

LUCAS EDUARDO ARAÚJO DE MELO

**INFLUÊNCIA DA INFRAESTRUTURA CICLOVIÁRIA E DOS FLUXOS DE
CICLISTAS NO ACESSO ÀS OPORTUNIDADES DE EMPREGO E ESTUDO NA
CIDADE DE SÃO PAULO**

São Paulo

2022

LUCAS EDUARDO ARAÚJO DE MELO

**INFLUÊNCIA DA INFRAESTRUTURA CICLOVIÁRIA E DOS FLUXOS DE
CICLISTAS NO ACESSO ÀS OPORTUNIDADES DE EMPREGO E ESTUDO NA
CIDADE DE SÃO PAULO**

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa de Pós-graduação)

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia de
Transportes

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Augusto Isler

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 25 de Janeiro de 2022

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catálogo-na-publicação

Melo, Lucas Eduardo Araújo de
INFLUÊNCIA DA INFRAESTRUTURA CICLOVIÁRIA E DOS FLUXOS DE
CICLISTAS NO ACESSO ÀS OPORTUNIDADES DE EMPREGO E ESTUDO
NA CIDADE DE SÃO PAULO / L. E. A. Melo -- versão corr. -- São Paulo, 2022.
117 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Distribuição de viagens 2.Bicicletas 3.Função de impedância I.Universidade
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de
Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

*À minha esposa Mariana,
e pais, Eduardo e Cláudia.
Por sempre acreditarem nos meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor de toda sabedoria que me concedeu a honra de servi-lo nessa área do conhecimento e colocou pessoas certas em diferentes momentos e lugares ao longo da minha formação pessoal e acadêmica.

Ao Prof. Rainer König da Technische Universität Dresden por me apresentar e inspirar o meu ingresso na área de transportes. Aos meus professores da UFPE Prof. Oswaldo Lima Neto, Prof. Maurício Andrade e Profa. Maria Leonor Alves Maia pela base na minha formação e ao incentivo na continuidade dos estudos na pós-graduação.

Ao meu orientador, Prof. Cassiano Isler, pela paciência, dedicação e apoio nos desafios acadêmicos e pessoais, pelo acolhimento em seu laboratório e pela honra de ter sido um dos seus primeiros alunos de mestrado. Aos demais professores do PTR, pelo vasto conhecimento compartilhado.

À minha família, pelo apoio constante e incentivo para que viesse a estudar em São Paulo. Aos amigos de Recife, por acreditarem no meu potencial. Aos colegas e amigos do mestrado, em especial Gabriel Caldeira e Renata Akemi, pelas discussões e trabalhos realizados juntos. Aos novos amigos representados pela Igreja Presbiteriana Paulistana, por serem a minha família em São Paulo.

À minha esposa Mariana, por ter deixado sua família em Recife e se juntado a mim nesse projeto de vida, pela paciência nas horas de dificuldade e pelas alegrias compartilhadas, confiança e companheirismo. A você, todo o amor.

“Disse Daniel:

Seja bendito o nome de Deus,

De eternidade a eternidade, porque Dele é a sabedoria e poder;

É Ele quem muda o tempo e as estações,

Remove reis e estabelece reis;

Ele dá sabedoria aos sábios e entendimento aos inteligentes.

Ele revela o profundo e o escondido;

Conhece o que está em trevas,

E com Ele mora a luz.”

(Livro de Daniel 2:20-22, Bíblia Sagrada)

RESUMO

Apesar dos avanços teóricos observados nas últimas décadas, a tomada de decisão no âmbito do planejamento cicloviário sob a perspectiva da acessibilidade e pelo uso de modelos tradicionais de demanda ainda é um desafio. Enquanto, esses modelos continuam sendo utilizados a partir da perspectiva da mobilidade para todos os modos de transportes, sua aplicação quanto ao modo cicloviário é particularmente afetada pela ausência da coleta periódica de dados de demanda obtidos por meio de pesquisas domiciliares e pelo uso de medidas eventualmente inadequadas de custo generalizado. Consequentemente, torna-se difícil a análise da influência da infraestrutura cicloviária nos níveis de acesso às oportunidades urbanas por meio da bicicleta no médio prazo. Assim, esta dissertação tem como objetivo analisar a influência combinada dos fluxos de ciclistas e da infraestrutura cicloviária na acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo ao incorporar dados sobre aqueles fluxos em determinados arcos de uma rede viária urbana a um modelo sintético de distribuição de viagens do tipo gravitacional. Os parâmetros de uma função de impedância combinada (função de Tanner) foram estimados analiticamente a partir de um algoritmo de minimização do erro ortogonal normalizado entre as matrizes alvo e modelada. O método proposto foi aplicado em um estudo de caso na cidade de São Paulo entre os anos de 2014 e 2017, período em que foram realizadas intervenções estruturais na rede cicloviária. A cada ano do período de análise foram estimados os parâmetros da função de impedância levando em consideração três diferentes custos generalizados (distância, tempo de viagem e *suitability*) para captar as variações da função de impedância e nos níveis de acessibilidade. Os resultados apontam para importância da consideração adequada dos custos generalizados e indicam o quanto proporcionar uma rede cicloviária bem conectada e contínua impacta positivamente a acessibilidade potencial. Entretanto, observa-se que o planejamento cicloviário tende a falhar quando executado à parte das características do uso do solo. Além disso, o método se mostra útil como apoio à tomada de decisão em um planejamento voltado à acessibilidade.

Palavras-chave: bicicleta; acessibilidade; distribuição de viagens; função de impedância.

ABSTRACT

Despite the theoretical advances observed in recent decades, decision-making in cycling planning based on an accessibility perspective and by means of traditional demand models is still challenging. While these models have been used from a mobility point of view for all transport modes, applying them to cycling is especially affected by the lack of a recurrent demand data collection obtained from household surveys and by the use of eventually unsuitable measures of generalized cost of bicycle travel. Therefore, it becomes difficult to analyze the influence of cycling infrastructures on accessibility levels to urban activities by bicycle in the medium term. Thus, this dissertation aims to analyze the combined influence of bicycle flows and the cycling infrastructure on potential accessibility to job and study opportunities by adding cycling flow data observed in several links of a network to a synthetic model of trip distribution of a gravitational type. The combined deterrence function parameters (Tanner function) are analytically estimated by minimizing the normalized orthogonal error between the target and modeled matrices. The proposed method is applied in a case study in the city of Sao Paulo in the period between 2014 and 2017, when structural interventions on the cycling network were observed. For each year within this analysis period the deterrence function parameters were estimated by considering three different generalized costs (distance, travel time and suitability) to capture variations on the deterrence function and accessibility levels across the time. Results point to the importance of considering suitable generalized costs for cycling and indicate how much ensuring a continuous and well-connected cycling network has a positive impact on potential accessibility. However, it is observed that cycling planning tends to fail when designed apart from land use characteristics. Furthermore, the method is useful as a decision-making support tool for a planning based on an accessibility perspective.

Keywords: cycling; accessibility; trip distribution; deterrence function.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Principais formatos das funções de impedância	34
Figura 2: Fluxograma do método proposto para o cálculo da acessibilidade potencial	46
Figura 3: Algoritmo de otimização de busca em duas etapas.....	52
Figura 4: (a) Densidade de empregos e matrículas escolares; (b) Renda média familiar	55
Figura 5: Sistema metro-ferroviário de São Paulo	56
Figura 6: Evolução da rede cicloviária de São Paulo.	57
Figura 7: Rede cicloviária da cidade de São Paulo 2017	58
Figura 8: Pontos de contagem na rede viária de São Paulo.....	60
Figura 9: Funções de impedância calibradas por modelo de custo generalizado	68
Figura 10: Acessibilidade potencial total às oportunidades de emprego e estudo na cidade de São Paulo pelo modo cicloviário	71
Figura 11: Acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo na cidade de São Paulo entre 2014 e 2017	74
Figura 12: Variação da acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo na cidade de São Paulo entre 2014 e 2017	77
Figura 13: Superfície de resposta da função de minimização A.1	98
Figura 14: Superfície de resposta da função de minimização A.2	98
Figura 15: Superfície de resposta da função de minimização A.3	99
Figura 16: Superfície de resposta da função de minimização A.4	100
Figura 17: Superfície de resposta da função de minimização A.5	101
Figura 18: Superfície de resposta da função de minimização A.6	101
Figura 19: Superfície de resposta da função de minimização A.7	102
Figura 20: Superfície de resposta da função de minimização A.8	103
Figura 21: Curvas de nível da função genérica de minimização.....	104
Figura 22: Resultados do algoritmo de procura - Etapa para $\beta = 4$	106
Figura 23: Resultados do algoritmo de procura - Passo B	107
Figura 24: Representação do sistema dos gases nos estados macro (a), meso (b) e micro(c)	108
Figura 25: Algoritmo de minimização de Hyman (1969)	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distância equivalente dos atributos da rede viária	63
Tabela 2: Parâmetros estimados da função de impedância e o total de viagens das matrizes alvo e estimada	65
Tabela 3: Parâmetros estimados da função de impedância e o total de viagens das matrizes alvo e estimada	66
Tabela 4: Análise descritiva da acessibilidade potencial das zonas de tráfego	72
Tabela 5: Funções de minimização de erro	97
Tabela 6: Resultados do algoritmo de procura - Passo A para $\beta = 4$	105
Tabela 7: Resultados do algoritmo de procura – Passo B	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Propostas de Bicycle Suitability.....	28
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Objetivo	16
1.2. Justificativa	17
1.3. Organização da pesquisa	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1. Acessibilidade: do conceito à aplicação	20
2.2. Modelagem do modo ciclovitário	26
2.3. Métodos de estimação de funções de demanda	32
2.4. Modelagem e planejamento do modo ciclovitário no contexto nacional	38
2.5. Comentários acerca da revisão da literatura	43
3. MÉTODO	45
3.1. Dados de entrada do modelo	47
3.2. Matriz OD alvo	48
3.3. Estimação da função de demanda	49
4. APLICAÇÃO	54
4.1. Estudo de caso: cidade de São Paulo	54
4.2. Dados e parâmetros	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1. Parâmetros da função de demanda	65
5.2. Acessibilidade potencial	71
6. CONCLUSÕES	80
6.1. Limitações da pesquisa	81
6.2. Sugestões para futuras pesquisas	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
APÊNDICE A	96
APÊNDICE B	104
ANEXO A	108
ANEXO B	112
ANEXO C	115

1. INTRODUÇÃO

À medida que as cidades se tornam mais populosas, os problemas decorrentes dos transportes urbanos se tornam cada vez mais complexos, não apenas pelo aumento do número de deslocamentos em termos absolutos, mas também devido à distribuição das oportunidades sociais e econômicas no tempo e no espaço. Devido à característica derivada da maior parte da demanda pelo transporte urbano, a viagem em si não é um objetivo primário, mas um objetivo secundário resultante do desejo de acessar as atividades urbanas, o problema do transporte está intimamente ligado ao uso do solo urbano.

Apesar das oportunidades urbanas serem a causa da demanda por transporte, há uma relação biunívoca entre o uso do solo e os sistemas de transportes, de modo que intervenções e políticas realizadas em um dos sistemas provocam consequências no outro e vice-versa. Entretanto, observa-se, historicamente, a existência de uma assimetria nas políticas voltadas a esses dois elementos urbanos, cujas decisões foram, e em grande parte das cidades ainda são pensadas e tomadas de forma independente (HANDY, 2005).

Esse equívoco tem contribuído, juntamente com outros fatores de ordem econômica e política, com o crescimento desordenado dos centros urbanos e a consequente queda na qualidade de vida nas cidades. Por um lado, observa-se o aumento da dificuldade e da desigualdade no acesso às oportunidades econômicas, sociais e culturais. Por outro lado, o foco dado à priorização dos modos motorizados tem gerado perdas econômicas devido ao aumento do tempo de viagem provocado pelos congestionamentos, assim como impactos ambientais causados pelo aumento da poluição, e sociais devido aos acidentes, por exemplo. Dessa maneira, o planejamento independente desses dois sistemas tem levado a um modelo de desenvolvimento urbano insustentável (GEURS; VAN WEE, 2004).

Banister (2008) destaca dois pontos em relação ao processo de planejamento urbano que são cruciais para permitir o desenvolvimento de cidades sustentáveis. O primeiro diz respeito à integração do planejamento do uso do solo e do sistema de transportes por meio da substituição do foco no aumento da mobilidade dos indivíduos pelo aumento no acesso às oportunidades urbanas disponíveis. O segundo ponto é a inversão de prioridades quanto ao uso dos modos motorizados em relação aos modos não motorizados.

O planejamento voltado à mobilidade parte da ideia de que o problema do transporte está relacionado à maneira como os indivíduos viajam e das dificuldades, ou impedâncias, associadas aos deslocamentos no sistema de transporte. Em certo sentido, essa perspectiva busca melhorar os aspectos relativos à viagem em si, como o tempo, os custos e a velocidade. Porém, ignora a característica derivada da demanda por transporte. Dessa maneira, observa-se

o aparecimento de efeitos contraditórios às medidas adotadas. Por exemplo, com o objetivo de diminuir o tempo de viagem, amplia-se a capacidade viária para aumentar a velocidade operacional, que por sua vez fomenta uma demanda reprimida que, em um curto período, satura a infraestrutura viária e o tempo de viagem volta a ser um problema (FERREIRA; PAPA, 2020).

Por outro lado, a acessibilidade por ser definida como a extensão com que os sistemas de transportes e o uso do solo permitem o acesso dos indivíduos às oportunidades e atividades em seus respectivos destinos por meio de diferentes modos de transporte (GEURS; VAN WEE, 2004). É importante notar que a ideia de acessibilidade estabelece uma relação entre os sistemas de transportes e as atividades urbanas. Segundo os autores, o termo acessibilidade deve ser entendido sob o ponto de vista espacial, isto é, a combinação entre a quantidade de atividades existentes em uma região e a relativa facilidade/dificuldade de se chegar até ela. Já o termo acesso deve ser entendido sob a perspectiva dos indivíduos, ou seja, a combinação entre a quantidade de atividades urbanas disponíveis e a facilidade/dificuldade de alcançá-las por meio de diferentes modos de transporte.

A principal, e crucial, diferença entre essas duas perspectivas (mobilidade e acessibilidade) é que no planejamento sob o aspecto da acessibilidade, a mobilidade é vista como um meio para se alcançar as atividades urbanas e apenas um dos componentes do planejamento, juntamente com o uso do solo e as restrições temporais, por exemplo. Ou seja, o aumento da mobilidade contribui para o aumento da acessibilidade, mas não é considerada como sua finalidade.

Logo, o planejamento orientado à acessibilidade permite uma clara associação entre o uso do solo e a infraestrutura dos sistemas de transportes, o que pode levar os tomadores de decisão a uma visão mais ampla do papel dos transportes não somente em relação ao fenômeno da mobilidade, mas também quanto à sua contribuição para a equidade social e equilíbrio ambiental (GIANNOTTI *et al.*, 2021; LUCAS; VAN WEE; MAAT, 2016).

Em relação à priorização dos modos não motorizados destacada por Banister (2008), a bicicleta tem sido apontada como elemento importante nesse processo. Segundo o autor, juntamente com políticas de uso do solo que promovam a diminuição das distâncias percorridas entre as origens e destinos, o modo cicloviário se apresenta como uma alternativa competitiva em relação aos modos motorizados em viagens mais curtas. Além disso, a bicicleta se destaca pelo atendimento porta a porta, incentivo ao exercício físico, emissão nula de poluentes e de baixos ruídos ao longo do deslocamento, e menor custo relativo de aquisição e manutenção do veículo frente aos modos motorizados, englobando os pilares

sociais, ambientais e econômicos do desenvolvimento sustentável (EHRGOTT *et al.*, 2012; HANDY; VAN WEE; KROESEN, 2014; PORTUGAL, 2017).

Apesar dos seus benefícios, deve-se ter em mente que o planejamento cicloviário faz parte de um sistema de transportes, inserido em um contexto complexo e sujeito a múltiplas forças que atuam na construção do ambiente urbano, como o uso do solo, especulação imobiliária, processos de gentrificação e exclusão social, transporte de cargas e os conflitos pelo espaço viário, de modo que a bicicleta não deve ser entendida como a solução única para o problema do transporte, como por muito tempo foi atribuído ao automóvel, mas parte importante das potenciais soluções.

Para isso, o incentivo à adesão da bicicleta como modo de transporte diário enfrenta diversos desafios, como as atitudes dos indivíduos em relação ao modo cicloviário, *status*, conveniência, clima, topografia, conforto e segurança viária. Além disso, a infraestrutura cicloviária, apesar de não ser suficiente, é uma condição necessária para incentivar o uso da bicicleta. A presença de ciclovias e ciclofaixas no sistema viário possui uma forte correlação positiva com o aumento da demanda por viagens de bicicleta devido ao aumento da percepção de segurança viária, conforto e velocidade dos usuários.

A partir da integração entre os dois pontos apontados por Banister (2008), entende-se que a implementação das infraestruturas cicloviárias é uma etapa importante para ampliar o acesso às oportunidades urbanas ao invés de contribuir somente com a melhora dos aspectos ligados ao deslocamento por bicicleta.

A técnica 4 Etapas (comumente denominada Modelo 4 Etapas) é considerada a principal estrutura pela qual diferentes modelos de demanda são aplicados no apoio à tomada de decisão. Entretanto, a utilização dessa técnica presume que intervenções devem ser consideradas com base nos fluxos estimados ao final dos modelos de alocação, ou seja, são decisões baseadas puramente nos aspectos da mobilidade. Portanto, dada a sua disseminação, esta pesquisa baseia-se em modelos tradicionais que compõem essa técnica para estimar medidas de acessibilidade que viabilizem a análise de sua variação quanto às oportunidades de emprego e estudo à medida que a rede cicloviária sofre alterações.

Porém, diferentemente dos modos motorizados, cuja aplicação desses modelos já estão bem consolidados no sentido de se conhecerem as principais características que afetam os padrões de deslocamento, escolha de modo e de rota, o mesmo não pode ser afirmado quando comparado com o modo cicloviário, uma vez que as suas particularidades requerem certas adaptações na aplicação. Nesse sentido, dois aspectos principais são abordados nesta dissertação.

O primeiro diz respeito à composição dos custos de viagem, que impactam diretamente os modelos de Distribuição de Viagens, Escolha Modal e Alocação de Tráfego. Broach, Dill e Gliebe (2012) afirmam que durante um longo período a modelagem do modo cicloviário, quando era incluída nesse mérito, estava restrita à etapa de Escolha Modal. Quando incluída na etapa de Alocação de Tráfego, assumia-se que motoristas e ciclistas consideravam e avaliavam os atributos do ambiente construído e dos aspectos do sistema viário da mesma maneira, assim como adotavam a minimização do tempo de viagem como mesmo critério de escolha de rota. Entretanto, evidências apontam que aspectos ligados à topografia, volume de tráfego e presença de infraestruturas são tão importantes quanto, ou até mais importante do que, o tempo de viagem (EHRGOTT *et al.*, 2012; HOOD; SALL; CHARLTON, 2011).

No âmbito do planejamento cicloviário, a presença de infraestrutura cicloviária desempenha um papel crucial nos custos generalizados, que por sua vez impactam na estimação de métricas de acessibilidade, como a acessibilidade potencial, por meio da função de impedância. Apesar de não estimar um modelo de escolha de rotas, esta pesquisa considera diferentes modelos de custos já estabelecidos na literatura na aplicação dos modelos tradicionais de demanda.

O segundo aspecto está relacionado à existência de uma assimetria entre a frequência da coleta de dados sobre a demanda por transportes e a relativa rapidez com que as infraestruturas cicloviárias podem ser implementadas no sistema de transportes. Geralmente, esses dados são coletados por meio de Pesquisas Domiciliares de Origem e Destino, cujos padrões de viagem são sistematizados na forma de matrizes Origem-Destino (OD). Todavia, devido aos elevados custos humano, financeiro e de tempo para coleta de dados em uma amostra significativa da população, essas pesquisas são realizadas em grandes intervalos de tempo (GE; FUKUDA, 2016; OLIVEIRA NETO; PITOMBEIRA NETO, 2016). Em contrapartida, as infraestruturas cicloviárias podem sofrer grandes expansões em um curto período, como no caso da cidade de São Paulo, cuja a rede cicloviária aumentou mais de 400 km entre 2013 e 2016 (CET, 2019).

Uma vez que a disponibilidade de infraestrutura cicloviária impacta os custos de viagem, o padrão de deslocamentos e a demanda por viagens de bicicleta podem sofrer variações significativas em período relativamente curto de tempo. Mas, devido à ausência de dados sobre a demanda, torna-se difícil verificar essas alterações de forma objetiva no médio prazo. A literatura apresenta como alternativa para superar tais dificuldades a utilização dos métodos de estimação de matrizes OD por meio de dados de fluxo de veículos, como forma de considerar a demanda observada por meio de dados que podem ser coletados com relativa

facilidade comparados às pesquisas Origem-Destino (CASCETTA, 1984; PARRY; HAZELTON, 2012; VAN ZUYLEN; WILLUMSEN, 1980).

Esta pesquisa propõe-se a responder a questão da relação entre a disponibilidade de infraestrutura cicloviária e os níveis de acesso às oportunidades urbanas em um horizonte de médio prazo, aqui admitido como o período de aproximadamente dez anos. O método adotado baseia-se na análise da variação da impedância gerada por intervenções de grande porte em uma rede cicloviária a partir da combinação de modelos de Distribuição de Viagem e de estimação de matrizes OD baseados em dados de fluxo de bicicletas. Com isso, torna-se possível gerar insumos para etapa de diagnóstico dos planos cicloviários, e suas revisões periódicas mais frequentes, para a tomada de decisão no âmbito do planejamento estratégico.

A literatura aponta que o aumento da oferta de infraestrutura cicloviária diminui os custos de viagem, de modo que se espera um aumento na acessibilidade às atividades urbanas à medida que são implementadas novas ciclovias e ciclofaixas (EHRGOTT *et al.*, 2012; GROND, 2016; HOOD; SALL; CHARLTON, 2011; MENGHINI *et al.*, 2010). Além disso, a disponibilidade dessas infraestruturas apresenta uma relação direta com o total de viagens por bicicleta (ZUO e WEI, 2019), influenciando os fluxos de ciclistas observados, cujos efeitos nos níveis de acessibilidade devem ser considerados.

Para efeitos de aplicação, a cidade de São Paulo apresenta-se como um interessante estudo de caso. A partir da segunda metade da última década, os esforços do poder público municipal em ampliar a malha cicloviária resultaram na construção de aproximadamente 400 km entre o início de 2014 e o final de 2016 (CET, 2019). A partir do ano de 2014 a Companhia de Engenharia de Tráfego (CET) passou a incluir dados sobre os fluxos de ciclistas nas pesquisas anuais sobre volumes e velocidades dos veículos nas principais vias da cidade. Dessa maneira, o estudo de caso fornece o contexto e os dados apropriados para aplicação do método proposto.

1.1. Objetivo

Considerando o contexto do planejamento cicloviário orientado à acessibilidade e os desafios referentes à modelagem do modo bicicleta, esta dissertação tem o objetivo de analisar alterações da acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo considerando intervenções estruturais em uma rede cicloviária e os fluxos urbanos de ciclistas em um horizonte de planejamento de médio prazo. A fim de alcançar tal objetivo, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a. Caracterizar os custos generalizados dos arcos da rede viária de São Paulo considerando a disponibilidade de infraestrutura em cada ano de análise no período entre 2014 e 2017;
- b. Estimar os parâmetros das funções de impedância de um modelo gravitacional de Distribuição de Viagens combinado com um modelo de estimação de matrizes OD baseado em dados de fluxo de bicicletas;
- c. Analisar os efeitos da configuração da rede cicloviária e dos fluxos de ciclistas na acessibilidade potencial estimada a partir das funções de impedância.

1.2. Justificativa

Diante das vantagens potenciais do planejamento sob o ponto de vista da acessibilidade frente à perspectiva da mobilidade, tem-se observado um aumento no número de estudos acadêmicos e, conseqüentemente, um avanço teórico em relação ao tema. Todavia, pesquisadores têm questionado a ausência de aplicações desse conceito no campo prático no processo de planejamento de transportes em geral (HANDY, 2020; PROFFITT *et al.*, 2019).

Apesar da multiplicação de projetos de redes cicloviárias no contexto nacional a partir da promulgação da Lei Federal 12.587/12 (BRASIL, 2012), popularmente conhecida como Lei de Mobilidade Urbana, é possível observar que esse fenômeno também se repete. Ao longo dos últimos anos, alguns dos principais centros urbanos brasileiros elaboraram planos cicloviários integrados com o objetivo de estabelecer metas e diretrizes de implantação dessas infraestruturas. Todavia, até onde foi possível constatar, nenhum desses planos utiliza, de forma objetiva, medidas de acessibilidade como indicador no processo de tomada de decisão, apesar de alguns deles colocarem a acessibilidade como um dos seus objetivos.

O Plano Cicloviário de São Paulo (CET, 2019), por exemplo, estabelece como uma das diretrizes a ampliação da acessibilidade e mobilidade por meio da garantia de um deslocamento seguro e confortável, e da conectividade entre as origens e destinos dos usuários. Todavia, as métricas de avaliação das infraestruturas implementadas são restritas às pesquisas de percepção ao longo do deslocamento, de contagens volumétricas e de número de acidentes. A proposta do plano diretor cicloviário da cidade de Porto Alegre (PORTO ALEGRE, 2008), por sua vez, é baseada nos modelos tradicionais de demanda, em que a decisão de implantação das novas infraestruturas é tomada a partir dos fluxos estimados nos arcos da rede, apesar da atratividade entre origens e destinos também ser uma das diretrizes. Assim como o plano cicloviário integrado de Fortaleza (FORTALEZA, 2015), que apresenta

critérios semelhantes, levando em consideração as linhas de desejo dos ciclistas e a atratividade, sem, com isso, adotar métricas de avaliação da acessibilidade.

Uma estratégia comum por parte das prefeituras é a implantação da infraestrutura cicloviária por meio de Planos de Metas, em que uma certa quantidade de novas infraestruturas, normalmente medida em termos do total de quilômetros a serem implantados, é proposta de acordo com a disponibilidade de recursos econômicos para o período.

Entretanto, decisões relacionadas à priorização de regiões no recebimento de novas infraestruturas a cada período do Plano de Metas ainda são baseadas em argumentos técnicos subjetivos, muitas vezes com o objetivo de evitar o conflito de interesses no uso do espaço viário. É possível perceber também que os tomadores de decisão ainda se preocupam em avaliar as medidas implementadas a partir de conceitos, métodos e indicadores voltados à qualidade das viagens, claramente baseados em um planejamento voltado à perspectiva da mobilidade ao invés da acessibilidade. Consequentemente, percebe-se a ausência da aplicação de métricas objetivas no âmbito do planejamento cicloviário, cuja interpretação dos seus resultados tenham sólido embasamento conceitual para orientar a tomada de decisão. Com isso, observa-se que as atuais redes cicloviárias dos principais centros urbanos brasileiros ainda se apresentam de forma fragmentada, descontínua e marcadas pela desconexão entre origens e destinos, limitando o acesso dos indivíduos às atividades por meio da bicicleta.

Neste contexto, a principal motivação desta pesquisa é que o uso de medidas de acessibilidade seja atualmente o mais adequado para o planejamento de transportes, particularmente do modo cicloviário, devido à possibilidade de relacioná-los com outros aspectos urbanos. Dessa maneira, apresentar um método que permita o cálculo dos níveis de acessibilidade com uma maior frequência por meio de dados menos laboriosos e mais rápidos de serem coletados, como os dados de fluxo de bicicletas, se apresenta como a principal contribuição teórica da pesquisa, cujas consequências práticas são de grande valor aos tomadores de decisão. Apesar de não fazer parte do escopo desta pesquisa, isso permite, por exemplo, analisar os impactos sociais do resultado da relação entre as infraestruturas de transporte e do uso do solo por meio das desigualdades de acesso às oportunidades econômicas (LUCAS; VAN WEE; MAAT, 2016; PEREIRA; SCHWANEN; BANISTER, 2017; PRITCHARD *et al.*, 2019).

1.3. Organização da pesquisa

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos. O Capítulo 2 diz respeito à revisão da literatura sobre o contexto e a problemática da pesquisa, a fundamentação teórica do método adotado, assim como a sua contribuição acadêmica e prática. Em seguida, o Capítulo 3 descreve o método adotado, seus principais componentes e a relação entre eles. O Capítulo 4 descreve o estudo de caso na cidade de São Paulo, cujos resultados da aplicação do método proposto são apresentados e discutidos no Capítulo 5, seguido das conclusões, limitações e sugestões para trabalhos futuros no Capítulo 6.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta revisão bibliográfica são abordados os principais temas relativos ao planejamento cicloviário. O capítulo está dividido em cinco seções, em cuja primeira apresentam-se o conceito de acessibilidade, suas principais métricas, as vantagens do planejamento baseado nesse conceito e as dificuldades enfrentadas na sua aplicação no campo prático. Em seguida, são apresentadas as soluções encontradas na literatura sobre a modelagem do modo cicloviário. A terceira seção apresenta a fundamentação teórica para o método de estimação da parcela de impedância da medida de acessibilidade utilizada na pesquisa, seguida de uma apresentação do estado da arte da modelagem e do planejamento do modo cicloviário no contexto nacional. O capítulo é encerrado com as conclusões acerca da revisão.

2.1. Acessibilidade: do conceito à aplicação

Rubin (2017) afirma que a complexidade da relação entre o sistema de transportes e o uso do solo é marcada pelas condições de causa e efeito. Sabe-se que alterações no sistema de transportes possuem impactos diretos no uso do solo e vice-versa, apesar dos efeitos serem processados em diferentes escalas temporais. Nesse sentido, destaca-se que o processo de transformação do uso do solo devido às alterações no sistema de transportes ocorre, em geral, de forma mais lenta, enquanto o efeito inverso acontece de forma mais rápida.

Apesar dessa relação ter sempre existido, o planejamento de ambos os sistemas foi, por muito tempo, realizado de forma relativamente independente. Portugal (2017) traça um breve panorama da evolução histórica dos conceitos e do escopo de atuação dos profissionais envolvidos com a mobilidade e seu planejamento, e destaca que elementos de todas as fases ainda estão presentes, em maior ou menor grau, em cada contexto urbano. O autor apresenta a seguinte divisão:

- Tráfego: ênfase e prioridade ao tráfego motorizado, particularmente o automóvel, que tem nos níveis de serviço (capacidade, velocidade e tempo) a medida de desempenho mais adotada;
- Transporte: ênfase ao transporte motorizado e sua fluidez, mas procura abranger também outros sistemas (transporte coletivo) e a integração entre os diferentes modos;
- Mobilidade: ênfase nas viagens, valorização dos seus aspectos quantitativos e o atendimento da demanda, e na consolidação de um padrão de deslocamentos resultante da ocupação do solo existente;

- Mobilidade sustentável: inclusão de novas dimensões (sociais, ambientais e econômicas) e complexidade na análise da mobilidade ao destacar a multimodalidade, dos efeitos negativos das externalidades e da relação biunívoca com o uso do solo, destacando a acessibilidade como instrumento integrador de ambos os sistemas.

Apesar da acessibilidade ser enfatizada apenas no momento mais recente, Levine (2020) argumenta que essa ideia é conhecida há pelo menos um século pelos urbanistas. Durante esse período, esse conceito vem sendo transformado, ganhando novas dimensões e sentidos, seja na sua aplicação ou em sua definição teórica, e conclui que essas incorporações são particularmente importantes para mudança de paradigma do planejamento da mobilidade para a acessibilidade.

Segundo Handy (2020), é preciso desmistificar o falso entendimento de que o conceito de mobilidade pode ser utilizado de maneira intercambiável ao conceito de acessibilidade. Segundo essa perspectiva, melhorar a forma de deslocamento dos indivíduos em termos da diminuição do tempo de viagem por meio do incremento da velocidade resulta em melhores níveis de acessibilidade. Entretanto, diversos estudos têm demonstrado que essa hipótese é parcialmente correta, dado que a mobilidade está englobada no conceito de acessibilidade. Isso tem levado ao seguinte paradoxo: em um primeiro momento, o aumento das velocidades (maior capacidade e fluidez) aumenta a acessibilidade pela diminuição do tempo de viagem, mas com o passar do tempo verifica-se o aumento das distâncias percorridas (espraiamento urbano) e dos custos de viagem (engarrafamentos, menores tempos de viagem), resultando na queda dos níveis de acessibilidade (BANISTER, 2008; BOCAREJO; OVIEDO, 2012; FERREIRA; BATEY, 2007; FERREIRA; PAPA, 2020).

Entretanto, dada a característica derivada da demanda por transportes, o que importa é analisar a dificuldade dos indivíduos para chegar aonde eles desejam ou precisam, seja devido à ineficiência do sistema de transportes ou pelas dificuldades geradas pela distribuição das atividades no espaço urbano. Dessa maneira, o planejamento baseado na acessibilidade é, atualmente, o mais apropriado para tratar dos problemas do transporte pois une a causa dos deslocamentos (uso do solo) e a sua qualidade (impedância dentro do sistema de transportes) (HANDY, 2020).

A acessibilidade pode ser admitida sob duas abordagens distintas. A abordagem denominada positiva é aplicada quando a acessibilidade é utilizada como uma variável explicativa para descrever um fenômeno espacialmente dependente como, por exemplo, em

modelos de regressão para escolha de residência. Este é o caso da pesquisa conduzida por Saghapour, Moridpour e Thompson (2018), que utilizaram a acessibilidade como variável explanatória para examinar a sua utilidade em modelos de demanda para os modos não motorizados. Há ainda uma segunda abordagem denominada como normativa, adotada nesta pesquisa, em que as medidas de acessibilidade são utilizadas como indicadores para tomada de decisão por meio da definição de diferentes cenários criados no processo de planejamento (LEVINE, 2020).

Existem variadas formas de medir acessibilidade (BOCAREJO; OVIEDO, 2012; NEUTENS *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2017; VAN WEE; GEURS, 2011), cuja escolha depende do nível de complexidade e aplicabilidade do problema específico (PAPA *et al.*, 2016). De acordo com Geurs e Van Wee (2004), os indicadores de acessibilidade podem ser divididos em quatro categorias:

- Indicadores baseados em infraestrutura: são medidas que analisam o funcionamento da oferta do sistema de transportes em termos de capacidade, nível de serviço operacional e tempo de viagem;
- Indicadores baseados na localização: basicamente divididos em dois subgrupos, as medidas de contorno, ou de oportunidades acumuladas, e as medidas de acessibilidade potencial. As medidas de contorno podem ser calculadas sob dois pontos de vista, enquanto o primeiro é dado em termos da quantidade de oportunidades que potencialmente podem ser alcançadas para um tempo ou custo de viagem fixo, o segundo determina o tempo ou custo de viagem necessário para alcançar um determinado número fixo de oportunidades. Já a acessibilidade potencial é uma medida que pondera o potencial total de oportunidades disponíveis a partir de uma função de impedância ao deslocamento para alcançá-las;
- Indicadores baseados no indivíduo: são medidas que incorporam restrições espaciais e temporais sob a perspectiva do indivíduo, isto é, a acessibilidade é medida a partir da análise se os indivíduos são capazes de participar de determinadas atividades dada a sua restrição de tempo (se o indivíduo está disponível em determinado horário para exercer uma atividade) e de espaço (se o indivíduo consegue chegar em tempo hábil para exercer tal atividade);

- Indicadores baseados em medidas de utilidade: essas medidas caracterizam a acessibilidade como o resultado de uma série de escolhas discretas relacionadas ao transporte baseadas na Teoria da Utilidade Aleatória. Servem especialmente para realizar análises econométricas da acessibilidade decorrentes de escolhas realizadas pelos indivíduos.

Geurs e Van Wee (2004) discutem as principais vantagens e desvantagens de cada métrica. Em relação aos indicadores baseados em infraestrutura, afirmam que esta ignora os potenciais impactos do uso do solo nas estratégias de transporte, refletindo a filosofia da mobilidade como conceito equivalente à acessibilidade. As medidas de acessibilidade baseadas no indivíduo necessitam de dados demasiadamente desagregados e específicos, não sendo comuns em pesquisas de grande escala. Já os indicadores baseados em medidas de utilidade possuem a desvantagem de serem de difícil interpretação e de comunicação, pois não podem ser facilmente explicadas na ausência de conhecimentos relacionados à teoria da utilidade, por exemplo.

Sobre os indicadores de localização, por um lado as medidas de oportunidades acumuladas, apesar de incluírem elementos do uso do solo e do sistema de transportes, apresentam a desvantagem de não avaliar seu efeito combinado. Além disso, não levam em consideração as percepções e preferências dos indivíduos, ou seja, assume-se que todas as oportunidades são igualmente desejadas, independentemente do custo de viagem ou do tipo de atividade (GEURS; VAN WEE, 2004).

Por outro lado, a acessibilidade potencial, derivada dos modelos gravitacionais, como o modelo de Hansen (1959) (Equação 1), avalia o efeito combinado do uso do solo e do sistema de transportes ao assumir uma relação inversa entre a atratividade das oportunidades e o custo de viagem.

$$A_i = \sum_{j=1}^n E_j \cdot f_{(c_{ij})} \quad (1)$$

em que A_i : Acessibilidade da zona i ;

E_j : Total de oportunidades disponível na zona j ; e

$f_{(c_{ij})}$: Função de impedância em termos do custo de viagem entre i e j .

A primeira parcela diz respeito ao uso do solo, que pode ser determinada pela quantidade potencial, ou total, de atividades disponíveis em cada zona de tráfego em um modelo agregado. Pode ser entendida como o grau de atratividade de cada zona e medida a partir de diferentes variáveis de acordo com a atividade de interesse, como o percentual de área construída voltada ao comércio, número de vagas de emprego, total de matrículas escolares ou locais de lazer.

A segunda parcela está relacionada à percepção da dificuldade de se deslocar no espaço urbano e é geralmente representada por uma função de impedância, cujo valor é inversamente proporcional ao custo de viagem e pode ser medido em termos de tempo de viagem ou uma composição de diferentes atributos como tempo, custo monetário, conforto, segurança sob a forma do custo generalizado de viagem (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011). Essa função pode assumir diversas formas, discutidas com mais detalhes na Seção 2.3 desta dissertação.

A aplicação e a interpretação de medidas de acessibilidade podem se tornar complexas, particularmente os indicadores de utilidade (HANDY, 2020). De acordo com Vecchio, Tiznado-Aitken e Hurtubia (2020), em sua revisão sobre transporte e equidade na América Latina, há uma maior preferência pelas medidas de acessibilidade baseadas na localização devido à sua relativa simplicidade. Seu uso também é bastante comum no contexto asiático (LUO; ZHAO, 2021). Nesse sentido, Geurs e Van Wee (2004) afirmam que a acessibilidade potencial é particularmente interessante no processo de mudança de abordagem da mobilidade para acessibilidade devido à utilização de conceitos já consolidados, como a noção de impedância.

Apesar do maior potencial no uso do conceito de acessibilidade, vários pesquisadores têm alertado para a existência de uma defasagem entre os avanços teóricos e científicos, e aplicações objetivas pelos profissionais responsáveis pelo planejamento urbano. Proffitt *et al.* (2019) ilustram esse problema por meio de uma pesquisa sobre os planos de mobilidade urbana em 42 metrópoles americanas. Os resultados mostram que praticamente todos os planos mencionam o termo acessibilidade, mas apenas 10% a definem e a grande maioria adota o termo mobilidade de forma equivalente ao conceito de acessibilidade. Cerca de 80% propõem maior quantidade de opções de transporte com o objetivo de diminuir o congestionamento de automóveis sem incluir aspectos do uso do solo, enquanto apenas 53,4% avaliam o desempenho dos projetos em termos de conexão entre origens e destinos.

Em contrapartida, a pesquisa conduzida por Hallgrimsdottir *et al.* (2016) analisa dados longitudinais de 2004 e 2014 sobre o grau de implementação de políticas de transporte baseadas na acessibilidade em cerca de 290 municípios suecos. Os resultados mostram um

aumento do número de municípios que aplicaram essas políticas, apesar do modelo apontar a existência de uma heterogeneidade no grau de intensidade de suas implantações.

A fim de investigar o uso de medidas de acessibilidade no planejamento da mobilidade urbana pelos tomadores de decisão, Boisjoly e El-Geneidy (2017) coletaram informações de profissionais de transporte e uso do solo, sendo a maioria do contexto norte americano. Cerca de 90% dos entrevistados estavam bem familiarizados com o conceito de acessibilidade e usavam-no em seus trabalhos. Por outro lado, 78% deles conheciam métricas de acessibilidade, mas apenas 55% aplicavam-na efetivamente. Isto é, há uma importante discrepância entre a quantidade de profissionais que estão familiarizados com as métricas e os que realmente as aplicam em seus projetos. Dentre os que utilizavam métricas de acessibilidade, apenas 36% faziam por iniciativa própria, 30% devido à obrigatoriedade dos planos e apenas 22% afirmaram que as métricas já eram ferramentas adotadas antes de assumirem seus cargos. Já os respondentes que não as utilizavam, afirmaram que as principais barreiras para implementação eram a falta de conhecimento sobre as métricas em si, sobre os tipos de dados necessários, assim como dificuldades em coletá-los e os tipos de ferramentas disponíveis.

Quanto a essa última, Silva *et al.* (2017) argumentam que há uma assimetria entre o desenvolvimento de ferramentas de planejamento (*softwares*), baseadas em ideias e necessidade de dados complexos, que estão longe do contexto prático; e a expectativa não-realista dos usuários - planejadores e tomadores de decisão - quanto à facilidade do uso e aos resultados dessas ferramentas. A pesquisa também aponta que os desenvolvedores devem procurar eliminar problemas com relação à dificuldade no uso das ferramentas e falta de dados ou permitir que dados mais fáceis de serem coletados possam ser utilizados, principalmente em relação aos modos não motorizados e de integração intermodal.

Por fim, diversos estudos surgiram ao longo da última década com o intuito de analisar a acessibilidade por meio do modo ciclovitário. Saghapour, Moridpour e Thompson (2017) propuseram um índice (*Cycling Accessibility Index*) para determinar a acessibilidade potencial para diferentes motivos de viagem. Outros autores exploraram medidas de oportunidades acumuladas (FAGHIH IMANI; MILLER; SAXE, 2019; MCNEIL, 2011) e muitos têm focado em medir o acesso por bicicleta ao transporte público e o efeito combinado de ambos nos níveis de acessibilidade (PRITCHARD *et al.*, 2019; SOUZA *et al.*, 2017; ZUO *et al.*, 2020; ZUO; WEI, 2019).

Todavia, os modelos tradicionais de demanda continuam sendo as principais ferramentas de apoio ao planejamento de transportes. Neste sentido, a forma como a medida de

acessibilidade potencial pode ser calculada apresenta-se como uma vantagem para acelerar a disseminação do conceito de acessibilidade no campo prático devido à utilização de elementos bem consolidados nesses modelos. Porém, a modelagem do modo ciclovitário ainda apresenta diversos desafios, conforme tratado na próxima seção.

2.2. Modelagem do modo ciclovitário

Dada a importância da bicicleta no desenvolvimento sustentável, cresceu o interesse pelo estudo e desenvolvimento de ferramentas de apoio ao planejamento ciclovitário, tendo sido os modelos tradicionais de demanda aplicados ao modo ciclovitário como ponto de partida. Entretanto, Liu *et al.* (2020a) ressaltam que esses modelos foram, ou ainda são, elaborados sob o *modus operandi* dos modos motorizados, de maneira que a sua aplicação à bicicleta requer uma série de adaptações à realidade dos ciclistas.

Um dos aspectos de adequação da bicicleta a esses modelos perpassa pela estimação dos custos de viagem para utilização nos modelos de distribuição de viagens e escolha modal. Apesar de estudos nesse sentido serem antigos, Broach, Dill e Gliebe (2012) afirmam que normalmente assume-se comportamento idêntico de ciclistas e motoristas no processo de escolha de rotas sob dois aspectos. Primeiro, ambos possuem o mesmo objetivo, ou critério, de minimizar o tempo de viagem na escolha de rotas. Segundo, ambos avaliam os mesmos atributos com os mesmos pesos ao longo da rota. Entretanto, sabe-se que não só o tempo de viagem é importante para os ciclistas, mas também a segurança viária e aspectos ligados à topografia, por exemplo, possuem a mesma, ou talvez até maior, importância na escolha de rota (GROND, 2016).

Baseado nessa lógica, uma série de pesquisas foram conduzidas com o intuito de entender quais características da rede viária seriam mais proeminentes para os ciclistas, de modo a auxiliar a implantação de novas infraestruturas ciclovitárias nos arcos com maior probabilidade de uso da bicicleta. Porém, antes de apresentar o desenvolvimento histórico dos estudos relacionados ao tema, é preciso definir certos termos que, segundo Lowry *et al.* (2013), são comumente utilizados de forma intercambiável na literatura e, muitas vezes, não fica claro o que está sendo tratado pelos autores em diferentes pesquisas.

- *Bicycle Suitability*: avaliação do conforto e segurança percebidos pelo ciclista em um segmento linear da rede viária.

- *Bikeability*: avaliação do conforto, segurança e conveniência ao acesso de destinos em relação à toda extensão da rede cicloviária.
- *Bicycle Friendliness*: avaliação de toda a comunidade em relação ao uso da bicicleta, incluindo o *bicycle suitability* e *bikeability*, as leis, as políticas de educação no trânsito e a cultura de respeito e aceitação da bicicleta como modo de transporte.

As definições apresentam diferentes escalas de percepção quanto ao uso da bicicleta. *Bicycle Suitability* está relacionado à percepção do ciclista no âmbito local da rede viária. Na literatura, está geralmente associado aos indicadores de nível de serviço (*Bicycle Level of Service* – BLOS), mas, seguindo o mesmo princípio, pode ser entendido como uma medida inversa ao custo generalizado percebido pelo ciclista em cada arco da rede viária.

O *Bikeability* engloba a definição anterior, mas trata da avaliação da rede cicloviária como um todo. Em geral, uma rede composta por arcos com boas medidas de *Bicycle Suitability* contribui positivamente com o nível de *Bikeability*. Entretanto, se a rede não conecta bem as origens e destinos, a tendência é que ela seja percebida com um baixo *Bikeability*. Nesse sentido, Lowry *et al.* (2013) apontam o *Bikeability* como uma medida semelhante à noção de acessibilidade por bicicleta, mas voltada à avaliação da infraestrutura em si.

O *Bicycle Friendliness* está relacionado a uma percepção mais ampla do modo cicloviário em uma comunidade, envolvendo questões culturais, jurídicas e de políticas de incentivo. Por exemplo, uma região pode apresentar um bom *Bikeability*, mas enfrentar graves barreiras culturais ao uso da bicicleta, tornando-a uma área de baixo *Bicycle Friendliness*.

A adoção de indicadores relacionados ao BLOS foi a primeira tentativa de abordar corretamente o uso viário dos ciclistas por meio da identificação de arcos da rede com maior *Bicycle Suitability*. Segundo Harkey, Reinfurt e Knuiman (1998), o primeiro índice nesse sentido foi proposto em 1978 pela equipe responsável pela elaboração do plano cicloviário de Geelong, Austrália. Baseados na própria experiência, os gestores definiram o conceito de *Bicycle Stress Level* (BLS), em que se assume a pretensão dos ciclistas em minimizar, simultaneamente, o esforço físico e o estresse mental devido aos conflitos com o tráfego motorizado ao longo da rota. A partir de variáveis como distância, velocidade máxima permitida, largura da faixa de rolamento e volume de tráfego motorizado, a equipe classificou as principais vias da cidade em cinco categorias, sendo o nível “A” de maior compatibilidade e o nível “E” de menor compatibilidade ao uso da bicicleta.

A pesquisa de Sorton e Walsh (1994) pode ser considerada a pioneira a considerar as percepções dos ciclistas na composição desses índices ao invés de serem baseadas somente nas interpretações subjetivas dos planejadores (HARKEY; REINFURT; KNUIMAN, 1998). A partir de então, diversos índices de *Bicycle Suitability* foram sendo propostos, tendo sido o auge dessa abordagem na década de 1990. Os principais trabalhos sobre o tema são apresentados no Quadro 1. A principal ideia que norteia essas medidas é a categorização de arcos da rede mais adequados (níveis de serviço de A a E) ao uso da bicicleta sob a perspectiva do usuário para, assim, apoiar a decisão de implantação de novas infraestruturas cicloviárias.

Quadro 1: Propostas de *Bicycle Suitability*

Autor	Índice	Variáveis
Davis (1987)	Bicycle Safety Index Rating (BSIR)	-Largura da faixa de rolamento -Velocidade dos veículos motorizados -Velocidade máxima permitida -Fatores de qualidade do pavimento -Fatores de localização
Epperson (1994)	Road Condition Index (RCI)	-Volume diário do tráfego -Número de faixas de rolamento -Velocidade máxima permitida -Fator de qualidade do pavimento -Fator de localização
Sorton e Walsh (1994)	Bicycle Stress Level (BSL)	-Largura da faixa de rolamento -Velocidade máxima permitida -Volume de tráfego -Largura das vias dedicadas à bicicleta
Dixon (1996)	Bicycle Level of Service (BLOS)	-Nível de serviço operacional da via para os veículos motorizados -Existência de conexões multimodais -Nível de manutenção da pista -Largura da faixa utilizada pela bicicleta -Conflitos (barreiras físicas, cruzamentos, estacionamento na via) -Velocidade da bicicleta
Harkey, Reinfurt e Knuiman (1998)	Bicycle Compatibility Index (BCI)	-Presença de infraestrutura cicloviária -Largura da faixa dedicada à bicicleta -Volume de tráfego da faixa adjacente -Volume de tráfego das outras faixas -Velocidade dos veículos motorizados -Estacionamento na via

Continuação

Quadro 1: Propostas de *Bicycle Suitability*

Autor	Índice	Variáveis
Jensen (2007)	Bicycle Level of Service (BLOS)	-Uso do solo -Volume de tráfego por hora -Volume de pedestres por hora -Número de faixas de rolamento -Velocidade dos veículos motorizados -Estacionamento na via -Presença de paradas de ônibus -Tipo e largura da infraestrutura cicloviária
Transportation Research Board (2010)	Bicycle Level of Service (BLOS)	-Fator de largura de faixa -Fator de volume de tráfego -Fator de velocidade dos veículos motorizados -Fator de qualidade do pavimento
Mekuria, Furth e Nixon (2012)	Level of Traffic Stress (LTS)	- Largura da via -Velocidade dos veículos motorizados - Obstáculos no percurso - Infraestrutura cicloviária
Majumdar e Mitra (2018)	Bicycle Level of Service (BLOS)	-Estacionamento na via -Fator de qualidade do pavimento -Volume de tráfego -Uso do solo -Velocidade dos veículos motorizados

Entretanto, há algumas dificuldades na utilização na maior parte dessas medidas. Majumdar e Mitra (2018) afirmam que geralmente são aplicados modelos de regressão linear para estimação do BLOS, que se trata de uma variável ordinal, de modo que a leitura dos resultados deve ser feita com mais precaução. Mais apropriado seria a aplicação de regressões lineares ordenadas. Além disso, Mekuria, Furth e Nixon (2012) afirmam que ainda não está claro como foi estabelecida a relação entre os níveis de serviço e os atributos da rede no cálculo do BLOS proposto pelo Transportation Research Board (2010), dificultando a reprodutibilidade da estimação dos seus parâmetros em outros contextos.

Com a disseminação dos modelos de escolha discreta, pesquisas de preferência declarada passaram a ser utilizadas para estudar critérios de escolha de rota e identificar os principais atributos que a afeta. A partir do trabalho pioneiro de Sener, Eluru e Bhat (2009), passou-se a entender o mecanismo de escolha de rota do ciclista como um sistema de trocas (*trade-offs*) entre diferentes atributos da rota, muitas vezes conflitantes entre si. Ou seja, entende-se que neste processo o ciclista pondera, por exemplo, entre declividade e distância, volume de tráfego e velocidade máxima permitida, semáforos e rotatórias, na escolha de cada arco da rota entre a origem e o destino.

Paralelamente, a popularização de equipamentos de *Global Positioning Systems* (GPS) também foi decisiva para construção de novos modelos para avaliação dos arcos da rede no

sentido de *Bicycle Suitability*. Ao combinar modelos de escolha discreta com dados de GPS como pesquisas de preferência revelada, Menghini *et al.* (2010) apresentaram o primeiro modelo de escolha de rotas para ciclistas.

Uma limitação das pesquisas de preferência revelada é que apenas uma rota é observada (a escolhida pelo ciclista) entre a origem e o destino dentre o infinito número de combinações de arcos para a construção de uma rota (GROND, 2016). Entretanto, modelos discretos exigem o conhecimento de todas, ou um conjunto, de rotas alternativas para compor o experimento, de maneira que algoritmos de geração de rotas alternativas têm sido propostos primeiramente para diminuir o universo de possível rotas para um número finito, mas com alta probabilidade de escolha e, posteriormente, permitir formulação de cenários de escolha.

Dentre os métodos de geração de rotas mais conhecidos, é possível citar o *link elimination* (RIESER-SCHÜSSLER; AXHAUSEN, 2013), cujo objetivo é identificar as k-ésimas rotas de menor custo generalizado a partir da eliminação dos arcos da rede utilizados na rota anterior; o *doubly stochastic generation function* (BOVY; FIORENZO-CATALANO, 2007), que identifica as rotas mais prováveis como variáveis estocásticas; e o *modified route labeling* (BROACH; GLIEBE; DILL, 2010), que consiste em criar rotas alternativas baseadas no *Label correcting algorithm* maximizando um critério de escolha de rota.

Diversos artigos publicados seguiram essa linha, como por exemplo Hood, Sall e Charlton (2011) que replicaram o modelo de Menghini *et al.* (2010) no contexto americano a partir da coleta de dados de GPS por meio de *smartphones*. Broach, Dill e Gliebe (2012) se destacam ao proporem um modelo de escolha de rotas baseado na equivalência entre os atributos considerados na análise e a distância de viagem. Em outras palavras, tornou-se possível interpretar o peso de cada atributo em termos de uma distância equivalente, ou seja, um custo generalizado em termos de distância. Por exemplo, em uma viagem de uma milha cuja declividade varia entre 2% e 4%, o ciclista estaria disposto a percorrer 1,375 milhas em uma rota alternativa com declividade entre 0% e 2%, ou seja, uma rota 37,5% maior para evitar aquela declividade, *ceteris paribus*.

A partir de então, diversos autores passaram a estudar outras variáveis com potencial influência na escolha de rota, como a percepção de segurança viária, número de semáforos, uso do solo, arborização, conversões à esquerda, clima, tempo e aspectos físicos do ciclista (GROND, 2016; PRATO; HALLDÓRSDÓTTIR; NIELSEN, 2018). Resultados mostram uma correlação positiva de arcos da rede com mais comércio, mais arborizados e a presença de heterogeneidades quanto ao condicionamento físico do ciclista.

Outros autores, como Ehr Gott *et al.* (2012), adotaram uma abordagem biobjetiva como critério de escolha de rota, afirmando que ambas as medidas de tempo de viagem e *Bicycle Suitability* são igualmente importantes. Neste caso, a rota escolhida é definida pelos autores como a mais eficiente, entendida como aquela que, para um mesmo tempo de viagem não há uma rota de maior nível de *Suitability* e, simultaneamente, para esse nível de *Suitability*, não há uma rota com menor tempo de viagem. Isso incentivou a proposição de estudos relacionados à modelagem da velocidade do ciclista e, conseqüentemente, uma estimativa mais acurada do tempo de viagem com intuito de utilizá-lo como custo generalizado, como por exemplo as pesquisas conduzidas por Bigazzi e Lindsey (2019) e Clarry, Faghieh e Miller (2019).

Os avanços concernentes à composição dos custos generalizados nos arcos da rede viária sob a perspectiva dos ciclistas foram cruciais para aplicação adequada dos modelos tradicionais de demanda ao modo cicloviário. Levando em consideração a técnica 4 Etapas, esses custos afetam diretamente não só os modelos de alocação de tráfego, mas também as funções de utilidade dos modelos de escolha modal e, particularmente para esta dissertação, a função de impedância utilizada nos modelos de distribuição de viagens.

Arellana *et al.* (2020) estimaram um *Bikeability Index* (BI) para representar a atratividade do arco para o uso da bicicleta (nota-se que os autores adotaram o termo *Bikeability* para um índice relacionado ao termo *Bicycle Suitability*), e aplicaram-no a um modelo direto de demanda para estimar os fluxos nos principais arcos da rede viária de Barranquilla. Apesar de todo um contexto voltado à importância do planejamento em termos de acessibilidade, os autores indicam que as novas infraestruturas cicloviárias deveriam ser implementadas nos arcos com maiores fluxos de ciclistas, mantendo a tomada de decisão sob a perspectiva da mobilidade.

Liu *et al.* (2020a) propuseram um modelo logístico aninhado que compreende as etapas de geração de viagens, escolha modal e escolha de destino incorporando diferentes medidas de custo generalizado, sendo duas delas baseadas nos modelos de Broach, Dill e Gliebe (2012) e Jensen (2007). Além disso, o modelo inclui diferentes motivos de viagem e características individuais com o intuito de analisar o impacto de diferentes configurações de rede cicloviária na demanda por viagens de bicicleta. Como forma de validação, os autores compararam os fluxos de ciclistas estimados com os fluxos observados em determinados arcos da rede nos horários de pico e a distribuição dos custos generalizados em relação às viagens observadas e as modeladas. Dados os efeitos captados por esse modelo, Liu *et al.* (2020b) conduziram uma análise custo-benefício comparando os custos de diferentes configurações da rede cicloviária

em Estocolmo e os benefícios relativos à saúde, redução de emissões e diminuição de acidentes de acordo com a variação da demanda devido à troca modal para bicicleta.

2.3. Métodos de estimação de funções de demanda

Entender a dinâmica dos fluxos de viagem no tempo e no espaço é uma prerrogativa essencial para diversos estudos relacionados à Engenharia de Transportes, particularmente no processo de planejamento e avaliação de políticas de mobilidade e acessibilidade (KRISHNAKUMARI *et al.*, 2020). A forma mais usual de representar, definir e organizar os padrões de viagem no contexto urbano é por meio da construção de matrizes origem-destino (OD), em que o valor de cada célula representa o número de viagens entre origens e destinos (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

De forma genérica, as matrizes OD podem ser construídas a partir de três métodos distintos. O primeiro refere-se à condução pesquisas de campo para coleta de dados, como as pesquisas domiciliares, por exemplo. O segundo estima a matriz OD por meio de modelos matemáticos denominados modelos sintéticos. Já último método, apesar de também utilizar modelos matemáticos, são conhecidos como modelos de construção de matrizes baseados em dados de fluxo e baseiam-se em lógica distinta dos modelos sintéticos tradicionais (DOBLAS; BENITEZ, 2005; ROSTAMI NASAB; SHAFABI, 2020).

A fim de levantar uma amostra estatisticamente significativa da população e suas viagens, um grande esforço financeiro, humano e de tempo é necessário para realização das pesquisas OD domiciliares (OLIVEIRA NETO; PITOMBEIRA NETO, 2016). Conseqüentemente, esse tipo de levantamento de dados ocorre com pouca frequência e, particularmente em contextos de restrições orçamentárias, essas pesquisas se tornam praticamente inviáveis (NABIZADE GANGERAJ; BEHZADI; BEHZAD, 2017).

Outra limitação dessas pesquisas é que apenas uma pequena proporção de viagens é observada para um dia típico, o que resulta em muitos pares OD nulos ou com poucas viagens na amostra, principalmente após a segmentação por modo de transporte ou horários do dia (OLIVEIRA NETO; PITOMBEIRA NETO, 2016). Dessa maneira, as informações dessas pesquisas são normalmente utilizadas como dados de entrada para estimação de matrizes OD por meio dos outros dois métodos citados anteriormente.

Os modelos sintéticos de estimação de matrizes OD também são conhecidos como modelos de distribuição de viagens e viabilizam estimar o número de viagens em cada célula da matriz a partir de informações disponíveis sobre a demanda (ORTÚZAR;

WILLUMSEN, 2011). Os primeiros métodos, e ainda os mais utilizados atualmente, correspondem aos modelos gravitacionais, baseados na analogia com a teoria gravitacional de Newton.

Segundo Pourebrahim *et al.* (2019), apesar dos modelos iniciais apresentarem um ajuste razoável aos dados observados, faltava-lhes uma justificativa teórica e estatisticamente aceitável, a qual foi demonstrada por Wilson (1967) por meio do método de maximização da entropia, cuja dedução matemática encontra-se no Anexo A desta dissertação. Posteriormente, outros autores chegaram à mesma solução por meio de outros métodos estatísticos como a máxima verossimilhança (EVANS, 1971) e inferência Bayesiana (HYMAN, 1969) para definir melhor ajuste ao fenômeno observado.

Os modelos gravitacionais assumem que o número de viagens é inversamente proporcional a um custo de viagem entre a origem e o destino. Por analogia à teoria gravitacional, adotava-se o número de habitantes na origem e no destino como variável equivalente à massa dos corpos celestes e o inverso do quadrado da distância para representar uma função de custo, posteriormente chamada função de impedância, entre os dois pares OD (corpos celestes) (POUREBRAHIM *et al.*, 2019).

Em seguida, passou-se a utilizar informações *a priori* sobre os padrões de viagens oriundas das pesquisas domiciliares, matrizes estimadas anteriormente e informações provenientes de modelos de geração de viagens. O total de viagens com origem (produzidas) e destino (atraídas) em cada zona passaram a ser ponderadas por funções de impedância, que representam a dificuldade de realizar o deslocamento ao longo da rede viária de acordo com o custo de viagem (Equação 2).

$$T_{ij} = A_i \cdot O_i \cdot B_j \cdot D_j \cdot f(c_{ij}) \quad (2)$$

em que T_{ij} : total de viagens entre a zonas de origem i e destino j ;

O_i, D_j : total de viagens com origem (produzidas) na zona i e destino (atraídas) na zona j ;

A_i, B_j : parâmetros de balanceamento nas zonas de origem i e destino j ;

$f(c_{ij})$: função de impedância do custo generalizado c_{ij} entre as zonas de origem i e destino j .

Devido ao aumento da velocidade comercial dos veículos e, posteriormente, por causa da influência dos congestionamentos, a distância foi substituída pelo tempo de viagem como uma melhor forma de representar a separação espacial entre duas regiões. Mais adiante, passaram a ser consideradas outras questões como o custo monetário, percepções de conforto e

segurança, por exemplo, criando a noção do custo generalizado de viagem como a percepção geral do custo entre as origens e destinos (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

Dessa maneira, a função de impedância passou a ser compreendida não só como uma função de separação espacial entre as origens e destinos, mas como uma percepção da dificuldade (facilidade) de realizar uma viagem dado o custo generalizado. Além disso, Hyman (1969), ao deduzir o modelo gravitacional por meio da Inferência Bayesiana, demonstra que diferentes formas da função de impedância podem ser utilizadas para representar esse fenômeno. As formas mais comuns são a exponencial ($e^{-\beta \cdot c_{ij}}$), potência ($c_{ij}^{-\gamma}$), ou uma combinação de ambas ($c_{ij}^{\gamma} \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}}$) também chamada de função de Tanner, representadas na Figura 1 (SHREWSBURY, 2012; ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011). É possível observar que a função de Tanner possui maior liberdade para acomodar variações de crescimento e decrescimento da função de impedância, particularmente para viagens de menor custo. Por esta razão, a função combinada é adotada nesta pesquisa dado que as viagens por bicicleta são, em geral, mais curtas (GEURS; LA PAIX PUELLO; VAN WEPEREN; 2016).

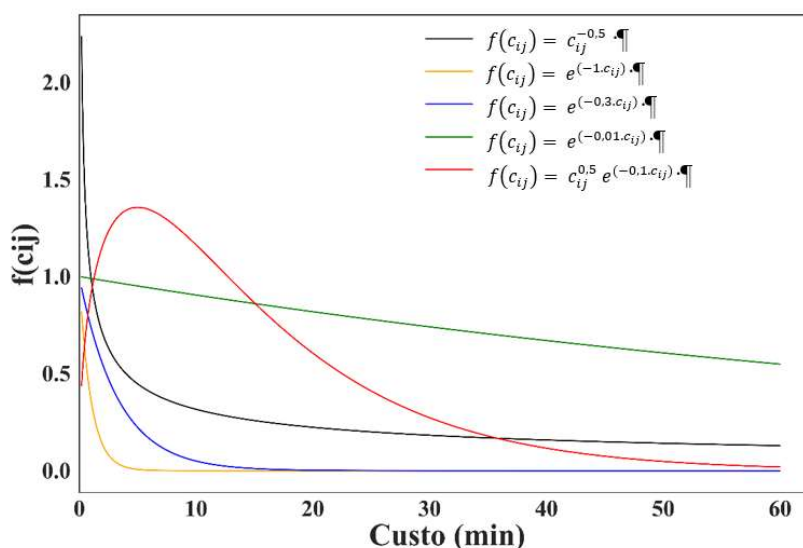


Figura 1: Principais formatos das funções de impedância

Fonte: Ortúzar e Willumsen (2011)

A solução do modelo gravitacional (Equação 2) é dada pela calibração dos parâmetros da função de impedância e dos parâmetros associados às origens e destinos (A_i e B_j), de modo que o conteúdo da matriz sintética estimada seja o mais próximo possível dos dados observados. Hyman (1969) apresenta um método analítico baseado na interpolação linear para

estimar o parâmetro β da função exponencial para minimizar o erro entre os custos médios de viagem das matrizes estimada e observada. O processo e o algoritmo desenvolvido pelo autor são apresentados no Anexo B desta dissertação. Entretanto, Batty (1976) afirma que, apesar de ser um método bastante eficiente, sua principal limitação deve-se à dificuldade de expandi-lo para funções de impedância com dois ou mais parâmetros, como a função de Tanner, e aponta métodos alternativos.

O processo de otimização de funções com duas ou mais variáveis conhecido como método de procura, ou *hill climbing*, deve-se à analogia geométrica entre o relevo e a superfície de resposta gerada pela função de erro de duas variáveis. Em geral, o pressuposto mais importante desses métodos de procura é que a função ou superfície de resposta deve possuir um, e somente um, valor ótimo – o ótimo global. Também é comum que as diferentes funções de erro correlacionadas à cada variável do problema sejam combinadas em uma única função de desempenho, ou função objetivo a ser minimizada, para gerar uma superfície de resposta e permitir a aplicação dos métodos de procura (BATTY, 1976; BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 2006).

Nesse sentido, Batty e Mackie (1972) apresentam e comparam a eficiência de cinco métodos para estimação dos parâmetros da função de impedância da Equação 2 com duas variáveis: processo iterativos de primeira ordem; método de Newton-Raphson e de Fibonacci para múltiplas variáveis; método de procura Simplex; e a procura baseada na convergência quadrática. Os autores apontam que o método de Newton-Raphson parece ser o mais eficiente no caso de modelos espaciais para localização residencial. Batty (1976), por sua vez, demonstra a aplicação para modelos de transportes. Entretanto, apesar do avanço no desenvolvimento de métodos dessa natureza, o método de Hyman (1969) ainda é o mais amplamente utilizado.

O terceiro método mais comum para estimação de matrizes OD origina-se da dificuldade de coleta de dados para aplicação dos métodos anteriores. Os métodos baseados em dados de fluxo vêm sendo desenvolvidos desde a década de 1970 (PITOMBEIRA NETO; OLIVEIRA NETO; LOUREIRO, 2017) e a grande vantagem de sua utilização é a relativa facilidade de coleta de grandes bases de dados devido à possibilidade de automação das contagens de veículos, o que permite a captação de variações diárias e sazonais da demanda (VAN ZUYLEN; WILLUMSEN, 1980).

Nesses modelos, o problema é definido analogamente ao inverso da alocação de tráfego. Genericamente, a alocação de tráfego ocorre da seguinte maneira: conhecidos os totais de viagens em cada célula da matriz OD, é possível estimar, por meio de diferentes modelos e

hipóteses de alocação e escolha de rota, o fluxo de veículos ou de usuários em cada arco da rede no período considerado.

A abordagem inversa aos modelos de alocação é matematicamente representada pela Equação 3. Conhecidos os fluxos nos arcos (V_a), cujos dados podem ser coletados por meio de pesquisas de campo ou equipamentos eletrônicos, esses modelos permitem estimar a matriz mais provável (T_{ij}) que reproduza os fluxos observados, de acordo com a proporção de viagens entre o par OD T_{ij} que passa no arco a (p_{ij}^a) (VAN ZUYLEN; WILLUMSEN, 1980).

$$V_a = \sum_i \sum_j p_{ij}^a \cdot T_{ij} \quad (3)$$

$$0 \leq p_{ij}^a \leq 1$$

em que V_a : fluxo de veículos no arco a ;

p_{ij}^a : proporção do total de viagens entre a origem i e o destino j que utilizam o arco a em sua rota;

T_{ij} : Total de viagens entre a origem i e o destino j .

A variável p_{ij}^a pode ser obtida por meio de diversas técnicas de alocação de tráfego, seja por alocações do tipo “Tudo-ou-nada” ou pelo princípio de Equilíbrio do Usuário (SHEFFI, 1985). A princípio, nem todas as informações oriundas das contagens são úteis para estimação da matriz, uma vez que o fluxo em um arco pode corresponder à soma de fluxos em arcos consecutivos, resultando em uma combinação linear entre informações de outros arcos. Assim, se a área de estudo é dividida em N regiões, a matriz OD seria composta por N^2 células preenchidas pelo total de viagens T_{ij} entre cada par OD. Para resolver o problema, seria necessário, a princípio, coletar informações de N^2 arcos com fluxos independentes e consistentes entre si.

Todavia, como o número de arcos pesquisados normalmente é muito inferior ao número de pares OD (N^2), é impossível determinar uma solução única devido à indeterminação do sistema de equações. Ou seja, existem diversas matrizes OD que podem reproduzir os fluxos observados nos arcos, o que recai em um problema de otimização em que se busca estimar a matriz mais provável para reprodução desses fluxos (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011). Isso se torna cada vez mais complexo à medida que se aumenta o grau de desagregação da área de estudo, em que se aumenta o número de pares origem-destino possíveis.

Portanto, os modelos propostos passaram a considerar informações *a priori* (matrizes OD) como referência à otimização. Segundo Oliveira Neto e Pitombeira Neto (2016), essas

matrizes, também chamadas de matrizes prévias, podem ser de quatro tipos: (a) matriz OD amostrada, obtida a partir métodos de levantamento direto; (b) matriz OD expandida, com base em modelos de demanda; (c) matriz desatualizada, obtida a partir de modelos calibrados com dados amostrais do passado; ou (d) matriz OD subjetiva, construída por analistas baseada no seu conhecimento prévio do fenômeno. Assim, a qualidade da matriz modelada depende fortemente da qualidade da matriz prévia.

Segundo Sun *et al.* (2021), a acurácia da matriz modelada também depende da quantidade dos pontos de coleta de dados sobre fluxo de veículos, que determinam a escala da pesquisa, e sua localização, e está diretamente ligada à quantidade de informações não-redundantes coletadas (combinações lineares dos fluxos). Além disso, a escolha dos locais de observação deve levar em consideração as premissas sobre os modelos de escolha de rota, o que leva a uma noção inicial dos resultados da alocação de tráfego, a fim de aproveitar ao máximo as informações coletadas.

Os modelos de construção de matrizes que têm sido propostos podem ser classificados em duas categorias: aqueles com o intuito de estimar matrizes OD estáticas, cujos parâmetros do sistema não variam ao longo do período de análise; e os que buscam estimar matrizes dinâmicas, que consideram variações dos fluxos ao longo do dia ou entre diferentes dias (PITOMBEIRA NETO; OLIVEIRA NETO; LOUREIRO, 2017). Essas últimas são mais coerentes com o fenômeno real, porém o estudo de matrizes estáticas ainda é amplo e, devido à relativa facilidade de modelagem e apesar de suas simplificações, servem de referência para estimação de matrizes dinâmicas (BERTONCINI, 2010).

Do grupo de modelos para construção de matrizes estáticas, é possível destacar três subcategorias, que variam de acordo com seus pressupostos (BERA; RAO, 2011). No primeiro grupo estão os modelos que não assumem os efeitos de congestionamento, ou seja, assumem fluxo livre, e cuja proporção do tráfego que utiliza um arco da rede é determinado de forma independente fora do processo de estimação da matriz. Os mais usuais são os modelos baseados na maximização da entropia (VAN ZUYLEN; WILLUMSEN, 1980), máxima verossimilhança (SPIESS, 1987), inferência Bayesiana (MAHER, 1983) e mínimos quadrados generalizados (GLS, do inglês *Generalized Least Squares*) (CASCETTA, 1984), cuja dedução matemática encontra-se no Anexo C, dado que foi utilizado como parte do método nesta dissertação.

O segundo grupo é composto por modelos que propõem a relaxação de ambas as premissas anteriores, ou seja, consideram-se os efeitos de congestionamento e a alocação de tráfego faz parte do processo de estimação da matriz OD. Normalmente, adotam-se as

abordagens de Equilíbrio do Usuário (YANG *et al.*, 1992). Por fim, o terceiro grupo corresponde aos modelos que consideram a estimação dos fluxos entre os pares origem destino como dados estocásticos que seguem uma distribuição de probabilidade específica, resolvidos por meio de funções de verossimilhança (HAZELTON, 2000), método dos momentos (HAZELTON, 2003) ou inferência Bayesiana (TEBALDI; WEST, 1998).

É importante ressaltar que a principal limitação desses métodos se deve à ausência de relação entre a demanda e as características socioeconômicas dos usuários da rede, e à possibilidade de estimação da demanda em cenários não existentes. Esses modelos foram inicialmente propostos para estimação de matrizes OD para viagens de automóvel, mas também podem ser aplicados a outros modos, desde que suas particularidades sejam devidamente consideradas (BERTONCINI, 2010).

Nesse contexto, até onde se pôde constatar, o modelo proposto por Ryu (2020) é o único até o momento que se utiliza de métodos baseados em dados de fluxo para estimar matrizes OD para viagens de bicicleta. O método é dividido em dois estágios, em que o primeiro tem por objetivo a geração de matrizes baseados no modelo gravitacional com dados de matrizes prévias e a parcela de impedância é derivada empiricamente. Em seguida, no segundo estágio, aplica-se um método de estimação de fluxos nos arcos, chamado de “*Path Flow Estimator*” proposto por Bell *et al.* (1997), que utiliza os dados observados de fluxo e os fluxos alocados da matriz gerada no primeiro estágio. Ao longo do processo, a matriz estimada no primeiro estágio é refinada a partir dos dados de contagem.

2.4. Modelagem e planejamento do modo ciclovitário no contexto nacional

Ao longo da última década, houve um aumento no interesse, tanto por parte dos tomadores de decisão quanto dos pesquisadores, pelo estudo e promoção do modo ciclovitário, principalmente após a promulgação da Lei Federal 12.587/12 (BRASIL, 2012). Esta seção está dividida em duas partes, a primeira apresenta um panorama das principais pesquisas desenvolvidas no país sobre a bicicleta e a segunda envolve a análise de planos ciclovitários propostos em grandes centros urbanos brasileiros e sua relação com o conceito de acessibilidade.

2.4.1. Pesquisas envolvendo o modo ciclovitário

A reduzida quantidade relativa de deslocamentos por bicicleta e o pequeno número de estudos relacionados ao modo ciclovitário fizeram com que as primeiras pesquisas

desenvolvidas no âmbito nacional se preocupassem particularmente em entender quais seriam as barreiras e motivadores ao uso da bicicleta. Enquanto Teramoto (2008) apresentou uma ampla revisão sobre as características do transporte cicloviário, Silva (2015) explorou os primeiros planos e diretrizes nacionais, particularmente em relação às orientações geométricas das infraestruturas cicloviárias.

Outras pesquisas se ocuparam em estabelecer métodos, em sua maioria de caráter mais qualitativo, que apontam para os fatores que afetam a escolha pela bicicleta nos deslocamentos diários. Sá *et al.* (2016) compararam os padrões de viagens de bicicleta dos dados das Pesquisas OD de São Paulo conduzidas em 1997 e 2007 a fim de encontrar correlações entre o uso da bicicleta e o seu impacto na saúde dos usuários. Os autores concluíram que há uma maior probabilidade no uso da bicicleta para os indivíduos que residem próximo ao trabalho, assim como para a baixa qualidade do transporte público. Particularmente para esses indivíduos, houve uma melhora na sua saúde e qualidade de vida.

Silveira e Maia (2015) também analisaram esses fatores por meio dos construtos da Teoria do Comportamento Planejado. Como resultado, apontam atitudes relacionadas à busca de uma vida mais saudável, segurança e comportamento no trânsito, o tempo de deslocamento, condições meteorológicas, acessibilidade e disponibilidade de infraestrutura cicloviária como as principais motivações à adoção da bicicleta. Conclusões semelhantes foram encontradas por Freitas e Maciel (2017) ao avaliarem a eficácia do Código de Trânsito Brasileiro (CTB) para os usuários de bicicleta.

Enquanto alguns trabalhos apresentaram métodos de planejamento cicloviário voltados à participação social, como por exemplo Chapadeiro (2011) e Malatesta (2014), houve um significativo avanço nas abordagens técnicas no estudo do modo cicloviário. Nesse caso, as pesquisas realizadas por Benedini, Lavieri e Strambi (2019) e Zhang, Magalhães e Wang (2014) utilizaram modelos econométricos (*probit* ordenados) para identificar fatores que afetam o uso da bicicleta nas cidades de São Paulo e Belo Horizonte, respectivamente. As duas pesquisas possuem conclusões similares ao apontarem para a presença de infraestrutura próxima à origem e destino da viagem, tempo de viagem, posse de automóvel, nível de escolaridade e gênero como as principais características que influenciam a escolha do uso da bicicleta.

Assim como no âmbito internacional, algumas pesquisas nacionais se preocuparam em avaliar as características da rede viária e do ambiente construído para identificar os arcos mais adequados ao uso da bicicleta conforme a definição de “*Bicycle Suitability*”. Monari e Segantine (2019) abordaram o tema por meio de métricas semelhantes ao *Bicycle Level of*

Stress (BLS). Silva *et al.* (2014) apresentaram um método de multicritério para definição de rotas, enquanto Pitilin (2016) utilizou o método de intervalos sucessivos para analisar dados de uma pesquisa de preferência declarada quanto à diferentes cenários de rotas. Além disso, Segadilha e Sanches (2014) utilizaram dados de GPS, a exemplo de Menghini *et al.* (2010), de diferentes viagens realizadas por 49 ciclistas na cidade de São Carlos-SP. Em geral, resultados apontam para influência da segurança pública e viária, arborização, volume de tráfego e inclinação da via, em acordo com os resultados das pesquisas internacionais.

No sentido da utilização de modelos de demanda, é possível destacar o artigo desenvolvido por Plaza e Rodrigues da Silva (2013), cujo objetivo foi elaborar procedimentos para estimativa da distância média dos deslocamentos intrazonais realizadas por bicicleta, dada a assimetria entre as curtas distâncias percorridas pelos ciclistas e o nível de agregação das zonas de tráfego em alguns contextos, pois nos casos em que as zonas são muito extensas, o número de viagens internas a cada zona pode acarretar distorções no modelo.

Magalhães, Campos e Bandeira (2018), por sua vez, estimaram um modelo de geração de viagens por meio de uma regressão linear múltipla que correlaciona variáveis de uso do solo, do ambiente construído, as características do sistema viário, a temperatura média diária, incidência de crimes e acidentes envolvendo ciclistas com o fluxo de bicicletas em determinados arcos da rede viária na região sul da cidade do Rio de Janeiro. Os resultados obtidos apontam um impacto negativo da presença de estacionamento na via, do número de acidentes e intersecções viárias, e da quantidade de faixas de rolamento no fluxo total de ciclistas, enquanto a proximidade à infraestrutura cicloviária e as altas temperaturas como fatores positivos àquela variável.

Por fim, até onde foi possível constatar, há apenas um estudo envolvendo o modo cicloviário e medidas de acessibilidade. A pesquisa conduzida por Pritchard *et al.* (2019) na cidade de São Paulo explora o tema da bicicleta juntamente com a acessibilidade. Os autores analisaram as desigualdades no acesso ao emprego a partir de diferentes modos de transporte ao longo do dia e destacam o uso da bicicleta como modo único ou combinado com o transporte público. Concluiu-se naquele trabalho que a oferta adequada de infraestrutura cicloviária e bicicletários ajudam a diminuir as desigualdades de acesso aos empregos devido ao aumento da acessibilidade pela combinação da bicicleta e do transporte público, mas também apontam que os níveis de acessibilidade geradas pelo automóvel ainda são, relativamente, muito superiores aos outros modos de transporte.

2.4.2. Planos cicloviários e a acessibilidade

Nesta seção são apresentadas análises dos planos cicloviários desenvolvidos para os municípios de São Paulo, Curitiba, Porto Alegre e Fortaleza com o intuito de apontar a relação entre o processo de planejamento cicloviário e a acessibilidade.

O Plano de Estrutura Cicloviária de Curitiba (CURITIBA, 2019) foi apresentado em outubro de 2019 com o objetivo de estabelecer novas diretrizes para ampliação da rede cicloviária já existente (208,5 km). Por um lado, a etapa de diagnóstico utiliza dados de demanda provenientes da Pesquisa OD local conduzida em 2017 e dados do uso do solo, e ressalta em seus objetivos a necessidade de conexão cicloviária entre os principais equipamentos urbanos (analogamente ao conceito de acessibilidade). Por outro lado, entretanto, o plano propõe intervenções de novas infraestruturas apenas por meio das características do sistema viário, tanto em termos de hierarquia quanto espaço disponível, isto é, sem que a infraestrutura cicloviária retire capacidade do sistema dos modos motorizados.

É possível observar que na parte propositiva do plano há a ausência de termos relacionados à demanda de viagens por bicicleta ou à métricas relacionadas à acessibilidade, o que significa que as propostas estão concentradas no desenho estrutural da rede e na adequação geométrica das vias para o recebimento dessas infraestruturas ao invés do atendimento da real necessidade dos indivíduos.

A cidade de Fortaleza tem se apresentado como um caso de sucesso no incentivo ao uso da bicicleta a partir de uma combinação de medidas voltadas ao aumento da oferta de infraestruturas cicloviárias, atualmente com 365 km, e de programas de bicicletas compartilhadas. O Plano Diretor Cicloviário Integrado apresentado em 2015 é, em boa parte, responsável por essa mudança na cidade (FORTALEZA, 2015).

Esse Plano apresenta um profundo diagnóstico da demanda do modo cicloviário, abordando aspectos do ambiente físico, características socioeconômicas, acidentes, a estrutura urbana da rede viária, do uso do solo, dos sistemas de transporte e da rede cicloviária disponível, assim como a condução de pesquisas de contagem volumétrica de ciclistas e entrevistas com ciclistas e pedestres. O objetivo principal do plano é definido por “dotar a cidade de instrumentos e infraestrutura eficazes para implantação de uma rede cicloviária integrada ao transporte público e aos equipamentos urbanos”, dando a ideia de conexão, ou acesso, às oportunidades econômicas.

Os princípios e objetivos estabelecidos estão ligados à continuidade da rede, às linhas de desejo dos ciclistas (rotas entre as origens e destinos), conexão com o transporte público e o aumento na segurança viária. Novamente, não há menção sobre o uso de indicadores para

avaliar a implantação das infraestruturas cicloviárias em termos de conectividade, ou acesso, o que torna difícil saber se a rede planejada atende de forma objetiva às viagens potencialmente cicláveis até as oportunidades de emprego e estudo, por exemplo.

O Plano Diretor Cicloviário Integrado de Porto Alegre foi desenvolvido no ano de 2008 e tinha como proposta a implantação de 400 km de infraestruturas cicloviárias no município (PORTO ALEGRE, 2008). O diagnóstico levantado é, em termos de detalhamento, muito semelhante ao plano desenvolvido em Fortaleza. Todavia, o estudo feito para a capital gaúcha utiliza modelos de demanda (técnica 4 Etapas) para estimar o potencial de viagens por bicicleta em um horizonte de 15 anos. Por meio de Pesquisas de Preferência Declarada, o estudo estima modelos de divisão modal a partir de diferentes cenários de infraestrutura cicloviária. Dessa maneira, a partir da alocação de tráfego da demanda estimada de viagens por bicicleta, foram inferidos os arcos da rede com maior fluxo de bicicletas para apoiar a tomada de decisão das futuras infraestruturas.

Apesar do plano ressaltar diferentes aspectos de acessibilidade em três dos quatro objetivos, nenhuma medida de acessibilidade foi calculada como parâmetro de avaliação das novas infraestruturas. Deve-se destacar que o plano desenvolvido para Porto Alegre é o único, até onde foi possível observar, que se utiliza dos modelos de demanda tradicionais como apoio à tomada de decisão, apesar de não levar em consideração aspectos importantes sobre o modo cicloviário discutidos anteriormente nesta dissertação, como o custo generalizado. Se por um lado observa-se um avanço no uso das ferramentas de apoio à tomada de decisão, as conclusões ainda são baseadas na perspectiva do planejamento voltado à mobilidade, em que se pretende implementar novas infraestruturas nos arcos de maior fluxo modelado.

Finalmente, no caso da cidade de São Paulo, os primeiros projetos cicloviários da capital paulista remontam as décadas de 1980 e 1990 e, principalmente devido às barreiras institucionais e organizacionais do governo municipal, grande parte da rede cicloviária atual só foi implementada entre 2013 e 2016 (MALATESTA, 2012). O Plano de Mobilidade (PlanMob) de São Paulo (SÃO PAULO, 2015) define como um dos seus objetivos a melhora da acessibilidade e mobilidade urbana – nota-se que há uma diferenciação entre os dois termos – nos quais a bicicleta deve desempenhar um papel de destaque e estabelece como meta a construção de 1.300 km de novas infraestruturas cicloviárias até o ano de 2028. O processo de implantação é definido pela formulação de Planos de Metas ao longo das diferentes gestões municipais no período.

Após a expansão da rede cicloviária entre os anos 2013 e 2016, foi estabelecido o primeiro Plano de Metas proposto para o biênio 2017-2019 (CET, 2019). Seguindo as

diretrizes do PlanMob 2015, o Plano de Metas 2017-2019 estabeleceu como um dos objetivos a melhora da acessibilidade e a conexão entre as origens e os destinos. Todavia, destaca-se novamente a falta de métricas voltadas à acessibilidade nas etapas de diagnóstico.

Dessa maneira, é possível concluir que, em geral, existe uma falta de conhecimento sobre o nível atual de acessibilidade às oportunidades urbanas pelo modo ciclovitário nos grandes centros urbanos brasileiros, mesmo após a infraestrutura cicloviária ter sido implementada com esse intuito. Assim, enquanto nenhum indicador de avaliação dos objetivos for adotado, particularmente quanto à acessibilidade, os novos Planos de Metas continuarão enfrentando os mesmos dilemas sobre quais locais deveriam receber prioridade de implantação, contribuindo para o ainda baixo nível de utilização da bicicleta.

2.5. Comentários acerca da revisão da literatura

A revisão da literatura aponta para existência de uma assimetria entre o desenvolvimento do conceito de acessibilidade e métricas propostas na literatura, e as aplicações no processo de planejamento de transportes em particular do modo ciclovitário. É possível observar que esse fenômeno ocorre tanto no cenário nacional quanto em países desenvolvidos e tem sido pauta de diversas discussões na comunidade científica.

Pesquisas recentes têm apontado não só a existência de problemas institucionais e culturais, mas também a falta de conhecimento sobre as ferramentas e a coleta dados necessários para estimar métricas de acessibilidade, e os seus potenciais benefícios no planejamento baseado no aumento da acessibilidade. Uma maneira de colaborar para a mudança de perspectiva é através do uso de métodos já consolidados e dados familiares aos utilizados atualmente pelos técnicos e tomadores de decisão, porém interpretados sob o ponto de vista da acessibilidade. Partindo desse princípio, esta pesquisa procura aplicar modelos tradicionais de demanda para obtenção de resultados úteis à construção de medidas de acessibilidade.

Além disso, para utilização desses modelos foram observadas necessidades de adequações ao modo cicloviário quanto aos custos generalizados e à assimetria entre a frequência na coleta de dados sobre a demanda e a velocidade de implantação das infraestruturas cicloviárias, com consequências diretas na impedância. Dessa maneira, esta dissertação procura utilizar custos generalizados mais adequados ao deslocamento por bicicleta, assim como dados mais simples de serem coletados - dados de fluxo de bicicletas - para analisar a variação da acessibilidade potencial a partir de mudanças na infraestrutura cicloviária.

Apesar de adotar estratégia semelhante, a presente pesquisa distingue-se do método apresentado por Ryu (2020) pelo fato de utilizar as observações do fluxo de bicicletas não apenas para possibilitar a estimação de uma matriz origem destino sintética, mas principalmente como fonte de informação auxiliar para calibração dos parâmetros da função de impedância. Assim, viabiliza a análise da variação da acessibilidade potencial no período de curto e médio prazo, sendo esta a principal contribuição teórica da presente pesquisa.

Por fim, foi apresentado o estado da arte dos estudos relacionados à bicicleta no contexto nacional. É possível observar que, apesar do avanço na complexidade dos métodos utilizados, há ainda poucos exemplos de pesquisas relacionadas aos modelos de demanda tradicionais aplicados ao modo ciclovitário, de modo que a presente pesquisa também apresenta uma contribuição para o tema no contexto nacional. Além disso, o método proposto possui importantes implicações práticas do uso de métricas de acessibilidade no processo de planejamento ciclovitário, ausentes na maior parte dos planos elaborados nas cidades brasileiras.

3. MÉTODO

Para os planos cicloviários que têm por objetivo o aumento do acesso às oportunidades urbanas, a estimação de medidas de acessibilidade desempenha papel crucial na etapa de diagnóstico, em que são analisados os efeitos da infraestrutura cicloviária implementada nos níveis de acessibilidade atual. Este capítulo apresenta o método adotado nesta dissertação para o cálculo da acessibilidade potencial, conforme o modelo proposto por Hansen (1959) apresentado na Equação 1. A principal vantagem desse modelo é a presença do termo da impedância, o que permite a estimação dos seus parâmetros por meios dos modelos clássicos de demanda. Além disso, seu conceito é bastante difundido na literatura de transportes, de modo que essa medida possui maior capacidade de difusão entre os técnicos e tomadores de decisão.

Como apontado anteriormente, o cálculo da acessibilidade potencial exige a combinação de informações sobre o uso do solo e da impedância de viagens no sistema de transportes. Uma vez que o foco principal desta pesquisa é a análise da variação da acessibilidade devido às mudanças na infraestrutura cicloviária, maior atenção é dada à estimação dos parâmetros da função de impedância. Já os dados sobre o uso do solo são considerados exógenos e foram admitidos constantes no caso abordado de análises de médio prazo, dado que o processo de transformação desse sistema é relativamente mais lento que o sistema de transportes.

A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas do método para construção de cada cenário analisado na pesquisa. O fluxograma tem início com a calibração dos parâmetros da função de impedância e termina com o cálculo da acessibilidade potencial. Uma vez construídos os cenários propostos e estimados os parâmetros da função de impedância em cada caso, as suas variações ano a ano são analisadas por meio da análise gráfica das curvas de impedância e a verificação das suas consequências nos níveis de acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo. Apesar do método ser aplicável a qualquer modo de transporte e atividade urbana, esta pesquisa concentra-se no acesso às oportunidades de emprego e educação pelo modo cicloviário. Além disso, é assumida uma abordagem agregada no nível de zonas de tráfego.

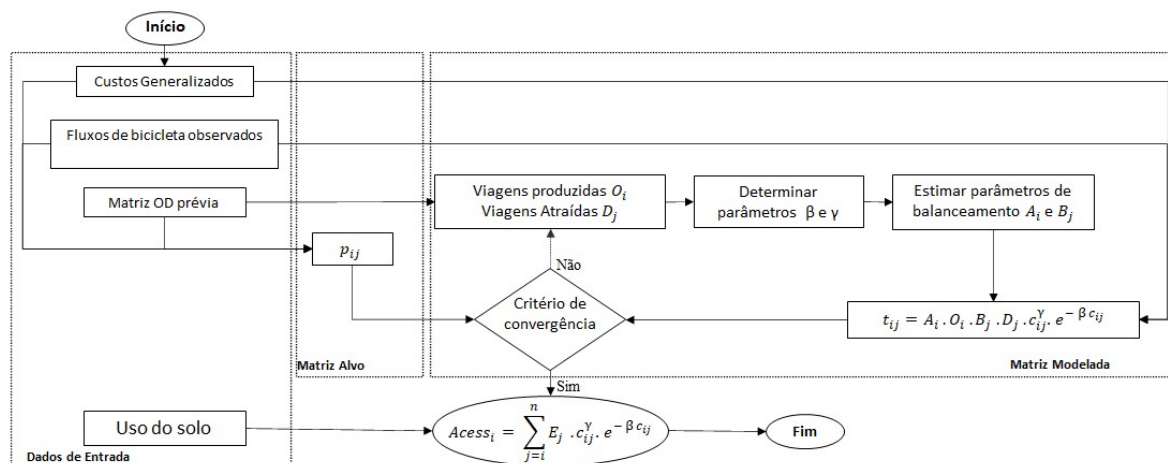


Figura 2: Fluxograma do método proposto para o cálculo da acessibilidade potencial

Resumidamente, o método pode ser descrito da seguinte maneira. Primeiramente é estimada uma matriz alvo p_{ij} a partir da atualização da matriz OD prévia segundo os fluxos observados de bicicletas em certos arcos da rede viária pelo método de Mínimos Quadrados Generalizados (CASCETTA, 1984), de modo que as informações contidas na matriz prévia se aproximem da situação observada no cenário corrente, tanto em relação à demanda representada pelos fluxos quanto à disponibilidade das infraestruturas cicloviárias.

Em seguida, inicia-se o processo de estimação da matriz modelada. A partir da matriz OD prévia, são computadas as viagens produzidas (O_i) e atraídas (D_j) em cada zona de tráfego e, em seguida, são adotados valores para os parâmetros β e γ da função de impedância combinada. Conhecidos os valores de O_i , D_j , β e γ , os parâmetros A_i e B_j são calibrados pelo processo iterativo de Furness (ORTÚZAR E WILLUMSEN, 2011), o que resulta em uma matriz OD sintética. A partir dos dados de fluxos observados, a matriz sintética é atualizada pelo método de Cascetta (1984), resultando na matriz modelada.

As matrizes alvo e modelada são comparadas a partir de um dado critério de convergência. Caso o critério seja atendido, finaliza-se o processo iterativo e os parâmetros β e γ estão estimados. Caso contrário, são atribuídos novos valores para β e γ para estimação de uma nova matriz modelada e posterior comparação com a matriz alvo. O processo é repetido até que o critério de convergência seja atendido. Uma vez estimados os parâmetros da função de impedância, são computadas as informações sobre o uso do solo, no caso desta pesquisa o total de empregos e matrículas escolares em cada zona de tráfego, e calculada a acessibilidade potencial da zona de origem às zonas de destino.

3.1. Dados de entrada do modelo

Quatro tipos de dados de entrada são necessários para aplicação do método: a matriz OD prévia; fluxos de veículos (neste caso, de bicicletas); custos generalizados de viagem entre os centroides das zonas de tráfego; e dados sobre o uso do solo.

A primeira informação é proveniente de uma matriz origem-destino prévia determinada *a priori*, em que os padrões de deslocamento na área de estudo são conhecidos conforme os tipos definidos por Oliveira Neto e Pitombeira Neto (2016), conforme apresentado na página 36 desta dissertação. As matrizes provenientes de pesquisas domiciliares são as mais comumente utilizadas, como no caso desta dissertação, mas em muitos casos os dados coletados são antigos, de modo que as informações estão desatualizadas.

Dessa maneira, o segundo tipo de informação necessária são os dados sobre os fluxos de bicicletas observados em campo com o intuito de prover informações de demanda mais atuais, ou mais coerentes com o cenário em análise. Por um lado, essas informações podem ser coletadas por meio de equipamento eletrônicos, cujo funcionamento não possui restrições horárias para coleta e, portanto, podem fornecer informações sobre a variação ao longo do dia, ou épocas do ano, e contribuir para identificação dos efeitos da sazonalidade.

Por outro lado, podem ser conduzidas pesquisas manuais em um determinado período. Entretanto, devido ao alto custo, essas pesquisas geralmente coletam dados em horários específicos do dia, como nos horários de pico, restringindo as análises. Nesse caso, é necessário segmentar as viagens da matriz prévia de acordo com os horários das pesquisas de campo.

Como apontado no capítulo de revisão da literatura, outra questão importante quanto aos dados de fluxo diz respeito à quantidade de arcos em que as coletas são realizadas e a sua localização no espaço urbano, pois influenciam diretamente o modelo de estimação de matrizes baseado nesses dados. Nesse caso, a literatura apresenta métodos para determinação dos arcos em que as coletas de fluxos deveriam ser conduzidas (ver Sun *et al.*, 2021). Porém, na impossibilidade de se conduzir uma pesquisa dessa natureza apenas para realização de um estudo específico, os dados de fluxo disponíveis podem ser convenientemente utilizados.

A terceira informação de entrada refere-se aos custos generalizados de viagem entre as origens e os destinos. No caso dos modelos agregados, são computados os custos de viagem entre os centroides das zonas de tráfego. Como discutido na Seção 2.2, é fundamental que a composição desses custos seja compatível com a percepção dos ciclistas, principalmente em relação à influência da presença de infraestrutura cicloviária na impedância dos deslocamentos de bicicleta.

Particularmente nesta dissertação, assume-se que os custos generalizados entre os pares OD são informações *a priori* e fixos em cada cenário estabelecido, oriundos de alocações de tráfego do tipo “Tudo-ou-nada” em que não há influência do tráfego de veículos ou bicicletas. Variações dos custos generalizados são dadas a partir da mudança de cenário, seja pela ampliação (redução) da rede cicloviária ou de outros parâmetros que compõem o custo. No caso da aplicação de modelos baseados no conceito de Equilíbrio do Usuário, adaptações são necessárias uma vez que os custos de viagem deixam de ser uma informação prévia e são atualizados a cada iteração do modelo.

A escolha pela alocação do tipo “Tudo-ou-Nada” se deve pelo uso recorrente em estudos relacionados ao tema devido à pouca compreensão da literatura acerca da interação do ciclista com o tráfego motorizado ou com outros ciclistas, e o efeito dos já existentes congestionamentos de bicicletas. De qualquer maneira, essa escolha afeta diretamente a quantidade de dados de fluxo efetivamente utilizados no modelo, uma vez que há a possibilidade do arco em que a pesquisa de campo foi conduzida não possuir um fluxo modelado, de maneira que especificamente esse dado de fluxo não agrega informação ao modelo de estimação de matrizes baseado em dados de fluxo.

Por fim, dados sobre o uso do solo são aplicados na última etapa do modelo para o cálculo da acessibilidade potencial. No caso desta dissertação, cujo foco é a acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e de educação disponíveis na área de estudo, são computados o número de empregos e a quantidade de matrículas escolares disponíveis em cada zona de tráfego como variáveis que caracterizam o uso do solo para essas atividades.

3.2. Matriz OD alvo

A segunda etapa do método resume-se à estimação da matriz alvo do modelo. De acordo com Ge e Fukuda (2016), mesmo que a matriz prévia seja utilizada logo após o processamento dos dados coletados, muitas vezes ela já se encontra desatualizada pelo longo tempo entre a coleta de todos os dados, codificação e o próprio processamento dos dados. No caso da utilização de dados mais antigos, esse problema se torna ainda mais proeminente.

Além disso, a cada cenário de análise, é possível que a rede viária possua diferentes configurações de custo de viagem, o que pode influenciar os resultados da alocação de tráfego e, conseqüentemente, os dados de fluxo efetivamente utilizados. Todos esses fatores afetam, de alguma maneira, os resultados da matriz alvo.

Portanto, as informações contidas na matriz prévia são atualizadas pelos fluxos observados em campo, nesta pesquisa, por meio do método dos Mínimos Quadrados

Generalizados proposto por Cascetta (1984), considerando os custos generalizados adotados para o cenário em análise. Esse método tem como principal vantagem a ausência de problemas ligados à continuidade dos fluxos presente em outros modelos de estimação de matrizes estáticas. A matriz obtida pelo modelo é chamada de matriz alvo uma vez que é utilizada como referência no processo de estimação dos parâmetros da função de impedância descrito na próxima seção.

3.3. Estimação da função de demanda

A estimação dos valores de β e γ da função de impedância, e conseqüentemente da matriz modelada, é dada por um processo iterativo em que se procura minimizar uma função de erro entre os conteúdos da matriz alvo e modelada.

Para estimar a matriz modelada são computados, primeiramente, os totais de viagens produzidas (O_i) e atraídas (D_j) em cada zona de tráfego provenientes da matriz OD prévia. Em seguida, são atribuídos valores para os parâmetros β e γ , de modo que, juntamente com os custos generalizados, são obtidos os valores de impedância de viagem entre os centroides das zonas de tráfego. Por meio do método iterativo de Furness (ORTÚZAR E WILLUMSEN, 2011), os parâmetros A_i e B_j são calculados através das Equações 4 e 5.

$$A_i = \frac{1}{\sum_j B_j D_j (c_{ij}^\gamma e^{-\beta c_{ij}})} \quad (4)$$

$$B_j = \frac{1}{\sum_i A_i O_i (c_{ij}^\gamma e^{-\beta c_{ij}})} \quad (5)$$

Conhecidos todos os elementos da Equação 2, uma matriz sintética da matriz prévia é estimada e posteriormente atualizada pelos dados de fluxo de bicicleta pelo método GLS no cenário em análise, obtendo-se a matriz modelada. Finalmente, a matriz modelada é comparada com a matriz alvo por meio de uma função de erro, cujo resultado é avaliado segundo um critério de convergência ϵ preestabelecido. Caso o erro atenda o critério, finaliza-se o procedimento, e a matriz está modelada e os parâmetros da função de impedância estão estimados. Caso contrário, são atribuídos novos valores para β e γ para estimação de uma nova matriz modelada. O procedimento é repetido até que o critério ϵ seja atendido.

O processo de atualização dos parâmetros β e γ pode ser feito de forma exaustiva, ou seja, avalia-se a função de erro para o maior número de combinações β e γ possível. Porém, essa

abordagem pode não ser eficiente no sentido do tempo de processamento, por exemplo. Uma segunda opção é utilizar algoritmos de otimização que procuram atribuir valores aos parâmetros β e γ de maneira sistemática para minimizar a função de erro considerada.

Conforme exposto no Anexo B, Hyman (1969) propôs um algoritmo de minimização para o caso da função de impedância exponencial, com apenas um parâmetro (β). Enquanto o autor demonstra o método por meio da minimização do erro entre os custos totais das matrizes observada e estimada, Ortúzar e Willumsen (2011) descrevem o mesmo método a partir do erro entre os custos médios das matrizes alvo e modelada. Isso indica que a função de erro pode ser definida a partir de diferentes combinações do custo de viagem.

Nesta pesquisa, adota-se a função de impedância combinada (modelo de Tanner) devido à sua flexibilidade quanto às viagens de curta duração e à possibilidade de recair no caso particular da função exponencial, caso γ seja igual a zero. Para esta função, entretanto, duas restrições devem ser atendidas, sendo a primeira em relação ao custo da viagem e a segunda quanto ao logaritmo desse custo. Segundo Batty e Mackie (1972), uma estratégia para solução desse problema é por meio da combinação das duas restrições em uma única função de minimização por meio da soma entre as duas parcelas de erro, por exemplo.

Entretanto, conforme mencionado na Seção 2.3, a criação dessa função de minimização de erro deve obedecer a propriedade da unimodalidade, em que a superfície gerada pela função deve conter um, e somente um, valor de mínimo (BATTY, 1976). Assim como Bazaraa, Sherali, Shetty (2006), Batty e Mackie (1972) afirmam que o pesquisador necessita conhecer *a priori*, ao menos parcialmente, a forma da superfície de resposta da função para garantir a propriedade. Todavia, os autores ponderam que nem sempre é possível ter esse conhecimento devido à complexidade matemática da função e recomendam realizar uma análise exaustiva dentro de um intervalo fechado para os valores dos parâmetros a fim de se conhecer parcialmente a forma da superfície gerada.

Uma vez que o método adotado nesta pesquisa é resultado de uma combinação entre o modelo gravitacional de distribuição de viagens e o método GLS para estimação de matrizes baseado no fluxo de ciclistas, não há conhecimento *a priori* do comportamento da superfície de resposta de qualquer função de minimização de erro. Dessa maneira, foi conduzida uma análise exaustiva da combinação entre β e γ para avaliar parcialmente as superfícies de resposta de 8 funções de minimização diferentes, construídas a partir de combinações de termos de erro dos custos e dos logaritmos dos custos. Os detalhes dessa análise, sobre os intervalos adotados dos valores de β e γ , os tipos de função de minimização analisadas e os

resultados das superfícies geradas em cada função são apresentadas no Apêndice A desta pesquisa.

Como resultado, adotou-se como função de minimização o erro quadrático ortogonal normalizado conforme a Equação 6 (RAKHA; ARAFEH, 2010).

$$f(\beta, \gamma) = \sum_{i,j}^n \left[\frac{p_{ij}c_{ij} - t_{ij}(\beta, \gamma)c_{ij}}{(p_{ij}c_{ij})_{\text{máx}}} \right]^2 + \left[\frac{p_{ij} \ln(c_{ij}) - t_{ij}(\beta, \gamma) \ln(c_{ij})}{(p_{ij} \ln(c_{ij}))_{\text{máx}}} \right]^2 \quad (6)$$

em que $f(\beta, \gamma)$: função de minimização;

$p_{ij}, t_{ij}(\beta, \gamma)$: viagens com origem na zona i com destino na zona j da matriz alvo e da matriz modelada, respectivamente;

c_{ij} : custo generalizado de viagem entre os centroides das zonas i e j ;

$(p_{ij}c_{ij})_{\text{máx}}$ e $(p_{ij} \ln(c_{ij}))_{\text{máx}}$: valores máximos dos produtos entre o número de viagens e o custo generalizado e o logaritmo do custo na matriz alvo, respectivamente.

Uma vez definida a função de minimização e a análise da superfície gerada pela Equação 6, adotou-se o algoritmo de otimização de busca em duas etapas descrito na Figura 3. Neste algoritmo, a cada atualização de um dos parâmetros, são obtidos novos valores de A_i e B_j para estimar a matriz sintética da matriz prévia, cujos resultados são analisados pela função de minimização adotada.

1	<u>Inicialização</u>
2	Defina Tamanho de passo Δ_β e Δ_γ para os parâmetros β e γ , respectivamente.
3	Fator de decrescimento $0 < \alpha < 1$
4	Critério de parada ε
5	$n = 0, j = 0$
6	$O_i = \sum_{j=1}^n p_{ij} \forall i$
7	$D_j = \sum_{i=1}^n p_{ij} \forall j$
8	$y_j = (\beta_n, \gamma_j)$
9	<u>ETAPA A</u>
10	Enquanto $\Delta_\gamma > \varepsilon$ faça
11	$y_{j+1} = (\beta_n, \gamma_j + \Delta_\gamma)$
12	Enquanto $f(y_{j+1}) < f(y_j)$ faça
13	$y_{j+1} = y_j; j = j + 1; y_{j+1} = (\beta_n, \gamma_j + \Delta_\gamma);$ Estimar A_i e $B_j;$
14	$y_{j+1} = (\beta, \gamma_j - \Delta_\gamma)$
15	Enquanto $f(y_{j+1}) < f(y_i)$ faça
16	$y_{j+1} = y_j; j = j + 1; y_{j+1} = (\beta_n, \gamma_j - \Delta_\gamma);$ Estimar A_i e $B_j;$
17	$\Delta_\gamma = \alpha \cdot \Delta_\gamma$
18	<u>ETAPA B</u>
19	$x_n = y_j; x_{n+1} = (\beta_n + \Delta_\beta, \gamma_j)$
20	Enquanto $\Delta_\beta > \varepsilon$ faça
21	Enquanto $f(x_{n+1}) < f(x_n)$ faça
22	$j = 0; y_j = x_{n+1};$ Execute ETAPA A;
23	$x_{n+1} = y_j; n = n + 1; x_{n+1} = (\beta_n + \Delta_\beta, \gamma_j);$ Estimar A_i e $B_j;$
24	$x_{n+1} = (\beta_n - \Delta_\beta, \gamma_j)$
25	Enquanto $f(x_{n+1}) < f(x_n)$ faça
26	$j = 0; y_j = x_{n+1};$ Execute ETAPA A;
27	$x_{n+1} = y_j; n = n + 1; x_{n+1} = (\beta_n - \Delta_\beta, \gamma_j);$ Estimar A_i e $B_j;$
28	$\Delta_\beta = \alpha \cdot \Delta_\beta$

Figura 3: Algoritmo de otimização de busca em duas etapas

O algoritmo é dividido em duas etapas de busca sequencial na superfície da função de minimização. Após a inicialização (linha 2-8), a Etapa A é aplicada para minimizar a Equação 6 fixando-se o valor de β . A partir do ponto inicial $y_j = (\beta_n, \gamma_j)$, os valores da Equação 6 são comparados entre pontos sucessivos na direção de γ de acordo com o tamanho

do passo Δ_γ ($y_{j+1} = (\beta_n, \gamma_j + \Delta_\gamma)$) até que aqueles valores comecem a crescer (linhas 11-13). Em seguida, uma análise similar é conduzida na direção oposta de γ ($y_{j+1} = (\beta_n, \gamma_j - \Delta_\gamma)$) a partir do último ponto avaliado (linhas 15-16). Analisadas as duas direções de γ , chega-se à conclusão de que não há mais nenhum valor menor para a função. Então, o tamanho de passo Δ_γ é reduzido por um fator α (linha 17). O processo de avaliação dos valores da Equação 6 na direção de γ (para um β fixo) é repetido até que o tamanho de passo atinja o critério de parada ε .

Em seguida, inicia-se a Etapa B, que busca minimizar a Equação 6 ao longo da direção de β . A partir do ponto obtido na Etapa A, aplica-se o tamanho de passo Δ_β ($x_{n+1} = (\beta_n + \Delta_\beta, \gamma_j)$) na linha 19. A cada novo valor de β , a Etapa A é aplicada a fim de identificar o menor valor da Equação 6 para o respectivo β fixo. Os valores da função são sucessivamente comparados ao longo da direção positiva de β até que passem a crescer (linhas 21-23). Em seguida, uma análise similar é conduzida na direção oposta de β (linhas 25-27). Conduzida a análise em ambas as direções e se nenhum valor menor da Equação 6 é encontrado, o tamanho de passo Δ_β é reduzido por um fator α (linha 28). A Etapa B é repetida até que o tamanho de passo Δ_β seja menor que o critério de parada adotado ε e finaliza-se o algoritmo. O Apêndice B apresenta um exemplo gráfico do algoritmo descrito para solução de uma função de minimização genérica.

3.4. Estimativa da acessibilidade potencial

Estimados os parâmetros da função de impedância, são levantados os dados sobre o uso do solo e calculado o valor da acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo por meio da Equação 1.

A partir do método de estimação apresentado, a acessibilidade potencial pode ser calculada em diferentes configurações de rede cicloviária, uma vez que esta impacta a composição de custos generalizados, e diferentes dados de fluxos de ciclistas observados. As combinações desses dados resultam em cenários que permitem a análise da variação da função de impedância e, conseqüentemente, da acessibilidade a partir de diferentes configurações de rede cicloviária.

A etapa de análise do método pode ser mais bem compreendida no capítulo subsequente pela condução de um estudo de caso aplicado à cidade de São Paulo, em que a acessibilidade potencial é calculada a partir da combinação de diferentes dados de fluxos de bicicletas, custos generalizados e matrizes prévias.

4. APLICAÇÃO

Este capítulo apresenta um exemplo de aplicação do método de estimação da acessibilidade potencial, cujos parâmetros da função de impedância são estimados a partir da combinação entre o modelo gravitacional tradicional e um modelo de estimação de matrizes baseado em dados de fluxo de bicicletas. O capítulo é dividido em duas seções, em que a primeira apresenta as características dos sistemas de transportes e de uso do solo da cidade de São Paulo, e a segunda apresenta os dados e parâmetros utilizados na aplicação do método, assim como desenvolve a forma como a variação da acessibilidade é analisada. Os resultados da aplicação são apresentados no capítulo seguinte.

4.1. Estudo de caso: cidade de São Paulo

A cidade de São Paulo, capital do estado homônimo, possui cerca de 12,2 milhões de habitantes e compõe, juntamente com outros 38 municípios, o maior conglomerado urbano do Brasil, a Região Metropolitana de São Paulo. A relação biunívoca entre o uso do solo e o sistema de transportes é bastante clara no processo de desenvolvimento da capital paulista.

Segundo Gaspar (2011), a atual configuração urbana da cidade de São Paulo tem início com a instalação de grandes parques industriais e logísticos, principalmente após o ciclo do café. Esse período é marcado pela descentralização das atividades urbanas dada a concentração populacional ao redor dessas instalações. Em seguida, a combinação entre a saída das fábricas do território municipal e o desenvolvimento do comércio e do setor financeiro contribuíram para a concentração das oportunidades urbanas e do aumento do valor da terra na região central da cidade (BOSNICH, 2017).

Como reflexo disso, a Figura 4a apresenta a distribuição da densidade do número de oportunidades de emprego e estudo na cidade de São Paulo. Enquanto as matrículas escolares estão mais bem distribuídas no território, há uma maior oferta de empregos nas regiões central e sudoeste da cidade, o que resulta em maior densidade combinada de oportunidades de estudo e emprego nessa região. Na Figura 4b observa-se maior concentração das famílias de alta renda próximas às regiões de com maior número de empregos, ao contrário das zonas que apresentam baixa renda média familiar.

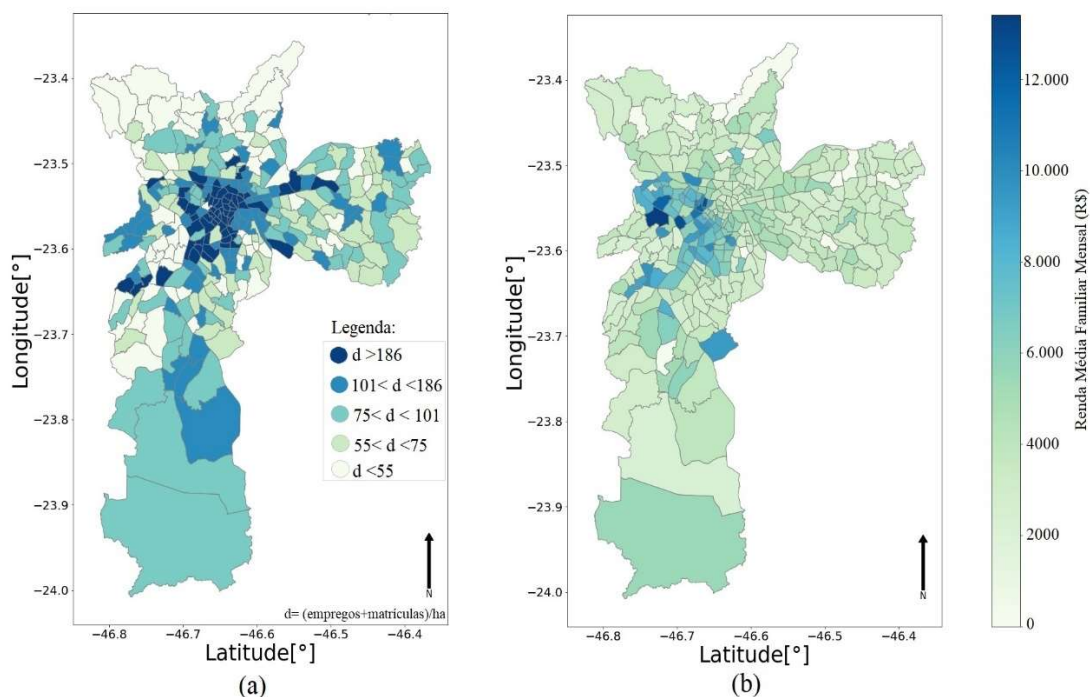


Figura 4: (a) Densidade de empregos e matrículas escolares; (b) Renda média familiar
Cidade de São Paulo

Além do processo natural de desenvolvimento do uso do solo, o sistema de transportes também desempenhou papel importante na formação urbana de São Paulo. A concentração das oportunidades econômicas no centro da cidade, o alto valor da terra, o crescimento da indústria automobilística e as políticas de incentivo ao uso do automóvel por meio da abertura de grandes avenidas e corredores viários, contribuíram para formação de um padrão de deslocamentos do tipo radial e a instalação da população de renda mais baixa na periferia da cidade (BOSNICH, 2017). Como consequência, houve o aumento dos congestionamentos e dos tempos de viagem.

Diante disso, passou-se a investir mais no transporte coletivo, primeiramente no sistema rodoviário. Hoje a cidade possui o maior sistema de transporte por ônibus do mundo, com cerca de 14.500 veículos e 1.300 linhas, que transportam cerca de 10 milhões de passageiros por dia. A fim de aumentar a competitividade com o transporte individual motorizado, o sistema passou a contar com mais de 500 km de faixas exclusivas e 132 km de corredores, que visam aumentar a sua eficiência operacional diante dos congestionamentos gerados pelos automóveis (São Paulo, 2020).

Insuficiente para atender a demanda por viagens, sobretudo para a região central, passou-se a investir no sistema metroferroviário (Figura 5). Atualmente, o Metrô-SP possui aproximadamente 101,1 km de extensão dentro dos limites do município, além da existência

do sistema de trens urbanos que conecta a cidade com outros 23 municípios da RMSP. De acordo com a Pesquisa Origem-Destino (OD) mais recente, realizada em 2017, cerca de 36% de todas as viagens realizadas na RMSP utilizam um desses sistemas, seja como único modo ou combinado com outros (Metrô, 2019). Apesar das políticas de mobilidade terem contribuído, em certa medida, com os índices de mobilidade, as medidas adotadas à parte das políticas de uso do solo acabaram reforçando a concentração das oportunidades econômicas e o aumento das distâncias entre empregos e residências. Todavia, o último Plano Diretor, elaborado em 2015, apresenta uma mudança de postura por parte dos tomadores de decisão.

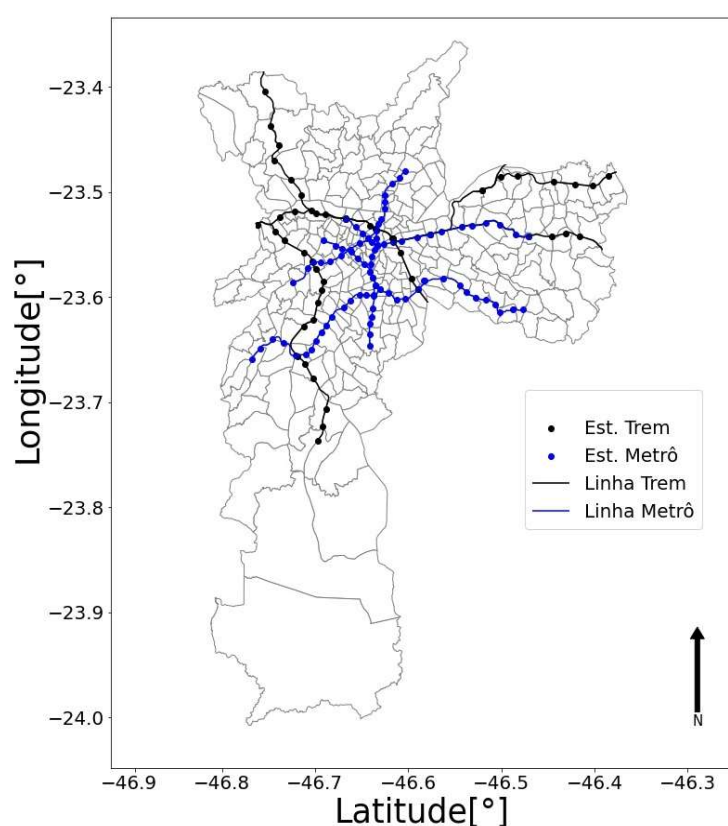


Figura 5: Sistema metro-ferroviário de São Paulo

Se por um lado o processo de tomada de decisão para implantação e utilização de ferramentas de apoio ao planejamento dos sistemas motorizados de transporte, seja coletivo ou individual, já estão bem consolidados no município, o mesmo não pode ser afirmado para o caso do modo ciclovitário. Segundo Malatesta (2012), os primeiros estudos relacionados ao tema datam do início dos anos 1980, pela elaboração do primeiro plano de ciclovias da cidade proposto por um conjunto de secretarias da prefeitura. Naquele primeiro plano a cidade foi dividida em 14 setores interligados pela malha ciclovitária planejada, composta por ciclovias,

ciclofaixas e espaços compartilhados com os automóveis, alcançando 200 km. Entretanto, o plano não chegou a ser implementado devido a questões institucionais.

Nos anos 1990, um novo plano cicloviário foi proposto, baseado na percepção dos fluxos de ciclistas nos finais de semana. No entanto, sem a participação e apoio popular, e a descontinuidade dos estudos de implantação, novamente o plano não foi implementado. Esta década foi marcada pelo desenvolvimento de estudos e projetos de desenho cicloviário e sinalização voltadas à segurança viária do ciclista, com enfoque na definição das larguras das faixas cicláveis e adequação física do espaço viário. Apesar da legislação ter avançado nesse período em diversos aspectos, apenas em 2006 passou-se a obrigar a inclusão do planejamento cicloviário na política de mobilidade urbana no município. A partir de então, uma série de projetos-piloto foram concebidos e implementados na cidade, como por exemplo as ciclofaixas de lazer, nos fins de semana, em 2008 (MALATESTA, 2014).

Todavia, foi a partir de 2012 que se iniciou a elaboração do plano cicloviário municipal que dá forma à rede cicloviária conhecida hoje. Essas infraestruturas começaram a serem implementadas de fato em meados de 2014, 2015 e 2016, conforme a Figura 6, cuja distribuição espacial é ilustrada na Figura 7. Comparando as duas últimas pesquisas OD conduzidas na RMSP (2007 e 2017) observa-se um aumento de 45,2% no número de viagens por bicicleta com origem e destino na capital paulista por dia, de 150,2 mil para 218,2 mil viagens (Metrô, 2019). Dado o crescimento no número de ciclistas neste período, a Companhia de Engenharia de Tráfego (CET) passou a incluir o modo cicloviário em sua pesquisa anual de contagens volumétricas e de velocidade, conduzida manualmente nas principais vias da cidade.

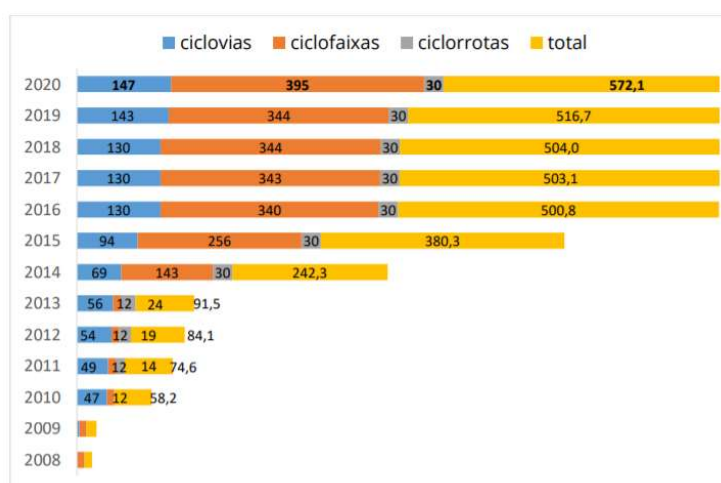


Figura 6: Evolução da rede cicloviária de São Paulo.

(Fonte: CET, 2019)

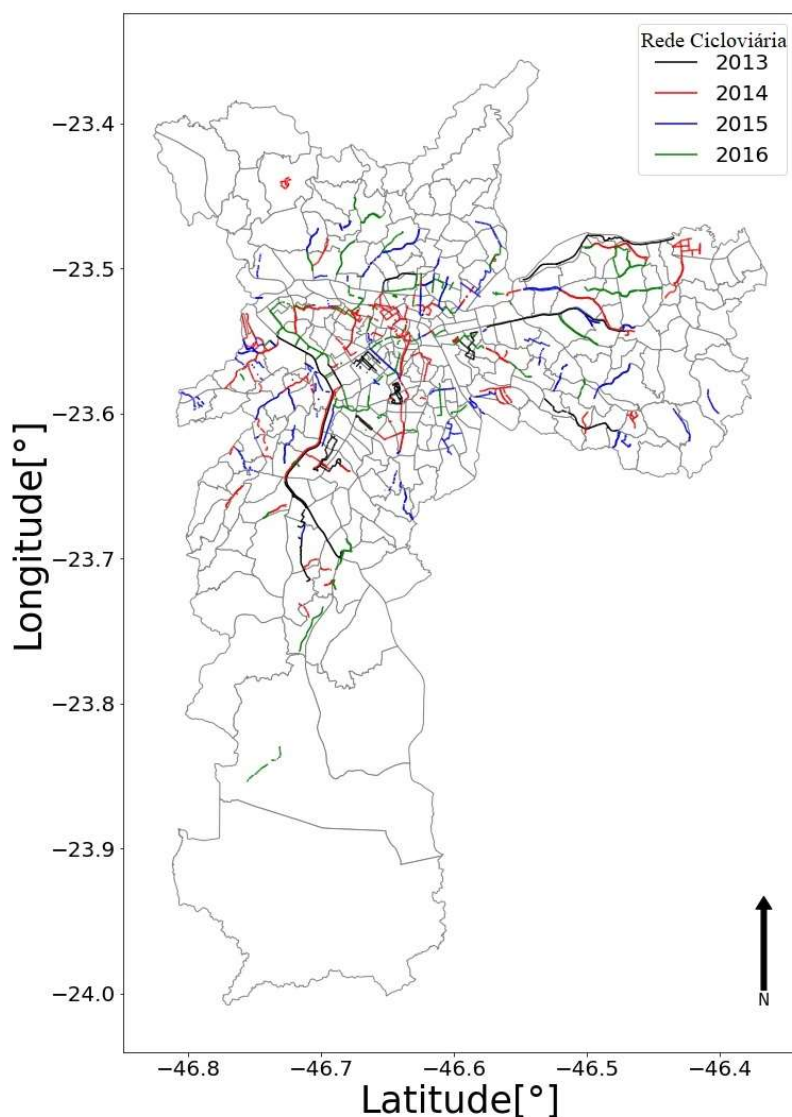


Figura 7: Rede ciclovária da cidade de São Paulo 2017

Apesar do crescente aumento das políticas de incentivo ao uso da bicicleta na cidade de São Paulo, ainda não são utilizados modelos de demanda para apoio à tomada de decisão. Além disso, como já discutido na Seção 2.4, nenhuma métrica relacionada à acessibilidade da rede é adotada para avaliação dos Planos de Metas já implementados, apesar da acessibilidade ser mencionada como um de seus objetivos.

Ao contrário, a métrica mais utilizada é dada pela quantidade de quilômetros de novas infraestruturas a serem implementadas. Porém, são negligenciadas do ponto de vista do planejamento uma vez que não fornecem informações sobre os reais benefícios dessas infraestruturas no deslocamento e, principalmente, no acesso às atividades urbanas. Além

disso, os futuros Planos de Metas ficam comprometidos pela impossibilidade da criação de cenários para avaliação de diferentes propostas de intervenções.

É nesse sentido que a aplicação do modelo proposto à cidade de São Paulo desempenha papel importante não apenas do ponto de vista da contribuição teórica do método, mas também de suas consequências práticas para o planejamento.

4.2. Dados e parâmetros

De acordo com a Figura 6 apresentada na Seção 4.1, a extensão da rede cicloviária de São Paulo passou de 91,3 km em 2013 para 242,3 em 2014, 380,3 km em 2015 e 500,8 km em 2016, e permaneceu praticamente inalterada em 2017, chegando aos 503,8 km. Apesar da projeção de crescimento para os anos subsequentes, houve um atraso nas obras de implantação e apenas no ano presente, 2021, a meta do Plano de Metas de 2019 foi atingida.

O estudo de caso da cidade de São Paulo compreende a aplicação do método para o cálculo da acessibilidade potencial em cada ano no período entre 2014 e 2017, bem como a análise da sua variação nesse período. Apesar do grande crescimento da rede entre os anos de 2013 e 2014, o período de análise escolhido é limitado devido à ausência de informações sobre os fluxos de ciclistas em determinados arcos da rede viária nos anos anteriores à 2014 e ao atraso da continuidade de implantação do plano a partir de 2017.

Os primeiros dados de entrada para aplicação do modelo correspondem aos de fluxo observados. Anualmente, uma pesquisa de campo para levantamento de informações sobre fluxo e velocidade de veículos é conduzida pela CET em diferentes pontos da capital paulista, ilustrados na Figura 8.

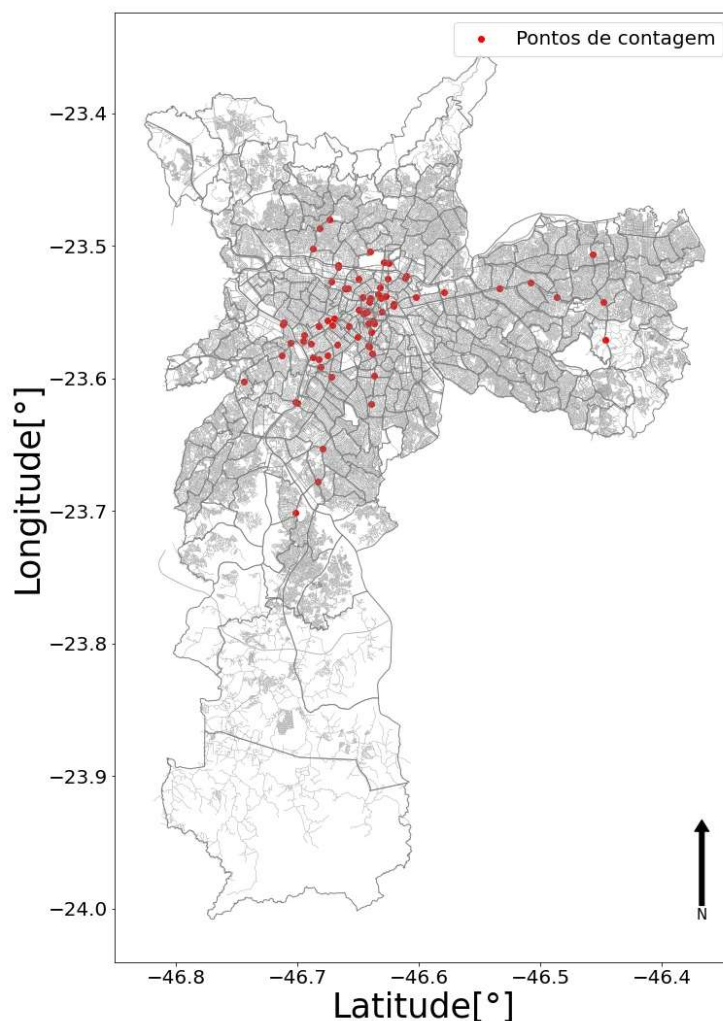


Figura 8: Pontos de contagem na rede viária de São Paulo

Ressalta-se que a pesquisa de contagens é conduzida apenas em uma fração dos arcos apresentados no mapa da Figura 8 a cada ano. O número total de arcos depende do orçamento disponível, de modo que existe um certo rodízio entre eles. Todavia, respeita-se uma rotatividade, de maneira que para o mesmo arco as informações são coletadas no máximo a cada duas edições da pesquisa. No entanto, cerca de 75 arcos da rede são contemplados a cada ano e resultam, em média, em 150 informações de fluxo coletadas (contando ambas as direções) (CET, 2020).

Devido às restrições orçamentárias, a pesquisa anual da CET é realizada especificamente nos horários de pico da manhã (entre 7h e 10h) e no pico da tarde (entre 17h e 20h) de forma manual. Nesta dissertação foram utilizados especificamente os dados de fluxo de ciclistas do pico da manhã relativos a cada ano do período de análise.

Em seguida, foram levantados os dados referentes às informações dos padrões de viagem representados pela matriz OD prévia. Nesta dissertação, duas matrizes prévias foram

consideradas, ambas oriundas das duas últimas Pesquisas OD conduzidas pelo Metrô de São Paulo em 2007 e 2017 (Metrô, 2019). A primeira foi utilizada como matriz prévia para o cálculo da acessibilidade potencial entre os anos de 2014 e 2016 por ser a informação mais recente sobre os padrões de viagem relativo a este período. Para a análise referente ao ano de 2017, utilizou-se a Pesquisa OD conduzida naquele mesmo ano.

Uma vez que o foco de pesquisa é no acesso às oportunidades de emprego e estudo disponíveis e, juntamente, com a restrição dos dados de fluxo de bicicletas para o pico da manhã, foi realizada a segmentação das matrizes prévias para estes motivos de viagem e horário do dia. De acordo com as informações disponíveis nas Pesquisas OD de 2007 e 2017, aproximadamente 138 mil e 204 mil viagens foram realizadas por bicicleta, das quais 79% e 82% por motivo trabalho e estudo, respectivamente. No pico da manhã, essas viagens foram de 17.563 e 39.545 na OD de 2007 e 2017, respectivamente.

Posteriormente, foram determinados os custos generalizados em cada arco da rede para estimação do custo de viagem entre os centroides das zonas de tráfego. Os atributos da rede viária e cicloviária foram obtidos a partir do banco de dados disponibilizado pelo Centro de Estudos da Metrópole (CEM, 2020). Porém, devido à ausência de dados e estudos sobre modelos de escolha de rota para ciclistas no contexto local, não há referências para determinação dos pesos dos atributos da rede e do ambiente construído. Portanto, três diferentes modelos foram considerados para composição do custo generalizado das viagens por bicicleta nesta aplicação. No primeiro, doravante denominado “Modelo Distância”, o custo de viagem diz respeito unicamente à minimização da distância entre as zonas de origem e destino da observação.

No segundo, daqui em diante denominado “Modelo Velocidade”, o custo generalizado de cada arco da rede é representado pelo tempo necessário para percorrê-lo. No entanto, são considerados os atributos da rede que afetam o desenvolvimento da velocidade do ciclista ao longo do arco a partir dos resultados de um dos modelos estimados por Clarry, Faghieh Imani e Miller (2019), chamado pelos autores de modelo “não-controlado”. Dessa maneira, é possível calcular a velocidade média desenvolvida pelo ciclista em cada arco da rede, calculada pela Equação 7, de modo que o tempo médio de viagem no arco é dado pela razão entre o seu comprimento e respectiva velocidade média calculada. O critério de escolha de rota, nesse caso, é a minimização do tempo de viagem entre as zonas de origem e destino da observação.

$$V_a = 4,493 + 0,541 \cdot Inf_{ciclovía} + 0,323 \cdot Inf_{ciclofaixa} + 0,144 \cdot Inf_{comp.} + 0,233 \cdot C_{arterial} - 0,124 \cdot C_{secun/local} + 0,180 \cdot i_- - 0,332 \cdot i_+ \quad (7)$$

em que V_a : velocidade do ciclista no arco a

$Inf_{ciclovía}$: 1 se há ciclovía, 0 caso contrário;

$Inf_{ciclofaixa}$: 1 se há ciclofaixa, 0 caso contrário;

$Inf_{comp.}$: 1 se o arco é uma via de compartilhamento viário com elementos de acalmamento de tráfego, 0 caso contrário;

$C_{arterial}$: 1 se o arco é uma via arterial, 0 caso contrário;

$C_{secun/local}$: 1 se o arco é uma via local ou secundária, 0 caso contrário;

i_- : inclinação negativa, em porcentagem (%);

i_+ : inclinação positiva, em porcentagem (%).

O terceiro e último modelo de custo generalizado considerado para o estudo de caso, chamado de “Modelo Suitability”, é baseado nas adaptações feitas por Pritchard *et al.* (2019) para o contexto da cidade de São Paulo. O modelo combina os resultados da Pesquisa Nacional de Velocidade dos Ciclistas da Holanda de 2016 e do modelo proposto por Broach, Dill e Gliebe (2012). Nesse caso, o critério de escolha de rota do ciclista é baseado na maximização da percepção de conforto e segurança de acordo com a definição de “*Bicycle Suitability*” apresentada na Seção 2.2 no capítulo da revisão da literatura.

No entanto, o custo generalizado é dado em termos do tempo de viagem equivalente entre a origem e o destino. Segundo Pritchard *et al.* (2019), os resultados da pesquisa conduzida na Holanda mostram que a velocidade média do ciclista em cada arco da rede é inversamente proporcional à densidade da rede viária. Observou-se que o ciclista é capaz de desenvolver maiores velocidades e mantê-la constante em longos segmentos da rede, enquanto os efeitos de aceleração, desaceleração e tempo de espera para cruzar as intersecções da rede prejudicam a velocidade média do ciclista em locais de maior densidade viária, onde os segmentos da rede possuem menor comprimento e há um maior número de intersecções. Como resultado, as velocidades na rede são extrapoladas em função do comprimento dos arcos por meio de uma função de ajuste logístico (com um R^2 de 0,9585) já incorporadas à rede disponibilizada pelo CEM (2020).

Após a definição de um valor base para velocidade média em cada arco da rede, são considerados os resultados obtidos por Broach, Dill e Gliebe (2012) em relação a outros atributos da rede por meio de fatores multiplicadores da velocidade base. O modelo proposto

pelos autores estabelece que os ciclistas estão dispostos a percorrer maiores distâncias no seu trajeto para evitar certos atributos (*trade-offs*), como a declividade, fazer conversões à esquerda ou vias com maior fluxo de veículos. Seguindo essa lógica, é possível estimar um comprimento de arco equivalente a partir das diferentes características da rede viária.

A Tabela 1 apresenta os atributos considerados para estimar a velocidade do ciclista no contexto da cidade de São Paulo. A segunda coluna apresenta os resultados do modelo de Broach, Dill e Gliebe (2012) e indica o acréscimo (decrécimo) da percepção de comprimento do arco referente àquele atributo em termos percentuais. A terceira coluna apresenta o valor do fator $F = 1/(1 + Dist. Equivalente \%)$ a ser multiplicado pelo valor base da velocidade média, tal que a velocidade média final em cada arco é dada pela Equação 8.

Tabela 1: Distância equivalente dos atributos da rede viária

Atributos da rede	Distância Equivalente (%)	Fator
Declividade (<2%)	0	1
Declividade (2-4%)	37,1	0,729
Declividade (4-6%)	120,3	0,453
Declividade (>6%)	323,9	0,236
Sem Infraestrutura	0	1
Ciclovía/Ciclofaixa	-16,0	1,16
Ciclorrotas	-10,8	1,108
Sem infraestrutura em pontes	0	1
Pontes com ciclovía	-29,2	1,292
Pontes com ciclofaixa	-18,2	1,182

Fonte: Broach, Dill e Gliebe (2012) e Pritchard *et al.* (2019) – Adaptado

$$V_a = \hat{V}_a \cdot F_{declividade} \cdot F_{infra} \cdot F_{ponte} \quad (8)$$

em que V_a : velocidade média final no arco;

\hat{V}_a : valor base da velocidade média;

$F_{declividade}$: fator referente à declividade;

F_{infra} : fator referente à presença de infraestrutura cicloviária;

F_{ponte} : fator referente à presença de infraestrutura cicloviária em pontes e viadutos.

Para os modelos “Velocidade” e “Suitability”, foram adotados os valores 30 km/h e 5 km/h como limites superior e inferior, respectivamente, da velocidade final em cada arco da

rede, seguindo a lógica de Pritchard *et al.* (2019). Para cada modelo de custo generalizado adotado, os custos de viagem entre os centroides das zonas de tráfego foram estimados a partir de alocações de tráfego do tipo “Tudo-ou-Nada” por meio do *software* de modelagem de transportes PTV Visum (PTV GROUP, 2020).

As informações relativas ao uso do solo são obtidas para o cálculo da acessibilidade potencial. Os dados sobre o número de empregos e vagas escolares em cada zona de tráfego são extraídos das Pesquisas OD de 2007 e 2017 conduzidas pelo Metrô de São Paulo. De maneira similar às matrizes prévias, as informações da pesquisa OD mais antigas são utilizadas para o cálculo e análise da acessibilidade potencial entre os anos de 2014 e 2016, enquanto a pesquisa mais recente é utilizada no resultado do ano de 2017. Em 2007, havia uma oferta de cerca de 5,93 milhões de empregos e 3,1 milhões de alunos matriculados na cidade de São Paulo, enquanto na edição de 2017, observou-se um total de 6 milhões de vagas de trabalho e 3,35 milhões matrículas escolares.

Os parâmetros da função de impedância são estimados para 12 cenários, a partir da combinação entre os três custos generalizados adotados, os quatro anos do período de análise e as diferentes matrizes prévias adotadas. Os valores iniciais de β e γ para inicialização do algoritmo de procura são definidos pelo inverso do custo médio da matriz alvo ($1/\bar{c}_{alvo}$) e o inverso do logaritmo médio dos custos generalizados de viagem $1/\overline{\log(c)}_{alvo}$, respectivamente, conforme Ortúzar e Willumsen (2011). Além disso, os valores adotados para o tamanho de passo de β e γ , fator de decrescimento e do critério de parada são, respectivamente, iguais a $\Delta_\gamma = 0,5$, $\Delta_\beta = 0,2$, $\alpha = 0,7$ e $\varepsilon = 0,009$.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Parâmetros da função de demanda

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação do método de estimação dos parâmetros da função de impedância considerando as três diferentes métricas de custo generalizado apresentadas no capítulo anterior. Para cada uma delas, aplica-se o método em diferentes configurações da rede cicloviária observadas entre os anos de 2014 e 2016, além de uma aplicação para o ano de 2017, em que a matriz prévia considerada é alterada, resultando em 12 cenários distintos. A Tabela 2 mostra os valores dos parâmetros β e γ , o total de viagens das matrizes alvo e modelada, e a quantidade de arcos com informações sobre o fluxo de ciclistas efetivamente utilizados em cada um dos modelos.

Tabela 2: Parâmetros estimados da função de impedância e o total de viagens das matrizes alvo e estimada

	Modelo Distância			
	2014	2015	2016	2017
γ	0,000	0,160	0,000	0,060
β	0,140	0,170	0,090	0,080
Total viagens matriz modelada	10.117	15.196	17.582	20.818
Total viagens matriz alvo	10.171	15.192	17.693	21.115
Arcos com dados de fluxo utilizados	10	11	20	38
Erro Ortogonal (Equação 6)	0,0009	0,0009	0,0011	0,1375
	Modelo Velocidade			
	2014	2015	2016	2017
γ	0,000	0,030	0,100	0,190
β	0,020	0,040	0,030	0,030
Total viagens matriz modelada	13.213	13.501	17.588	28.065
Total viagens matriz alvo	13.309	13.504	17.693	28.218

Continuação

Tabela 2: Parâmetros estimados da função de impedância e o total de viagens das matrizes alvo e estimada

	Modelo Velocidade			
	2014	2015	2016	2017
Arcos com dados de fluxo utilizados	11	20	20	30
Erro Ortogonal (Equação 6)	0,0022	0,0017	0,0018	0,2090
	Modelo "Suitability"			
	2014	2015	2016	2017
γ	0,030	0,230	0,740	0,680
β	0,040	0,060	0,080	0,060
Total viagens matriz modelada	12.637	15.283	16.710	27.245
Total viagens matriz alvo	12.688	15.334	16.762	27.526
Arcos com dados de fluxo utilizados	15	19	24	42
Erro Ortogonal (Equação 6)	0,0018	0,0013	0,0013	0,1933

É possível notar que apenas uma fração dos arcos que possuem informações sobre os fluxos observados de ciclistas no pico da manhã provenientes da pesquisa da CET são utilizados de fato pelo modelo. Isso pode ser parcialmente explicado por dois motivos. Primeiro, as matrizes prévias de 2007 e 2017 apresentam relativamente poucos pares OD não-nulos de viagens por bicicleta. Visto que não foi aplicado um modelo de Geração de Viagens em etapa anterior, a consequência imediata dessa escolha é que certas regiões da cidade não apresentaram viagens por bicicleta provenientes da matriz e, portanto, os fluxos de ciclistas observados nessas regiões não são considerados pelo modelo. O segundo motivo se deve à escolha pelo método de alocação do tipo "Tudo-ou-Nada" entre os centroides das zonas de tráfego, fazendo com que alguns arcos com informações dos fluxos observados não sejam parte da rota entre pares OD. Consequentemente, não há fluxo modelado, o que faz com que os dados observados não sejam considerados pelo modelo.

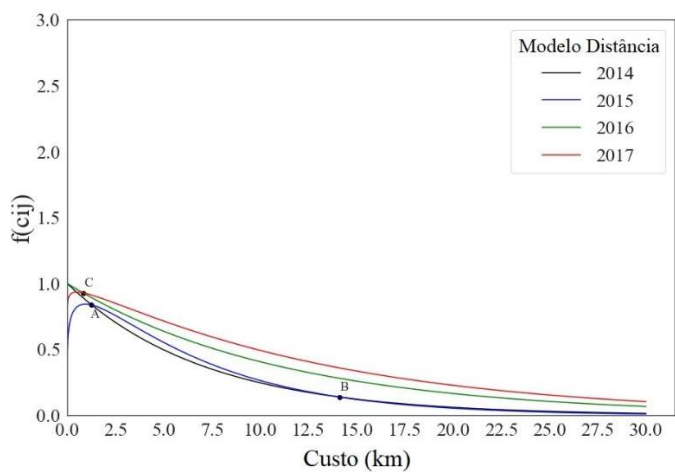
Nesse caso, o modelo “Suitability” apresenta maior número de arcos com informações de fluxo utilizados em relação aos outros modelos, apesar de ainda apresentar um número baixo se comparado aos 75 arcos em que esses dados estão disponíveis em cada cenário. Isto é, apesar das pesquisas de campo da CET não terem sido planejadas especificamente para escolha de arcos com maior probabilidade do uso dos ciclistas, o modelo “Suitability” é o que melhor aproxima as rotas modeladas dos arcos escolhidos para coleta de dados de fluxo.

Os resultados apontam que o modelo se mostrou capaz de captar a variação da demanda em termos do número total de viagens. Seguindo a tendência de crescimento dos fluxos observados nos arcos pesquisados pela CET ao longo do tempo, também se observa um crescimento no total de viagens em cada modelo de custo generalizado. Ao mesmo tempo, nota-se diferenças nesses totais na comparação entre os modelos em um mesmo ano de análise. Isso se deve principalmente devido às variações das informações de fluxo efetivamente utilizadas.

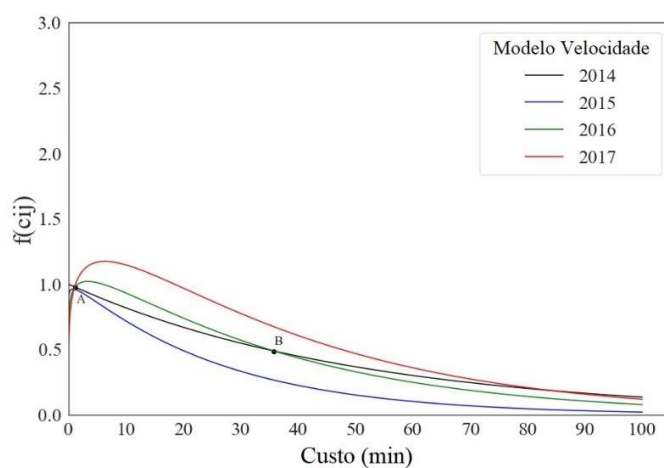
Entretanto, é interessante notar que quando diferentes modelos de custo generalizado utilizam exatamente as mesmas informações de fluxos observados, o total de viagens da matriz alvo apresenta o mesmo valor. Esse é o caso do cenário de 2016 para os modelos “Distância” e “Velocidade”, em que ambas as matrizes alvo apresentam um total de 17.693 viagens. O mesmo não acontece com o total de viagens modeladas devido ao erro associado a cada modelo.

Uma das vantagens de utilizar o erro ortogonal normalizado é a possibilidade de comparar diferentes modelos. Nesse caso, apesar do modelo “Distância” apresentar menor número de arcos contendo dados sobre os fluxos observados, o erro ortogonal normalizado é o menor entre os três modelos de custo considerados, indicando que há um melhor ajuste entre os conteúdos das matrizes alvo e modelada, seguido pelo modelo “Suitability” e “Velocidade”.

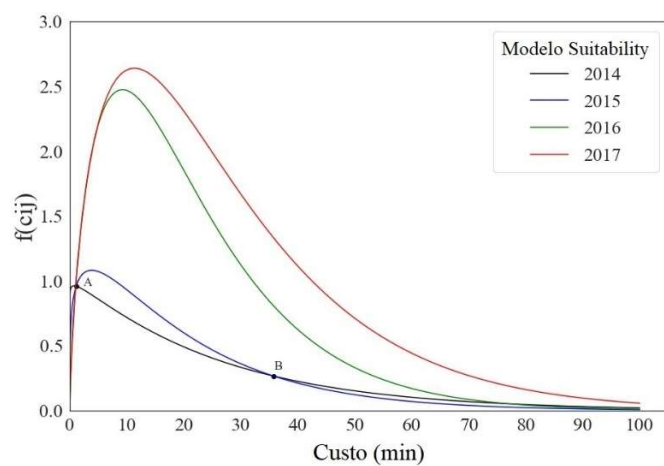
Os valores dos parâmetros β e γ apresentados na Tabela 2 são ilustrados graficamente na Figura 9. Uma vantagem do uso da função de impedância de Tanner é que a estimação dos parâmetros pode resultar em casos particulares, como por exemplo a função exponencial quando $\gamma = 0$. Este é caso dos cenários em 2014 para os modelos “Velocidade” e “Distância” e, para este último modelo, também no ano de 2016. É importante ressaltar que a função de impedância representa o inverso da percepção de dificuldade ao deslocamento entre a origem e o destino, ou seja, quanto maior o valor da função, menor é a percepção da impedância pelo indivíduo e vice-versa.



(a)



(b)



(c)

Figura 9: Funções de impedância calibradas por modelo de custo generalizado

A Figura 9a ilustra a variação da função de impedância no período de análise em relação ao modelo “Distância”. Dado que apenas os comprimentos dos arcos são considerados como custo generalizado, a influência da infraestrutura ciclovária (e outros atributos) não é

diretamente observada, mas apenas os efeitos da matriz prévia, dos fluxos observados de bicicleta e a localização dos pontos de contagem. Entretanto, Zuo e Wei (2019) afirmam que há uma forte correlação entre os fluxos de bicicletas e a presença de infraestrutura cicloviária, de modo que esta exerce influência indireta naqueles.

Devido ao método *GLS*, a adição de apenas um dado de fluxo afeta todos os pares OD da matriz prévia, mas de duas maneiras distintas. Suponha que a pesquisa de campo tenha sido conduzida apenas no arco a e que o fluxo observado seja maior que o fluxo proveniente da matriz prévia. Por um lado, os pares OD da matriz prévia que não possuem viagens passando pelo arco a terão seus fluxos aumentados de forma homogênea após a aplicação do *GLS*. Por outro lado, os pares OD que possuem viagens passando pelo arco a terão seus fluxos aumentados proporcionalmente à sua contribuição do fluxo modelado.

Nesse caso, a função de impedância será afetada de acordo com a distribuição de custos da nova matriz estimada. Um aumento homogêneo no número de viagens não afeta a função de impedância uma vez que a distribuição de custos em relação ao percentual de viagens permanece o mesmo. O que realmente afeta a distribuição de viagens são os novos valores dos pares OD cujas viagens passam pelo arco a . Se houver um maior incremento no número de viagens dos pares OD com maior custo de viagem, a função de impedância apresentará um aumento nos valores (aumento na percepção da dificuldade de deslocamento) para as viagens de maior custo. Isso acontece de maneira análoga no caso de pares OD com menor custo de viagem. Entretanto, à medida que são considerados mais arcos que possuem informações de fluxo, maior a complexidade dos seus efeitos na função de impedância.

De volta ao modelo aplicado à cidade de São Paulo, ao serem comparadas as funções do modelo “Distância”, a Figura 9a mostra um aumento no valor da função de impedância ao longo dos anos, com exceção das viagens menores que 1,3 km e maiores que 14,1 km (pontos A e B, respectivamente) entre os anos de 2014 e 2015. Isso significa que mais indivíduos estão se deslocando por maiores distâncias, indicando uma mudança na percepção da distância como uma medida de impedância. Uma vez que os dados de uso do solo foram mantidos constantes no período entre 2014 e 2016, esse resultado pode ser parcialmente explicado pelas consequências da expansão da rede cicloviária ao proporcionar uma maior conectividade entre as origens e destinos mais distantes. Ou seja, é possível que a garantia de rotas mais seguras faça os indivíduos viagem distâncias maiores de bicicleta.

Obviamente, a alteração dos custos de viagem afeta diretamente a distribuição dos custos de viagem. No caso de uma matriz OD constante, a diminuição dos custos de viagem entre os centroides representa um aumento no número de viagens com menor custo e,

consequentemente, uma diminuição do número de viagens com custos maiores, fazendo com que a função de impedância apresente maiores valores em viagens com menor custo e um decaimento à medida que esses custos aumentam.

Essa variação dos custos de viagem também pode afetar a rota entre cada par OD e, consequentemente, a utilização de arcos que possuem dados de fluxo observados. Nesse caso, tanto um arco a pode deixar de ser utilizado, quanto um arco b pode passar a ser utilizado em uma nova rota do mesmo par OD. Entretanto, nem sempre isso representa redução da impedância devido à nova rota de menor custo, uma vez que a informação de fluxo adicionada (ou retirada) pode afetar positivamente (ou negativamente) o número de viagens deste par OD como explicado anteriormente. Dessa maneira, nos modelos “Velocidade” e “Suitability”, a distribuição de viagens e, consequentemente, a função de impedância, é afetada no modelo tanto pela matriz corrigida pelos fluxos, quanto pelas variações do custo de viagem devido à alteração da infraestrutura cicloviária ao longo do tempo.

A Figura 9b apresenta as variações da função de impedância para o modelo “Velocidade”. Apesar da expansão da rede cicloviária, os resultados desse modelo mostram um aumento da percepção de impedância entre os anos 2014 e 2015, especialmente para viagens de longa duração, em que as diferenças entre as curvas da função de impedância são maiores. A percepção de impedância volta a diminuir em 2016 quando comparada aos valores de 2015. Entretanto, apenas as viagens menores que 35 minutos (ponto A da Figura 9b) apresentam uma melhora em relação a 2014, enquanto para viagens mais longas que esse tempo (ponto B da Figura 9b), a percepção de impedância ainda permanece maior em 2016.

A variação da impedância para o modelo “Suitability” é apresentada na Figura 9c. Em geral, a percepção de impedância ao deslocamento diminuiu ao longo do tempo, com exceção das viagens com duração maior que 35 minutos entre os anos de 2014 e 2015. Entre 2015 e 2016 houve um foco maior, por parte dos tomadores de decisão, na conexão e continuidade das infraestruturas já existentes nessa etapa de expansão da rede cicloviária, de modo que mais destinos passaram a ser acessíveis de bicicleta por meio de rotas mais seguras e confortáveis. Nesse sentido, é possível que isso tenha contribuído para o aumento significativo dos valores da função de impedância, provocando uma queda perceptível na percepção de impedância.

Todos os modelos de custo generalizado apresentam um incremento nos valores da função de impedância entre os anos de 2016 e 2017, em que houve uma mudança da matriz prévia utilizada e a rede cicloviária permaneceu praticamente inalterada. A matriz prévia de 2017 apresenta um aumento no número de pares OD com fluxos não-nulos de viagens por bicicleta

quando comparada à matriz prévia de 2007, indicando que o uso da bicicleta na cidade de São Paulo está espacialmente mais distribuído. Ou seja, as funções de impedância indicam que os indivíduos têm realizado viagens de maior custo.

5.2. Acessibilidade potencial

Uma vez estimados os parâmetros das funções de impedância, a acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo no horário de pico da manhã foi calculada conforme a Equação 1 para cada zona de tráfego em cada cenário estabelecido. Assume-se que o número de empregos e matrículas escolares no período entre 2014 e 2016 é constante, referentes aos dados da Pesquisa OD de 2007, enquanto para ano de 2017 esses valores são referentes à Pesquisa OD realizada naquele ano.

A Figura 10 ilustra os valores da acessibilidade potencial total às oportunidades de emprego e estudo na cidade de São Paulo pelo modo ciclovitário, isto é, a soma do nível de acessibilidade de todas as zonas de tráfego do município.

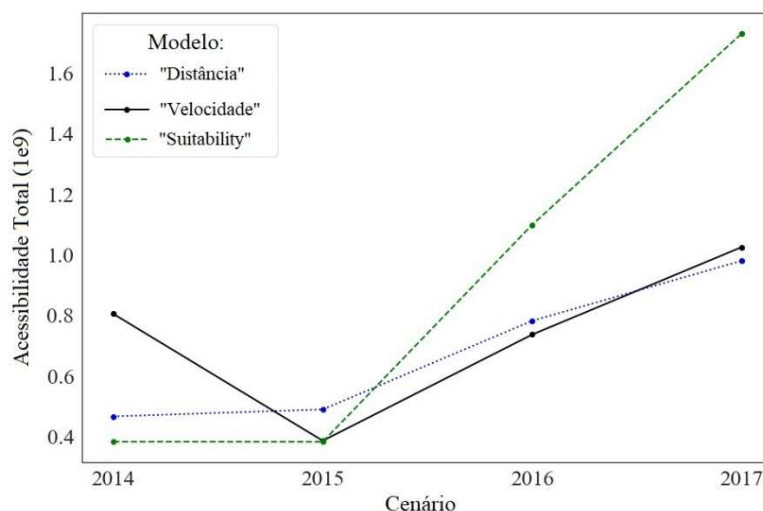


Figura 10: Acessibilidade potencial total às oportunidades de emprego e estudo na cidade de São Paulo pelo modo ciclovitário

De acordo com a Equação 1, a função de impedância compõe uma das parcelas da acessibilidade potencial, de modo que no período entre 2014 e 2016 é possível estabelecer uma relação diretamente proporcional entre ambos, uma vez que as informações relativas ao uso do solo foram mantidas constantes. Dessa maneira, o crescimento ou decréscimo da acessibilidade total mantém uma correlação proporcional às diferenças entre as curvas das funções de impedância ano a ano.

O modelo “Velocidade” mostra que o aumento da percepção de impedância entre os anos de 2014 e 2015 (Figura 9b) reflete na queda da acessibilidade potencial no período representada na Figura 10. A queda na percepção de impedância entre 2015 e 2016 provoca um aumento da acessibilidade, mas ainda abaixo do patamar encontrado em 2014, principalmente devido à manutenção da baixa percepção à impedância na proporção de viagens com duração maior que 35 minutos (ponto B Figura 9b).

Em contrapartida, o modelo “Suitability” apresenta uma manutenção dos valores da acessibilidade total entre os anos de 2014 e 2015 devido à interposição das curvas da função de impedância no período (Figura 9c). A queda significativa da percepção de impedância entre 2015 e 2016 nesse modelo reflete em importante aumento na acessibilidade no período. E, assim como os valores da função de impedância crescem gradualmente no modelo “Distância” (Figura 9a), a acessibilidade total considerando esse modelo apresenta comportamento semelhante.

A Tabela 3 apresenta os resultados agregados da acessibilidade total para cada modelo de custo nos cenários estabelecidos.

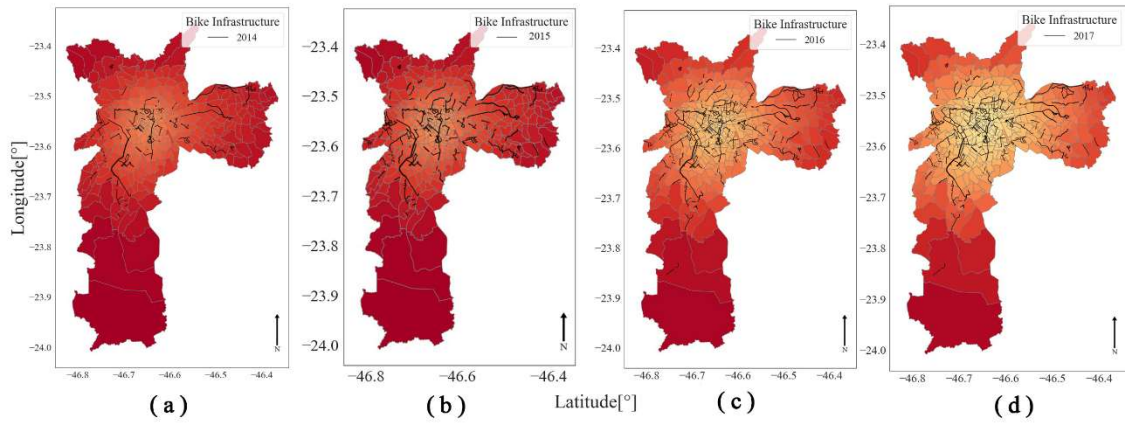
Tabela 3: Análise descritiva da acessibilidade potencial das zonas de tráfego

Modelo de custo / ano	Média (10⁶)	Desvio Padrão (10⁵)	Min (10³)	Max (10⁶)
Modelo Distância				
2014	1,46	6,50	23,53	2,62
2015	1,53	7,14	17,65	2,78
2016	2,44	8,20	127,74	3,73
2017	2,88	8,93	198,29	4,18
Modelo “Velocidade”				
2014	2,52	8,84	70,67	3,93
2015	1,21	6,55	3,52	2,52
2016	2,32	9,95	19,03	4,01
2017	3,06	12,03	26,68	5,13
Modelo “Suitability”				
2014	1,20	6,44	9,46	2,51
2015	1,20	7,68	4,54	2,88
2016	3,43	22,55	10,12	8,00
2017	5,24	29,08	28,75	10,34

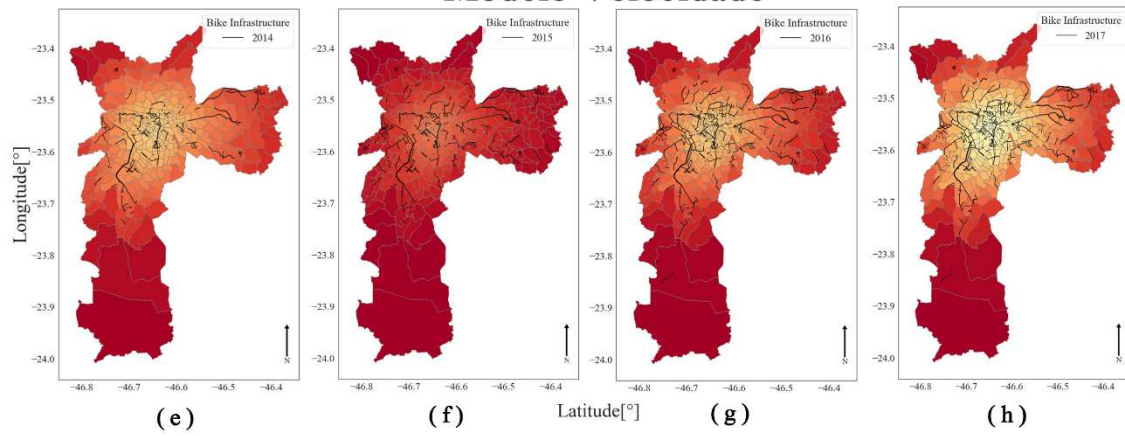
A acessibilidade potencial média das zonas de tráfego se comporta de maneira semelhante à acessibilidade total. Em contrapartida, é possível observar o aumento do desvio padrão ao longo dos anos, com exceção do período entre 2014 e 2015 no modelo “Velocidade”. Juntamente com os dados sobre a acessibilidade máxima e mínima (zonas de tráfego com maior e menor valores de acessibilidade potencial, respectivamente), é possível afirmar que há um crescimento desigual na acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo na cidade, de modo que algumas regiões se beneficiaram mais da expansão da rede cicloviária que outras.

A Figura 11 ilustra a distribuição da acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo por zona de tráfego conforme os modelos de custo generalizado considerados e a oferta de infraestrutura cicloviária disponível a cada ano do período de análise. Dada a concentração de empregos e matrículas escolares na região central e na região sudoeste da capital conforme ilustrado na Figura 4 da Seção 4.1, maiores índices de acessibilidade são observados nessas regiões como esperado.

Modelo Distância



Modelo Velocidade



Modelo Suitability

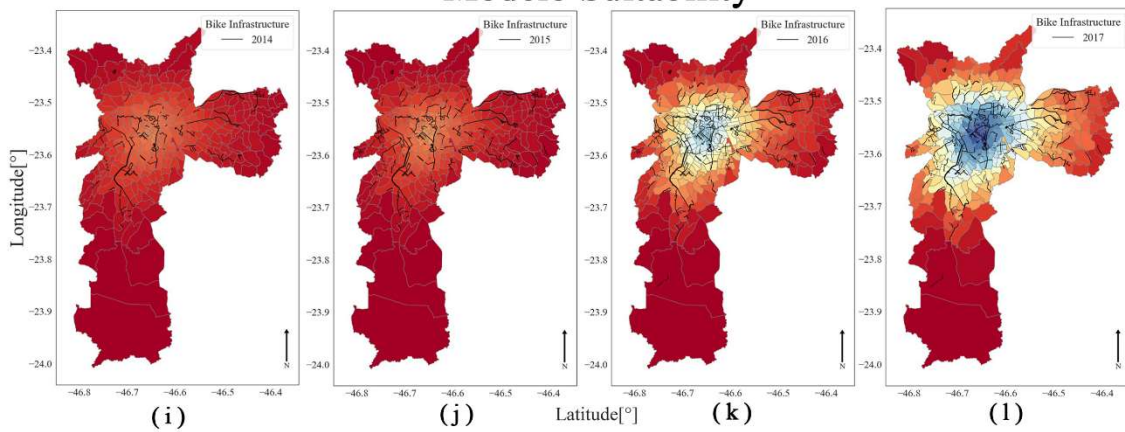


Figura 11: Acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo na cidade de São Paulo entre 2014 e 2017

Analisando o modelo “Distância” (Figura 11a à Figura 11d), observa-se que a acessibilidade potencial aumenta significativamente no centro da cidade e, em menor grau, à medida que se aproxima da periferia, uma vez que os indivíduos passaram a viajar maiores distâncias de acordo com a discussão feita sobre a função de impedância. Entretanto, é possível notar que, em valores absolutos, a acessibilidade potencial para este modelo apresenta valores medianos se comparados ao valor máximo calculado entre os três modelos.

A função de impedância impacta significativamente os resultados quando a acessibilidade potencial é calculada a partir dos valores dos parâmetros obtidos do modelo “Velocidade” (Figura 11e à Figura 11h). Entre os anos de 2014 e 2015, todas as zonas de tráfego apresentaram diminuição da acessibilidade potencial devido ao aumento da percepção de impedância, enquanto o oposto é observado entre 2015 e 2016. Por outro lado, é possível observar que em 2016, enquanto as zonas mais próximas à concentração de empregos e estudo apresentaram crescimento em relação à 2014, o oposto não ocorre nas regiões mais distantes, assim como observado na comparação entre as respectivas funções de impedância.

Em comparação ao modelo “Distância”, o modelo “Velocidade” apresenta valores máximos de acessibilidade maiores no ano de 2017, principalmente na região central. Entretanto, observa-se no segundo modelo que há uma queda mais acentuada na acessibilidade à medida que as zonas ficam mais distantes do centro, enquanto o primeiro mostra que as regiões periféricas possuem maior acessibilidade. Nesse sentido, é possível afirmar que o custo generalizado do modelo “Velocidade” é percebido de forma mais sensível que o do modelo “Distância” como dificuldade ao deslocamento.

O fato de que a variação da percepção da impedância é proporcional à distância entre as curvas da função é mais facilmente observado no modelo “Suitability” entre os anos 2015 e 2016 (Figura 9c). Da mesma maneira, as Figura 11j e Figura 11k apresentam um forte incremento da acessibilidade potencial naquele período, especialmente para viagens com custo generalizado menor que 30 minutos. Nesse caso, é possível verificar mais claramente a influência da infraestrutura cicloviária no aumento da acessibilidade na região central da cidade e provavelmente no aumento do fluxo de bicicletas observados na pesquisa de campo conduzida pela CET.

Nota-se a existência de uma relação entre a conectividade da rede cicloviária e a acessibilidade das zonas de tráfego no modelo “Suitability” (Figuras 11i à 11l). No período de 2015 a 2016, a expansão da rede cicloviária foi particularmente voltada à conexão entre as infraestruturas já existentes, aumentando a sua continuidade. Todavia, a maior parte dos novos trechos foram implantados no eixo centro-sudoeste. Como resultado, observa-se maior

incremento da acessibilidade nessa região, enquanto a zona leste da capital, apesar da presença de infraestrutura cicloviária, permanece desconectada da região central, o que pode ter contribuído para limitar o aumento da acessibilidade em direção à periferia.

A Figura 12 ilustra a variação percentual anual da acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo na cidade de São Paulo ao longo do período de análise. A partir dessas imagens é possível observar mais claramente o reflexo do comportamento entre as curvas das funções de impedância de dois cenários na variação da acessibilidade potencial.

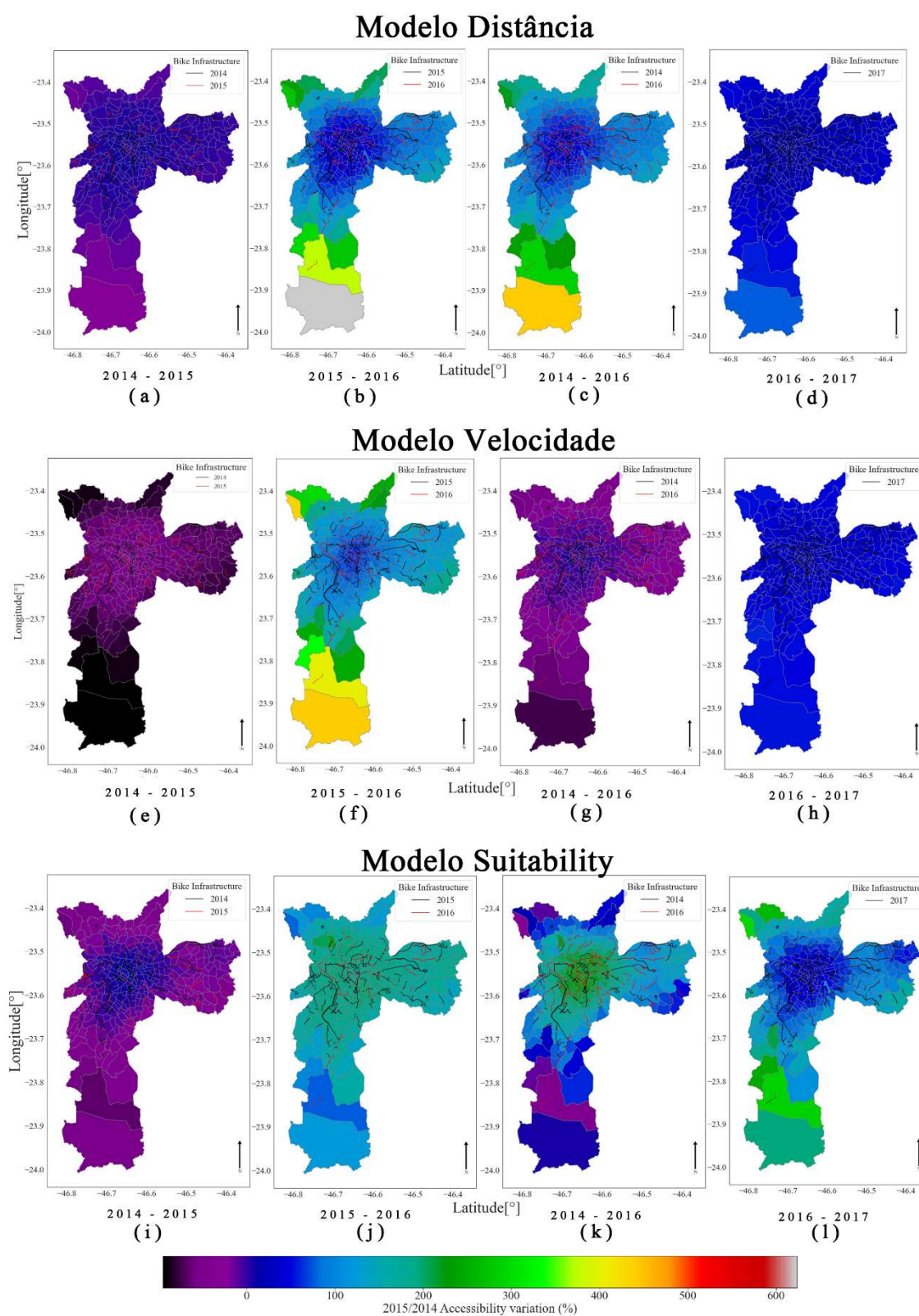


Figura 12: Variação da acessibilidade potencial às oportunidades de emprego e estudo na cidade de São Paulo entre 2014 e 2017

Considerando o modelo “Distância” (Figura 12a à Figura 12d), é possível observar queda na acessibilidade nas zonas mais distantes da região central da cidade entre 2014 e 2015 devido ao aumento da percepção de impedância para viagens maiores que 14,1 km (ponto B da Figura 9a), enquanto as zonas próximas à concentração de oportunidades de emprego e estudo apresentaram um pequeno aumento nos índices de acessibilidade. Houve um aumento no valor da função de impedância entre 2015 e 2016, maior à medida que o custo aumenta, e o mesmo ocorre para a acessibilidade potencial, em que todas as zonas de tráfego apresentaram crescimento da acessibilidade, principalmente nas zonas mais distantes da região central da cidade.

A variação da acessibilidade potencial quando aplicado o modelo “Velocidade” é ilustrado pelas Figura 12e à Figura 12h. Assim como a discussão feita sobre o comportamento da função de impedância, a acessibilidade potencial apresenta uma queda significativa entre os anos 2014 e 2015 em todo território da cidade, principalmente nas regiões periféricas, em que a percepção do aumento da impedância é maior que em relação à área central. Em seguida observa-se uma recuperação entre os anos de 2015 e 2016, mas quando comparados os anos de 2014 e 2016, é possível perceber que apenas o eixo centro-sudoeste apresenta um crescimento da acessibilidade, enquanto o restante da cidade apresenta uma queda no acesso ao emprego e estudo pelo modo ciclovitário.

Entre 2016 e 2017 é observado um crescimento aproximadamente constante em toda a cidade em ambos os modelos “Distância” e “Velocidade”, seguindo o comportamento da diferença quase constante entre as curvas da função de impedância, apresentadas na Figura 9, entre esses dois anos, apesar dessa influência ser parcial devido às mudanças nos dados sobre o uso do solo.

Por fim, é possível observar as variações da acessibilidade quando aplicado o modelo “Suitability” (Figuras 12i às 12l). A variação entre 2014 e 2015 ocorre de maneira semelhante ao modelo “Distância”. Entretanto, é importante ressaltar o contraste entre esses dois modelos nas comparações subsequentes. Enquanto o modelo “Distância” apresenta maior variação positiva nos subúrbios, o modelo “Suitability” apresenta o mesmo resultado na região central, com exceção da comparação entre os anos de 2016 e 2017. Isso pode indicar que, apesar da mudança sobre a percepção da distância como impedância à viagem de bicicleta (mais indivíduos aceitam viajar maiores distâncias), o aumento da segurança e conforto ao longo da viagem foi mais significativo nas regiões com maior concentração de infraestruturas cicloviárias.

Em geral, houve um aumento médio da acessibilidade em toda a cidade em todos os modelos. O fato da expansão cicloviária ter sido feita prioritariamente na região central, em que há uma grande concentração de oportunidades de emprego e estudo, contribuiu para a forte diminuição da percepção da dificuldade do deslocamento por bicicleta às viagens mais curtas ou de menor duração. Consequentemente, observou-se um aumento significativo nos níveis de acessibilidade nessa área, principalmente nos resultados do modelo “Suitability”.

Os resultados também apontam uma maior disposição dos indivíduos à realização de viagens mais longas, ou de maior duração, favorecendo os níveis de acessibilidade nas regiões periféricas da cidade. Entretanto, em termos absolutos, os residentes dessas áreas ainda possuem um baixo nível de acesso, indicando que políticas focadas apenas no aumento da infraestrutura cicloviária, à parte de políticas integradas ao uso do solo, são insuficientes para estabelecer uma maior equidade no acesso às oportunidades urbanas. Isso é particularmente importante quando se leva em consideração o perfil socioeconômico desses indivíduos, majoritariamente de classe mais baixa.

Entre os anos de 2015 e 2016, houve uma preocupação por parte do governo municipal em promover a conexão entre as infraestruturas já existentes, principalmente em direção à região sudeste e, em menor escala, para a região norte. Os resultados mostram um aumento na acessibilidade (modelo “Suitability”) em direção a essas áreas. Em contraste, a zona leste da cidade, apesar da expansão da rede cicloviária, não apresentou o mesmo crescimento no acesso às oportunidades de emprego e estudo, parcialmente devido à descontinuidade da rede em direção ao centro da cidade, provocando uma menor atração ao modo cicloviário.

6. CONCLUSÕES

Apesar do desenvolvimento teórico das últimas décadas, o planejamento de transportes sob a perspectiva da acessibilidade ainda é raro. Particularmente ao modo cicloviário, a presença de ciclovias e ciclofaixas desempenha papel importante na impedância ao deslocamento no sistema viário, afetando diretamente os níveis de acesso às oportunidades urbanas por este modo de transporte. Embora este conceito esteja presente em muitos planos cicloviários, métricas relacionadas à acessibilidade não são calculadas, o que dificulta a tomada de decisão.

Esta pesquisa cumpre com o objetivo de analisar a influência das infraestruturas cicloviárias e do fluxo de ciclistas na determinação, assim como na variação, nos níveis de acessibilidade cicloviária em períodos de médio prazo. A partir da utilização de custos generalizados estimados sob diferentes perspectivas e da incorporação dos dados de contagem de bicicletas observados no sistema viário ao modelo gravitacional de distribuição de viagens, o método apresentado permite identificar os impactos causados pelas alterações da rede cicloviária na demanda de viagens, assim como na impedância ao deslocamento, que afetam diretamente os níveis de acessibilidade.

Assumindo que o uso do solo não sofre alterações significativas em intervalos de tempo relativamente pequenos, três diferentes modelos de custo generalizado (“Distância”, “Velocidade” e “Suitability”) foram utilizados para aplicação do método proposto na cidade de São Paulo entre os anos 2014 e 2017. O modelo provou ser útil na obtenção da variação da acessibilidade por meio da estimação dos parâmetros da função de impedância.

Além disso, os resultados mostram tanto o impacto direto da infraestrutura cicloviária, observado por meio da diminuição dos custos generalizados de viagem, quanto um impacto indireto, gerado pelo aumento da demanda em termos de fluxos e do total de viagens. Assim, pelo método adotado, torna-se difícil estabelecer hipóteses em busca da influência puramente da infraestrutura cicloviária sem levar em consideração os impactos que os fluxos exercem nos resultados.

Embora a função de impedância do tipo exponencial seja a mais comumente utilizada nos modelos de distribuição de viagens, a presente pesquisa adota a função de Tanner, cujas vantagens são a flexibilidade quanto às viagens mais curtas, que refletem melhor as viagens de bicicleta, e a possibilidade de recair no caso especial da função exponencial, como foi possível observar nos resultados apresentados.

Nesse caso, apesar da principal contribuição teórica desta dissertação ser a inclusão dos dados de fluxo de bicicletas para estimar os parâmetros da função de impedância em períodos

de curto e médio prazo, apresenta-se uma segunda contribuição por meio da utilização de um algoritmo para calibração desses parâmetros para o caso de funções com dois parâmetros como uma alternativa às limitações do tradicional método de Hyman (1969) (BATTY, 1976).

Como consequência da contribuição teórica e apesar das limitações da aplicação, os resultados apontam para as implicações práticas do modelo no planejamento cicloviário e tomada de decisão. Ao permitir a análise das consequências das modificações na rede cicloviária na acessibilidade por meio de métodos já consolidados por profissionais do planejamento de transportes, o método mostra-se útil para aplicação das métricas de acessibilidade para avaliação mais frequente das diretrizes impostas pelos Planos Cicloviários. Ao mesmo tempo, aponta para o fato de que as políticas voltadas ao desenvolvimento sustentável devem conter elementos não só voltados à expansão da rede cicloviária, mas aspectos ligados ao uso do solo, conforme apontado por Banister (2008).

Finalmente, o método permite a inclusão das métricas de acessibilidade no processo de planejamento cicloviário na proposição de metas e na tomada de decisão. Ao invés da adoção de metas simplistas, como o total de quilômetros de novas infraestruturas a serem implementados, a utilização de métricas de acessibilidade enriquece os resultados, ampliando o papel das infraestruturas cicloviárias não só em promover um melhor acesso às oportunidades urbanas, mas também na análise quanto à equidade e equilíbrio ambiental como salientado por Giannotti *et al.* (2021) e Lucas, Van Wee e Maat (2016).

6.1. Limitações da pesquisa

Apesar das contribuições e de alcançar os objetivos principal e específicos propostos, a pesquisa apresenta limitações, tanto de caráter teórico quanto de aplicação no estudo de caso na cidade de São Paulo.

Primeiro, é importante ressaltar que as matrizes prévias utilizadas são esparsas, isto é, possuem uma grande quantidade de zeros, dado o baixo número de pares OD com viagens de bicicleta no pico da manhã por motivo trabalho ou estudo. Na pesquisa domiciliar conduzida em 2007, dos 102.400 pares OD representados na matriz, apenas 114 apresentaram fluxo de bicicleta, enquanto em 2017, dos 116.964 pares OD existentes, 191 apresentaram fluxos não nulos. Assim, seguindo a lógica da técnica de 4 Etapas, modelos de Geração de Viagens podem ser aplicados antes dos modelos de Distribuição de Viagens para evitar a estimação de matrizes modeladas que também apresentem muitos valores nulos.

Todavia, o modelo proposto pressupõe a estimação da matriz alvo a partir da atualização da matriz prévia e, assim, permite a estimação da matriz modelada. Especificamente nesse

caso, os modelos de estimação de matrizes baseados em dados de contagem encontram dificuldades em atualizar células com valores nulos da matriz prévia. Uma solução possível é adotar valores pequenos e não-nulos na matriz prévia, porém isso pode gerar matrizes com resultados distorcidos (OLIVEIRA NETO; PITOMBEIRA NETO, 2016). Logo, assumiu-se trabalhar com as matrizes esparsas, considerando apenas os pares OD não nulos observados em cada matriz OD observada, tanto para o cálculo da matriz alvo quanto para estimação da matriz modelada, dada que era a única evidência disponível sobre as viagens feitas por bicicleta.

Devido à ausência de pesquisas relacionadas à modelos que representem os impactos dos diferentes atributos que influenciam o custo de uma rota para ciclistas no contexto de São Paulo (potencialmente obtidos por modelos escolha de rota), três modelos de custo generalizado foram adotados. Uma vez que os pesos dos atributos dos modelos adotados são provenientes de amostras de ciclistas em outros contextos, como o canadense e holandês, deve-se levar em consideração a existência de diferenças significativas em relação processo decisório dos ciclistas no contexto local. Além disso, os modelos “Velocidade” e “Suitability” adotam pressupostos distintos quanto ao critério de escolha de rota adotado pelo ciclista. O primeiro assume a minimização do tempo de viagem e o segundo a maximização da percepção de conforto e segurança, traduzidos em um tempo de viagem equivalente. Isso também contribuiu para utilização de diferentes arcos com dados de fluxo e, juntamente com as diferentes composições de custo e critério de escolha de rota, levou às diferenças nos resultados apresentados nos modelos.

Outro aspecto importante da aplicação do método proposto diz respeito à escolha pelo método de alocação “Tudo-ou-Nada”. Assim como ocorrido no estudo de caso, é possível que, a depender do modelo de custo generalizado adotado, alguns arcos da rede em que as informações sobre o fluxo observado de bicicletas estejam disponíveis apresentem fluxos modelados iguais a zero. Isso também é influenciado pelo fato de haver poucos pares OD com valores não-nulos, implicando que os dados de fluxo observado em nada contribuem para atualização da matriz por meio do método *GLS*. Isto é particularmente importante quando se observa a característica dos arcos em que foram observados. É possível observar na Tabela 2 que o modelo “Suitability” utiliza, em geral, mais arcos com informações sobre os fluxos que os outros modelos.

A escolha pelo método de alocação “Tudo-ou-Nada” também apresenta implicações nas etapas do modelo proposto. Uma vez que as condições de tráfego não alteram os custos de deslocamento nesse caso, a matriz de custos de viagem entre os centroides das zonas de

tráfego permanece constante para um mesmo cenário, de modo que os custos de viagem não são alterados a cada iteração. O principal motivo dessa escolha é que, no caso da bicicleta, ainda há poucos estudos que discutem a influência das condições de tráfego de bicicletas na composição do custo de viagem. Entretanto, uma vez disponíveis essas informações ou no caso da aplicação para modos motorizados, é possível adaptar o método segundo a premissa de Equilíbrio do Usuário por meio do cálculo das matrizes de custo a cada iteração do modelo.

Além disso, é preciso considerar que as pesquisas conduzidas pela CET para coleta dos dados de fluxo foram inicialmente desenhadas para os modos motorizados e que, posteriormente, passaram a ser considerados os fluxos de ciclistas sem, no entanto, serem feitas considerações adequadas quanto aos arcos mais utilizados por ciclistas. Logo, é preciso considerar que os resultados também foram afetados pela localização dos arcos em que foram conduzidas as pesquisas de campo.

Por fim, a literatura apresenta diferentes modelos de construção de matrizes OD baseados em dados de contagem. Nesta pesquisa adotou-se o modelo *GLS* devido à ausência de problemas ligados à continuidade dos fluxos (CASCETTA, 1984) e à flexibilidade de dar maior peso aos dados da matriz OD ou dos fluxos, de acordo com a qualidade dos dados ou proximidade temporal da coleta. Entretanto, é possível que diferentes métodos sejam aplicados.

6.2. Sugestões para futuras pesquisas

Para o contexto local, e até nacional, torna-se cada vez mais importante a condução de pesquisas voltadas à construção de modelos de escolha de rotas para os ciclistas. Grande parte dos modelos desenvolvidos até o momento são oriundos de países desenvolvidos, na América do Norte e Europa, de modo que é possível explorar as diferenças dos contextos urbanos e culturais que afetam os pesos de diferentes atributos no processo de escolha de rota. O clima, os índices de violência pública e de acidentes são alguns dos aspectos que não são considerados nos modelos mais conhecidos, além da presença de possíveis heterogeneidades entre diversos segmentos da população, como por exemplo as diferenças entre homens e mulheres, dada a baixa participação feminina no uso da bicicleta, a idade e a renda.

Além disso, à medida que se aumentam os fluxos de ciclistas em determinados arcos da rede, surgem problemas de congestionamento de bicicletas, como já é possível observar (antes da pandemia da COVID-19) na Av. Faria Lima, na cidade de São Paulo, por exemplo. Portanto, recomenda-se o estudo da incorporação de conceitos como níveis de serviço do

tráfego de bicicletas na escolha de rota e a possível adaptação das premissas dos modelos baseados no Equilíbrio do Usuário ao modo ciclovitário.

A estrutura metodológica proposta nesta pesquisa pode ser extrapolada à aplicação e adaptação a outros modos de transporte, como os automóveis. Em cidades em que a quantidade de equipamentos eletrônicos voltados a esse modo é maior e mais bem distribuída ao longo da rede viária e, uma vez que as informações de fluxo são continuamente coletadas ao longo do dia e do ano, é possível ampliar o método para modelos dinâmicos para captação dos efeitos diários e sazonais da demanda nos níveis de acessibilidade.

A incorporação dos dados de fluxo na estimação de funções de demanda permite também a exploração de pesquisas relacionadas à resiliência dos sistemas de transportes urbanos. Dada a queda dos níveis de serviço desses sistemas quando da ocorrência de fenômenos naturais extremos, como fortes chuvas, enchentes etc., o aumento significativo da impedância ao deslocamento nesses cenários pode ser estimado pelo modelo proposto e, conseqüentemente, ser utilizado para análise dos níveis de acesso aos equipamentos de emergência como os hospitais, por exemplo. Além disso, permite-se a utilização dessas medidas ao longo das fases disruptiva e de recuperação dos sistemas de transportes no período de ocorrência desses fenômenos.

Por fim, é importante ressaltar que esta dissertação apresenta a importância da oferta de infraestrutura ciclovitária e a coleta de dados agregados sobre o padrão de deslocamentos da área de estudo. Sob a perspectiva da demanda de viagens por bicicleta, a literatura apresenta diversos modelos de escolha de modo baseados em premissas tradicionais como a teoria da utilidade e minimização dos custos generalizados. Todavia, pesquisas recentes têm demonstrado que fatores subjetivos como atitudes, bem-estar e satisfação para com a bicicleta, as normas sociais, percepção de segurança, a formação de hábitos e comportamentos desempenham um papel tão, ou até mais, importantes que os aspectos econômicos e do ambiente construído nesse processo. Nesse sentido, pesquisadores têm procurado sistematizar o processo de escolha pela bicicleta por meio de teorias de mudança de comportamento e na consolidação dos métodos quantitativos para sua interpretação, o que pode auxiliar na proposição de políticas de incentivo ao modo ciclovitário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARELLANA, J; SALTARÍN, M.; LARRANAGA, A. M.; GONZALEZ, V.; HENAO, C. A. Developing an urban bikeability index for different types of cyclists as a tool to prioritise bicycle infrastructure investments. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2020. v. 139, n. July, p. 310–334. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.07.010>>.

BANISTER, D. The sustainable mobility paradigm. **Transport Policy**, 2008. v. 15, n. 2, p. 73–80. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005>>.

BATTY, M; MACKIE, S. The Calibration of Gravity, Entropy, and Related Models of Spatial Interaction. **Environment and Planning A: Economy and Space**, 1972. v. 4, n. 2, p. 205–233.

BATTY, Michael. **Cambridge Urban and Architectural Studies: 3. Urban Modelling. Algorithms, Calibrations, Predictions**. [S.l.]: [s.n.], 1976.

BAZARAA, M.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. **Nonlinear Programming: Theory and Algorithms**. 3th. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006.

BELL, M. G. H. *et al.* A stochastic user equilibrium path flow estimator. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 1997. v. 5, n. 3–4, p. 197–210.

BENEDINI, D. J.; LAVIERI, P. S.; STRAMBI, O. Understanding the use of private and shared bicycles in large emerging cities: The case of Sao Paulo, Brazil. **Case Studies on Transport Policy**, 2019. n. June 2018, p. 0–1. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.11.009>>.

BERA, S.; RAO, K. V. K. Estimation of origin-destination matrix from traffic counts: The state of the art. **European Transport - Trasporti Europei**, 2011. v. 49, n. 49, p. 3–23.

BERTONCINI, B. V. Uma proposta de Estimação da matriz OD a partir de fluxos de tráfego observados nas interseções de rede de transportes. **USP São Carlos**, 2010. p. 232.

BIGAZZI, A.; LINDSEY, R. A utility-based bicycle speed choice model with time and energy factors. **Transportation**, 2019. v. 46, n. 3, p. 995–1009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11116-018-9907-2>>.

BOCAREJO S., J. P.; OVIEDO H., D. R. Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments. **Journal of Transport Geography**, 2012. v. 24, p. 142–154. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.12.004>>.

BOISJOLY, G.; EL-GENEIDY, A. M. The insider: A planners' perspective on accessibility. **Journal of Transport Geography**, 2017. v. 64, n. July, p. 33–43.

BOSNICH, Leandro. **Acessibilidade e desigualdade socioeconômica na Região Metropolitana de São Paulo**. 2017. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Planejamento e Gestão do Território, Universidade Federal do ABC, Santo André, 2017.

BOVY, P. H. L.; FIORENZO-CATALANO, S. Stochastic route choice set generation: Behavioral and probabilistic foundations. **Transportmetrica**, 2007. v. 3, n. 3, p. 173–189.

BRASIL. Lei nº 12.587, de 03 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 04 jan. 2012. Seção 1, p. 1.

BROACH, J.; DILL, J.; GLIEBE, J. Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2012. v. 46, n. 10, p. 1730–1740. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2012.07.005>>.

BROACH, J.; GLIEBE, J.; DILL, J. Calibrated labeling method for generating bicyclist route choice sets incorporating unbiased attribute variation. **Transportation Research Record**, 2010. n. 2197, p. 89–97.

CASCETTA, E. Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: A generalized least squares estimator. **Transportation Research Part B**, 1984. v. 18, n. 4–5, p. 289–299.

CET. **Plano Ciclovitário do município de São Paulo**. Disponível em: <http://www.cetsp.com.br/media/1100812/Plano-Ciclovitário_2020.pdf>.

CHAPADEIRO, F. C. **LIMITES E POTENCIALIDADES DO PLANEJAMENTO CICLOVIÁRIO: UM ESTUDO SOBRE A PARTICIPAÇÃO CIDADÃ**. [S.l.]: Universidade de Brasília, 2011. ISBN 9780071784993.

CLARRY, A.; FAGHIH IMANI, A.; MILLER, E. J. Where we ride faster? Examining cycling speed using smartphone GPS data. **Sustainable Cities and Society**, 2019. v. 49, n. March 2018, p. 101594. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101594>>.

CURITIBA, P. De. **Plano de estrutura ciclovitária de Curitiba**. [S.l.]: [s.n.], 2019. Disponível em: <http://www.ippuc.org.br/visualizar.php?doc=http://admsite2013.ippuc.org.br/arquivos/documentos/D327/D327_029_BR.pdf>.

DAVIS, J. **Bicycle Safety Evaluation**. Chattanooga: Auburn University, 1987.

DIXON, L. B. Bicycle and Pedestrian Level-of-Service Performance Measures and Standards for Congestion Management Systems. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s.l.], v. 1538, n. 1, p. 1-9, jan. 1996.

DOBLAS, J.; BENITEZ, F. G. An approach to estimating and updating origin-destination matrices based upon traffic counts preserving the prior structure of a survey matrix. **Transportation Research Part B: Methodological**, 2005. v. 39, n. 7, p. 565–591.

EHRGOTT, M.; WANG, J.; RATH, A.; VAN HOUTTE, C. A bi-objective cyclist route choice model. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2012. v. 46, n. 4, p. 652–663. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2011.11.015>>.

EPPERSON, B. Evaluating Suitability of Roadways for Bicycle Use: Toward a Cycling Level-of-Service Standard. **Transportation Research Record**, Washington D. C., v. 1438, n. 1, p. 99-16, nov. 1994.

EVANS, A. W. The calibration of trip distribution models with exponential or similar cost functions. **Transportation Research**, 1971. v. 5, n. 1, p. 15–38.

FAGHIH IMANI, A.; MILLER, E. J.; SAXE, S. Cycle accessibility and level of traffic stress: A case study of Toronto. **Journal of Transport Geography**, 2019. v. 80, n. January.

FELDMAN, O.; FORERO-MARTINEZ, J.; COOMBE, D. Alternative Gravity Modelling Approaches for Trip Matrix Synthesis. **Transport Conference 2012**, 2012. n. June, p. 42–50. Disponível em: <<http://trid.trb.org/view.aspx?id=1324902>>.

FERREIRA, A.; BATEY, P. Re-thinking accessibility planning: A multi-layer conceptual framework and its policy implications. **Town Planning Review**, 2007. v. 78, n. 4, p. 429–458.

FERREIRA, A.; PAPA, E. Re-enacting the mobility versus accessibility debate: Moving towards collaborative synergies among experts. **Case Studies on Transport Policy**, 2020. v. 8, n. 3, p. 1002–1009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.04.006>>.

FORTALEZA, P. De. **Plano Diretor Cicloviário de Fortaleza**. [S.l.]: [s.n.], 2015. Disponível em: <https://mobilidade.fortaleza.ce.gov.br/images/pdf/PDCI_FORTALEZA.pdf>.

FREITAS, A. L. P.; MACIEL, A. B. L. Cycling in a Brazilian City. **Procedia Engineering**, 2017. v. 198, n. September 2016, p. 411–418. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.096>>.

GASPAR, R. C. A cidade de São Paulo: Mudanças na economia metropolitana. **Pesquisa & Debate**, São Paulo, v. 2314, n. 1, p. 134-153, nov. 2011.

GE, Q.; FUKUDA, D. Updating origin-destination matrices with aggregated data of GPS traces. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2016. v. 69, p.

291–312. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2016.06.002>>.

GEURS, K. T.; PAIX, L. LA; VAN WEPEREN, S. A multi-modal network approach to model public transport accessibility impacts of bicycle-train integration policies. **European Transport Research Review**, 2016. v. 8, n. 4, p. 1–15. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12544-016-0212-x>>.

GEURS, K. T.; VAN WEE, B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. **Journal of Transport Geography**, 2004. v. 12, n. 2, p. 127–140.

GIANNOTTI, M.; BARROS, J.; TOMASIELLO, D. B.; Smith, D.; PIZZOL, B. SANTOS, B. M.; ZHONG, C.; SHEN, Y.; MARQUES, E.; BATTY, M. Inequalities in transit accessibility: Contributions from a comparative study between Global South and North metropolitan regions. **Cities**, 2021. v. 109, n. October 2020, p. 103016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103016>>.

GROND, K. Route Choice Modeling of Cyclists in Toronto. 2016. p. 1–70.

HALLGRIMSDOTTIR, B. *et al.* Implementation of accessibility policy in municipal transport planning - Progression and regression in Sweden between 2004 and 2014. **Transport Policy**, 2016. v. 49, p. 196–205. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.05.002>>.

HANDY, S. **Critical Assessment of the Literature on the Relationships Among Transportation , Land Use , and Physical Activity.** **Transportation Research Board.** [S.l.]: [s.n.], 2005.

HANDY, S. Is accessibility an idea whose time has finally come? **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2020. v. 83, p. 102319. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102319>>.

HANDY, S.; VAN WEE, B.; KROESEN, M. Promoting Cycling for Transport: Research Needs and Challenges. **Transport Reviews**, 2014. v. 34, n. 1, p. 4–24. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2013.860204>>.

HANSEN, W. G. How Accessibility Shapes Land Use. **Journal of the American Planning Association**, 1959. v. 25, n. 2, p. 73–76.

HARKEY, D. L.; REINFURT, D. W.; KNUIMAN, M. Development of the bicycle compatibility index. **Transportation Research Record**, 1998. n. 1636, p. 13–20.

HAZELTON, M. L. Estimation of origin-destination matrices from link flows on uncongested networks. **Transportation Research Part B: Methodological**, 2000. v. 34, n. 7, p. 549–566.

HAZELTON, M. L. Some comments on origin-destination matrix estimation. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2003. v. 37, n. 10, p. 811–822.

HOOD, J.; SALL, E.; CHARLTON, B. A GPS-based bicycle route choice model for San Francisco, California. **Transportation Letters**, 2011. v. 3, n. 1, p. 63–75.

HYMAN, G. M. The Calibration of Trip Distribution Models. **Environment and Planning A: Economy and Space**, 1969. v. 1, n. 1, p. 105–112.

JENSEN, S. U. Pedestrian and bicyclist level of service on roadway segments. **Transportation Research Record**, 2007. n. 2031, p. 43–51.

KRISHNAKUMARI, P., VAN LINT, H.; DJUKIC, T.; CATS, O. A data driven method for OD matrix estimation. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2020. v. 113, n. May 2019, p. 38–56. Disponible em: <<https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.05.014>>.

LEVINE, J. A century of evolution of the accessibility concept. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2020. v. 83, n. March, p. 102309. Disponible em: <<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102309>>.

LIU, C.; TAPANI, A.; KRISTOFFERSON, I.; RYDERGREN, C.; JONSSON, D. Development of a large-scale transport model with focus on cycling. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2020a. v. 134, n. March 2019, p. 164–183. Disponible em: <<https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.02.010>>.

LIU, C.; TAPANI, A.; KRISTOFFERSON, I.; RYDERGREN, C.; JONSSON, D. Appraisal of cycling infrastructure investments using a transport model with focus on cycling. **Case Studies on Transport Policy**, 2020b. n. October. Disponible em: <<https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.11.003>>.

LOWRY, M. B.; CALLISTER, D.; GRESHAM, M.; MOORE, B. Assessment of Communitywide Bikeability with Bicycle Level of Service. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2013. v. 2314, n. 1, p. 41–48.

LUCAS, K.; VAN WEE, B.; MAAT, K. A method to evaluate equitable accessibility: combining ethical theories and accessibility-based approaches. **Transportation**, 2016. v. 43, n. 3, p. 473–490. Disponible em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11116-015-9585-2>>.

LUO, H.; ZHAO, S. Impacts of high-speed rail on the inequality of intercity accessibility: A case study of Liaoning Province, China. **Journal of Transport Geography**, 2021. v. 90, n. November 2020, p. 102920. Disponible em: <<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102920>>.

MAHER, M.J. Inferences on trip matrices from observations on link volumes: a

Bayesian statistical approach. **Transportation Research Part B**, 1983. v. 17B, n. 6, p. 435–447.

MAGALHÃES, J. R. L.; CAMPOS, V. B. G.; BANDEIRA, R. A. De M. Análise de variáveis para estimativa de viagens por bicicletas: Um estudo no município do Rio de Janeiro, Brasil. **Transportes**, 2018. v. 26, n. 4, p. 30–46.

MAJUMDAR, B. B.; MITRA, S. Development of level of service criteria for evaluation of bicycle suitability. **Journal of Urban Planning and Development**, 2018. v. 144, n. 2.

MALATESTA, Maria Ermelina B. **Boletim Técnico 50: A História dos estudos de bicicleta na CET**. Sao Paulo: [s.n.], 2012.

MALATESTA, Maria Ermelina Brosh. A bicicleta nas viagens cotidianas do município de são paulo. 2014. p. 250.

MCNEIL, N. Bikeability and the 20-min Neighborhood. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2011. v. 2247, n. 1, p. 53–63.

MEKURIA, M. C.; FURTH, P. G.; NIXON, H. Loss-Stress Bicycling and Network Connectivity. **Mineta Transportation Institute Report 11-19**, 2012. p. 68. Disponível em: <<http://transweb.sjsu.edu/PDFs/research/1005-low-stress-bicycling-network-connectivity.pdf>>.

MENGHINI, G.; CARRASCO, N.; SCHÜSSLER, N.; AXHAUSEN, K. W. Route choice of cyclists in Zurich. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2010. v. 44, n. 9, p. 754–765. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2010.07.008>>.

MONARI, M.; SEGANTINE, P. C. L. Método para definição de rede de rotas cicláveis em áreas urbanas de cidades de pequeno porte: um estudo de caso para a cidade de Bariri-SP. **Transportes**, 2019. v. 27, n. 2, p. 149–164.

NABIZADE GANGERAJ, E.; BEHZADI, G. A.; BEHZAD, R. Estimation of Origin – Destination Matrix from Traffic Counts Based On Fuzzy Logic. **Civil Engineering Journal**, 2017. v. 3, n. 11, p. 1166.

NEUTENS, T.; SCHWANEN, T.; WITLOX, F.; DE MAYER, P. Equity of urban service delivery: A comparison of different accessibility measures. **Environment and Planning A**, 2010. v. 42, n. 7, p. 1613–1635.

OLIVEIRA NETO, F. M. De; PITOMBEIRA NETO, A. R. Matrizes Origem-Destino Estáticas Em Redes De Transportes. **Transportes (Rio de Janeiro)**, 2016. v. 24, n. 1, p. 107–119.

ORTUZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Transport Modelling**. 4. ed. West Sussex: John Wiley And Sons, 2011. 608 p.

PAPA, E.; BRÖMMELSTROET, M.; SILVA, C; HULL, A. Accessibility instruments for planning practice: A review of European experiences. **Journal of Transport and Land Use**, 2016. v. 9, n. 3, p. 57–75.

PARRY, K.; HAZELTON, M. L. Estimation of origin-destination matrices from link counts and sporadic routing data. **Transportation Research Part B: Methodological**, 2012. v. 46, n. 1, p. 175–188. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2011.09.009>>.

PEREIRA, R. H. M.; SCHWANEN, T.; BANISTER, D. Distributive justice and equity in transportation. **Transport Reviews**, 2017. v. 37, n. 2, p. 170–191. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2016.1257660>>.

PITILIN, T. R. IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS FATORES A SEREM CONSIDERADOS PARA O PROJETO DE UMA REDE CICLOVIÁRIA. 2016. n. June.

PITOMBEIRA NETO, A. R.; OLIVEIRA NETO, F. M.; LOUREIRO, C. F. G. Statistical models for the estimation of the origin-destination matrix from traffic counts. **Transportes**, 2017. v. 25, n. 4, p. 1.

PLAZA, C. V.; SILVA, R. Da; NELSON. Viagens Intrazonais Por Bicicleta. 2013. v. 1346.

PORTO ALEGRE, M. De P. **Plano Diretor Cicloviário de Porto Alegre**. [S.l.]: [s.n.], 2008. Disponível em: <http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/eptc/usu_doc/pdci_relatorio_final.pdf>.

PORTUGAL, L. S. (org.). **Transport, Mobilidade e Desenvolvimento Urbano**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 336 p.

POUREBRAHIM, N.; SULTANA, S; NIAKANLAHIJI, A; THILL, J. Trip distribution modeling with Twitter data. **Computers, Environment and Urban Systems**, 2019. v. 77, n. June, p. 101354. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101354>>.

PRATO, C. G.; HALLDÓRSDÓTTIR, K.; NIELSEN, O. A. Evaluation of land-use and transport network effects on cyclists' route choices in the Copenhagen Region in value-of-distance space. **International Journal of Sustainable Transportation**, 2018. v. 12, n. 10, p. 770–781. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1437236>>.

PRITCHARD, J. P.; TOMASIELLO, D. B.; GIANNOTTI, M.; GEURS, K. Potential impacts of bike-and-ride on job accessibility and spatial equity in São Paulo, Brazil. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2019. v. 121, n. February, p.

386–400. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.01.022>>.

PROFFITT, D. G. *et al.* Accessibility planning in American metropolitan areas: Are we there yet? **Urban Studies**, 2019. v. 56, n. 1, p. 167–192.

PTV GROUP (Deutschland). **VISUM - Manual User**. Karlsruhe: Ptv Group, 2017. 1687 p.

RAKHA, H.; ARAFEH, M. Calibrating steady-state traffic stream and car-following models using loop detector data. **Transportation Science**, 2010. v. 44, n. 2, p. 151–168.

RIESER-SCHÜSSLER, N.; BALMER, M.; AXHAUSEN, Kay W. Route choice sets for very high-resolution data. **Transportmetrica A: Transport Science**, 2013. v. 9, n. 9, p. 825–845.

ROSTAMI NASAB, M.; SHAFABI, Y. Estimation of origin–destination matrices using link counts and partial path data. **Transportation**, 2020. v. 47, n. 6, p. 2923–2950. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11116-019-09999-1>>.

RUBIN, J. Transportation and land-use change. **Economics of Rural Land-Use Change**, 2017. p. 41–54.

RYU, S. A bicycle origin-destination matrix estimation based on a two-stage procedure. **Sustainability (Switzerland)**, 2020. v. 12, n. 7, p. 1–14.

SÁ, T. H.; DURAN, A. C.; TAINIO, M.; MONTEIRO, C. A.; WOODCOCK, J. Cycling in São Paulo, Brazil (1997–2012): Correlates, time trends and health consequences. **Preventive Medicine Reports**, 2016. v. 4, p. 540–545. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.pmedr.2016.10.001>>.

SAGHAPOUR, T.; MORIDPOUR, S.; THOMPSON, R. G. Measuring cycling accessibility in metropolitan areas. **International Journal of Sustainable Transportation**, 2017. v. 11, n. 5, p. 381–394. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/15568318.2016.1262927>>.

SAGHAPOUR, T.; MORIDPOUR, S.; THOMPSON, R. G.. Enhancing active transport demand Modelling by incorporating accessibility measures. **Cities**, 2018. v. 78, n. September 2017, p. 206–215. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.02.015>>.

SÃO PAULO, P. De. **PlanMob SP 2015. Prefeitura de São Paulo**. [S.l.]: [s.n.], 2015. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/planmobsp_v072_1455546429.pdf>.

SÃO PAULO. SPTRANS. **Cenário Operacional**. Disponível em:

<http://www.sptrans.com.br/sptrans/>. Acesso em: 16 abr. 2020

SEGADILHA, A. B. P.; SANCHES, S. Da P. Analysis of Bicycle Commuter Routes Using GPSs and GIS. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, 2014. v. 162, p. 198–207.

SENER, I. N.; ELURU, N.; BHAT, C. R. An analysis of bicycle route choice preferences in Texas, US. **Transportation**, 2009. v. 36, n. 5, p. 511–539.

SHEFFI, Y. **Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods**. First ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1985.

SHREWSBURY, J. Calibration of trip distribution by generalised linear models. **Research Report**, 2012. n. February, p. 1–420. Disponível em: <<papers://ef64220a-a077-48ec-ae81-be13b32d2073/Paper/p981>>.

SILVA, A. *et al.* Multicriteria Analysis for Evaluation of Bike Lane Routes Integrated to Public Transportation. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, 2014. v. 162, n. Panam, p. 388–397. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.220>>.

SILVA, Cecília *et al.* Accessibility instruments in planning practice: Bridging the implementation gap. **Transport Policy**, 2017. v. 53, n. July 2015, p. 135–145. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.09.006>>.

SILVA, R. F. C. Da S. C. Da. Cma contribuição para implantação do plano diretor de mobilidade urbana na modalidade ciclovária: uma aplicação no município de teresina. [S.l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SILVEIRA, M. O. Da; MAIA, M. L. A. Suporte Pedalada do bem. **Transportes**, 2015. v. 55, n. 23, p. 1730–1741.

SORTON, A.; WALSH, T. Bicycle stress level as a tool to evaluate urban and suburban bicycle compatibility. **Transportation Research Record**, 1994. n. 1438, p. 17–24.

SOUZA, F. DE *et al.* Modelling the potential for cycling in access trips to bus, train and metro in Rio de Janeiro. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2017. v. 56, p. 55–67. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.007>>.

SPIESS, H. A maximum likelihood model for estimating origin-destination matrices. **Transportation Research Part B**, 1987. v. 21, n. 5, p. 395–412.

SUN, W. *et al.* Bi-objective traffic count location model for mean and covariance of origin–destination estimation. **Expert Systems with Applications**, 2021. v. 170, n. December 2020, p. 114554. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114554>>.

TEBALDI, C.; WEST, M. Bayesian inference on network traffic using link count data. **Journal of the American Statistical Association**, 1998. v. 93, n. 442, p. 557–573.

TERAMOTO, T. T. Planejamento De Transporte Ciclovário Urbano: Organização Da Circulação. 2008. p. 260.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Highway Capacity Manual**. 5. ed. Washington D. C. Transportation Research Board, 2010. 1650 p.

VAN WEE, B.; GEURS, K. Discussing equity and social exclusion in accessibility evaluations. **European Journal of Transport and Infrastructure Research**, 2011. v. 11, n. 4, p. 350–367.

VAN ZUYLEN, H. J.; WILLUMSEN, L. G. The most likely trip matrix estimated from traffic counts. **Transportation Research Part B: Methodological**, 1980. v. 14, n. 3, p. 281–293.

VECCHIO, G.; TIZNADO-AITKEN, I.; HURTUBIA, R. Transport and equity in Latin America: a critical review of socially oriented accessibility assessments*. **Transport Reviews**, 2020. v. 0, n. 0, p. 1–28. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1711828>>.

WILSON, A. G. A statistical theory of spatial distribution models. **Transportation Research**, 1967. v. 1, n. 3, p. 253–269.

YANG, H. *et al.* Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts on congested networks. **Transportation Research Part B**, 1992. v. 26, n. 6, p. 417–434.

ZHANG, D.; MAGALHÃES, D. J. A. V.; WANG, X. (Cara). Prioritizing bicycle paths in Belo Horizonte City, Brazil: Analysis based on user preferences and willingness considering individual heterogeneity. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2014. v. 67, p. 268–278. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2014.07.010>>.

ZUO, T; WEI, H.; CHEN, N.; ZHANG, C. First-and-last mile solution via bicycling to improving transit accessibility and advancing transportation equity. **Cities**, 2020. v. 99, n. January, p. 102614. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102614>>.

ZUO, T; WEI, H. Bikeway prioritization to increase bicycle network connectivity and bicycle-transit connection: A multi-criteria decision analysis approach. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2019. v. 129, n. September 2018, p. 52–71. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.08.003>>.

APÊNDICE A

Este Apêndice apresenta a análise realizada para escolha da função de minimização de erro utilizada no processo de estimação dos parâmetros da função de impedância considerada no método proposto no Capítulo 3.

A partir da adoção de diferentes tipos de funções de impedância, o problema de distribuição de viagens pode ser resolvido a partir do atendimento das restrições da função não-linear gerada pela aplicação do método de maximização da entropia (ver Anexos A e B). Uma vez que o problema não possui solução única, a literatura apresenta diferentes soluções a partir da minimização de funções de erro entre a matriz observada e a matriz modelada.

Hyman (1969) apresenta um método analítico para o caso da função de impedância do tipo exponencial ao comparar os custos totais das viagens modeladas e estimadas. Ortúzar e Willumsen (2011) utilizam o método de Hyman (1969) para minimizar o erro entre os custos médios modelados e observados. Já Feldman, Forero-Martinez e Coombe (2012) estimam os parâmetros da função de Tanner por meio da minimização do erro entre os *bins* da distribuição de custos das matrizes modelada e observada (Equação A.8).

Esta pesquisa utiliza a função de Tanner como função de impedância no modelo gravitacional, em que duas restrições devem ser respeitadas. A parcela exponencial está associada à restrição dos custos de viagem, enquanto a parcela potência está relacionada à restrição do logaritmo dos custos. Batty e Mackie (1972) apresentam diferentes métodos para solução desse problema, a partir da combinação das duas funções de erro. Bazaraa, Sherali e Shetty (2006) afirmam que a aplicação de métodos analíticos pressupõe que a função de minimização adotada possui um, e somente um, ponto de mínimo (unimodalidade).

Todavia, uma vez que o método proposto nesta pesquisa adiciona informações sobre os fluxos observados ao longo do processo de estimação, não se conhece *a priori* a superfície gerada pelas funções de minimização de erro entre as matrizes modelada e observadas dada a complexidade da relação entre os parâmetros e a matriz modelada, resultante da combinação do modelo GLS de Cascetta (1984) com o método gravitacional tradicional.

Dessa maneira, uma análise exhaustiva foi conduzida em um intervalo fechado de valores para os parâmetros β e γ com o intuito de se conhecer, ao menos parcialmente, a superfície de resposta da função de minimização e garantir o pressuposto de unimodalidade. Entretanto, a literatura apresenta diversas medidas de erro, de modo que foram testadas as 8 funções de minimização apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Funções de minimização de erro

Erro	
$e = \left \sum_{i,j} p_{ij} c_{ij} - \sum_{i,j} t_{ij}(\beta, \gamma) c_{ij} \right + \left \sum_{i,j} p_{ij} \log c_{ij} - \sum_{i,j} t_{ij}(\beta, \gamma) \log c_{ij} \right $	A.1
$e = \left(\sum_{i,j} p_{ij} c_{ij} - \sum_{i,j} t_{ij}(\beta, \gamma) c_{ij} \right)^2 + \left(\sum_{i,j} p_{ij} \log c_{ij} - \sum_{i,j} t_{ij}(\beta, \gamma) \log c_{ij} \right)^2$	A.2
$e = \sum_{i,j} p_{ij} c_{ij} - t_{ij}(\beta, \gamma) c_{ij} + \sum_{i,j} p_{ij} \log c_{ij} - t_{ij}(\beta, \gamma) \log c_{ij} $	A.3
$e = \sum_{i,j} (p_{ij} c_{ij} - t_{ij}(\beta, \gamma) c_{ij})^2 + \sum_{i,j} (p_{ij} \log c_{ij} - t_{ij}(\beta, \gamma) \log c_{ij})^2$	A.4
$e = \bar{c}_{obs} - \bar{c}_{model} + \log c_{ij_{obs}} - \log c_{ij_{model}} $	A.5
$e = (\bar{c}_{obs} - \bar{c}_{model})^2 + (\log c_{ij_{obs}} - \log c_{ij_{model}})^2$	A.6
$e = \sum_{i,j} \left[\frac{p_{ij} c_{ij} - t_{ij}(\beta, \gamma) c_{ij}}{(p_{ij} c_{ij})_{m\acute{a}x}} \right]^2 + \left[\frac{p_{ij} \ln(c_{ij}) - t_{ij}(\beta, \gamma) \ln(c_{ij})}{(p_{ij} \ln(c_{ij}))_{m\acute{a}x}} \right]^2$	A.7
$e = \sum_{bin\ custo} p_{ij} c_{ij} - t_{ij}(\beta, \gamma) c_{ij} + \sum_{bin\ custo} p_{ij} \log c_{ij} - t_{ij}(\beta, \gamma) \log c_{ij} $	A.8

Tomando os dados do ano de 2017 (matriz prévia, fluxos observados e rede ciclovária) e aplicando o modelo de custos generalizados “Velocidade”, estimou-se a matriz modelada a partir da variação dos parâmetros β e γ no intervalo [0,00:1,01] com um tamanho de passo igual a 0,01 em cada direção, resultando em mais de 10.200 valores de erros entre as matrizes alvo e modelada para cada função de minimização. As figuras a seguir apresentam os resultados das superfícies geradas em que o pressuposto da unimodalidade é analisado em cada uma delas sob diferentes ângulos: vista tridimensional no canto superior esquerdo; vista superior no canto superior direito; uma projeção dos valores mínimos da função para cada β fixo (resultados da Etapa A do algoritmo proposto na página 54) no canto inferior esquerdo; e, finalmente, as linhas de contorno da função no canto inferior direito.

A Figura 13 e Figura 14 ilustram os resultado para as funções representadas pelas Equações A.1 e A.2, respectivamente. É possível observar que essas funções não atendem o pressuposto de unimodalidade. Além de todas as figuras indicarem a presença de dois vales, tal que 13d e 14d mostram a presença de inúmeros mínimos locais em cada vale. Dessa maneira, a combinação das restrições do modelo gravitacional demonstrada por Hyman (1969) não pode ser extrapolada para o caso dessa pesquisa.

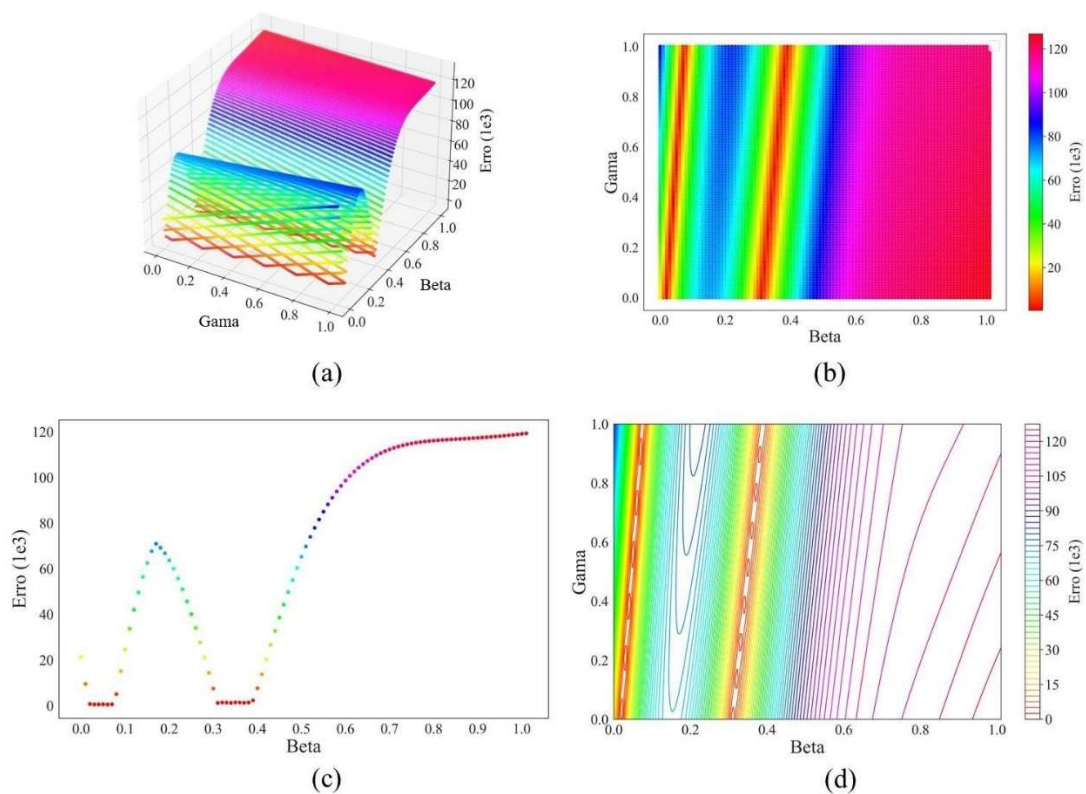


Figura 13: Superfície de resposta da função de minimização A.1

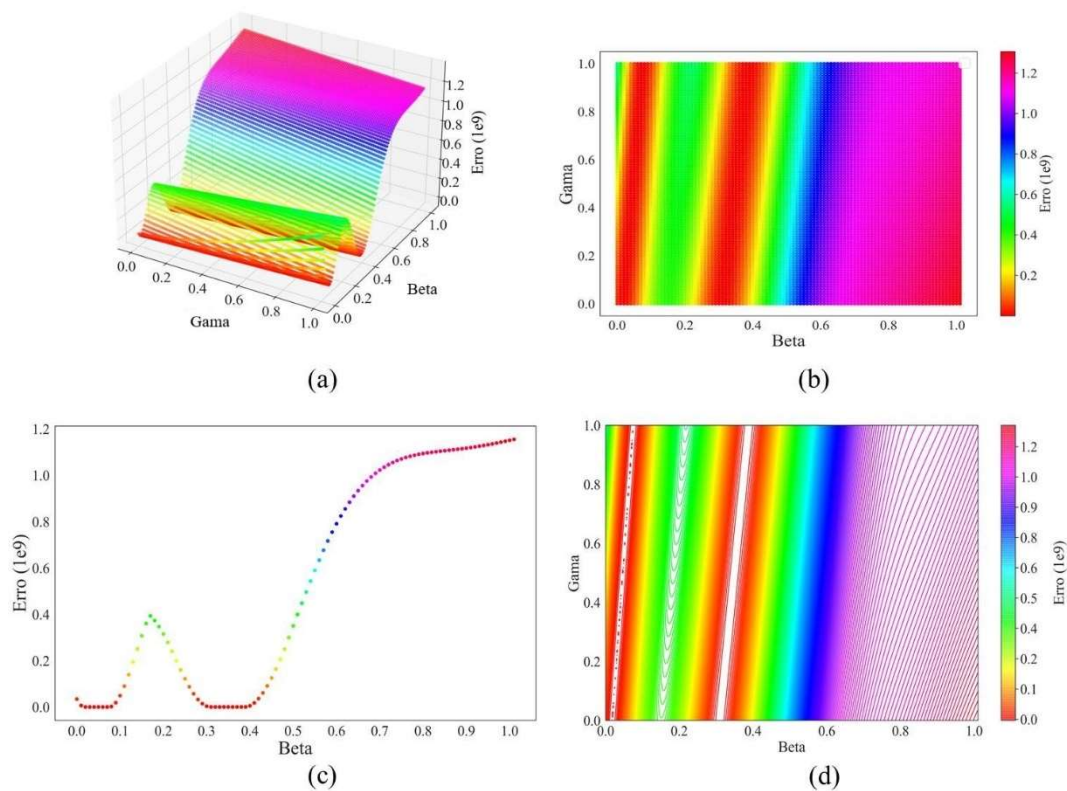


Figura 14: Superfície de resposta da função de minimização A.2

A Figura 15 e Figura 16 ilustram as superfícies geradas pela aplicação das funções de minimização representadas pelas Equações A.3 e A.4, respectivamente, possuem resultados similares. Apesar de não ser tão nítido na perspectiva tridimensional, ambas as funções apresentam dois vales, indicando a presença de mínimos locais, o que não atende o pressuposto de unimodalidade.

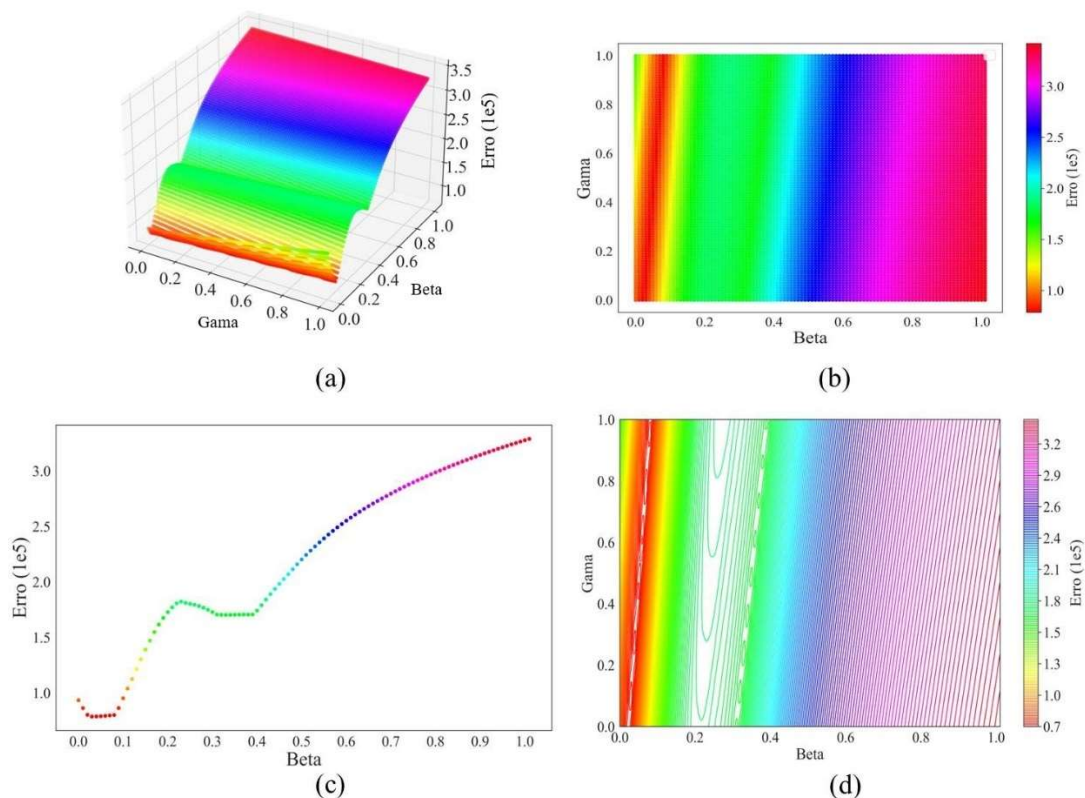


Figura 15: Superfície de resposta da função de minimização A.3

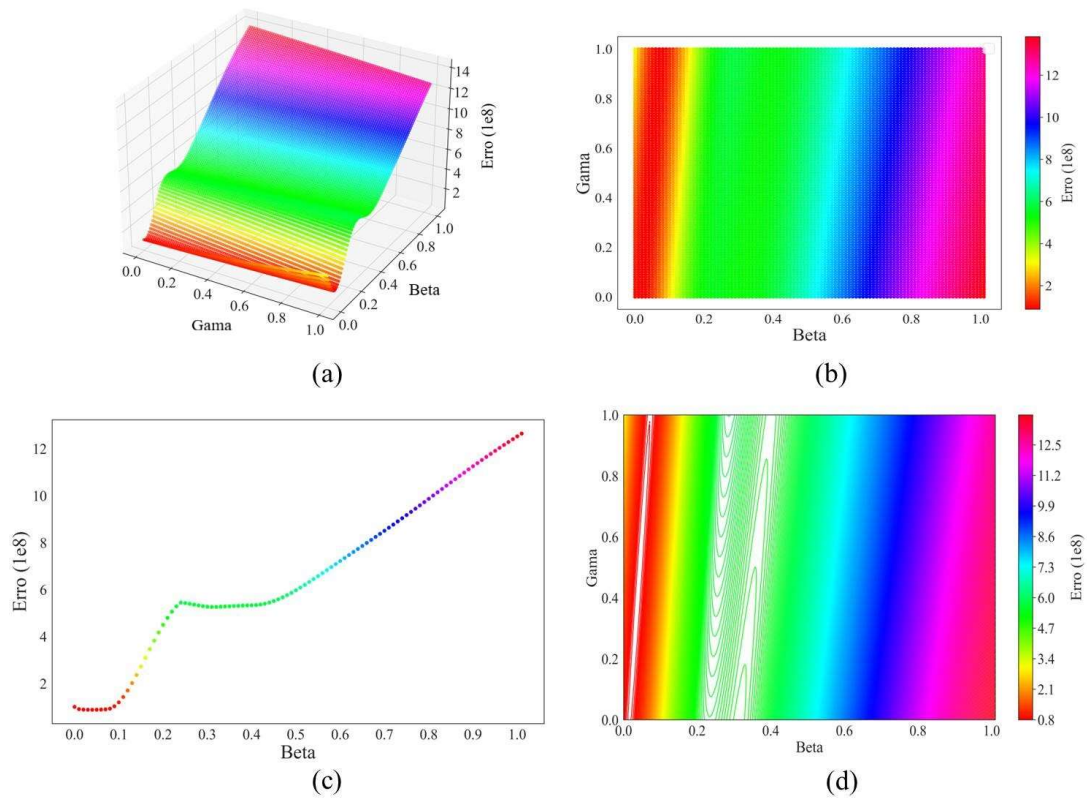


Figura 16: Superfície de resposta da função de minimização A.4

A Figura 17 e Figura 18 ilustram as superfícies geradas pela aplicação das funções de minimização representadas pelas Equações A.5 e A.6, respectivamente. Ambas apresentam resultados semelhantes, sendo possível observar que essas funções apresentam apenas um vale. Entretanto, a condição de unimodalidade não é satisfeita uma vez que as curvas de nível ilustradas nas 17d 18d apontam a existência de mínimos locais em cada respectivo vale. Isso significa que não é possível extrapolar a comparação dos custos médios das matrizes observada e modelada utilizada por Ortuzar e Willumsen (2011) para o caso desta pesquisa.

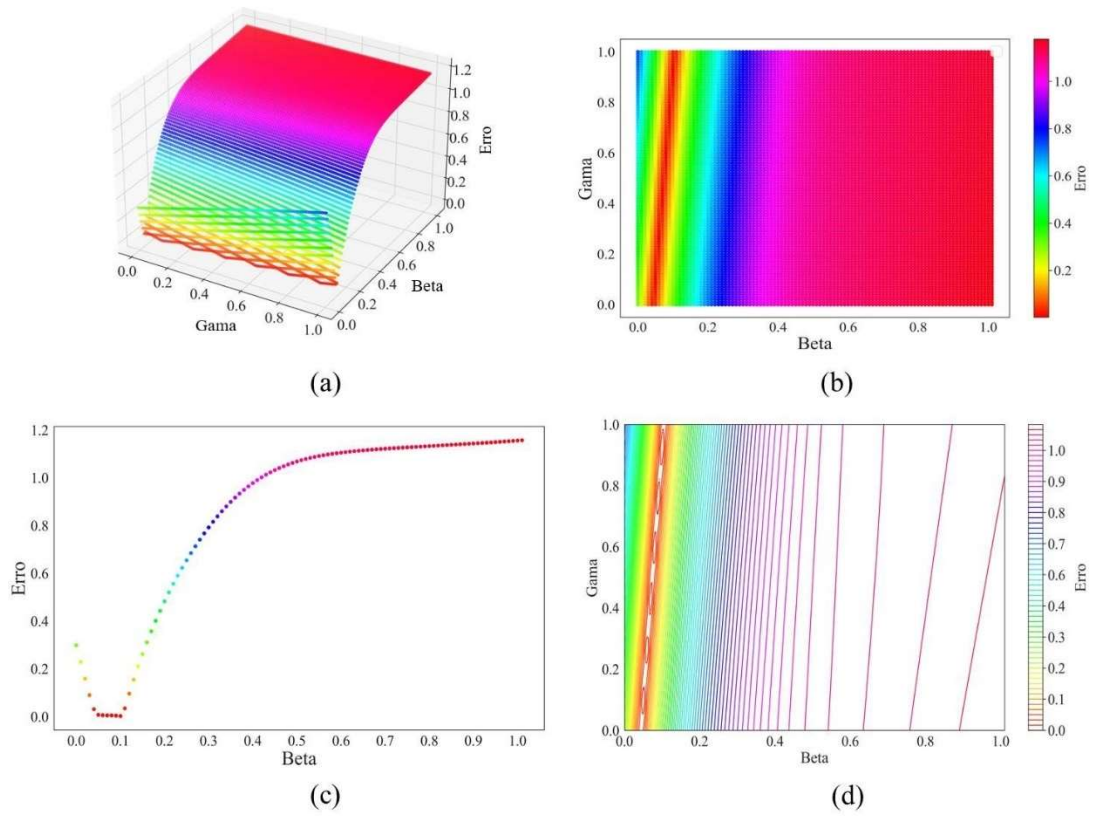


Figura 17: Superfície de resposta da função de minimização A.5

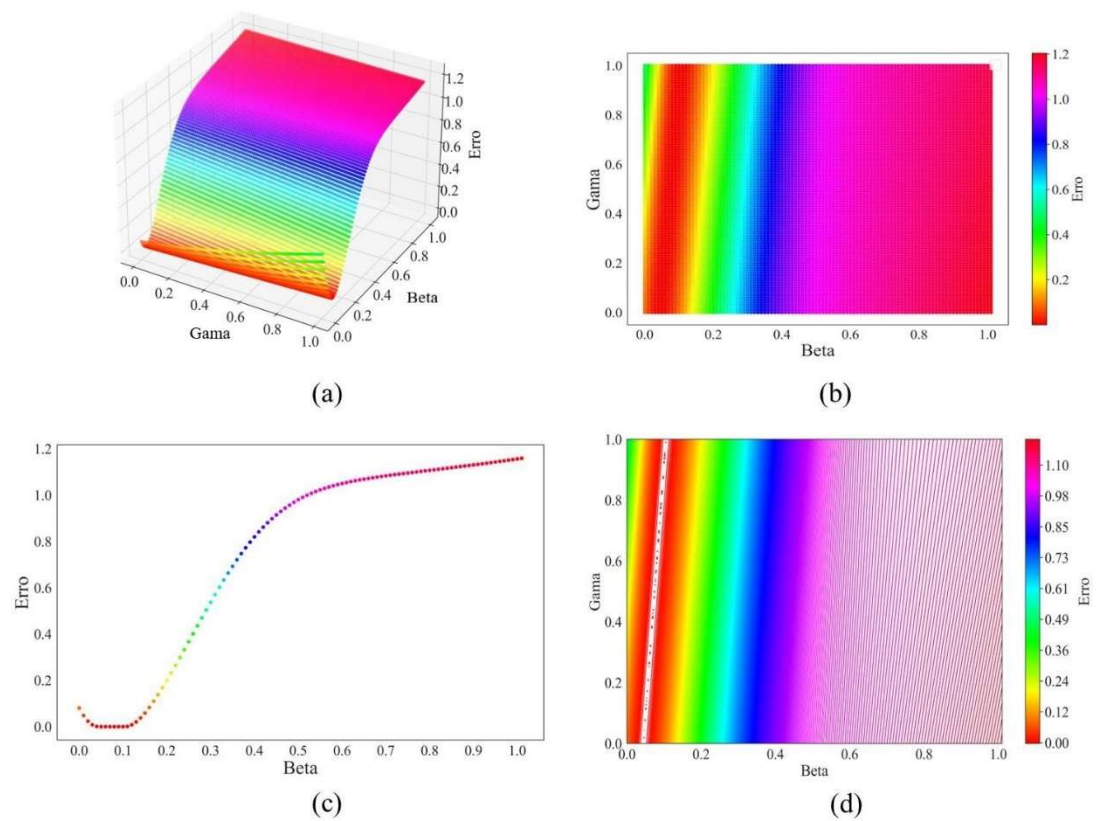


Figura 18: Superfície de resposta da função de minimização A.6

Finalmente, a Figura 19 e Figura 20 ilustram os resultados para a função de minimização do erro ortogonal normalizado entre as viagens das matrizes alvo e modelada ponderadas pelo custo e logaritmo do custo de viagem, e o erro quadrático entre o produto das viagens das matrizes alvo e modelada ponderadas pelos custos e logaritmos dos custos por *bin* de custo (Equações A.7 e A.8, respectivamente). Ambas possuem resultados muito semelhantes e atendem à condição de unimodalidade, uma vez que as superfícies geradas apresentam apenas um vale, que por sua vez apresenta apenas um mínimo local, ou o mínimo global.

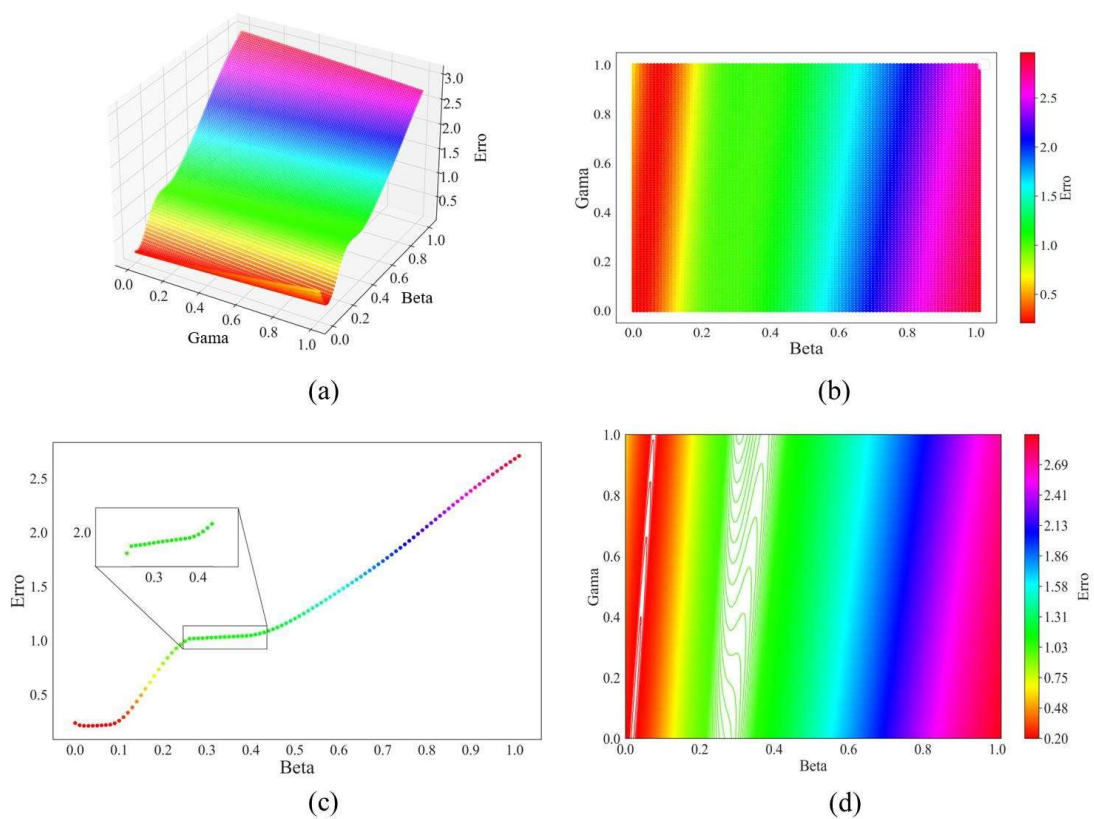


Figura 19: Superfície de resposta da função de minimização A.7

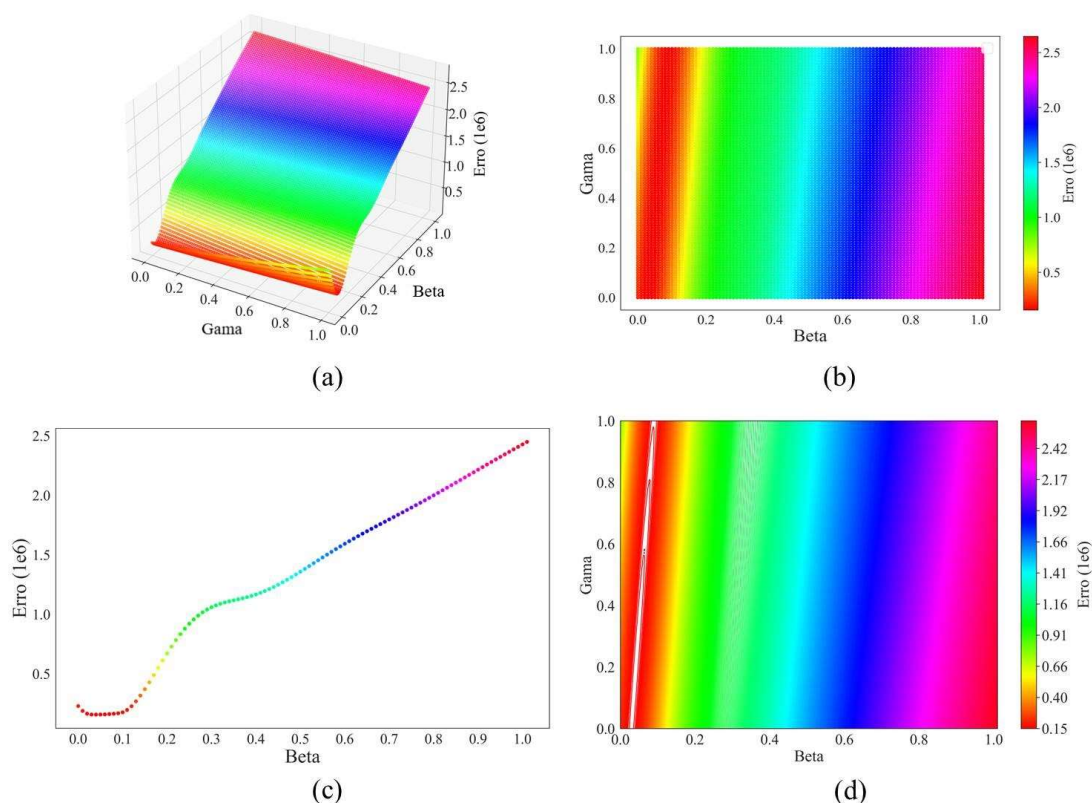


Figura 20: Superfície de resposta da função de minimização A.8

Dessa maneira, ambas poderiam ser utilizadas nesta pesquisa. Apesar da Equação A.8 ter sido utilizada na literatura para um problema de distribuição de viagens (ver Feldman, Forero-Martinez e Coombe, (2012)), há um viés que depende da escolha pelo pesquisador da quantidade ou do tamanho dos *bins* de custo. Ou seja, a qualidade da aderência do erro depende, até onde foi possível constatar, de uma escolha arbitrária do pesquisador.

Por outro lado, a Equação A.7, proposta por Rakha e Arafeh (2010), não está condicionada a esse viés por ser uma função contínua dos dados das matrizes, ao contrário da Equação A.8. Outra vantagem é o fato de permitir a normalização ortogonal dos erros, sendo possível comparar resultados de matrizes de diferentes cenários em relação à qualidade da aderência entre os valores observados e modelados. Dessa maneira, o erro ortogonal normalizado é escolhido como a função de minimização para aplicação do algoritmo do método proposto nesta pesquisa.

APÊNDICE B

Este apêndice apresenta um exemplo genérico para solução de uma função de minimização por meio do algoritmo descrito na Seção 3.3 em que ambos o ponto de mínimo e a superfície de resposta são previamente conhecidos (Figura 21). A função é dada pela Equação A.9.

$$f(\beta, \gamma) = (\beta - 2)^4 + (\beta + \gamma - 4)^2 \quad (\text{A.9})$$

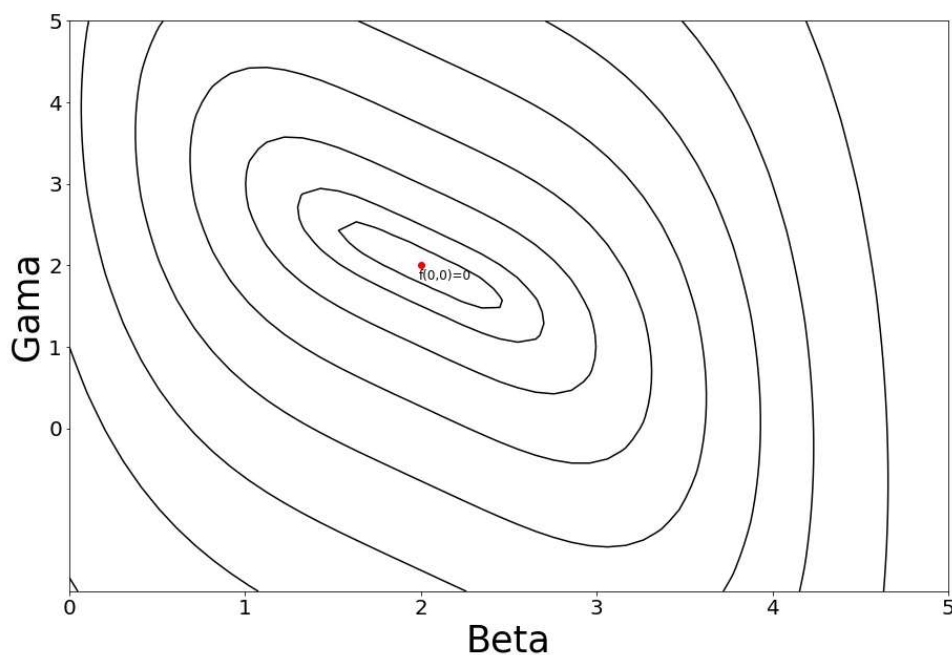


Figura 21: Curvas de nível da função genérica de minimização

A etapa de inicialização do algoritmo é conduzida a partir da definição dos tamanhos de passo $\Delta_\beta = 0,5$ e $\Delta_\gamma = 0,5$ na direção de cada coordenada, do fator de decrescimento $\alpha = 0,5$, do critério de parada $\varepsilon = 0,1$. Ao adotar os valores $(\beta, \gamma) = (4,00, 3,00)$ como as coordenadas do ponto inicial, aplica-se a Etapa A com o objetivo de encontrar o menor valor da Equação A.9 para o respectivo β fixo. Os resultados dessa etapa são descritos na Tabela 5 e apresentados na Figura 22.

Tabela 5: Resultados do algoritmo de procura - Passo A para $\beta = 4$.

i	Ponto de mínimo	Δ_γ	$(\beta, \gamma)_{min}$	$f(\beta, \gamma)_{min}$	Ponto	$(\beta, \gamma + \Delta_\gamma)$	$f(\beta, \gamma + \Delta_\gamma)$
0	1	+ 0,5	(4,00, 3,00)	25,00	2	(4,00, 3,50)	28,25
1	1	- 0,5	(4,00, 3,00)	25,00	3	(4,00, 2,50)	22,25
2	3	-0,5	(4,00, 2,50)	22,25	4	(4,00, 2,00)	20,00
3	4	-0,5	(4,00, 2,00)	20,00	5	(4,00, 1,50)	18,25
4	5	-0,5	(4,00, 1,50)	18,25	6	(4,00, 1,00)	17,00
5	6	-0,5	(4,00, 1,00)	17,00	7	(4,00, 0,50)	16,25
6	7	-0,5	(4,00, 0,50)	16,25	8	(4,00, 0,00)	16,00
7	8	-0,5	(4,00, 0,00)	16,00	9	(4,00, -0,50)	16,25
8	8	0,25	(4,00, 0,00)	16,00	10	(4,00, 0,25)	16,06
9	8	-0,25	(4,00, 0,00)	16,00	11	(4,00, -0,25)	16,06
10	8	0,12	(4,00, 0,00)	16,00	12	(4,00, 0,12)	16,01
11	8	- 0,12	(4,00, 0,00)	16,00	12	(4,00, - 0,12)	16,01

Na primeira iteração do algoritmo ($i = 0$), o valor da Equação A.9 no ponto inicial (Ponto 1) apresenta um valor menor quando comparado ao Ponto 2, em que o tamanho de passo Δ_γ é aplicado na direção positiva de γ . Nesse caso, o algoritmo abandona a busca nessa direção e passa a aplicar o tamanho de passo Δ_γ na direção oposta. Entre as iterações 1 e 6, sucessivos pontos (Pontos de 3 a 8) são avaliados e valores cada vez menores da Equação A.9 são encontrados, o que não ocorre na iteração 7. Uma vez que ambas as direções de γ já foram avaliadas, o tamanho de passo Δ_γ é reduzido pelo fator de decrescimento α . Uma nova busca na direção positiva de γ é iniciada com o novo tamanho de passo, mas sem sucesso (Iteração 8), bem como na direção oposta (Iteração 9). O tamanho de passo é novamente contraído, mas a busca em ambas as direções também não é bem-sucedida (Iterações 10 e 11). Após diminuir o tamanho de passo novamente, o critério de parada da Etapa A é atingido, de maneira que o ponto de mínimo valor da Equação A.9 para $\beta = 4$ se encontra sobre o Ponto 8 em que $f(4,00,0,00) = 16,00$.

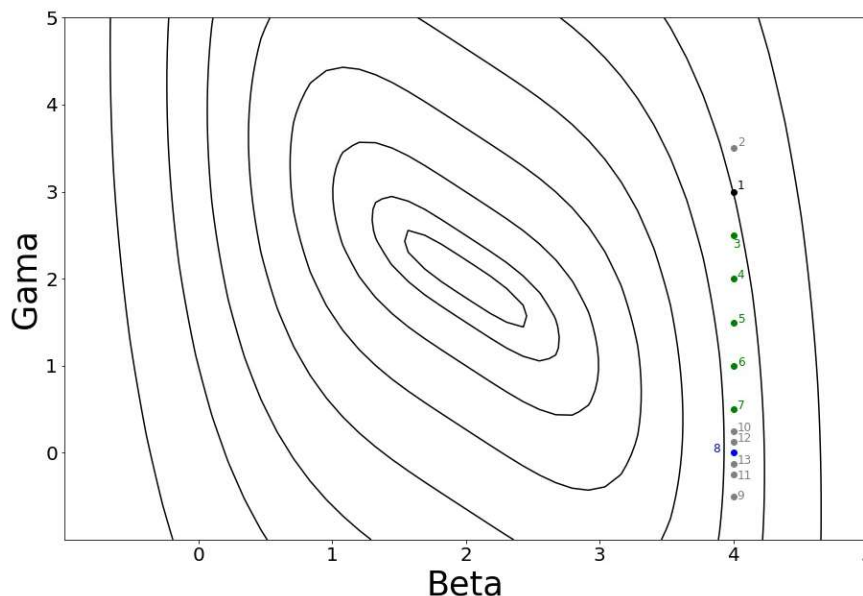


Figura 22: Resultados do algoritmo de procura - Etapa para $\beta = 4$

A partir do ponto de mínimo para $\beta = 4$ resultante da Etapa A, o algoritmo segue para a Etapa B, cujos resultados são descritos na Tabela 6 e representados pela Figura 23.

Tabela 6: Resultados do algoritmo de procura – Passo B

i	Ponto de mínimo	Δ_β	(β, γ)	$f(\beta, \gamma)$	Passo A		$f(\beta, \gamma)$	Ponto
					(β, γ) Inicial	(β, γ) Final		
0	8	0,50	(4,00, 0,00)	16,00	(4,50, 0,00)	(4,50, -0,50)	39,06	9
1	8	-0,50	(4,00, 0,00)	16,00	(3,50, 0,00)	(3,50, 0,50)	5,06	10
2	10	-0,50	(3,50, 0,50)	5,06	(3,00, 0,50)	(3,00, 1,00)	1,00	11
3	11	-0,50	(3,00, 1,00)	1,00	(2,50, 1,00)	(2,50, 1,50)	0,06	12
4	12	-0,50	(2,50, 1,50)	0,06	(2,00, 1,50)	(2,00, 2,00)	0	13
5	13	-0,50	(2,00, 2,00)	0	(1,50, 2,00)	(1,50, 2,50)	0,06	14
6	13	0,25	(2,00, 2,00)	0	(2,25, 2,00)	(2,25, 1,75)	0,003	15
7	13	-0,25	(2,00, 2,00)	0	(1,75, 2,00)	(1,75, 2,25)	0,003	16
8	13	0,125	(2,00, 2,00)	0	(2,12, 2,00)	(2,12, 1,87)	0,0002	17
9	13	-0,125	(2,00, 2,00)	0	(1,87, 2,00)	(1,87, 2,12)	0,0002	18

A partir do Ponto 8, aplica-se a busca no eixo β . Na iteração inicial, o tamanho de passo Δ_β positivo é aplicado para avaliação de um novo ponto (4.50, 0.00). Fixando-se o valor de β , a Etapa A é conduzida para calcular o valor de mínimo da Equação A.9, resultando no Ponto 9 da Figura 23. Entretanto, o valor de mínimo encontrado para $\beta = 4.5$ é maior que o valor de mínimo para $\beta = 4$. Logo, o algoritmo passa a comparar os valores da Equação A.9 na direção oposta de β , em que a cada novo valor de β a Etapa A é executada para encontrar o

valor de mínimo para o respectivo β fixo. Segue-se que da Iteração 1 a 4, valores cada vez menores da Equação A.9 são encontrados, de modo que o tamanho de passo $\Delta_\beta = -0.5$ se mantém constante até o Ponto 13. A Iteração 5 segue na mesma direção, entretanto o valor de mínimo encontrado no Ponto 14 é maior que a do Ponto 13. Uma vez que ambas as direções de β foram avaliadas, reduz-se o valor de Δ_β e a Etapa B é reiniciada com o novo tamanho de passo $\Delta_\beta = 0.25$. As Iterações 6 e 7 não apresentam menores valores de mínimo nas duas direções de β , de modo que o tamanho de passo é novamente reduzido pelo fator α . O mesmo acontece nas Iterações 8 e 9. Após a nova redução de Δ_β , atinge-se o critério de parada ε e o algoritmo é finalizado.

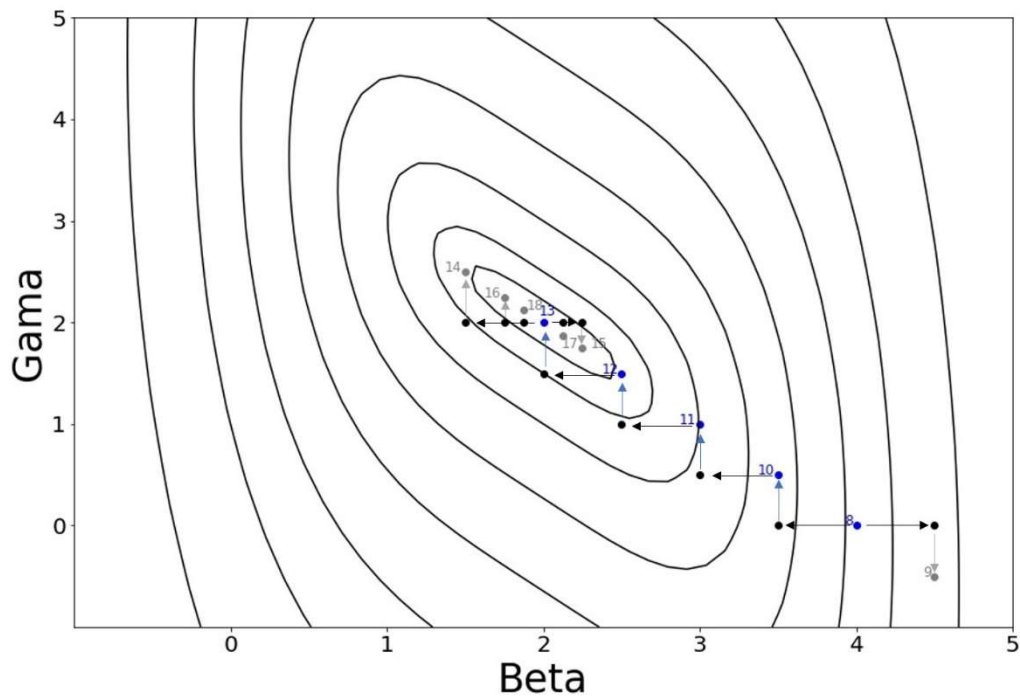


Figura 23: Resultados do algoritmo de procura - Passo B

ANEXO A

Este anexo apresenta a demonstração matemática do modelo gravitacional de distribuição de viagens baseado na técnica de Maximização da Entropia.

A fim de apresentar uma justificativa matemática para aplicação da Teria da Gravidade newtoniana aos modelos de construção de matrizes OD sintéticas, Wilson (1967) foi o primeiro autor a demonstrar a aplicação do conceito de entropia ao estudo dos deslocamentos urbanos. O autor afirma que a complexidade de se estudar o fenômeno é semelhante ao estudo do comportamento dos gases em um ambiente fechado e que o primeiro pode ser pensado de forma análoga ao segundo.

A entropia representa os estados de um sistema. No caso dos gases, o autor afirma que pode ser definido a partir de três perspectivas: o macroestado, que representa a quantidade total de moléculas dentro do sistema (Figura 24a); o mesoestado, que afirma como as moléculas estão distribuídas no sistema em termos de quantidade (Figura 24b); e o microestado, que descreve as combinações das moléculas (Figura 24c).

Analogamente, para o sistema de deslocamentos urbanos, Wilson (1967) define o macroestado como o número total de viagens dentro da área de estudo, o mesoestado como a quantidade de viagens entre cada par OD, e o microestado representa cada viagem no âmbito do indivíduo em relação à sua origem, destino e custo de viagem.

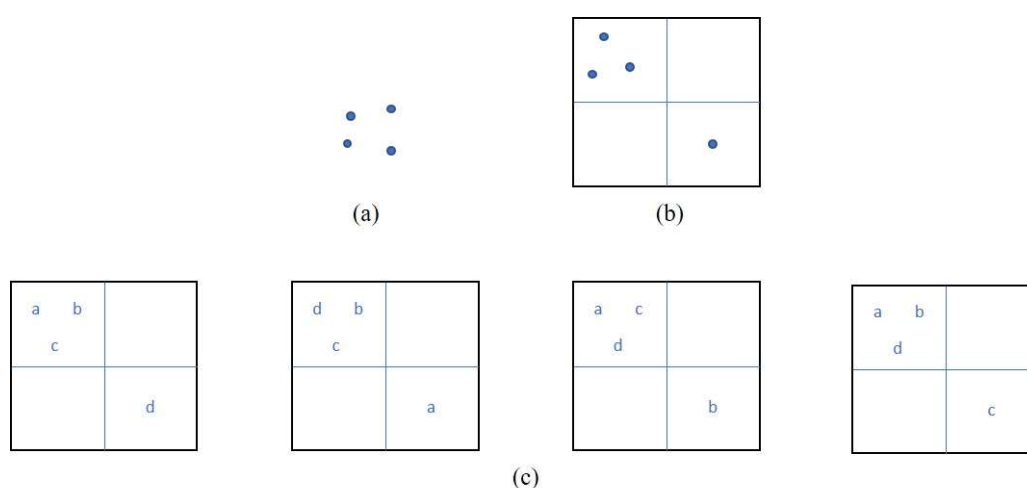


Figura 24: Representação do sistema dos gases nos estados macro (a), meso (b) e micro(c)

O autor também afirma que existem diversas combinações de microestados podem resultar em um mesmo mesoestado, e que o mesmo macroestado pode ser formado por

diversos mesoestados. Ao assumir que todos os microestados são igualmente prováveis, o mesoestado mais frequente será aquele que possuir o maior número de microestados, sujeitos às restrições do sistema. Assim, dado o número total de viagens em um sistema urbano (macroestado), o número de viagens entre cada par OD, ou o mesoestado $W_{(T_{ij})}$, mais provável é aquele que possui o maior número de combinações possíveis de microestados (T_{ij}) (BERTONCINI, 2010).

Nesse caso, Wilson (1967) demonstra que para estimar o número de viagens T_{ij} entre cada origem i e destino j bastaria que três restrições fossem satisfeitas (Equações A.10, A.11 e A.12):

$$\sum_i T_{ij} = O_i \quad (\text{A.10})$$

$$\sum_j T_{ij} = D_j \quad (\text{A.11})$$

$$\sum_{ij} T_{ij} \cdot c_{ij} = C \quad (\text{A.12})$$

em que

- O_i : total de viagens com origem (produzidas) na zona i ;
- D_j : total de viagens com destino (atraídas) na zona j ;
- c_{ij} : custo generalizado de viagem entre as zonas i e j .
- C : custo generalizado total para realizar as viagens.

Enquanto as Equações A.10 e A.11 definem as restrições relativas à quantidade de viagens produzidas e atraídas em cada zona de tráfego, respectivamente, a Equação A.12 estabelece uma restrição quanto ao custo total para realização das viagens.

O objetivo, portanto, é encontrar um mesoestado – uma distribuição de viagens T_{ij} – que maximiza o número de microestados a ele associados considerando o número total de viagens realizados dentro do sistema ($\sum_{ij} T_{ij} = T$). Para isso, o número de maneiras para selecionar um microestado T_{11} é dado pela combinação $C_{T_{11}}^T$. Já o número de combinações de T_{12} é dado por $C_{T_{12}}^{T-T_{11}}$, uma vez que T_{11} já foi escolhido. Assim, o número de microestados associado a um mesoestado genérico é dado pela multiplicação de todas as combinações possíveis (Equações A.13, A.14 e A.15).

$$W_{(T_{ij})} = C_{T_{11}}^T \cdot C_{T_{12}}^{T-T_{11}} \cdot C_{T_{13}}^{T-T_{11}-T_{12}} \dots \quad (\text{A.13})$$

$$W_{(T_{ij})} = \frac{T!}{T_{11}!(T-T_{11})!} \cdot \frac{(T-T_{11})!}{T_{12}!(T-T_{11}-T_{12})!} \dots \quad (\text{A.14})$$

$$W_{(T_{ij})} = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \quad (\text{A.15})$$

A linearização para fins de tratamento matemático pode ser obtida pela aplicação do logaritmo natural na Equação A.15, resultando na Equação A.16.

$$\begin{aligned} \ln(W_{(T_{ij})}) &= \ln\left(\frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!}\right) = \ln(T!) - \ln\left(\prod_{ij} T_{ij}!\right) \\ &= \ln(T!) - \sum_{ij} \ln(T_{ij}!) \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

Dado que $\ln(X!) = X \cdot \ln(X) - X$, tem-se:

$$\ln(W_{(T_{ij})}) = T \cdot \ln(T) - T - \sum_{ij} (T_{ij} \cdot \ln(T_{ij}) - T_{ij}) \quad (\text{A.17})$$

Portanto, para encontrar o mesoestado mais provável do macroestado T , é necessário maximizar o número de microestados a ele associados. Ao assumir que os somatórios das viagens produzidas e das viagens atraídas todas as zonas são iguais a T , que por sua vez é constante, é possível definir o modelo de maximização de entropia, dado pela Equação A.18, sujeito às restrições definidas nas Equações A.10, A.11 e A.12.

$$\text{Máx} (\ln(W_{(T_{ij})})) = - \sum_{ij} (T_{ij} \cdot \ln(T_{ij}) - T_{ij}) \quad (\text{A.18})$$

O problema de otimização apresentado é caracterizado como multidimensional com restrições de igualdade e não-negatividade das variáveis T_{ij} . Portanto, é possível reescrever o modelo como uma função Lagrangeana, tal que:

$$\begin{aligned} \text{Min L} = \ln(W_{(T_{ij})}) + \sum_i \alpha_i (O_i - \sum_j T_{ij}) + \sum_j \theta_j (D_{ji} - \sum_i T_{ij}) + \\ \beta (C - \sum_{ij} T_{ij} \cdot c_{ij}) \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

sujeito a

$$T_{ij} \geq 0 \quad (\text{A.20})$$

A solução do modelo irrestrito dado pelas Equações A.19 e A.20 satisfaz as restrições de não-negatividade de T_{ij} , logo tem-se que:

$$\frac{\partial L}{\partial T_{ij}} = -\ln(T_{ij}) - \alpha_i - \theta_j - \beta \cdot c_{ij} = 0 \quad (\text{A.21})$$

$$\ln(T_{ij}) = \alpha_i + \theta_j + \beta \cdot c_{ij} \quad (\text{A.22})$$

$$T_{ij} = \exp(\alpha_i + \theta_j + \beta \cdot c_{ij}) \quad (\text{A.23})$$

$$T_{ij} = \exp(\alpha_i) \cdot \exp(\theta_j) \cdot \exp(\beta \cdot c_{ij}) \quad (\text{A.24})$$

Escrevendo $\exp(\alpha_i)$ e $\exp(\theta_j)$ em função do total de viagens produzidas O_i e atraídas D_j , tem-se:

$$\exp(\alpha_i) = A_i \cdot O_i \quad (\text{A.25})$$

$$\exp(\theta_j) = B_j \cdot D_j \quad (\text{A.26})$$

Dessa maneira, o modelo gravitacional de distribuição de viagens para o cálculo de uma matriz OD sintética de acordo com Wilson (1967) é dado pela Equação A.27.

$$T_{ij} = A_i \cdot O_i \cdot B_j \cdot D_j \cdot \exp(-\beta \cdot c_{ij}) \quad (\text{A.27})$$

em que

- O_i : total de viagens com origem (produzidas) na zona i ;
- D_j : total de viagens com destino (atraídas) na zona j ;
- c_{ij} : custo generalizado de viagem entre as zonas i e j .
- A_i e B_j : parâmetros de balanceamento.

ANEXO B

Este Anexo apresenta a formulação matemática do tradicional método de calibração dos parâmetros da função de impedância em modelos de distribuição de viagens. Segundo Ortúzar e Willumsen (2011), diversas técnicas de calibração têm sido propostas, sendo o método de Hyman (1969) o mais amplamente disseminado e aplicado devido à sua robustez e eficiência. Em seu artigo seminal, o autor desenvolve o modelo gravitacional de distribuição de viagens a partir de outro método, a inferência Bayesiana.

A solução do problema de distribuição de viagens (Equação B.1) requer que restrições ligadas ao total de viagens com origem e destino observadas e modeladas sejam satisfeitas, além de restrições relacionadas à função de impedância do modelo. Nesse caso, Wilson (1967) em sua demonstração pela maximização da entropia (ver Anexo A).

Hyman (1969) assume que o custo total das viagens observadas deve ser igual ao custo total das viagens modeladas, resultando na função de impedância da forma exponencial (Equação B.1).

$$T_{ij} = A_i \cdot O_i \cdot B_j \cdot D_j \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}} \quad (\text{B.1})$$

Segundo Hyman (1969), a escolha do tipo de restrição relacionada à impedância da viagem determina a forma da função de impedância do modelo. Caso a restrição dada pela A.12 (Anexo A, página 103) seja substituída pela Equação B.3, por exemplo, tem-se uma função de impedância do tipo potência, representada pela Equação B.4.

$$\sum_{i,j} p_{ij} \cdot \log c_{ij} = \sum_{i,j} t_{ij} \cdot \log c_{ij} \quad (\text{B.3})$$

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-\gamma} \quad (\text{B.4})$$

Também é possível determinar uma função de impedância combinada entre a forma exponencial e potência, conhecida como a função de Tanner (Equação B.5), em que ambas as restrições A.12 e B.3 devem ser simultaneamente satisfeitas.

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{\gamma} \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}} \quad (\text{B.5})$$

Dessa maneira, Hyman (1969) desenvolveu o método analítico para calibração dos parâmetros da função de impedância (forma exponencial) apresentado a seguir, conforme demonstrado por Ortúzar e Willumsen (2011).

Os autores afirma que em qualquer iteração do processo está disponível uma matriz sintética $T(\beta_m)$ construída a partir da Equação B.1 dado o valor atual de β , de modo que é possível avaliar a diferença entre o custo médio de viagem modelado e o custo médio observado (Equação B.2).

$$c(\beta_m) = \frac{\sum_{i,j}[t_{ij}(\beta_m) \cdot c_{ij}]}{T(\beta_m)} = c^* = \frac{\sum_{i,j}[p_{ij} \cdot c_{ij}]}{\sum_{i,j} p_{ij}} \quad (\text{B.2})$$

em que

- $c(\beta_m)$ e c^* : custos médios de viagem modelado e observado, respectivamente;
- $t_{ij}(\beta_m)$: viagens modeladas com origem na zona i e destino na zona j ;
- $T(\beta_m)$: total de viagens modeladas;
- p_{ij} : viagens observadas com origem na zona i e destino na zona j ;
- c_{ij} : custo generalizado de viagem entre a zona i e a zona j .

Dado o valor de atual de β_m a cada iteração, é possível estimar os parâmetros A_i e B_j a partir do processo iterativo de Furness pelas Equações B.3 e B.4, respectivamente.

$$A_i = 1 / \sum_j B_j \cdot D_j \cdot \exp(-\beta_m \cdot c_{ij}) \quad (\text{B.3})$$

$$B_j = 1 / \sum_i A_i \cdot O_i \cdot \exp(-\beta_m \cdot c_{ij}) \quad (\text{B.4})$$

Portanto, o processo de calibração é definido pelo ilustrado na Figura 25.

1	<u>Inicialização</u>
2	Determine $m = 0$
3	$\beta_0 = 1/c^*$
4	$\varepsilon \cong 0$
5	<u>Passo 1</u>
6	Calcule
7	$t_{ij}(\beta_0) = A_i \cdot O_i \cdot B_j \cdot D_j \cdot \exp(-\beta_0 \cdot c_{ij})$
8	$c(\beta_0) = \frac{\sum_{i,j}[t_{ij}(\beta_0) \cdot c_{ij}]}{T(\beta_0)}$
9	$m = m + 1$
10	$\beta_m = \beta_0 \cdot c(\beta_0) / c^*$
11	$t_{ij}(\beta_m) = A_i \cdot O_i \cdot B_j \cdot D_j \cdot \exp(-\beta_m \cdot c_{ij})$
12	$c(\beta_m) = \frac{\sum_{i,j}[t_{ij}(\beta_m) \cdot c_{ij}]}{T(\beta_m)}$
13	<u>Passo 2</u>
14	Enquanto $ c(\beta_m) - c^* > \varepsilon$ faça
15	$\beta_{m+1} = \frac{(c^* - c_{m-1}) \cdot \beta_m - (c^* - c_m) \cdot \beta_{m-1}}{c_m - c_{m-1}}$
16	$m = m + 1$
17	$t_{ij}(\beta_m) = A_i \cdot O_i \cdot B_j \cdot D_j \cdot \exp(-\beta_m \cdot c_{ij})$
18	$c(\beta_m) = \frac{\sum_{i,j}[t_{ij}(\beta_m) \cdot c_{ij}]}{T(\beta_m)}$

Figura 25: Algoritmo de minimização de Hyman (1969)

Inicialmente, determine o valor inicial de β_0 como o inverso do custo médio observado (linha 3) e estabeleça um erro ε como critério de parada do algoritmo (linha 4). Em seguida, vá para o Passo 1 (linhas 5-11) e calcule a matriz sintética a partir do parâmetro β_0 (linha 7) e estime o custo médio modelado $c(\beta_0)$ (linha 8). Então, calcule um novo valor do parâmetro β_m (linha 10) e estime uma nova matriz sintética $t_{ij}(\beta_m)$ (linha 11) e seu respectivo custo médio $c(\beta_m)$ (linha 12). Vá para o Passo 2 (linhas 13-18). Calcule um novo valor para o parâmetro β_m (linha 15) e estime novamente uma matriz sintética $t_{ij}(\beta_m)$ (linha 17) e seu respectivo custo médio $c(\beta_m)$ (linha 18) Verifique a diferença entre o custo médio modelado e o custo médio observado e compare com ε . Repita o Passo 2 até que essa diferença seja menor que ε .

ANEXO C

Este anexo apresenta o desenvolvimento matemático do Método dos Mínimos Quadrados Generalizados (*Generalized Least Squares – GLS*) desenvolvido por Cascetta (1984). Este método é um dos principais modelos utilizados para estimação de matrizes OD estáticas a partir dos dados de fluxo de veículos. Uma das vantagens é a ausência de um “estimador de consistência” necessário aos outros métodos existentes para garantir a consistência entre os fluxos nos arcos. Nesse caso, o autor considera uma parcela de erro para os fluxos observados a fim de considerar erros de medida e variação temporal dos fluxos. A demonstração do método é descrita a seguir.

Os verdadeiros valores da matriz OD relativos às viagens realizadas entre n pares origem-destino em um determinado período são ordenadas em um vetor t de dimensão $n \times 1$. Um vetor análogo \hat{t} é obtido a partir de um modelo de viagens de modo que é possível estabelecer uma relação entre ambos (Equação C.1) por meio de um vetor de erros aleatórios ε com média μ e matriz de dispersão V .

$$\hat{t} = t + \varepsilon \quad (C.1)$$

Sabe-se que o fluxo de veículos f que passam em um arco da rede viária em um determinado período pode ser escrito como uma combinação linear dos elementos da matriz OD t e coeficientes que variam entre 0 e 1. Esses coeficientes indicam a porcentagem dos fluxos entre cada par origem-destino que utilizaram aquele arco em sua rota. A Equação C.2 indica essa relação na forma matricial, em que A é a matriz de alocação com dimensão $m \times n$ e pode ser obtida por meio de diferentes métodos de alocação de tráfego.

$$f = A.t \quad (C.2)$$

Alguns dos modelos de alocação de tráfego assumem que o mecanismo de escolha de rota é independente da matriz origem destino, o que resulta em uma matriz de alocação \hat{A} , sujeita a variados erros como a simplificação da rede viária, por exemplo. Dessa maneira, a Equação C.2 pode ser substituída pela Equação C.3, ao adicionar uma parcela de erro aleatório δ .

$$f = \hat{A}.t + \delta \quad (C.3)$$

Até o momento, assumiu-se como “verdadeiros” (isentos de erros) os fluxos observados, o que não é uma opção realista, de modo que f pode ser escrito em função dos seus erros (\hat{f}). A existência de uma tendência eventual entre os fluxos observados pode ser ignorada com respeito a δ , de modo que eles podem ser considerados não tendenciosos, com média f e matriz de dispersão W . Ao substituir f por \hat{f} na Equação C.3, obtém-se a Equação C.4, cujo erro aleatório η possui média igual a δ e matriz de dispersão W .

$$\hat{f} = \hat{A}.t + \eta \quad (\text{C.4})$$

O problema é encontrar o estimador da matriz OD “verdadeira” t por meio da combinação de informações contidas no modelo de \hat{t} , nos fluxos observados \hat{f} em determinados arcos da rede (Equações C.1 e C.4) e suas respectivas matrizes de dispersão V e W . Dessa maneira, essas equações podem ser combinadas, produzindo um sistema linear de equações estocásticas que coloca o vetor de observações de dimensão $(n + m) \times 1$ em relação ao vetor de parâmetros desconhecidos t e o vetor de erros aleatórios descrito pela Equação C.5.

$$\begin{bmatrix} \hat{t} \\ \hat{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n \\ \hat{A} \end{bmatrix} t + \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \eta \end{bmatrix} \quad (\text{C.5})$$

Em que a média do vetor de erros aleatório é dada por:

$$E(\varepsilon, \eta)' = (\mu, \delta)' \quad (\text{C.6})$$

Para expressar a matriz de dispersão do vetor de erros aleatórios, é necessário assumir algumas hipóteses sobre o modelo de alocação de tráfego adotado. No caso dos modelos de alocação proporcional, é possível afirmar que os componentes do vetor ε e η são independentes, de modo que a matriz de dispersão B é dada pela Equação C.7.

$$B = \begin{bmatrix} V & 0 \\ 0 & W \end{bmatrix} \quad (\text{C.7})$$

Nesse caso, o estimador de mínimos quadrados generalizados t^* pode ser aplicado no modelo estatístico linear (C.5) com matriz de dispersão dos resíduos (C.7). Ao assumir que o

vetor de resíduos aleatórios possui média igual a zero, o estimador pode ser considerado o melhor estimador linear não tendencioso (*Best Linear Unbiased Estimator - BLUE*) da matriz OD t . Não é necessário assumir um tipo específico de distribuição para o vetor de resíduos. Assim, o estimador t^* é dado pela Equação C.8.

$$\min_t \begin{bmatrix} \hat{t} - t \\ \hat{f} - \hat{A}t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^{-1} & 0 \\ 0 & W^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{t} - t \\ \hat{f} - \hat{A}t \end{bmatrix} \quad (\text{C.8})$$

O estimador t^* pode ser entendido como a matriz de menor distância ponderada em relação à matriz inicial t que, uma vez alocada na rede de tráfego, dá origem aos fluxos modelados com menor distância ponderada em relação aos fluxos observados \hat{f} . Ou seja, minimiza-se simultaneamente os erros entre a matriz modelada e a matriz inicial, e entre os fluxos modelados e observados. Assim, é possível determinar pesos relativos para cada fonte de erro. Nesse caso, os dados sobre os fluxos observados se mostrem mais próximos à realidade que a matriz modelada, sendo possível estabelecer pesos para que a distância dos fluxos modelados em relação aos fluxos observados seja menor comparada à distância entre a matriz OD original e modelada, e vice-versa.