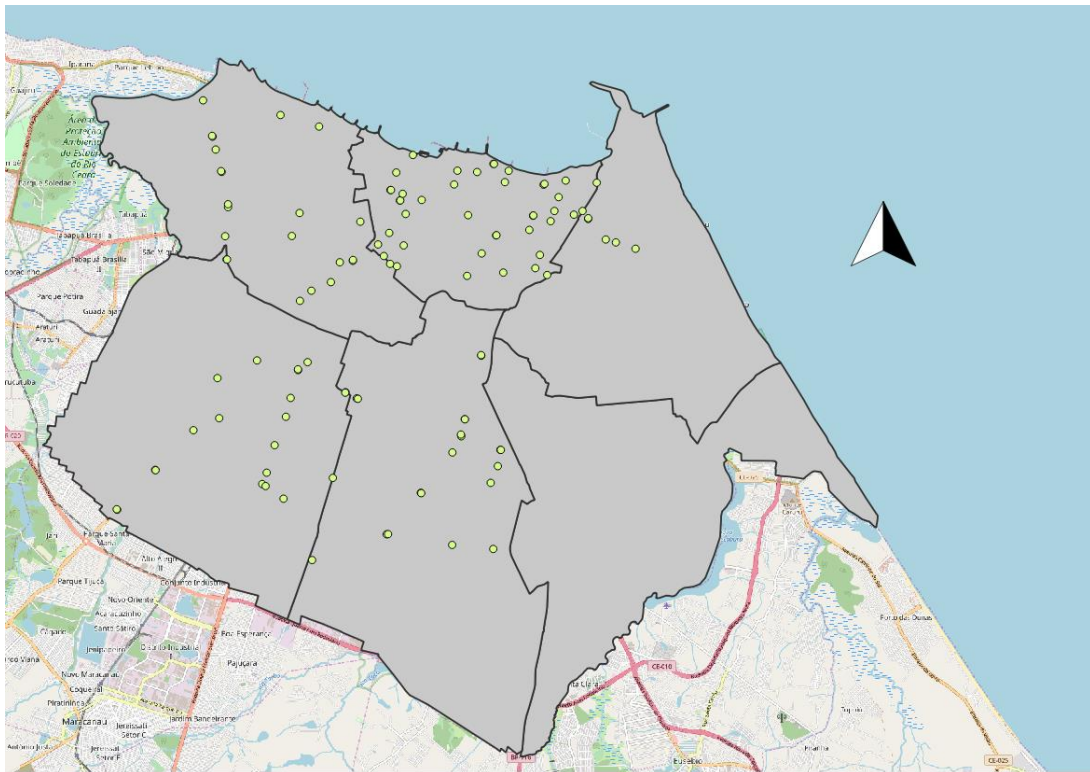
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 54 – Variação da proporção de leitura e para o equipamento FS075.



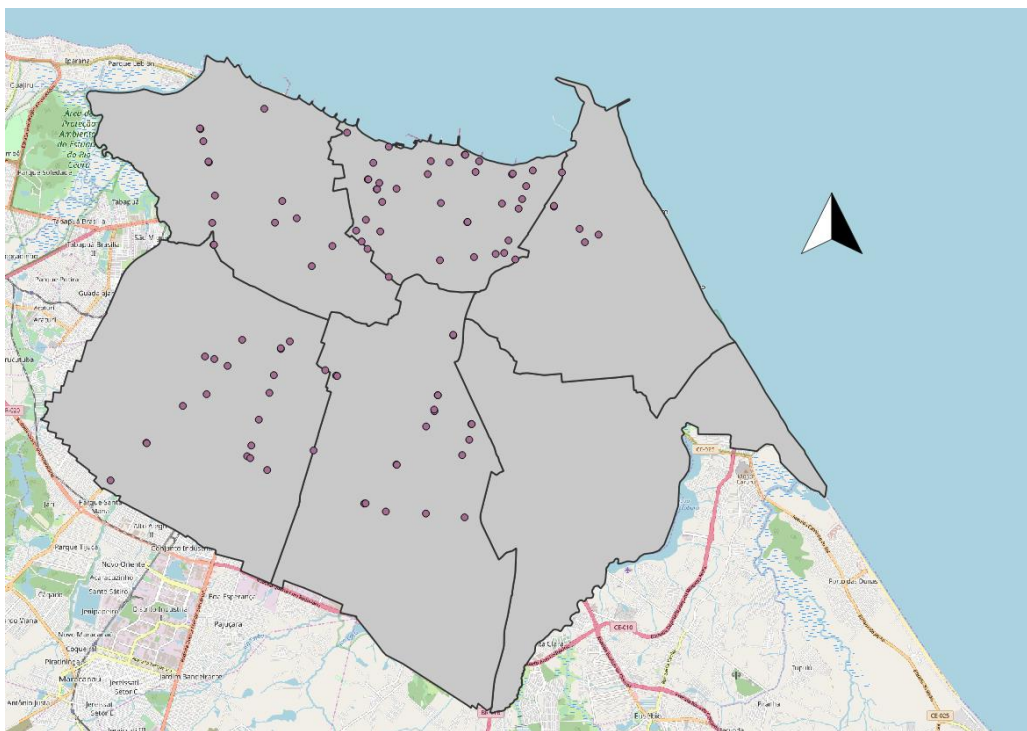
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 55 – Equipamentos selecionados para extração do fluxo OD no pico da manhã.



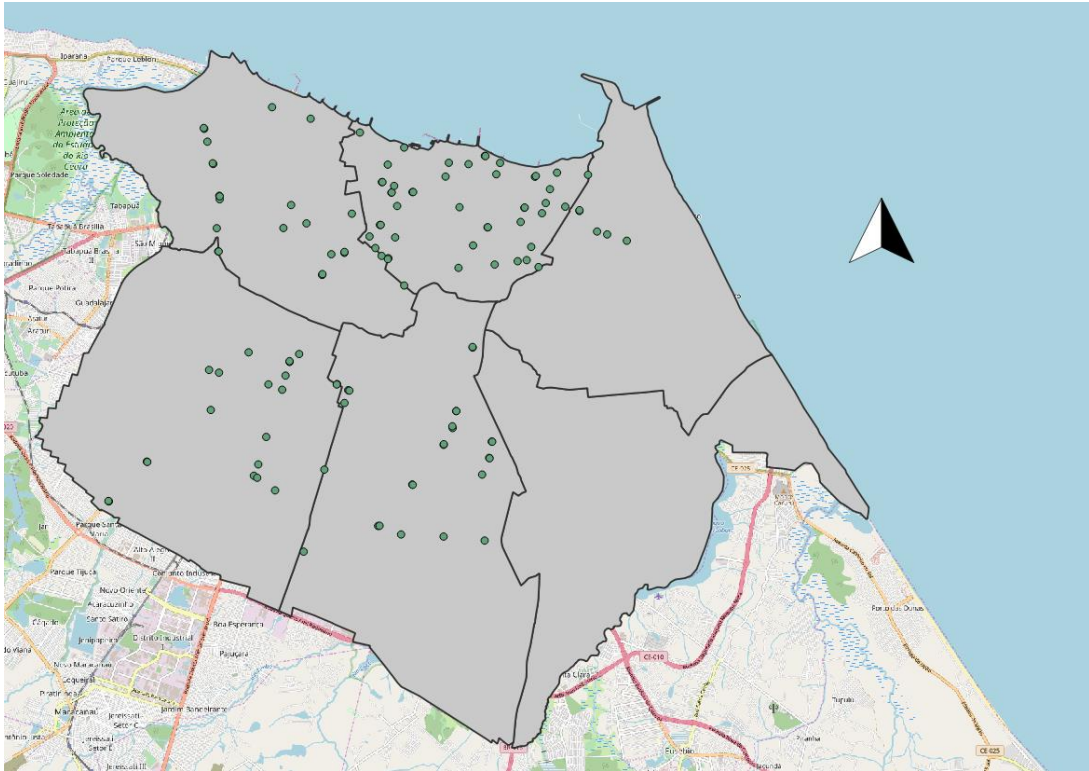
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 56 – Equipamentos selecionados para extração do fluxo OD no entre pico.



Fonte: Elaborado pela autora.

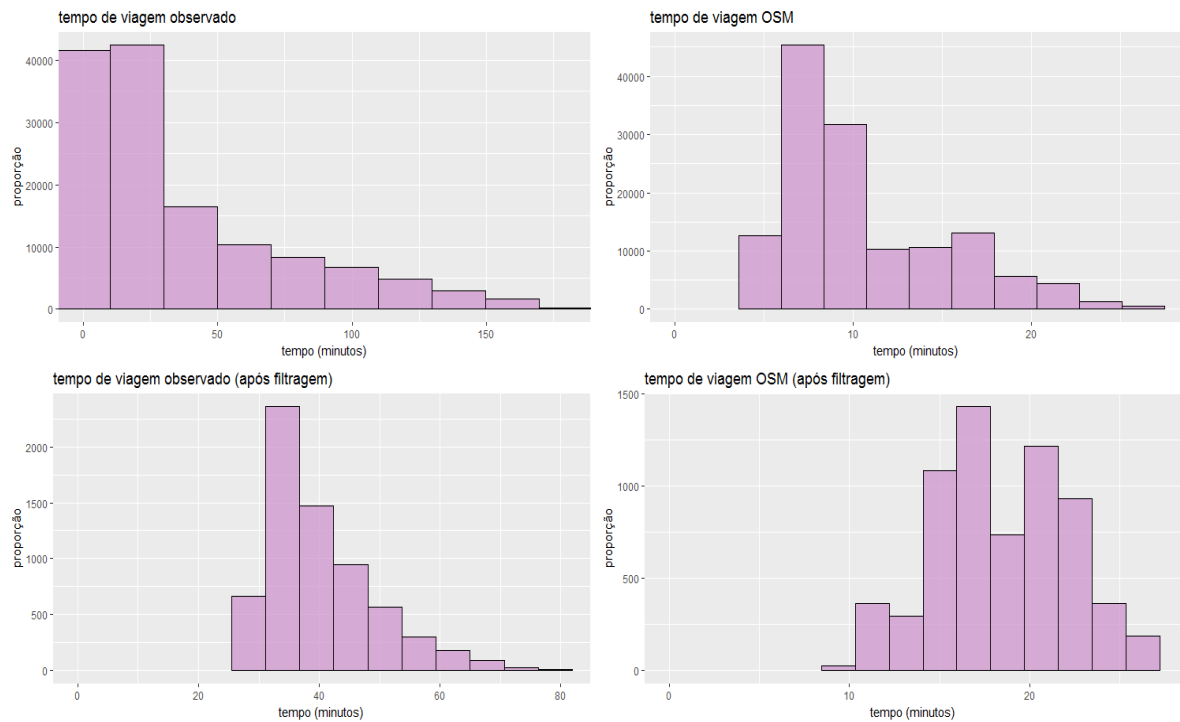
Figura 57 – Equipamentos seleccionados para extração do fluxo OD no pico da tarde.



Fonte: Elaborado pela autora.

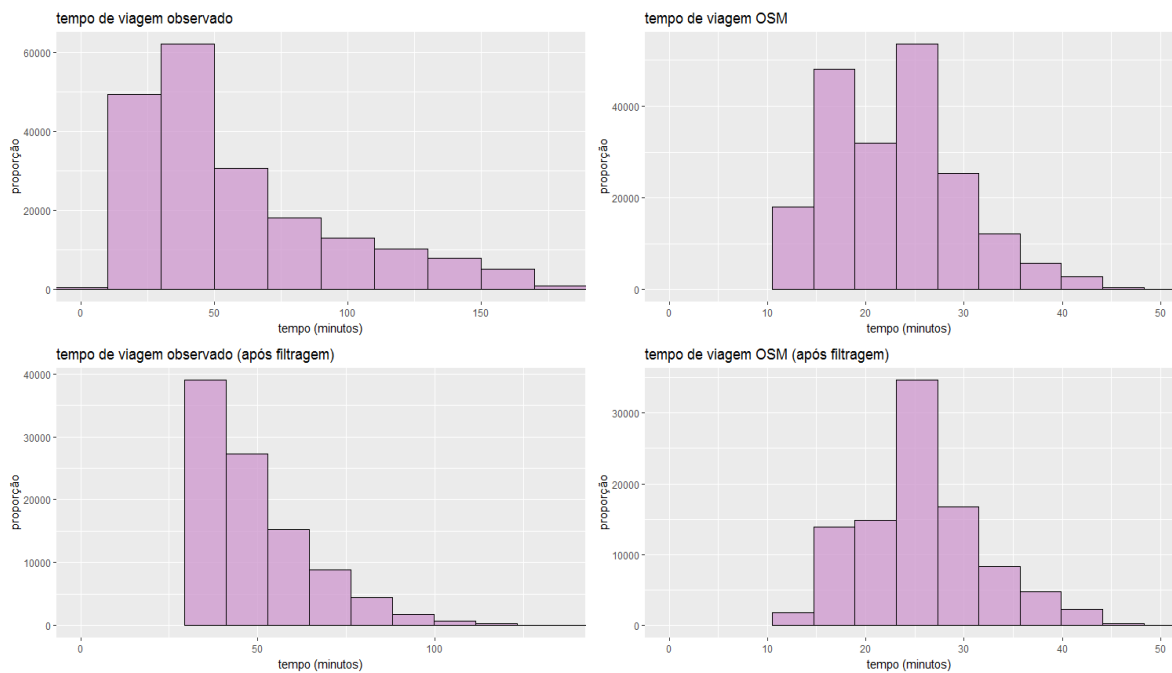
Com os equipamentos definidos, foi realizada a associação entre as placas lidas dentro de cada período e para cada um dos pares OD. A partir das associações foi realizada a filtragem dos tempos de viagem entre equipamentos de acordo com os critérios especificados na seção 4.1.2. As Figuras 58, 59 e 60 mostram a distribuição dos tempos de viagem antes e depois da filtragem, ao lado das distribuições do tempo de viagem dado pelo OSM para três pares OD no sentido centro-periferia, periferia-centro e periferia, periferia, respectivamente, no pico da manhã.

Figura 58 – Distribuição dos tempos de viagem para as associações central-nordeste para o pico da manhã.



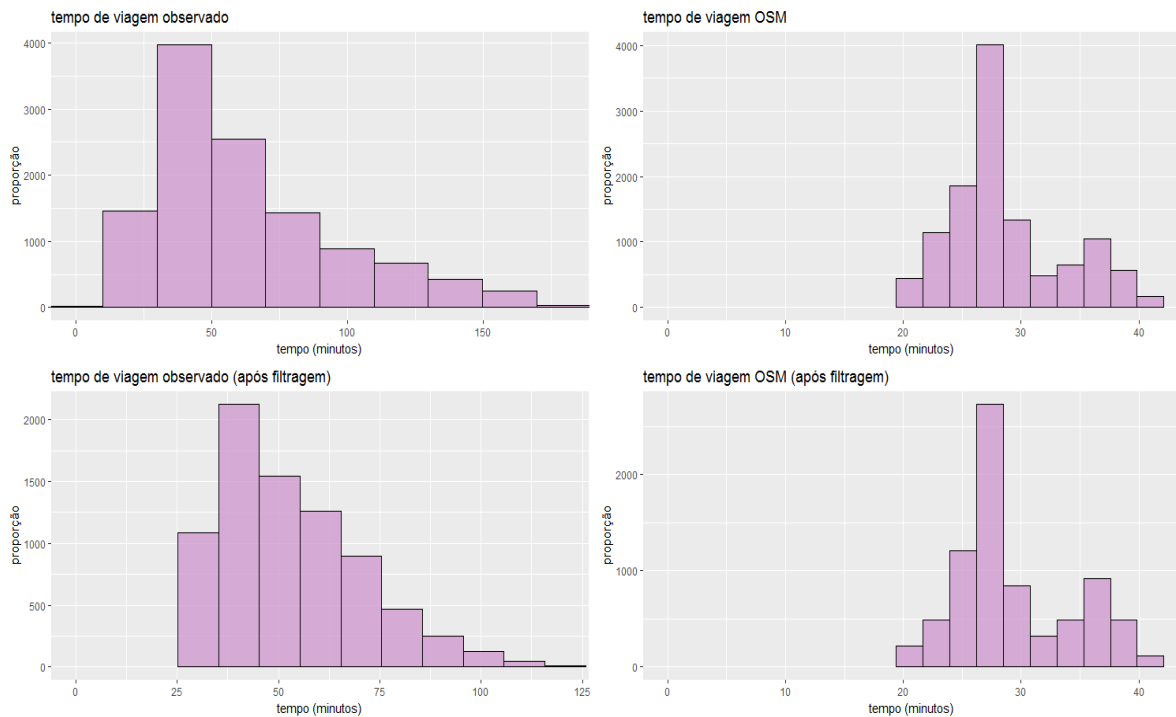
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 59 – Distribuição dos tempos de viagem para as associações sudoeste-central para o pico da manhã.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 60 – Distribuição dos tempos de viagem para as associações sudoeste-sul para o pico da manhã.

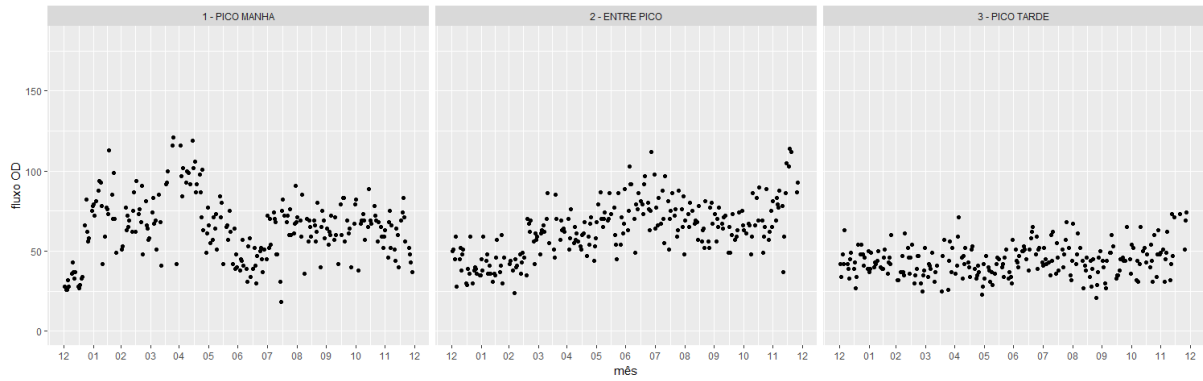


Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos histogramas apresentados anteriormente, pode-se observar que o total de associações antes das filtrações apresenta uma concentração muito alta nos valores mais baixos de tempo de viagem, o que pode indicar que a maior parte das associações foi realizada entre equipamentos próximos, provavelmente localizados no mesmo corredor, o que poderia levar a amostra a refletir boa parte de um volume nos corredores ao invés de um fluxo de passagem entre regiões. Pelos valores baixos da distribuição apresentada para os tempos de viagem entre equipamentos provenientes do OSM, acredita-se que se trata de uma situação de fluxo livre, o que não prejudica a filtração realizada, dado que foram considerados tempos de viagem até 3 vezes o tempo dado pelo OSM.

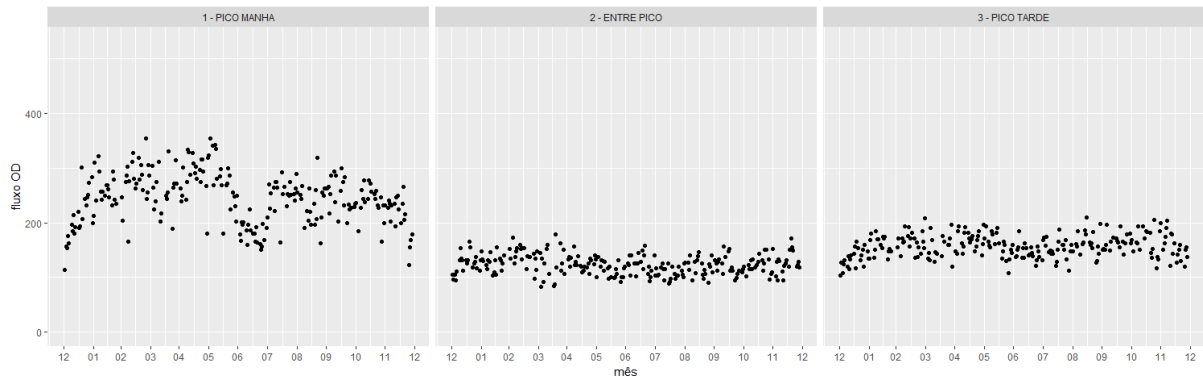
Por fim, partindo-se das associações com tempos de viagem aceitáveis, foram geradas as séries do fluxo OD para os três períodos de estudo. Os resultados estão apresentados nas Figuras 61 a 64, 65 a 68 e 69 a 72, para exemplos de séries no sentido periferia-centro, centro-periferia e periferia-periferia, respectivamente para cada um dos períodos.

Figura 61 – Fluxo OD no par nordeste-central.



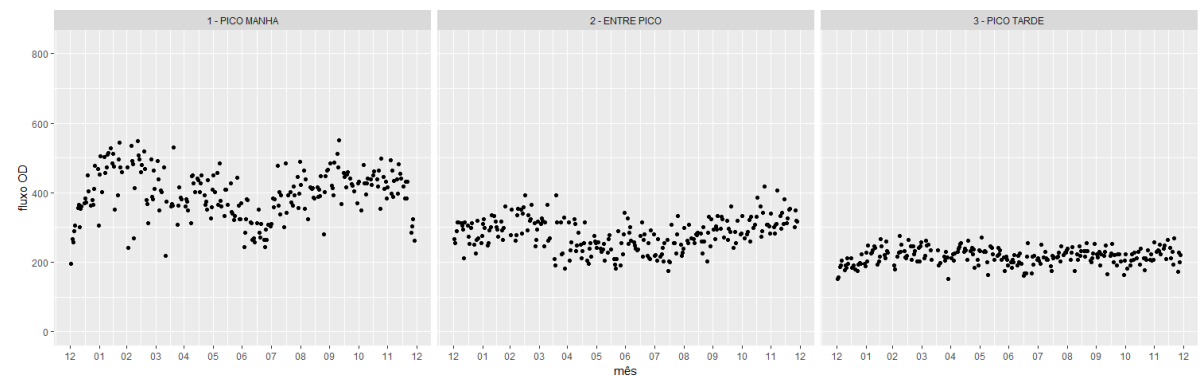
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 62 – Fluxo OD no par noroeste-central.



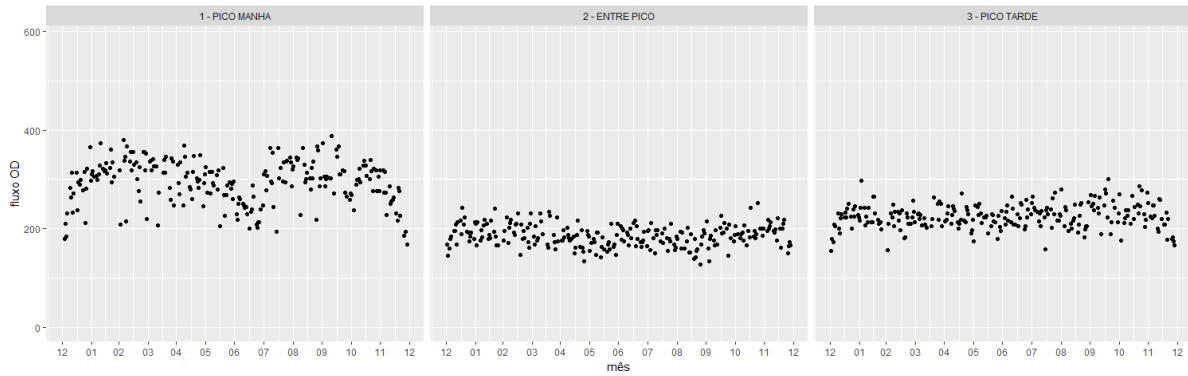
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 63 – Fluxo OD no par sudoeste-central.



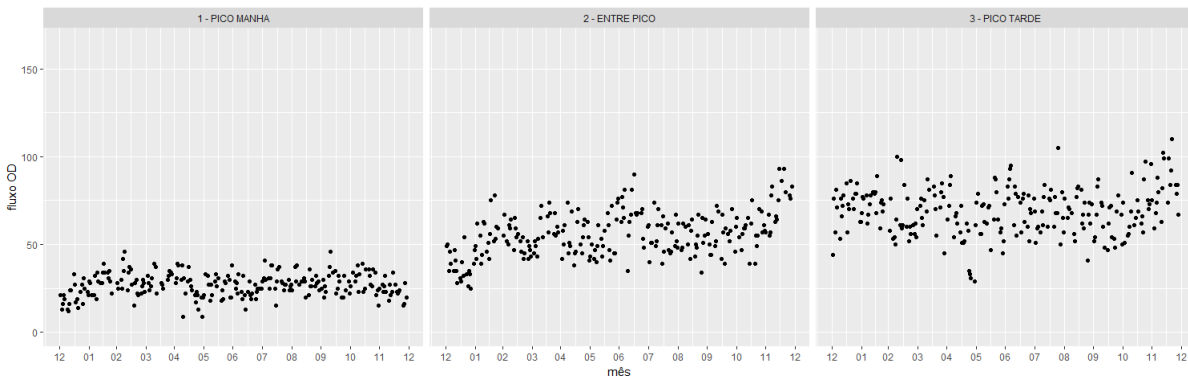
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 64 – Fluxo OD no par sul-central.



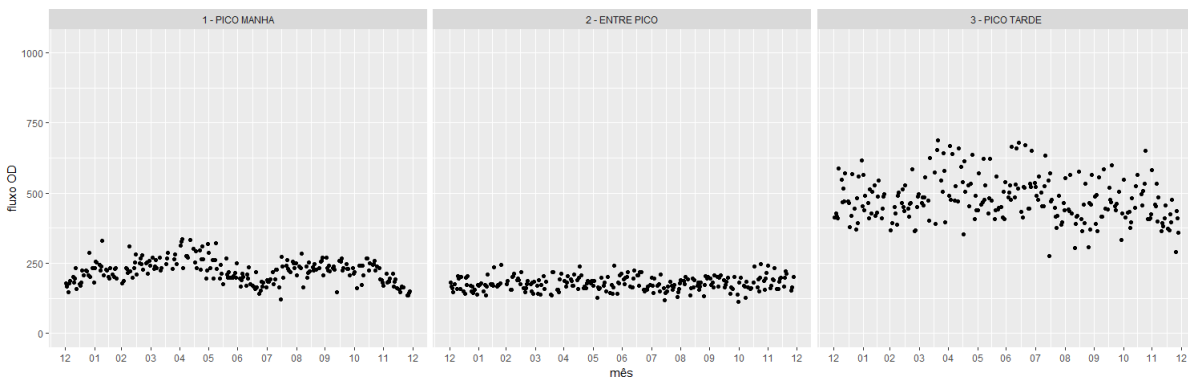
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 65 – Fluxo OD no par central-nordeste.



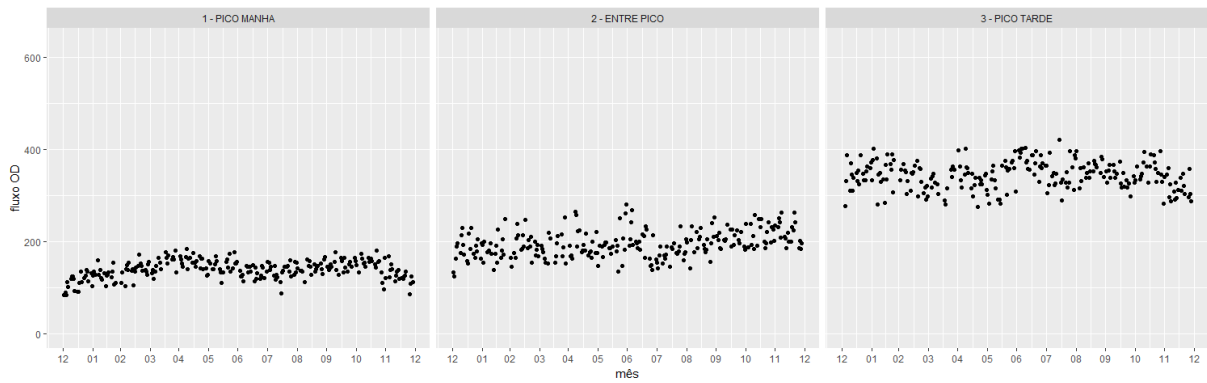
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 66 – Fluxo OD no par central-noroeste.



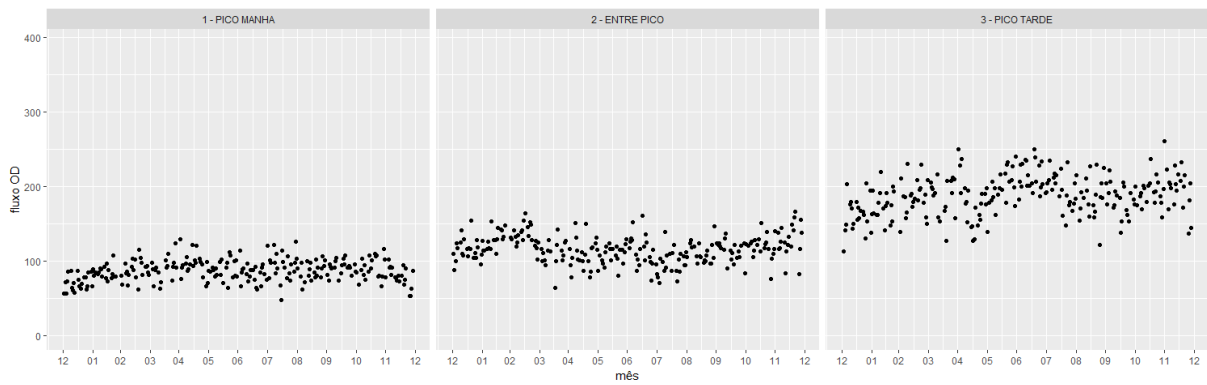
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 67 – Fluxo OD no par central-sudoeste.



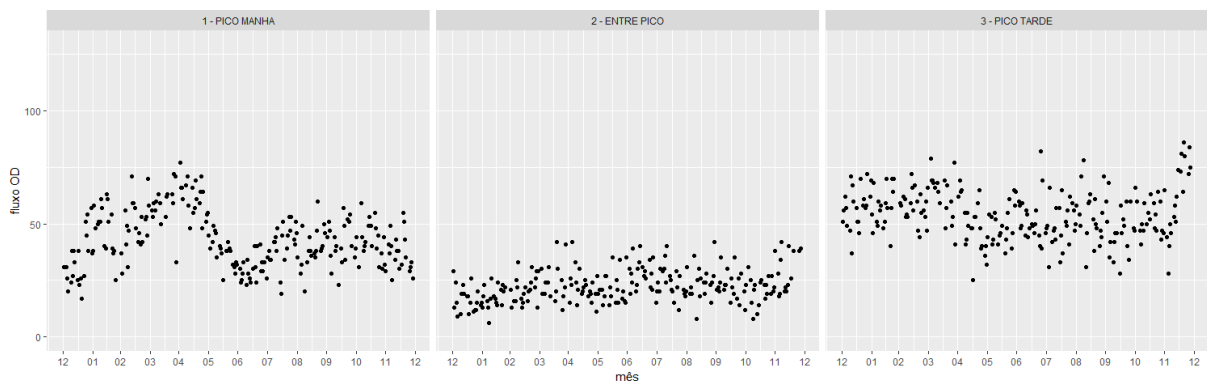
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 68 – Fluxo OD no par central-sul.



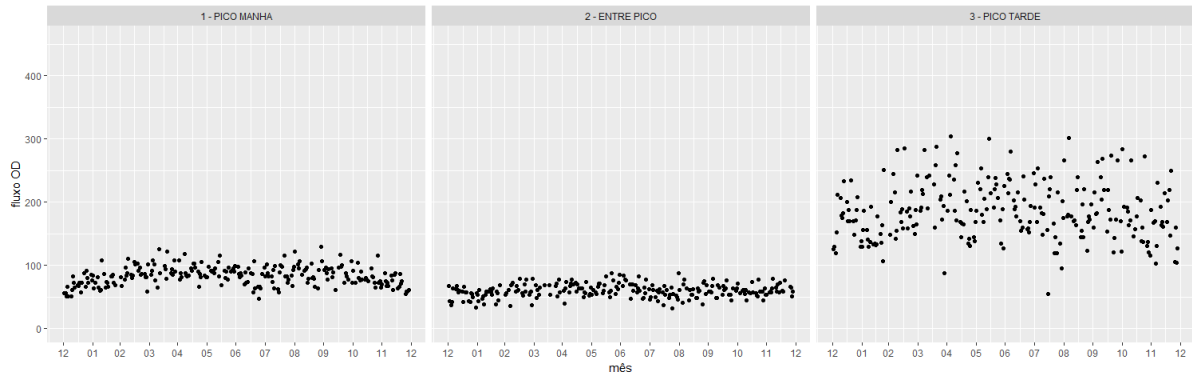
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 69 – Fluxo OD no par nordeste-noroeste.



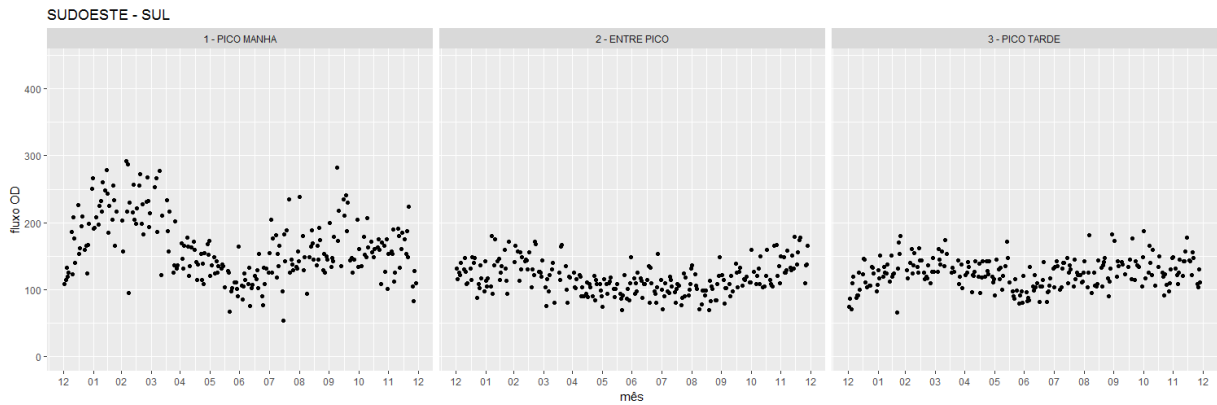
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 70 – Fluxo OD no par noroeste-sudoeste.



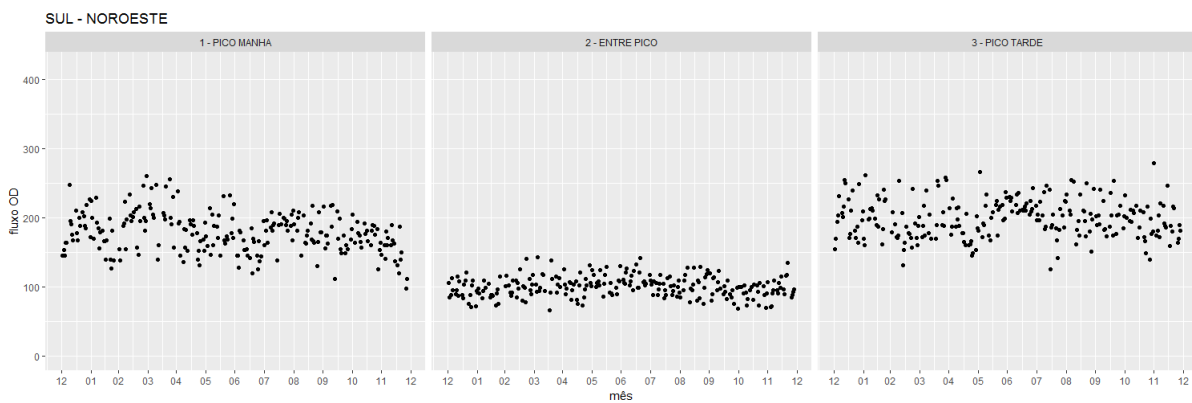
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 71 – Fluxo OD no par sudoeste-sul.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 72 – Fluxo OD no par sul-noroeste.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos resultados, e considerando que as séries obtidas representam de fato uma parcela das viagens realizadas entre pares de regiões da cidade, pode-se fazer algumas observações. Mesmo não refletindo a magnitude real dos fluxos OD, acredita-se que para cada um dos pares OD, a magnitude apresentada seja uma proporção aproximadamente similar para os três turnos, dado que foi utilizada praticamente a mesma quantidade de equipamentos para a geração das três séries ao longo do dia. Nesse sentido, observa-se um padrão semelhante ao do volume com as séries no sentido periferia central apresentando valores diários mais altos no pico da manhã, enquanto que os pares no sentido central-periferia apresentam valores mais elevados no pico da tarde. Nos pares com direção periferia-periferia observa-se uma tendência do valor do fluxo OD nos picos ser maior do que no entre pico. Com relação aos meses considerados atípicos, observa-se em algumas das séries o aumento ou diminuição do fluxo OD, porém em muitas delas aparentemente o efeito desses meses não é tão evidente na variação da série ao longo do ano.

5.2 Análise da Variabilidade

Nesta seção serão apresentados os resultados da etapa de análise exploratória dos dados de tráfego obtidos na etapa anterior no formato de séries temporais dia-a-dia. Esta análise teve como objetivo apontar indícios de como se dá a variabilidade dia-a-dia do volume de tráfego e dos fluxos OD na cidade de Fortaleza-CE. As subseções a seguir tratam dos três resultados obtidos para as duas variáveis analisadas através da aplicação do método proposto no capítulo 4.

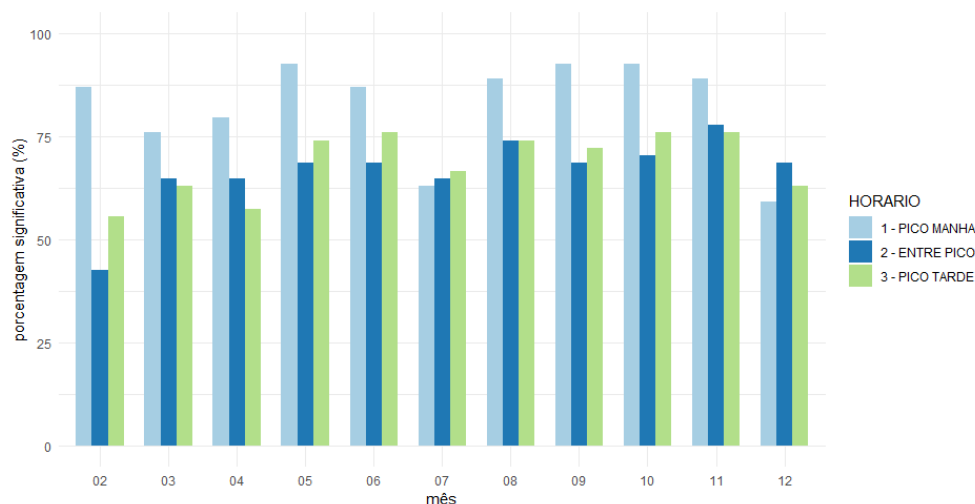
5.2.1 Séries de Volume de tráfego

Nesta subseção serão apresentados os resultados da aplicação dos quatro passos propostos no método de análise exploratória para as séries temporais obtidas do volume de tráfego, sendo o primeiro a análise da sazonalidade, o segundo a análise da autocorrelação dos resíduos do modelo de regressão linear, e o terceiro a análise da dispersão através do coeficiente de variação médio.

- Resultado 1 – sazonalidade

Os resultados obtidos para análise da sazonalidade das séries temporais do volume de tráfego foram divididos na análise da sazonalidade mensal e semanal, pela localização e pelo período de análise. Os resultados estão apresentados nas Figuras 73 a 76 a seguir. Com relação à sazonalidade mensal para o volume coletado na região central observa-se na Figura 73 um resumo contendo o percentual de equipamentos nos quais se pode considerar uma diferença significativa no volume dos meses de fevereiro a dezembro em relação ao mês de janeiro para cada um dos três períodos. Para o pico da manhã, os meses considerados típicos apresentaram um percentual acima de 75% dos equipamentos com volume diferente do mês de janeiro, com exceção dos meses de julho e dezembro, que apresentaram um percentual menor de equipamentos com volume diferente do mês de janeiro, o que é esperado, dado que esses três são os três meses considerados atípicos. Para o pico da tarde, os percentuais de equipamentos com volume diferente de janeiro varia pouco entre os demais meses do ano, indo de pouco mais de 50% para os meses de fevereiro e abril, e pouco mais de 75% para os meses de junho, outubro e novembro. O horário de entre pico também não apresenta grandes variações dessa diferença de volume entre meses, com exceção apenas do mês de fevereiro que apresentou menos de 50% dos equipamentos com volume diferente do mês de janeiro, o que pode ser esperado por conta do caráter de férias desses dois meses, e pelo alto volume de turistas na cidade, dado que se trata da região central e do horário de entre pico em que se acredita sejam realizadas mais atividades por motivos outros do que nos outros períodos.

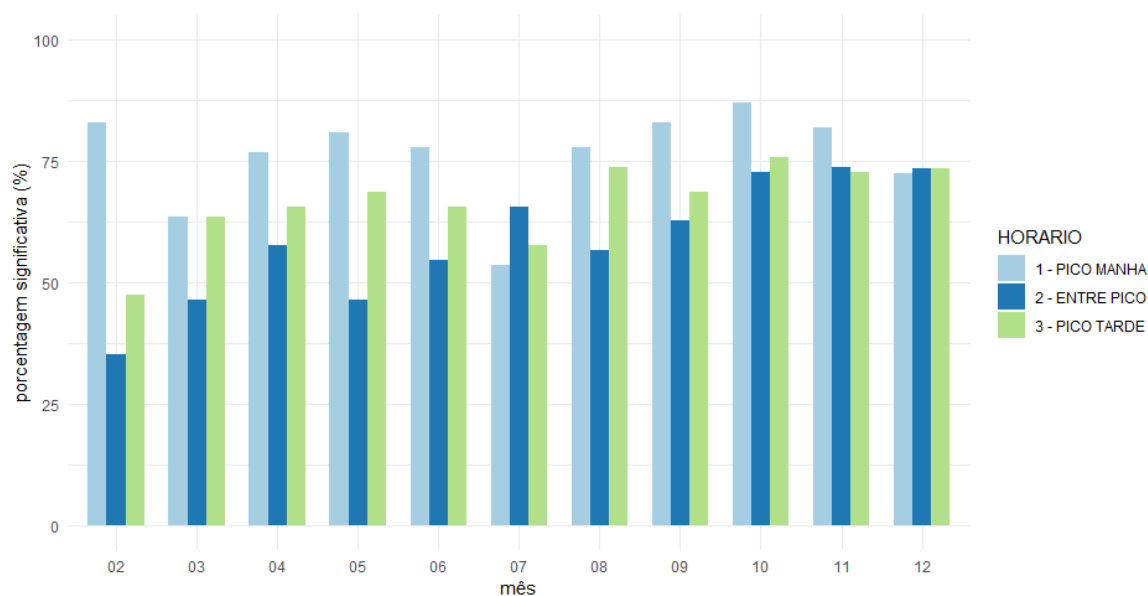
Figura 73 – Resumo da sazonalidade mensal para os equipamentos da região central.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em seguida, essa mesma análise de sazonalidade mensal foi realizada para as séries de volume dos equipamentos localizados nas regiões periféricas da cidade. O resultado está apresentado na Figura 74. No pico da manhã se observa um padrão semelhante ao da região central, com a maioria dos meses tendo um percentual acima de 75% de equipamentos com volume diferente do volume observado para o mês de janeiro, com exceção do mês de março e de dezembro. No horário de pico da tarde observa-se que o mês de fevereiro apresenta um valor abaixo de 50% dos equipamentos com volume significativamente diferente do volume observado no mês de janeiro, e que esse percentual tende a aumentar ao longo do ano, com exceção do mês de julho, onde se observa uma queda. O horário de entre pico segue o mesmo padrão do pico da tarde com relação à sazonalidade mensal dos equipamentos localizados nas regiões periféricas, seguindo uma tendência de aumento ao longo do ano, porém com valores menores de percentual de equipamentos com volume diferente do mês de janeiro, com exceção do mês de julho, em que esse valor é maior que o do pico da tarde, e dezembro, em que os dois valores são praticamente iguais. A partir da análise da sazonalidade mensal, foi possível identificar o caráter atípico dos meses de janeiro, julho e dezembro, e as semelhanças entre os demais meses do ano, diferindo entre os dois semestres em alguns casos, o que se alinha com os resultados obtidos por Oliveira (2004).

Figura 74 – Resumo da sazonalidade mensal para os equipamentos das regiões periféricas.

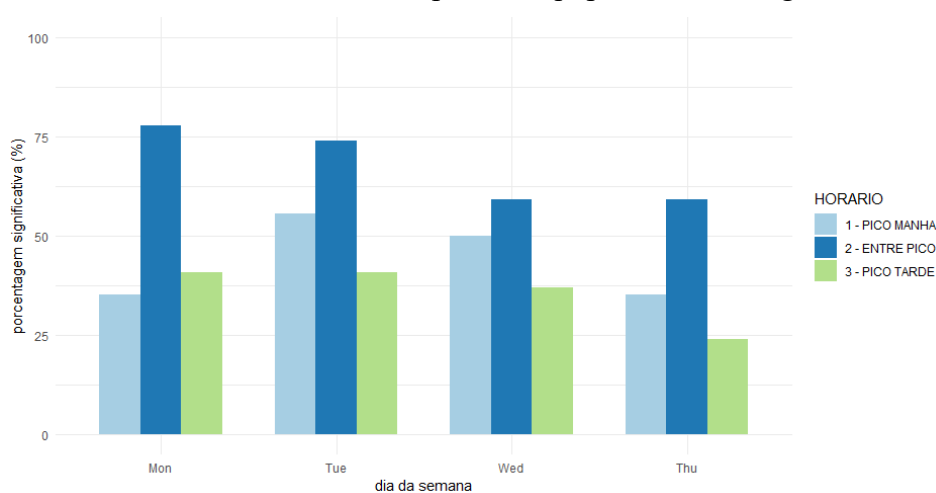


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 75 apresenta o resultado para o caso da sazonalidade por dias da semana

nos equipamentos localizados na região central, mostrando o percentual de equipamentos com volume significativamente diferente do observado nas sextas-feiras em relação aos demais dias. Para o pico da manhã observa-se que a terça e a quarta-feira apresentam em torno de 50% dos equipamentos com volume significativamente diferente de sexta-feira, enquanto que a segunda e a quinta-feira apresentam menos de 40% dos equipamentos com volume diferente do volume observado na sexta-feira. O pico da tarde apresenta um padrão diferente com os três primeiros dias tendo em torno de 40% dos equipamentos com volume diferente da sexta-feira, enquanto que na quinta-feira esse valor cai para 25%. O período de entre pico apresenta uma tendência decrescente ao longo da semana em relação ao percentual de equipamentos, indo de aproximadamente 75% na terça-feira até aproximadamente 60% na quinta-feira. A partir desses resultados é possível afirmar que o padrão atípico do volume de tráfego na sexta-feira na região central se apresenta mais nitidamente no horário de entre pico, enquanto que nos horários de pico, principalmente da segunda e sexta-feira isto não é tão evidente.

Figura 75 – Resumo da sazonalidade diária para os equipamentos da região central.

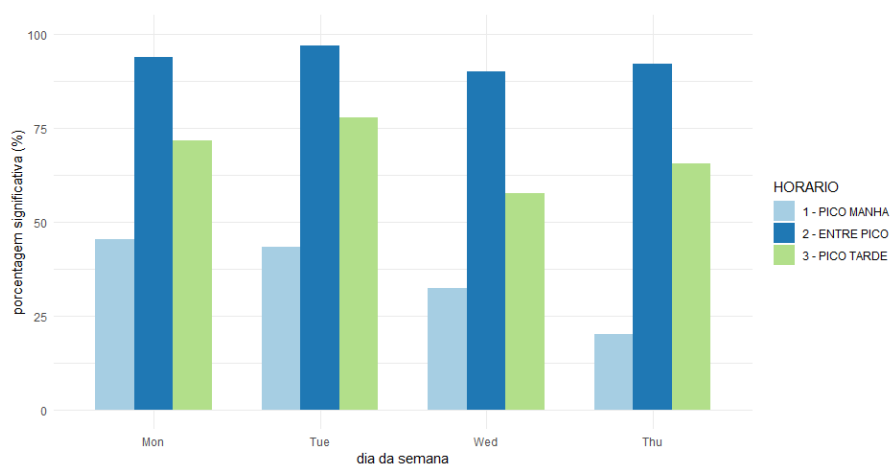


Fonte: Elaborado pela autora.

Na sequência está apresentado na Figura 76 o resultado para a análise de sazonalidade quanto aos dias da semana para os equipamentos localizados nas regiões periféricas. Neste caso, observa-se que no pico da manhã existe uma tendência decrescente para o percentual de equipamentos com volume significativamente diferentes de sexta-feira, começando já abaixo de 50% na terça-feira e indo até menos de 25% na quinta-feira. Já no pico da tarde os percentuais estão todos acima de 50% sem uma variação muito alta entre os dias. No horário de entre pico é quando se observa os maiores percentuais de equipamentos

com volumes diferindo significativamente dos volumes observados na sexta-feira, estando todos acima de 80%, também sem nenhum dia se destacando em relação aos outros. Novamente aqui, no pico da manhã não fica tão evidente o caráter atípico da sexta-feira em relação aos outros dias da semana, sendo mais evidente no pico da tarde e ainda mais no entre pico.

Figura 76 – Resumo da sazonalidade diária para os equipamentos das regiões periféricas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos na análise da sazonalidade por dia da semana apontam um comportamento mais homogêneo do volume de tráfego em ambos os horários de pico na região central, evidenciando o caráter pendular das viagens realizadas nos dias úteis, enquanto que no período de entre pico se observa uma diferença maior entre os dias considerados típicos e a sexta-feira, sobretudo nos equipamentos das regiões periféricas, onde o pico da tarde também apresenta uma diferença considerável nessa comparação, o que pode indicar uma ocorrência maior de deslocamentos por motivo outros no entre pico, sobretudo nas regiões periféricas.

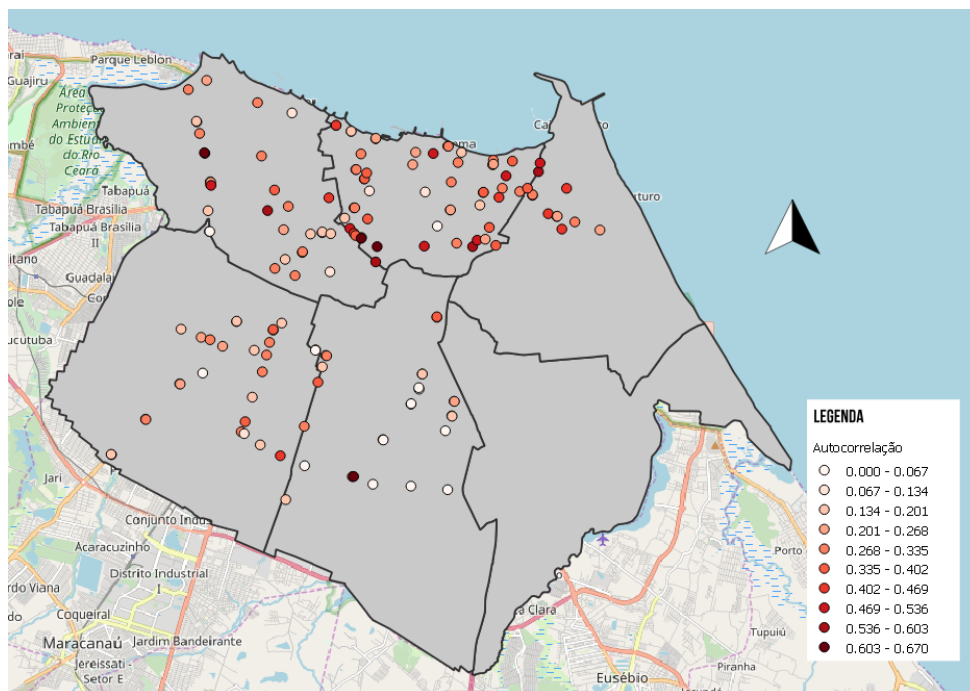
- Resultado 2 – autocorrelação

Os próximos resultados tratam da análise de autocorrelação das séries temporais do volume após a consideração do efeito da sazonalidade presente nelas. Isto se deu através da análise do valor da autocorrelação de lag 1, ou seja, a correlação dos valores observados em um dia com os valores observados no dia anterior, para os resíduos das séries temporais de

volume, e tiveram sua significância (hipótese alternativa de autocorrelação diferente de zero) testada através do teste de Durbin Watson como descrito no capítulo 4. As Figuras 77, 78 e 79 mostram os resultados dos valores de autocorrelação do lag 1 de acordo com a localização dos equipamentos nas regiões de estudo para os picos da manhã, entre pico e pico da tarde, respectivamente.

Na Figura 77 podem-se observar valores de autocorrelação mais elevados na região central, assim como nas regiões noroeste e nordeste, com a maior parte dos valores variando de 0,4 a 0,67, sobretudo nas fronteiras entre as regiões central e noroeste e central e nordeste. Enquanto nas regiões sul e sudoeste concentram a maior parte dos equipamentos com valores baixos, próximo de zero, com exceção de dois equipamentos localizados em um corredor arterial que conecta as regiões sul e sudoeste. Os valores moderados encontrados para equipamentos localizados em corredores das regiões sudoeste e noroeste, em contraste com os valores menores nos corredores da região sul pode indicar uma quantidade menor de opções de rotas alternativas para o último caso, enquanto que os primeiros casos se tratam de localidades onde a rede é mais adensada, permitindo uma maior permuta entre rotas dia-a-dia pelos usuários do sistema viário.

Figura 77 – Autocorrelação de lag 1 para os equipamentos no pico da manhã.

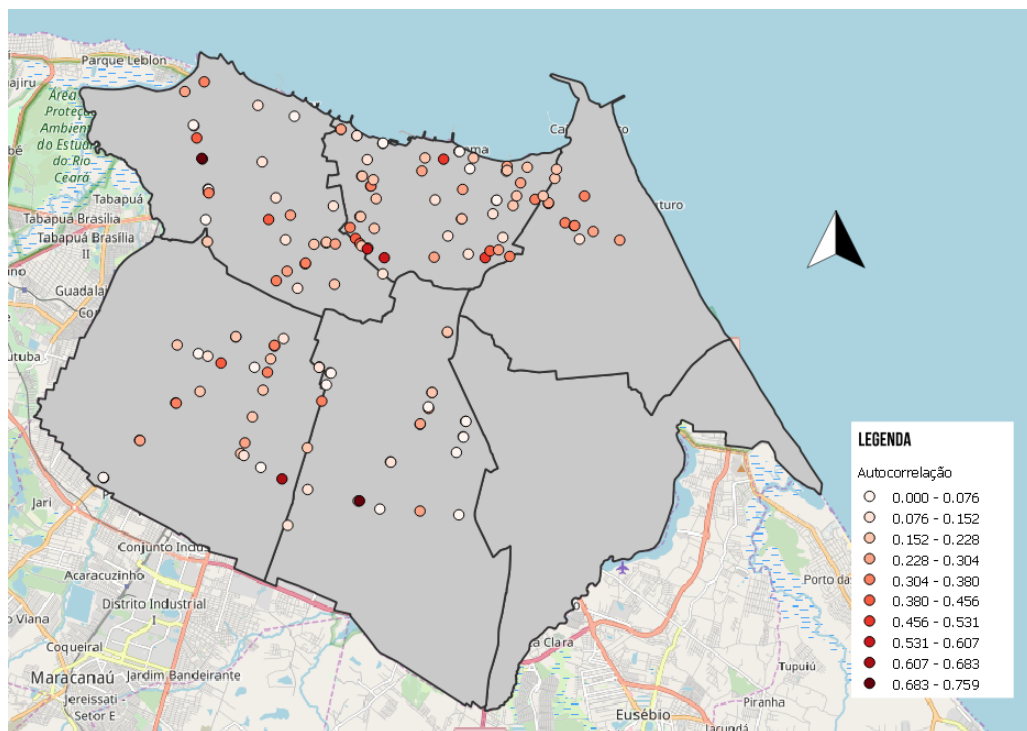


Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados para a autocorrelação do volume no entre pico estão mostrados na

Figura 78, onde se observa, de maneira global, valores mais baixos de autocorrelação em comparação com o pico da manhã, o que era esperado, dado que durante o período de entre pico a rede tende a não apresentar congestionamento, logo, não existindo a principal motivação do usuário para a mudança de rotas de um dia para o outro em uma viagem rotineira. Além disso, espera-se também observar menos viagens pendulares neste período. Alguns equipamentos se destacam neste caso com valores elevados de autorrelação, sendo os mesmos que se destacaram também pelo mesmo motivo nas regiões noroeste e sul no pico da manhã.

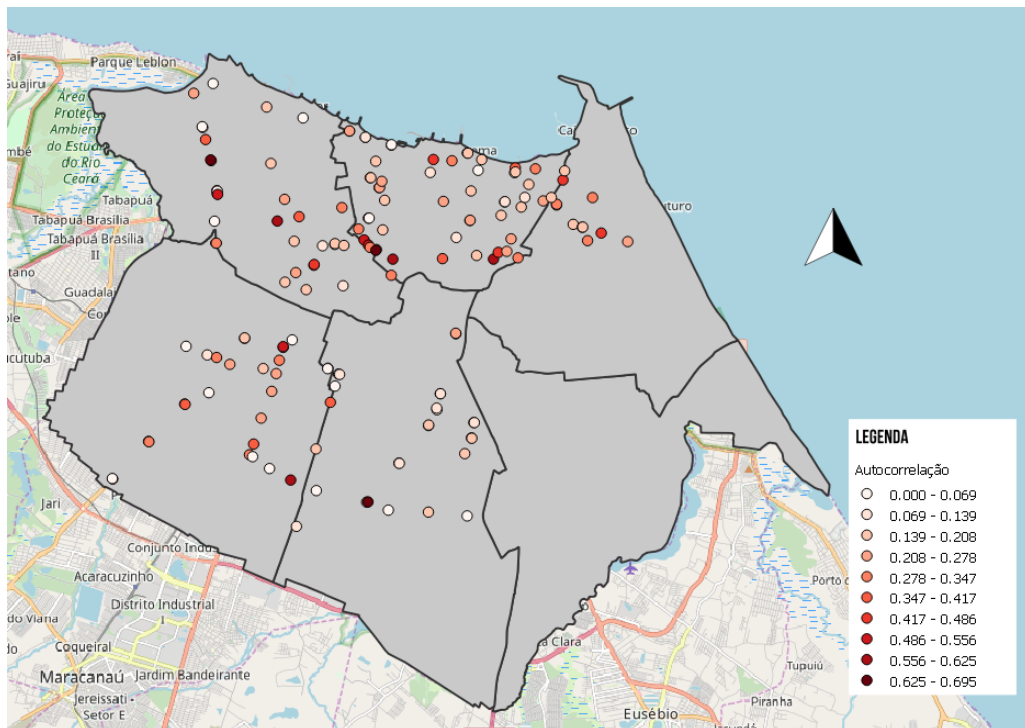
Figura 78 – Autocorrelação de lag 1 para os equipamentos no entre pico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 79 estão apresentados os resultados da autocorrelação para o período de pico da tarde, onde é possível observar de uma maneira global, um padrão de autocorrelação mais fraco que o do pico da manhã, porém mais forte que o do entre pico. Da mesma forma que para o pico da manhã, os valores mais altos de correlação estão localizados na área norte da cidade, nas regiões central, noroeste e nordeste, sobretudo nas fronteiras, o que é esperado pelos motivos expostos anteriormente.

Figura 79 – Autocorrelação de lag 1 para os equipamentos no pico da tarde.



Fonte: Elaborado pela autora.

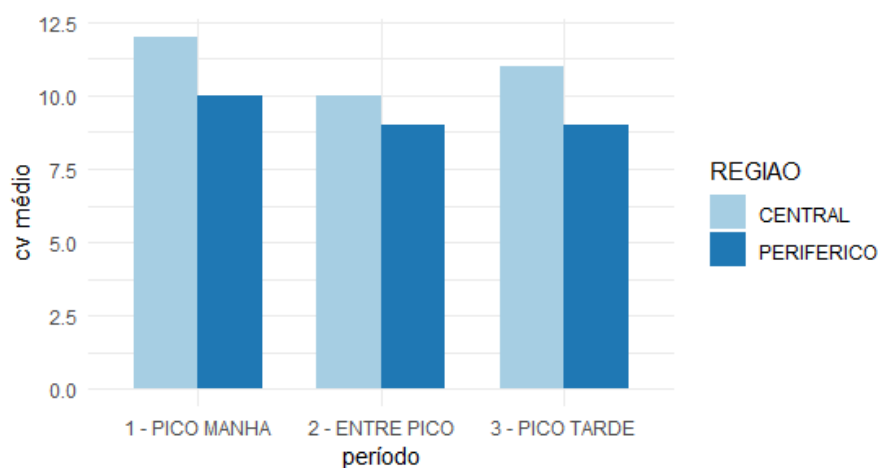
A partir dos resultados apresentados é possível notar a variação da autocorrelação dos valores de volume com o volume observado no dia anterior ao longo dos três períodos do dia, e de acordo com sua localização na região de estudo. Nos horários e localidades onde se espera um carregamento mais intenso da rede, se observa também valores mais elevados de autocorrelação, assim como onde se supõe existir uma oferta maior de opções de rotas para os usuários.

- Resultado 3 – dispersão

Por fim, foi realizada uma análise da dispersão considerando o coeficiente de variação de cada uma das 153 séries de volume para os meses típicos do primeiro semestre identificados por Oliveira (2004). Os resultados estão sintetizados na Figura 80 mostrando a média dos coeficientes de variação para os grupos de equipamentos localizados na região central e nas regiões periféricas para cada período do dia, onde é possível observar uma dispersão levemente maior nos dados do pico da manhã em relação aos demais, e nos dados dos equipamentos localizados na região central em relação aos das regiões periféricas. Isto pode ser um indicativo de maior variabilidade nos dados para situações em que a rede se apresenta mais congestionada e que se apresentam mais opções de mudança de rota (pico da

manhã e região central).

Figura 80 – Resumo da média dos coeficientes de variação dos volumes nos equipamentos.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.1 Fluxos OD

Os mesmos três conjuntos de resultados foram gerados para a análise da variabilidade dia-a-dia dos fluxos OD na cidade de Fortaleza-CE, utilizando agora uma classificação segundo a direção do movimento, considerando os deslocamentos realizados entre os 20 pares OD formados pelas cinco regiões de estudo consideradas.

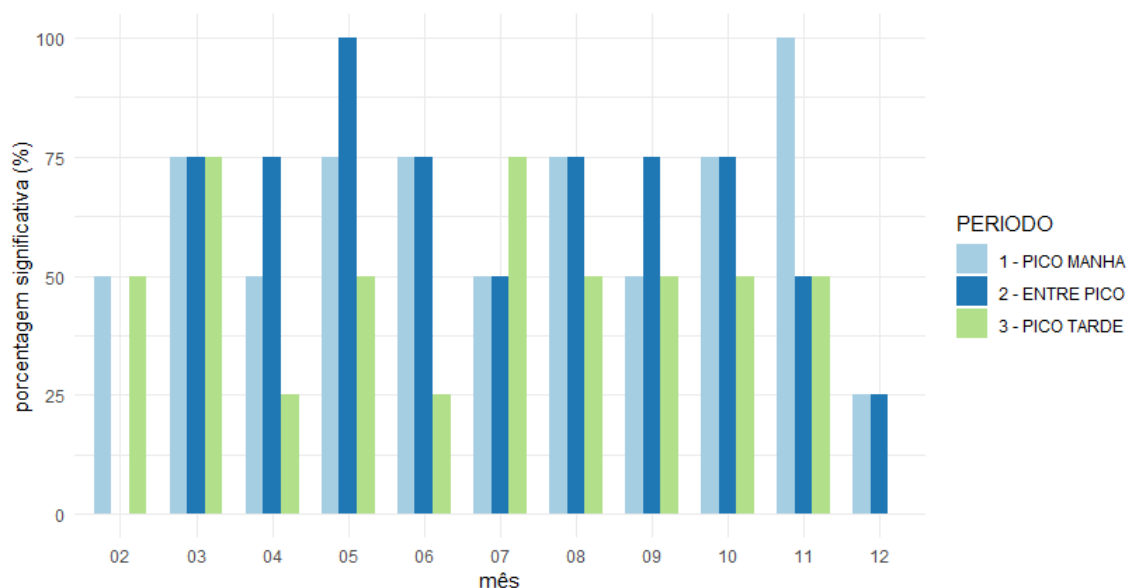
- Resultado 1 – sazonalidade

Assim como para o volume de tráfego, foram obtidos resultados para a análise de sazonalidade dos fluxos OD em relação aos meses do ano e dias da semana para cada um dos três períodos, porém, neste caso, para categorias relativas à direção dos pares OD, periferia-central, central-periferia e periferia-periferia, como classificado no levantamento de hipóteses no capítulo 3. As Figuras 81 a 83 mostram os resultados para a sazonalidade mensal e as Figuras 84 a 86 mostram os resultados obtidos para a sazonalidade por dia da semana, também comparando o percentual de equipamentos com o fluxo OD significativamente diferente para cada mês em relação ao mês de janeiro e pra cada dia em relação à sexta-feira para as categorias de pares OD mencionadas.

Na Figura 81 observa-se para quase todos os meses, o percentual de pares com

fluxo OD significativamente diferente do mês de janeiro foi de no máximo 75%, com exceção para os meses de maio no entre pico e novembro no pico da manhã em que todos os pares OD diferiram significativamente do mês de janeiro quanto ao fluxo OD. Além disso, observam-se também dois casos em que o percentual de pares foi zero, no mês de fevereiro para o entre pico e no mês de dezembro para o pico da tarde. Esses dois meses são os que menos se diferenciam de janeiro de maneira global.

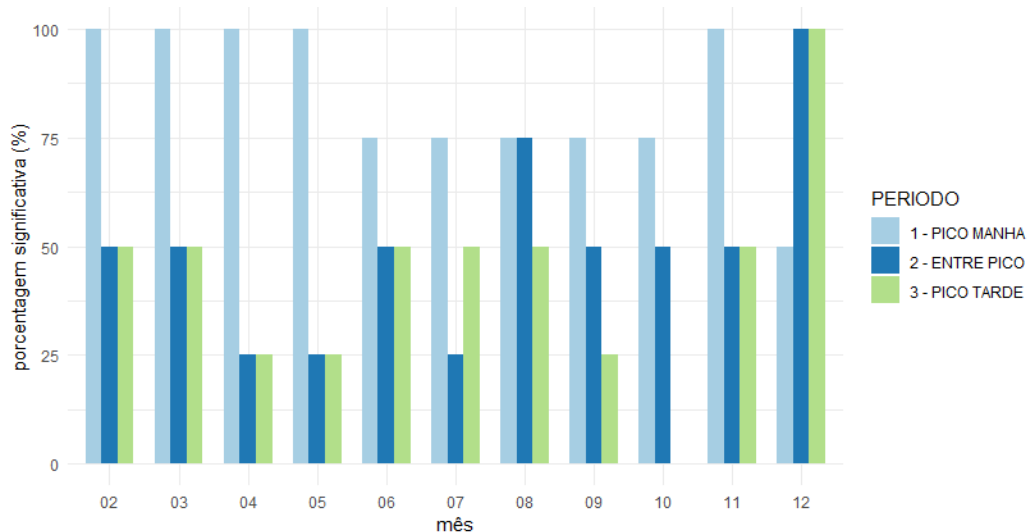
Figura 81 – Resumo da sazonalidade mensal para os pares no sentido periferia-central.



Fonte: Elaborado pela autora.

No caso dos pares no sentido central-periferia mostrado na Figura 82 observa-se que existe um padrão do fluxo OD no horário da manhã ser significativamente diferente do mês de janeiro, com exceção do mês de dezembro em que apenas metade dos pares nesse sentido apresentou uma diferença significativa. No entre pico, exceto pelos meses de agosto e dezembro, os pares seguem um padrão contrário com no máximo a metade dos pares sendo significativamente diferentes do mês de janeiro. Da mesma forma, o pico da tarde segue o mesmo padrão do entre pico com exceção apenas do mês de dezembro em que todos os pares apresentaram fluxo OD significativamente diferente do mês de janeiro em relação aos demais.

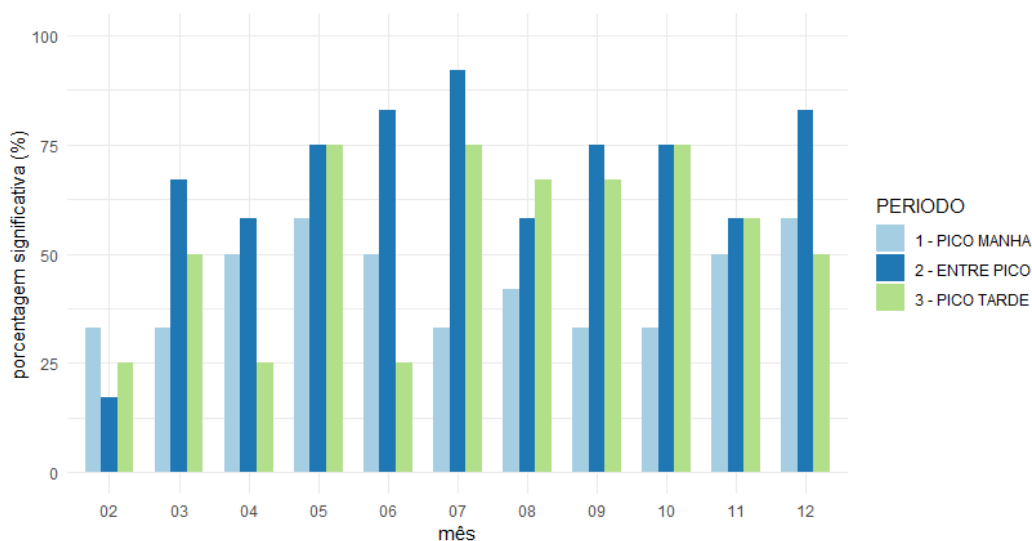
Figura 82 – Resumo da sazonalidade mensal para os pares no sentido central-periferia.



Fonte: Elaborado pela autora.

O resultado da sazonalidade mensal para os pares no sentido periferia-periferia está mostrado na Figura 83, onde é possível observar que os fluxos OD nesse sentido não diferem muito dos fluxos OD do mês de janeiro no pico da manhã, com apenas dois meses, maio e dezembro com percentual acima de 50%. O entre pico apresenta quase todos os meses com percentual acima de 50% de pares significativamente diferentes do mês de janeiro, com exceção de fevereiro. Já o pico da tarde apresenta uma oscilação desse percentual no primeiro semestre e uma consistência maior no segundo, com todos os meses acima de 50%.

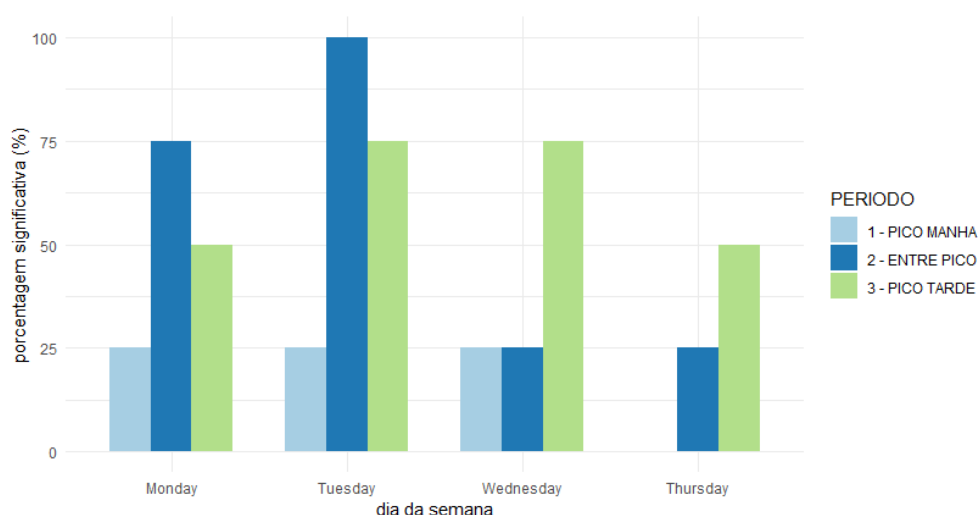
Figura 83 – Resumo da sazonalidade mensal para os pares no sentido periferia-periferia.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 84 mostra o resultado da sazonalidade para os dias da semana nos pares com sentido periferia-central, na qual se observa que no pico da manhã, para quase todos os dias da semana, apenas 25% dos pares apresentou diferença significativa no fluxo OD observado dia-a-dia em relação à sexta-feira, com exceção de quinta-feira que não apresentou diferença em nenhum dos pares. No entre pico, a terça-feira apresentou uma diferença significativa para todos os pares, seguido de segunda-feira com 75% dos pares diferentes, e quarta e quinta-feira com apenas 25% dos pares apresentando uma diferença significativa do fluxo OD em relação à sexta-feira. O pico da tarde apresenta 50% dos pares na segunda e quinta-feira com diferença significativa do fluxo OD em relação à sexta-feira, enquanto que na terça e quarta-feira são 75% dos pares.

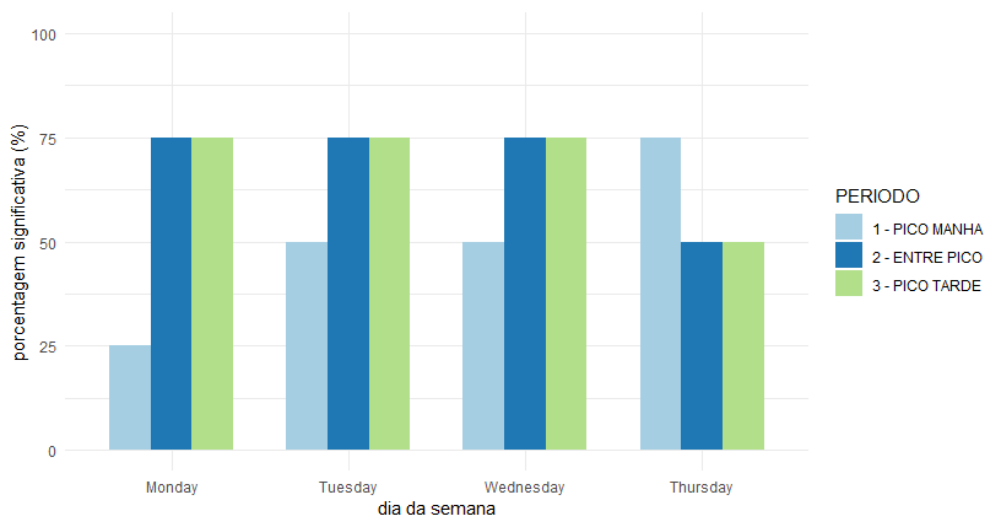
Figura 84 – Resumo da sazonalidade diária para os pares no sentido periferia-central.



Fonte: Elaborado pela autora.

O resumo da sazonalidade diária para os os pares no sentido central-periferia está mostrado na Figura 85 onde se observa um aumento no percentual de pares com fluxo OD significativamente diferente de sexta-feira ao longo da semana no pico da manhã. O período de entre pico e pico da tarde seguem o mesmo padrão para esse sentido de deslocamento, tendo 75% dos pares significativamente diferentes de sexta-feira de segunda a quarta-feira, e 50% na quinta-feira.

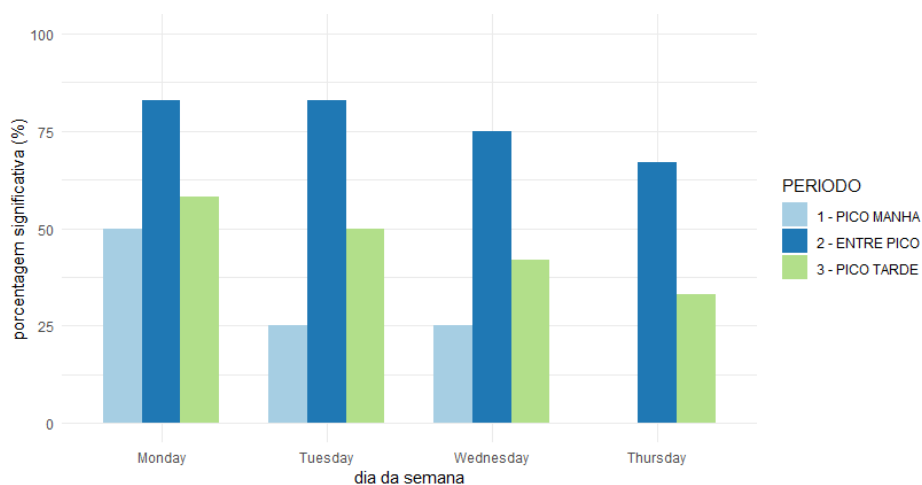
Figura 85 – Resumo da sazonalidade diária para os pares no sentido central-periferia.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, a Figura 86 mostra o resumo da sazonalidade por dias da semana em relação a sexta-feira no sentido periferia-periferia. Para este caso, os três períodos de análise seguem um padrão decrescente, com a segunda-feira apresentando um percentual maior de pares com fluxo OD significativamente diferentes de sexta-feira, já a terça e a quarta-feira apresentam um percentual menor que o da segunda-feira e próximos entre si, e a quinta-feira apresenta um percentual menor de pares diferentes de sexta-feira. Os valores percentuais são menores para o pico da manhã e maiores para o entre pico.

Figura 86 – Resumo da sazonalidade diária para os pares no sentido periferia-periferia.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados apresentados para a análise da sazonalidade dos fluxos OD em função dos sentidos de deslocamento são de difícil interpretação, dado tamanho pequeno da amostra, que consiste em um total de 20 pares OD, sendo 4 no sentido periferia-centro, 4 no sentido centro-periferia, e 12 no sentido periferia-periferia. A análise foi em grande parte inconclusiva devido à maneira como os dados foram sintetizados para a apresentação dos resultados, e por conta do tamanho pequeno da amostra de pares OD.

- Resultado 2 – autocorrelação

Após a consideração do efeito da sazonalidade nas séries temporais do fluxo OD foi realizada a análise de autocorrelação de lag 1 dos resíduos da regressão temporal, ou seja, a correlação dos valores observados em um dia com os valores observados no dia anterior, e sua significância (hipótese alternativa de autocorrelação diferente de zero) foi testada através do teste de Durbin Watson como descrito no capítulo 4. Os Quadros 5, 6 e 7 mostram os resultados dos valores de autocorrelação do lag 1 no formato de matriz OD para os picos da manhã, entre pico e pico da tarde, respectivamente. Os valores sinalizados com o símbolo ‘*’ indicam os resultados de autocorrelação não significativos.

No Quadro 5 observa-se que 10 dos 20 valores de autocorrelação foram não significativos, ou seja, não foi rejeitada a hipótese nula de autocorrelação igual a zero, incluindo todos os resultados do fluxo OD tendo como destino a região sul, o que não se observou em relação à região central, que é, no pico da manhã onde se espera que sejam atraídas mais viagens, em sua maioria pendulares. Isto pode ser explicado pelo fato de a região sul concentrar muitos empregos gerando também viagens pendulares e não concentrar tantos serviços quanto a região central, que pode estar atraindo também muitas viagens por motivo outros no pico da manhã.

Quadro 5 – Autocorrelação de lag 1 para as séries de fluxo OD no pico da manhã.

ORIGEM/DESTINO	CENTRAL	NORDESTE	NOROESTE	SUDOESTE	SUL
CENTRAL		0,21	0,20	0,20	-0,01 *
NORDESTE	0,24		0,24	-0,03 *	0,05 *
NOROESTE	0,17	0,07 *		0,05 *	0,02 *
SUDOESTE	0,12	0,16	0,18		0,04 *
SUL	0,01 *	0,15	0,04 *	0,09 *	

Fonte: Elaborado pela autora.

O Quadro 6 apresenta os resultados da autocorrelação de lag 1 para os fluxos OD no período de entre pico onde se observa que os valores para os pares com origem na região sul são todos não significativos, assim como quase todos os pares com origem na região sudeste. Além disso, muitos dos valores significativos são muito pequenos e se aproximam dos valores para os quais a hipótese nula não foi rejeitada.

Quadro 6 – Autocorrelação de lag 1 para as séries de fluxo OD no entre pico.

ORIGEM/DESTINO	CENTRAL	NORDESTE	NOROESTE	SUDOESTE	SUL
CENTRAL		0,11	0,17	0,09	0,21
NORDESTE	0,17		0,09	-0,03 *	0,17
NOROESTE	0,11	0,11		-0,05 *	0,08 *
SUDOESTE	0,03 *	0,04 *	0,10		0,07 *
SUL	0,01 *	-0,01 *	-0,01 *	-0,04 *	

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados da autocorrelação de lag 1 para o fluxo OD no pico da tarde estão apresentados no Quadro 7, onde se observa que quase todos os pares com origem na região sul apresentam valores não significativos, enquanto quase todos os pares com origem na região central tiveram valores significativos. Novamente, aqui, os resultados obtidos foram contrários aos esperados, dado que para o pico da tarde se considera que grande parte das viagens com origem na região central é de caráter pendular, logo, não se esperaria autocorrelação com o as viagens realizadas no dia anterior.

Quadro 7 – Autocorrelação de lag 1 para as séries de fluxo OD no pico da tarde.

ORIGEM/DESTINO	CENTRAL	NORDESTE	NOROESTE	SUDOESTE	SUL
CENTRAL		0,22	0,02 *	0,14	0,08
NORDESTE	0,20		0,16	-0,01 *	-0,02 *
NOROESTE	0,18	0,07 *		0,14	0,25
SUDOESTE	0,10	0,01 *	0,10		0,18
SUL	0,19	0,06 *	0,07 *	0,05 *	

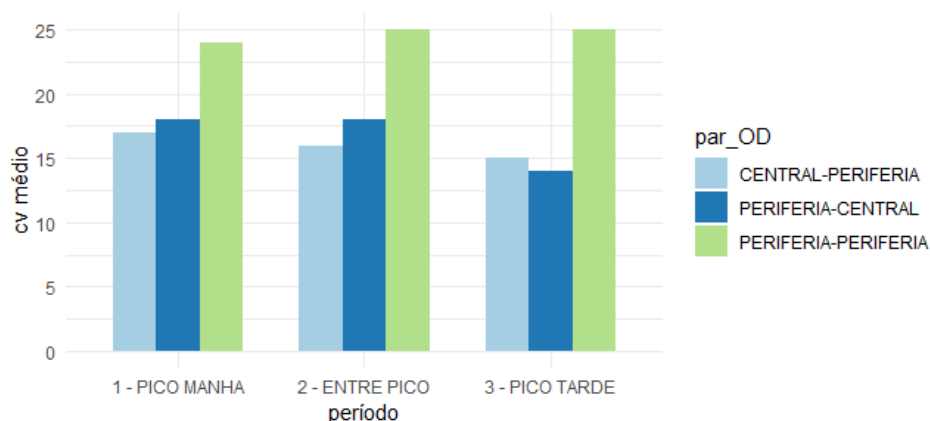
Fonte: Elaborado pela autora.

De uma maneira geral, todos os valores observados para a autocorrelação dos fluxos OD, mesmo os significativos apresentaram valores muito baixos, o que indica que, mesmo que exista uma dinâmica nos fluxos entre regiões da cidade de Fortaleza, essas decisões de viagem estão pouco correlacionadas com as viagens realizadas no dia anterior.

- Resultado 3 – dispersão

Por fim, o último resultado da análise de variabilidade dos fluxos OD consistiu no cálculo da média do coeficiente de variação para cada período e sentido de deslocamento, considerando os meses típicos do primeiro semestre de 2017. A Figura 87 apresenta o resumo da dispersão do fluxo OD entre pares da cidade de Fortaleza-CE, onde é possível observar que os valores do coeficiente de variação são maiores para o sentido periferia-periferia nos três períodos de análise, e as médias do coeficiente de variação nos outros dois sentidos são bem próximas, variando em torno de 15% nos três períodos.

Figura 87 – Resumo da média dos coeficientes de variação dos fluxos OD entre regiões.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.3 Discussão

Nesta seção os resultados obtidos para a variabilidade do tráfego serão confrontados com as hipóteses levantadas e apresentadas no capítulo 3. O Quadro 8 reapresenta as hipóteses sobre a variabilidade do volume de tráfego juntamente com a interpretação dos resultados obtidos em formato simbólico, buscando representar a intensidade da dinâmica dia-a-dia. Para a maior parte dos casos, as hipóteses levantadas foram confirmadas pelos resultados, com algumas diferenças do que se esperava. Para os picos da manhã e da tarde acreditava-se que os valores de autocorrelação do volume na região central seriam consideravelmente maiores do que os das regiões periféricas, os quais se apresentaram semelhantes nos resultados. Já para o entre pico acreditava-se que os valores de autocorrelação seriam semelhantes para as regiões central e periféricas, porém, nas regiões

periféricas os resultados obtidos apresentaram valores mais baixos que para a região central de uma maneira global. Uma das conclusões que se pode tirar a partir desses resultados é a de que a localização tem uma influência maior na dinâmica do volume do que o horário, ou seja, devem existir variáveis relativas ao uso do solo, assim como especificidades da rede viária que não estão sendo consideradas nesta análise, como, por exemplo, o adensamento da rede com mais ou menos opções de rota para os usuários.

Quadro 8 – Hipóteses x resultados sobre a intensidade da variabilidade do volume de tráfego.

	Periferia		Centro	
	Hipótese	Resultado	Hipótese	Resultado
Pico da Manhã	Média	Alta	Alta	Alta
Entre Pico	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Pico da Tarde	Média	Média	Alta	Média

Fonte: Elaborado pela autora.

O Quadro 9 apresenta os resultados da análise de variabilidade do fluxo OD entre regiões da cidade de Fortaleza-CE, juntamente com as hipóteses levantadas no capítulo 3 para os três sentidos e os três períodos de análise. Para a indicação do sinal dos resultados no Quadro 9 foi considerado se a maior parte das observações de cada categoria foi significativa (+) ou não (-). Em apenas três das nove situações analisadas os resultados seguiram as hipóteses: nos picos da manhã e da tarde no sentido periferia-periferia, para os quais as hipóteses foram de que não existiria uma dinâmica considerável entre dias, e para o entre pico no sentido centro-periferia, para o qual foi levantada a hipótese de que existiria uma dinâmica entre dias. Para os outros casos em que os resultados apresentaram o oposto das hipóteses, não houve unanimidade na significância da autocorrelação para todos os pares de cada categoria, o que indica que existem especificidades em cada uma das regiões que não foram levadas em consideração na classificação simples proposta neste trabalho. Além disso, os pares com autocorrelação significativa apresentaram um valor muito baixo, próximo do limite de significância o que indica a existência sim, de uma dinâmica dia-a-dia, porém muito fraca.

Quadro 9 – Hipóteses x resultados sobre a intensidade da variabilidade do fluxo OD.

	Periferia-Centro		Centro-Periferia		Periferia-Periferia	
	Hipótese	Resultado	Hipótese	Resultado	Hipótese	Resultado
Pico da Manhã	Baixa	Média	Baixa	Média	Baixa	Baixa
Entre Pico	Média	Baixa	Média	Média	Média	Baixa
Pico da Tarde	Baixa	Média	Baixa	Média	Baixa	Baixa

Fonte: Elaborado pela autora.

CAPITULO 6: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões acerca do presente trabalho de dissertação a partir da síntese dos resultados em relação aos objetivos propostos, assim como as recomendações para trabalhos futuros, destacando as contribuições geradas a partir da realização desta pesquisa e as limitações encontradas ao longo do processo.

6.1 Contribuições

Neste trabalho foi realizada uma análise da variabilidade temporal de duas das principais variáveis que compõem o tráfego urbano: o volume de tráfego e o fluxo OD para o caso da cidade de Fortaleza-CE. A compreensão dessa dinâmica é essencial para a formulação adequada de modelos de demanda com aplicações tanto no planejamento estratégico, no caso de modelos de alocação dinâmica do tráfego e de estimação da matriz OD sintética, quanto no planejamento operacional, no caso de modelos de previsão do tráfego em curto ou médio prazo.

A análise foi realizada em duas grandes etapas principais. A primeira tratou da consolidação de dados provenientes de sistemas de fiscalização eletrônica com o objetivo de torna-los adequados à realização da análise proposta. A partir desse objetivo, foi realizada a descrição dos dados originais e proposto e aplicado um método de tratamento para obter medidas confiáveis das variáveis de interesse. O método de consolidação consistiu na manipulação dos dados e aplicação de diversos critérios divididos em sete etapas sequenciais, resultando em séries temporais dia-a-dia do volume de tráfego e do fluxo OD entre regiões da cidade de Fortaleza-CE para o ano de 2017. Dentre as etapas do método de consolidação, a etapa de identificação dos horários de pico pode auxiliar também na classificação dos arcos analisados em relação ao padrão de distribuição horária do volume, que, como observado, assume diferentes perfis dependendo da localização e do sentido do arco, e, provavelmente de outros fatores não explorados neste trabalho. A etapa de consolidação dos dados contribuiu também na discussão da utilização de dados de associações de leitura de placas para a representação de fluxos OD. Neste sentido foram realizados diversos procedimentos de filtragem de dados com o objetivo de extrair dados que se aproximassem ao máximo de um fluxo OD entre regiões, e ao mesmo tempo garantir a viabilidade da análise com relação à quantidade de dados na amostra.

Com relação à etapa de análise exploratória das séries temporais de volume e fluxo OD foi possível ter uma visão global sobre a dinâmica do tráfego em Fortaleza, no sentido de identificar como as variáveis analisadas variam dia-a-dia, e como fatores temporais e espaciais influenciam nessa variabilidade. Os fatores analisados foram o período do dia, que foi dividido em pico da manhã, entre pico e pico da tarde, e a localização e sentido do deslocamento, que foram divididos em cinco regiões periféricas e uma central, e os pares OD formados por elas. Para cada um dos casos foram gerados três resultados principais: o primeiro com relação à sazonalidade mensal e semanal das séries, o segundo em relação à autocorrelação presente nos dados após a consideração do efeito da sazonalidade na variação das séries, e o terceiro com relação à dispersão observada nos dados através do cálculo do coeficiente de variação médio para cada um dos casos de classificação temporal e espacial. Os resultados obtidos foram confrontados com hipóteses levantadas sobre a variabilidade do tráfego e discutidos ao final para buscando-se compreender o fenômeno que gerou os resultados.

6.2 Limitações

Uma das principais limitações encontradas ao longo do processo de realização deste trabalho foram as particularidades do fenômeno identificadas a partir da análise dos dados, como, por exemplo, a dificuldade para a definição de um horário de pico da tarde/noite e entre pico igual para todas as regiões, no período após o horário de pico da manhã, que normalmente é bem definido para todas as regiões, o comportamento do tráfego varia muito de uma região para outra, dependendo do sentido e também da localização do arco analisado.

Outra limitação foi em relação ao acesso aos dados de fiscalização eletrônica de vias da cidade que não são gerenciadas pela Prefeitura Municipal de Fortaleza. Essas vias encontram-se no lado leste da cidade, o que acabou ocasionando a decisão de se excluir a região sudeste da análise, e, a região nordeste foi analisada, porém com poucos dados em relação às demais. Essas duas regiões da cidade configuram casos particulares, com áreas menos adensadas, e atualmente configuram um vetor de expansão da cidade, tanto residencial quanto de comércio e serviços, logo, sendo esperado que exista uma menor quantidade de dados de tráfego disponíveis.

A decisão de realizar a análise dividindo-se a cidade em seis grandes regiões demonstrou que muitas vezes os resultados obtidos não são homogêneos em relação à

classificação propostas em regiões periféricas e região central e os pares OD entre elas, o que indica que existem fatores locais que não teriam como ser considerados na análise, devido ao nível de agregação adotado.

Com relação aos resultados apresentados para a dispersão, não foram realizados testes de significância para as diferenças entre as médias dos coeficientes de variação, nem uma análise mais detalhada da distribuição das variáveis, sendo este apenas um resultado complementar na análise de variabilidade dia-a-dia, juntamente com a análise de sazonalidade.

6.2 Recomendações

Primeiramente, recomenda-se a realização de um novo estudo com foco na variabilidade ao longo do dia na cidade de Fortaleza-CE, buscando identificar padrões de dias da semana e meses do ano para auxiliar nas análises de variabilidade dia-a-dia. Estudos nesse sentido devem incluir também a análise de várias localizações da cidade com padrões de uso do solo e atividades diferentes com o objetivo de identificar fatores que influenciam na variação do tráfego, além dos que foram evidenciados nesta pesquisa.

Em seguida, recomenda-se também um aprofundamento na análise de dispersão das séries temporais, buscando identificar qual distribuição de probabilidade é a mais adequada para representar o fenômeno do tráfego.

Por fim, recomenda-se que seja realizada uma análise mais desagregada, que considere características da rede de transportes além da localização e horário do dia. Neste estudo foram identificadas muitas dimensões temporais e espaciais que podem ser comparadas e analisadas, o que trouxe um caráter global à análise. Para estudos futuros é de interesse para a melhor compreensão do fenômeno da variabilidade do padrão de deslocamento viário urbano, que se vá além e se realize uma análise espaço-temporal também de caráter local podendo-se utilizar este estudo como base.

REFERÊNCIAS

CANTARELLA, Giulio E.; CASCETTA, Ennio. Dynamic processes and equilibrium in transportation networks: towards a unifying theory. **Transportation Science**, v. 29, n. 4, p. 305-329, 1995.

CANTARELLA, G. E.; WATLING, D. P. Modelling Road traffic assignment as a day-to-day dynamic, deterministic process: a unified approach to discrete-and continuous-time models. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v. 5, n. 1, p. 69-98, 2016.

CASCETTA, E. **Transportation Systems Analysis**. 2nd ed. Boston, MA: Springer US, 2009. v. 29

CASCETTA, E.; CANTARELLA, G. E. Modelling dynamics in transportation networks: state of the art and future developments. **Simulation practice and theory**, v. 1, n. 2, p. 65-91, 1993.

CHENG, Tao; HAWORTH, James; WANG, Jiaqiu. Spatio-temporal autocorrelation of road network data. **Journal of Geographical Systems**, v. 14, n. 4, p. 389-413, 2012.

CHU, Ka; CHAPLEAU, Robert. Augmenting Transit Trip Characterization and Travel Behavior Comprehension. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2183, p. 29–40, 2010.

CRAWFORD, F.; WATLING, D. P.; CONNORS, R. D. A statistical method for estimating predictable differences between daily traffic flow profiles. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 95, p. 196–213, 2017.

CREMER, M.; KELLER, H. A new class of dynamic methods for the identification of origin-destination flows. **Transportation Research Part B**, v. 21, n. 2, p. 117–132, 1987.

DAGANZO, Carlos F.; SHEFFI, Yosef. On stochastic models of traffic assignment. **Transportation science**, v. 11, n. 3, p. 253-274, 1977.

GIRAUD, Timothée **osrm**: Interface Between R and the OpenStreetMap-Based Routing Service OSRM. R package version 3.1.1. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=osrm>. Acesso em: 2018.

HABTEMICHAEL, Filmon G; CETIN, Mecit. Short-term traffic flow rate forecasting based on identifying similar traffic patterns. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 66, p. 61 – 78, 2016.

HAZELTON, Martin L. Inference for origin – destination matrices: estimation, prediction and reconstruction. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 35, n. 7, p. 667-676, 2001.

IPLANFOR. Fortaleza Hoje. **Revista Fortaleza 2040**, Fortaleza, ano II, n. 4, 2015.

KUMAR, S. Vasantha; VANAJAKSHI, Lelitha. Short-term traffic flow prediction using

seasonal ARIMA model with limited input data. **European Transport Research Review**, v. 7, n. 3, p. 21, 2015.

LIMA, Lara Silva. **Espraiamento Urbano Por Autossegregação e Seus Impactos na Acessibilidade Urbana de Fortaleza**. 2017. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2017.

LO, H. P.; ZHANG, N.; LAM, William HK. Estimation of an origin-destination matrix with random link choice proportions: a statistical approach. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 30, n. 4, p. 309-324, 1996.

MIN, Wanli; WYNTER, Laura. Real-time road traffic prediction with spatio-temporal correlations. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 19, n. 4, p. 606-616, 2011.

OLIVEIRA, M. V. **A Natureza dos Padrões de Variação Espaço-Temporal do Volume Veicular em Ambiente Urbano: Estudo de Caso em Fortaleza**. 2004, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

OLIVEIRA NETO, Francisco Moraes et al. Matrizes Origem-Destino Estáticas Em Redes De Transportes. **Revista Transportes**. v. 24, n. 1, p. 107–119, 2016.

ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. 4th ed. West Sussex, UK: Wiley, 2011.

PITOMBEIRA NETO, Anselmo Ramalho. **Dynamic bayesian statistical models for the estimation of the origin-destination matrix**. 2015. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2015.

PITOMBEIRA NETO, Anselmo Ramalho; BERTONCINI, Bruno Vieira; LOUREIRO, Carlos Felipe Grangeiro. **Abordagem Bayesiana na Estimção de Matrizes Origem-Destino Sintéticas em Redes de Transportes**. Anais do XXV ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Belo Horizonte, 2011.

PITOMBEIRA NETO, Anselmo Ramalho; OLIVEIRA NETO, Francisco Moraes; LOUREIRO, Carlos Felipe Grangeiro. Statistical models for the estimation of the origin-destination matrix from traffic counts. **Revista Transportes**, v. 25, n. 4, p. 1-13, 2017.

ROESS, Roger P.; PRASSAS, Elena S.; MCSHANE, William R. **Traffic engineering**. Pearson/Prentice Hall, Hoboken, NJ, 2004.

STATHOPOULOS, A.; KARLAFTIS, M. Temporal and spatial variations of real-time traffic data in urban areas. **Transportation Research Record**, n. 1768, p. 135–140, 2001.

VARDI, Yehuda. Network tomography: Estimating source-destination traffic intensities from link data. **Journal of the American statistical association**, v. 91, n. 433, p. 365-377, 1996.

WARDROP, John Glen. **Some theoretical aspects of road traffic research**. *In*: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1, n. 3, p.362-378. London, UK, 1952.

WATLING, David P.; CANTARELLA, Giulio E. Modelling sources of variation in transportation systems: theoretical foundations of day-to-day dynamic models. **Transportmetrica B: Transport Dynamics**, v. 1, n. 1, p. 3-32, 2013.

WEIJERMARS, Wilhelmina Adriana Maria. **Analysis of urban traffic patterns using clustering**. Ph.D. dissertation, Univ. Twente, Enschede, The Netherlands, 2007.

WILLIAMS, Billy M.; HOEL, Lester a. Modeling and Forecasting Vehicular Traffic Flow as a Seasonal ARIMA Process: Theoretical Basis and Empirical Results. **Journal of Transportation Engineering**, v. 129, n. 6, p. 664–672, 2003.

XIA, Jingxin et al. Reliable Short-Term Traffic Flow Forecasting for Urban Roads: Multivariate Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity Approach. **Transportation Research Record**, v. 2343, n. 1, p. 77-85, 2013.