

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO - UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA E GESTÃO
DO CONHECIMENTO - PPGIGC

Magdiel de Brito Izidoro

UMA ANÁLISE DE REDES COMPLEXAS DA MOBILIDADE URBANA
FERROVIÁRIA DE SÃO PAULO A PARTIR DE DADOS DE
BILHETAGEM ELETRÔNICA DE 2019 E 2020

São Paulo

2026

Magdiel de Brito Izidoro

**UMA ANÁLISE DE REDES COMPLEXAS DA MOBILIDADE URBANA
FERROVIÁRIA DE SÃO PAULO A PARTIR DE DADOS DE
BILHETAGEM ELETRÔNICA DE 2019 E 2020**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento (PPGIGC) da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Informática e Gestão do Conhecimento.

Prof. Orientador: Dr. Pedro Henrique Triguís Schimit

São Paulo

2026

Izidoro, Magdiel.

Uma análise de redes complexas da mobilidade urbana ferroviária de São Paulo a partir de dados de bilhetagem eletrônica de 2019 e 2020.
/ Magdiel Izidoro. 2026.

63 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE,
São Paulo, 2026.

Orientador (a): Prof. Dr. Pedro Henrique Triguís Schimit.

1. Mobilidade urbana. 2. Bilhetagem eletrônica. 3. Redes complexas. 4. Inferência origem-destino. 5. Transporte sobre trilhos.

I. Triguís Schimit, Pedro Henrique.

II. Título.

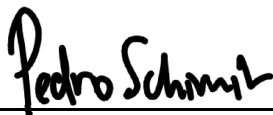
CDU 004

PARECER – EXAME DE DEFESA

Parecer da Comissão Examinadora designada para o exame de Defesa do Programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento a qual se submeteu o aluno MAGDIEL DE BRITO IZIDORO. Tendo examinado o trabalho apresentado para obtenção do título de “Mestre em Informática e Gestão do Conhecimento”, com Dissertação intitulada Padrões de mobilidade em São Paulo: uma abordagem baseada em redes complexas e dados de bilhetagem, a comissão Examinadora considerou o trabalho:

- ☒ **Aprovado**
☐ **Aprovado condicionalmente**
☐ **Reprovado com direito a novo exame**
☐ **Reprovado**

Examinadores



Prof. Dr. Pedro Henrique Triguís Schimit

 Documento assinado digitalmente
EDSON MELO DE SOUZA
Data: 08/05/2026 17:25:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edson Melo de Souza

 Documento assinado digitalmente
RONNY MARCELO ALIAGA MEDRANO
Data: 05/05/2026 10:02:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ronny Marcelo Aliaga Medrano

segunda-feira, 27 de abril de 2026

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pelo amor, apoio e compreensão em todos os momentos desta jornada.

Aos que caminharam ao meu lado, mesmo nos dias mais desafiadores.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, saúde e perseverança ao longo de toda essa jornada acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Henrique Triguís Schimit, pela orientação firme, pela confiança depositada em meu trabalho e pelas contribuições intelectuais que foram fundamentais para o amadurecimento desta pesquisa. Sua dedicação, rigor científico e disponibilidade foram decisivos para a consolidação deste estudo.

À Universidade Nove de Julho (UNINOVE), pela oportunidade de realização do curso de Mestrado e pela concessão da bolsa de estudos, que tornou possível a dedicação necessária ao desenvolvimento desta dissertação.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento (PPGI), pelas discussões acadêmicas, trocas de experiências e apoio mútuo ao longo do curso.

À Autopass, pela disponibilização dos dados utilizados nesta pesquisa, que permitiram a realização das análises aqui apresentadas.

Aos amigos e familiares, pelo apoio incondicional, compreensão nos momentos de ausência e incentivo constante durante todo o percurso.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“Deus quer, o homem sonha, a obra nasce.”.

Fernando Pessoa, 1934

RESUMO

Este trabalho analisa a mobilidade urbana sobre trilhos na Região Metropolitana de São Paulo a partir de registros anonimizados do sistema de bilhetagem eletrônica referentes aos anos de 2019 e 2020. O estudo parte da limitação de que esse tipo de base registra, em geral, apenas o embarque dos passageiros, sem informação explícita de desembarque. Para contornar esse problema, propõe-se um procedimento de inferência de fluxos origem–destino baseado no *Transaction Sequence Number* (TSN), que permite reconstruir deslocamentos sucessivos e, a partir deles, construir redes diárias de mobilidade. Com base nessas redes, foram analisadas métricas estruturais da teoria de redes complexas, além de distribuições de distância, entropia em nível de estação, dinâmicas de ranking e comparações espaciais entre períodos. Os resultados mostram que a pandemia de COVID-19 esteve associada a uma forte contração da demanda e a mudanças relevantes na organização estrutural da rede. Observou-se redução de 41,2% no volume total de deslocamentos, queda de 44,2% na força média da rede e redução de 44,0% na eficiência global. Em contrapartida, a distância média dos caminhos aumentou 64,0%, acompanhada por crescimento de 9,0% no número de comunidades e por uma reorganização espacial dos fluxos entre estações e corredores do sistema. Esses resultados indicam que a pandemia não afetou apenas o volume de viagens, mas também a forma de organização da mobilidade sobre trilhos na metrópole. Assim, o estudo demonstra que dados de bilhetagem eletrônica, quando combinados com métodos de inferência e análise em redes complexas, podem contribuir para o monitoramento contínuo da mobilidade urbana e para o planejamento de sistemas de transporte público.

Palavras-chave: COVID-19; mobilidade urbana; bilhetagem eletrônica; redes complexas; inferência origem–destino; transporte sobre trilhos.

ABSTRACT

This study analyses rail-based urban mobility in the São Paulo Metropolitan Region using anonymized electronic ticketing records from 2019 and 2020. The study addresses a common limitation of smart card data, which generally records only passenger boarding events without explicit information on alighting locations. To overcome this limitation, an origin-destination inference procedure based on the *Transaction Sequence Number* (TSN) is proposed, allowing the reconstruction of successive trips and the construction of daily mobility networks. Based on these networks, structural metrics from complex network theory were analysed, together with distance distributions, station-level entropy, ranking dynamics, and spatial comparisons between periods. The results show that the COVID-19 pandemic was associated with a strong contraction in demand and significant changes in the structural organization of the network. A reduction of 41.2% in the total volume of trips was observed, accompanied by a 44.2% decrease in average network strength and a 44.0% reduction in global efficiency. Conversely, the average path length increased by 64.0%, together with a 9.0% growth in the number of communities and a spatial reorganization of flows between stations and system corridors. These findings indicate that the pandemic affected not only travel demand but also the way rail mobility was organized across the metropolis. Therefore, this study demonstrates that electronic ticketing data, when combined with origin-destination inference methods and complex network analysis, can contribute to the continuous monitoring of urban mobility and support the planning and management of public transportation systems.

Keywords: COVID-19; urban mobility; smart card data; complex networks; origin-destination inference; rail transit.

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações	12
Lista de Tabelas	14
Lista de Abreviaturas	15
1 Introdução	16
1.1 Contextualização do Problema	17
1.2 Motivação	19
1.3 Justificativa	20
1.4 Problema de Pesquisa	20
1.5 Objetivo	20
1.6 Limitações do Trabalho	21
2 Revisão da Literatura	23
2.1 Modelos de Mobilidade Humana	23
2.2 Mobilidade Urbana e Humana	24
2.3 Redes Complexas e Mobilidade	25
2.3.1 Métricas de redes complexas	27
3 Metodologia	32
3.1 Classificação Metodológica	32
3.2 Área de Estudo e Base de Dados	33
3.3 Pré-processamento e Reconstrução OD via TSN	34
3.4 Construção da Rede	35
3.4.1 Definição dos nós	36
3.4.2 Definição das arestas	36
3.4.3 Ponderação e representação da rede	37
3.4.4 Construção diária da rede	37
3.5 Segmentação Temporal	37
3.6 Métricas de Rede	37
3.7 Dinâmica de Rankings e Comparação com a OD	38

4	Resultados	39
4.1	Evolução geral da demanda metroferroviária (2019-2020)	39
4.2	Dinâmica de rankings de estações e pares OD	43
4.3	Contração espacial da rede: março de 2019 vs março de 2020	46
4.4	Exemplos de redes diárias de mobilidade	47
4.5	Trajetórias temporais das métricas de rede	49
4.6	Estrutura de comunidades e padrões espaciais	52
4.7	Consistência com evidências baseadas em pesquisa	54
5	Conclusão	56
	Referências Bibliográficas	59

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

4.1	Mapa da rede ferroviária da Região Metropolitana de São Paulo, mostrando os limites municipais, os limites distritais do município de São Paulo, os trechos da rede de Metrô/CPTM e um conjunto selecionado de estações identificadas (escolhidas entre aquelas mais proeminentes nos <i>bump charts</i>).	40
4.2	Distância média percorrida por viagem (eixo esquerdo) e número total de viagens (eixo direito) ao longo do período de estudo.	41
4.3	Distribuição das distâncias e razão entre as distribuições de distância para os dois períodos (2020 sobre 2019).	42
4.4	Distribuições da entropia de Shannon por estação de origem para os dois períodos.	43
4.5	Gráficos do tipo <i>bump chart</i> para entradas e saídas ao longo do período 2019–01 a 2020–12. Cada linha representa a posição mensal no ranking (Top- k) das estações com maiores volumes de viagens.	44
4.6	Gráficos do tipo <i>bump chart</i> para pares OD e estações mais atravessadas ao longo do período 2019–01 a 2020–12. Cada linha representa a posição mensal no ranking (Top- k) dos pares OD e das estações mais frequentemente percorridas ao longo de caminhos mínimos.	45
4.7	Variação percentual na intensidade dos fluxos de passageiros ao longo de cada segmento ferroviário e metroviário entre março de 2019 e março de 2020. Cada segmento de linha representa uma conexão entre duas estações na rede de São Paulo. A escala de cores varia do vermelho, indicando fortes reduções no número de viagens, ao azul, indicando fortes aumentos, sendo o branco associado a variações desprezíveis. A espessura de cada segmento é proporcional à magnitude absoluta da variação no fluxo, de modo que segmentos mais espessos correspondem a mudanças mais intensas, independentemente de serem aumentos ou reduções.	47
4.8	Redes diárias de origem–destino para dias selecionados entre 2019 e 2020. Cada painel apresenta a rede ferroviária de São Paulo, na qual os nós correspondem às estações e as ligações conectam pares de estações com pelo menos uma viagem registrada.	48

4.9	Evolução diária das métricas em nível de rede utilizadas no artigo, calculadas a partir do grafo diário de mobilidade ferroviária G_t . Em cada painel, a curva fina representa o valor diário e a curva espessa representa a média móvel de 7 dias. As métricas são: peso total $W_G(t)$, densidade $D_G(t)$, força média $S_G(t)$, comprimento médio dos caminhos mínimos $l_G(t)$ (baseado em custo), eficiência global $E_G(t)$ (baseada em custo), coeficiente médio de agrupamento ponderado $C_G(t)$, número de comunidades $K_G(t)$ (partição por modularidade via método guloso) e assortatividade por grau $A_G(t)$	50
4.10	Estrutura diária de comunidades das redes ferroviárias de origem-destino para dias selecionados entre 2019 e 2020. Cada painel apresenta a rede ferroviária de São Paulo, na qual as ligações são coloridas de acordo com sua atribuição de comunidade, e as estações herdam a cor da comunidade à qual pertencem. .	53

LISTA DE TABELAS

4.1	Comparação das métricas diárias em nível de rede (média ao longo dos dias) entre 2019 (pré-pandemia) e 2020 (pandemia). A última coluna apresenta a variação relativa de 2019 para 2020 em termos percentuais.	52
-----	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
METRÔ	Companhia do Metropolitano de São Paulo
OD	Origem–Destino
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SPTrans	São Paulo Transporte S.A.
SBE	Sistema de Bilhetagem Eletrônica
TSN	Transaction Sequence Number

1 INTRODUÇÃO

A mobilidade humana emerge de decisões repetidas tomadas por indivíduos sob restrições espaciais, temporais e socioeconômicas, exibindo simultaneamente variabilidade e regularidade. Evidências empíricas mostram que os deslocamentos não ocorrem de forma aleatória, mas seguem padrões estruturados, como leis de escala nas distâncias percorridas (BROCKMANN *et al.*, 2006), recorrência na visitação de locais (GONZÁLEZ *et al.*, 2008) e limites mensuráveis de previsibilidade nas trajetórias individuais (SONG *et al.*, 2010). Esses resultados indicam que a mobilidade urbana pode ser representada e analisada por meio de estruturas formais capazes de capturar regularidades coletivas.

Nas últimas décadas, o avanço das bases de dados permitiu a consolidação de abordagens quantitativas voltadas à modelagem dos deslocamentos humanos. Estudos demonstram que os fluxos de mobilidade se manifestam em múltiplas escalas espaciais (ALESSANDRETTI *et al.*, 2020), preservando elevada previsibilidade mesmo em contextos urbanos complexos (POUDYAL *et al.*, 2024; GALLOTTI *et al.*, 2024). Nesse contexto, abordagens baseadas em redes têm sido utilizadas para representar sistemas de transporte e fluxos de mobilidade urbana, permitindo modelar interações entre localidades e analisar a estrutura das conexões do sistema (DING *et al.*, 2019; LATORA; MARCHIORI, 2002; XIA *et al.*, 2020).

A mobilidade urbana pode ser representada como um grafo em que localidades são nós e interações são arestas, permitindo analisar o sistema de transporte como uma estrutura de conexões, e não apenas como contagens isoladas (DING *et al.*, 2019). No transporte público, essa representação pode incorporar tanto a infraestrutura física quanto a demanda observada, com pesos das arestas indicando a intensidade dos fluxos entre pares de nós. Nessa perspectiva, conceitos como eficiência permitem caracterizar sistemas metroviários para além de descrições puramente topológicas (LATORA; MARCHIORI, 2002). Além disso, modelos em redes complexas oferecem métricas para quantificar conectividade, concentração e redundância, bem como para identificar comunidades associadas a sub-regiões ou corredores (DING *et al.*, 2019).

Quando construídas em alta resolução temporal, essas redes permitem acompanhar a evolução da conectividade efetiva, da importância relativa das estações e da vulnerabilidade do sistema, considerando conjuntamente topologia e demanda (XIA *et al.*, 2020; PAN

et al., 2024). Por isso, a análise de redes complementa indicadores tradicionais de mobilidade ao fornecer medidas interpretáveis de fragmentação, eficiência e resiliência, inclusive em contextos de choque, como a pandemia de COVID-19 (KIM; JUN, 2022; PEREZ; PEREIRA, 2023). Nesse campo, estudos sobre sistemas metroviários já discutiram eficiência e diferenças estruturais entre redes reais (LATORA; MARCHIORI, 2002; ANGELOUDIS; FISK, 2006), enquanto outras pesquisas abordaram vulnerabilidade e robustez (DERRIBLE; KENNEDY, 2010a; DERRIBLE; KENNEDY, 2010b; DERRIBLE, 2012), mudanças de regime em sistemas ferroviários (DOMÈNECH; SAURÍ, 2009), modelagem multicamadas para representar multimodalidade (ALETA *et al.*, 2016) e implicações da estrutura da rede para o planejamento do transporte (DAGANZO, 2010).

Pesquisas recentes destacam que dados de bilhetagem eletrônica oferecem novas possibilidades para a análise da mobilidade urbana em alta resolução temporal (ARNONE *et al.*, 2016; FADEEV; ALHUSSEINI, 2023). Diferentes fontes de dados têm sido utilizadas para caracterizar padrões de mobilidade humana em larga escala, incluindo registros de telefonia móvel, trajetórias GPS e dados de bilhetagem eletrônica (DU *et al.*, 2025). Diferentemente das pesquisas domiciliares tradicionais, como a Pesquisa Origem–Destino (Pesquisa OD) da Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô) (Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô, 2023), que são baseadas em amostras estratificadas e aplicadas periodicamente, em geral a cada dez anos, os registros de validação capturam continuamente o uso efetivamente realizado do sistema de transporte público. Contudo, em muitos sistemas de bilhetagem eletrônica (SBE) registra-se apenas o embarque dos passageiros, sem informação explícita sobre o desembarque, o que impõe desafios metodológicos para a reconstrução de fluxos origem–destino.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A Região Metropolitana de São Paulo constitui um dos maiores e mais complexos sistemas urbanos da América Latina, concentrando mais de 20 milhões de habitantes distribuídos em 39 municípios (IBGE, 2022a). Nesse contexto, a mobilidade urbana desempenha papel central na organização das dinâmicas sociais e econômicas da metrópole, sobretudo em razão da forte desigualdade territorial e da concentração de empregos e serviços em áreas centrais (BRANDÃO; BUENO, 2018; FERNANDES *et al.*, 2020). A localização periférica de parcelas expressivas da população intensifica a dependência do

transporte coletivo e amplia assimetrias no acesso a oportunidades urbanas.

No planejamento da mobilidade metropolitana, a Pesquisa Origem–Destino do Metrô de São Paulo constitui a principal referência para a caracterização dos deslocamentos urbanos (Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô, 2023). Trata-se de um levantamento domiciliar de grande escala, com base amostral e informações detalhadas sobre modos de transporte, motivos de viagem e características socioeconômicas. Embora esse tipo de pesquisa forneça um retrato abrangente da mobilidade, sua natureza periódica limita a observação contínua de flutuações de curto prazo e de mudanças estruturais no sistema (Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô, 2023; BARBOSA *et al.*, 2018). Essa limitação torna-se ainda mais relevante em contextos de choques externos, como a pandemia de COVID-19, que produziu reduções expressivas de demanda e reorganizações espaciais nos padrões de deslocamento (MU *et al.*, 2021; KIM; JUN, 2022; XIN *et al.*, 2022; ROWE *et al.*, 2023).

A OD 2023 estima que a Região Metropolitana de São Paulo realizou cerca de 35,6 milhões de viagens diárias, sendo 70,5% por modos motorizados e 29,5% por modos não motorizados. Em comparação com 2017, a OD 2023 aponta uma redução de 15% no total de viagens diárias, impulsionada por quedas tanto nas viagens motorizadas (−11,1%) quanto nas não motorizadas (−23,3%). Dentro das viagens motorizadas, a redução concentra-se de forma mais acentuada no transporte coletivo (−19,8%, cerca de 3 milhões de viagens a menos por dia), enquanto o transporte individual apresenta variação apenas marginal (−0,9%). De forma consistente, o índice geral de mobilidade diminui de 2,02 para 1,68 viagens por pessoa entre 2017 e 2023, o que corresponde a aproximadamente −17%, com as maiores reduções relativas associadas ao transporte coletivo e aos modos não motorizados.

A OD 2023 também destaca que as viagens internas a cada sub-região permanecem predominantes, representando cerca de 86% do total de deslocamentos, e que os indicadores espaciais apontam para uma redução das áreas com alta densidade de viagens, como aquelas com mais de 300 viagens motorizadas por hectare, especialmente nas partes mais centrais da Região Metropolitana de São Paulo. Por fim, a OD 2023 inclui questões relacionadas à pandemia, mostrando que os modos de transporte mais frequentemente abandonados durante esse período foram os coletivos, incluindo metrô e trem metropolitano.

Nesse cenário, registros de bilhetagem eletrônica emergem como uma fonte promiss-

sora para o monitoramento contínuo da mobilidade urbana, pois capturam o uso efetivamente realizado do sistema em alta resolução temporal (ARNONE *et al.*, 2016; FADEEV; ALHUSSEINI, 2023). No entanto, em muitos sistemas de transporte público, esses registros informam apenas o momento e o local do embarque, sem explicitar o desembarque dos passageiros. Como consequência, os fluxos origem–destino não podem ser observados diretamente, exigindo procedimentos metodológicos de inferência capazes de transformar sequências de validações em representações estruturais da mobilidade (ARNONE *et al.*, 2016; FADEEV; ALHUSSEINI, 2023). Além disso, a literatura recente mostra que abordagens baseadas em redes são particularmente adequadas para investigar alterações na conectividade, na centralidade e na organização dos fluxos em sistemas de transporte (DING *et al.*, 2019; XIA *et al.*, 2020; PAN *et al.*, 2024; PEREZ *et al.*, 2024). Apesar desses avanços, ainda persiste uma lacuna na integração entre dados de bilhetagem eletrônica e representações dinâmicas da mobilidade ferroviária em alta resolução temporal.

1.2 MOTIVAÇÃO

A motivação deste trabalho decorre da necessidade de compreender, com maior detalhe temporal e estrutural, a dinâmica da mobilidade ferroviária na Região Metropolitana de São Paulo. Em sistemas urbanos de grande escala, a análise de volumes agregados de viagens, embora importante, não é suficiente para revelar como os fluxos se reorganizam espacialmente ao longo do tempo. Nesse sentido, o uso combinado de dados operacionais e métodos de redes complexas permite avançar na interpretação da mobilidade como uma estrutura dinâmica de conexões entre estações e corredores (DING *et al.*, 2019; XIA *et al.*, 2020; PAN *et al.*, 2024).

Ao mesmo tempo, a disponibilidade de registros de bilhetagem eletrônica abre novas possibilidades para a análise empírica da mobilidade urbana em alta frequência temporal (ARNONE *et al.*, 2016; FADEEV; ALHUSSEINI, 2023). Particularmente em sistemas ferroviários metropolitanos, esses dados permitem acompanhar a variabilidade da demanda e investigar mudanças estruturais associadas a sazonalidades, eventos específicos e períodos de crise. Assim, investigar de que forma esses registros podem ser utilizados para reconstruir e analisar fluxos de mobilidade constitui um problema relevante tanto do ponto de vista científico quanto do ponto de vista aplicado.

1.3 JUSTIFICATIVA

A justificativa deste estudo está associada à necessidade de desenvolver procedimentos metodológicos capazes de explorar o potencial analítico dos dados de bilhetagem eletrônica em sistemas nos quais apenas o embarque dos passageiros é registrado. Embora a literatura tenha avançado no uso de dados operacionais para estudar mobilidade urbana e estrutura de redes de transporte (DING *et al.*, 2019; XIA *et al.*, 2020), ainda permanecem desafios importantes relacionados à inferência de fluxos origem–destino e à construção de representações estruturais da mobilidade (ARNONE *et al.*, 2016; FADEEV; ALHUSSEINI, 2023).

Nesse contexto, a proposta de utilizar o *Transaction Sequence Number* (TSN) para ordenar validações e inferir pares sucessivos de deslocamento busca responder a uma limitação concreta desse tipo de base de dados. A construção de redes diárias ponderadas permite analisar não apenas o volume de viagens, mas também mudanças na conectividade, na centralidade e na fragmentação do sistema ao longo do tempo. Dessa forma, o trabalho se justifica por oferecer uma abordagem capaz de integrar inferência de fluxos e análise estrutural da mobilidade ferroviária, dialogando com estudos recentes sobre mobilidade urbana, redes complexas e sistemas de transporte (DERRIBLE, 2012; BARBOSA *et al.*, 2018; DING *et al.*, 2019).

1.4 PROBLEMA DE PESQUISA

De que forma dados de bilhetagem eletrônica que registram apenas embarques podem ser utilizados, por meio do *TSN*, para reconstruir fluxos aproximados de origem–destino e analisar a evolução estrutural da mobilidade ferroviária na Região Metropolitana de São Paulo durante o período da pandemia de COVID-19?

1.5 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é analisar a estrutura e a evolução da mobilidade ferroviária na Região Metropolitana de São Paulo a partir da reconstrução de fluxos origem–destino com base em dados de bilhetagem eletrônica dos anos de 2019 e 2020, utilizando o TSN e a modelagem em redes complexas.

Como objetivos específicos, busca-se:

- desenvolver um procedimento de inferência de fluxos aproximados de origem–destino a partir de sequências de validações registradas no mesmo dia;
- construir redes diárias ponderadas de mobilidade ferroviária, nas quais os nós correspondem às estações e as arestas representam os fluxos inferidos entre elas;
- caracterizar a evolução estrutural da rede por meio de métricas de conectividade, centralidade, eficiência, agrupamento e modularidade;
- comparar as propriedades estruturais da rede antes e durante a pandemia de COVID-19, identificando contrações, reorganizações espaciais e mudanças na hierarquia das estações;
- investigar a dinâmica temporal das métricas e dos padrões de mobilidade ao longo do período analisado.

1.6 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho apresenta limitações inerentes à natureza dos dados utilizados e ao recorte adotado. Em primeiro lugar, os registros de bilhetagem eletrônica analisados capturam apenas validações realizadas no sistema ferroviário, não contemplando deslocamentos por outros modos de transporte nem trechos percorridos a pé. Dessa forma, a mobilidade observada corresponde apenas à parcela formalmente registrada no sistema sobre trilhos.

Em segundo lugar, a origem considerada na modelagem corresponde à estação de validação, e não necessariamente ao local de residência do usuário. Assim, as redes construídas representam interações entre estações do sistema ferroviário, e não fluxos completos da mobilidade urbana metropolitana. Além disso, como o sistema registra apenas o embarque dos passageiros, os fluxos origem–destino precisam ser inferidos a partir de sequências de validações com base no TSN (ARNONE *et al.*, 2016; FADEEV; ALHUSSEINI, 2023).

A adoção dessa abordagem é motivada pela necessidade de compreender não apenas o volume de deslocamentos, mas também a estrutura da mobilidade urbana e sua evolução ao longo do tempo. A inferência de fluxos origem–destino permite representar as interações entre estações e identificar padrões de conectividade, centralidade, fragmentação e

organização espacial que não podem ser observados diretamente a partir dos registros isolados de embarque. Nesse sentido, a modelagem baseada em redes complexas oferece um arcabouço analítico capaz de revelar mudanças estruturais na mobilidade e complementar abordagens tradicionais utilizadas em estudos de transporte urbano. Por essa razão, os resultados devem ser interpretados como representações aproximadas da mobilidade ferroviária observável, e não como uma descrição exaustiva da mobilidade urbana na Região Metropolitana de São Paulo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se a revisão da literatura relacionada ao estudo da mobilidade urbana e às abordagens analíticas utilizadas para investigar padrões de deslocamento em sistemas de transporte. A análise da mobilidade tem se beneficiado do avanço de métodos quantitativos e do uso de grandes bases de dados, que permitem modelar e interpretar sistemas compostos por múltiplos elementos interconectados, como ocorre nas redes de transporte público. Revisões recentes destacam o avanço da integração entre dados de mobilidade, modelos analíticos e aplicações práticas no estudo dos deslocamentos humanos em ambientes urbanos complexos (DU *et al.*, 2025).

2.1 MODELOS DE MOBILIDADE HUMANA

A modelagem da mobilidade humana foi inicialmente desenvolvida a partir de abordagens baseadas em interações espaciais, voltadas à explicação dos fluxos entre localidades. Entre os modelos mais conhecidos, destaca-se o modelo gravitacional, segundo o qual o fluxo entre dois lugares é proporcional à população de origem e destino e inversamente relacionado à distância entre eles. Apesar de sua simplicidade e ampla difusão em estudos urbanos, esse modelo depende da calibração de parâmetros específicos para cada contexto, o que pode limitar sua generalização (BARBOSA *et al.*, 2018). Ainda nesse campo, modelos clássicos de interação espacial continuam sendo relevantes para a análise comparativa de fluxos e para a interpretação de padrões agregados de deslocamento (DU *et al.*, 2025).

Como alternativa aos modelos gravitacionais, (SIMINI *et al.*, 2012) propuseram o modelo de radiação, no qual o fluxo entre origem e destino depende da distribuição de oportunidades existentes entre esses pontos, sem exigir parâmetros ajustáveis. Essa característica favoreceu sua aplicação em diferentes escalas e em contextos com limitação de dados, tornando-o uma referência importante na literatura de mobilidade (BARBOSA *et al.*, 2018; DU *et al.*, 2025). Em termos mais gerais, a revisão de (BARBOSA *et al.*, 2018) destaca que os modelos de mobilidade humana podem ser agrupados em três grandes categorias: modelos baseados em princípios físicos, modelos estatísticos sem parâmetros ajustáveis e modelos empíricos baseados em dados observacionais.

Com a ampliação da disponibilidade de dados digitais, abordagens empíricas passaram a ocupar posição central nesse campo. Registros de telefonia móvel, bilhetagem

eletrônica, GPS e redes sociais permitiram observar padrões regulares dos deslocamentos em escalas antes pouco acessíveis. Estudos como os de (GONZÁLEZ *et al.*, 2008) mostraram que os indivíduos tendem a frequentar um conjunto limitado de lugares, enquanto (SONG *et al.*, 2010) evidenciaram elevados níveis de previsibilidade nas trajetórias humanas. Mais recentemente, técnicas de aprendizado de representação em grafos têm sido utilizadas para capturar padrões sazonais e reorganizações espaciais da mobilidade ao longo do tempo, ampliando o repertório metodológico disponível para a área (FU *et al.*, 2023; DU *et al.*, 2025).

Nesse sentido, a evolução dos modelos de mobilidade humana revela um deslocamento progressivo de formulações mais agregadas e analíticas para abordagens orientadas por dados e sensíveis à heterogeneidade espacial e temporal dos deslocamentos. Essa transição é particularmente importante para estudos de mobilidade urbana contemporânea, nos quais diferentes fontes de dados permitem confrontar modelos teóricos com padrões empíricos observados em sistemas reais (BARBOSA *et al.*, 2018; DU *et al.*, 2025).

2.2 MOBILIDADE URBANA E HUMANA

A mobilidade humana constitui um fenômeno central para a compreensão das dinâmicas urbanas contemporâneas, sendo influenciada por fatores históricos, sociais, econômicos e territoriais. Segundo (BARBOSA *et al.*, 2018), os deslocamentos acompanham a trajetória da humanidade desde seus períodos mais remotos, inicialmente associados a restrições naturais e, mais recentemente, a condicionantes socioeconômicos, desigualdades e processos de urbanização. Nessa perspectiva, a mobilidade não se reduz ao deslocamento físico, mas expressa também as formas pelas quais o espaço urbano é produzido, acessado e apropriado. Compreender os padrões de mobilidade é, portanto, fundamental para o planejamento urbano, para a gestão de sistemas de transporte e para a formulação de políticas voltadas à acessibilidade e à sustentabilidade (BARBOSA *et al.*, 2018; NOULAS *et al.*, 2012). Em grandes metrópoles, a mobilidade também evidencia desigualdades no acesso a oportunidades e serviços, o que reforça sua dimensão social e distributiva (LEITE, 2010; PEREZ *et al.*, 2024; GAO *et al.*, 2024; PARK *et al.*, 2024; WANG; YUAN, 2025).

O avanço das tecnologias digitais ampliou significativamente a capacidade de observar esses deslocamentos em diferentes escalas. Registros provenientes de telefonia móvel, GPS, bilhetagem eletrônica e plataformas digitais passaram a fornecer informações deta-

lhadas sobre trajetórias, frequências de visitação e padrões de permanência (BARBOSA *et al.*, 2018; NOULAS *et al.*, 2012). Nesse contexto, a literatura também passou a empregar métricas individuais para caracterizar o comportamento dos usuários. Entre essas medidas, destacam-se os deslocamentos entre registros sucessivos, frequentemente chamados de *jump lengths*, o raio de giro, a frequência de visitação a locais mais recorrentes e as matrizes origem–destino (BARBOSA *et al.*, 2018). Essas métricas são úteis porque permitem descrever a escala espacial dos deslocamentos e a regularidade dos padrões de mobilidade, conectando propriedades individuais a estruturas coletivas observadas nas cidades.

Outra dimensão conceitual importante diz respeito à relação entre distância, tempo de viagem e velocidade efetiva. Conforme discutido por (BARBOSA *et al.*, 2018), a mobilidade ocorre em múltiplas escalas espaciais, desde deslocamentos intraurbanos curtos até viagens interurbanas e de longa distância, e essa diversidade implica diferentes combinações entre modo de transporte, tempo despendido e velocidade observada. Em geral, viagens curtas tendem a estar associadas a modos mais lentos e com mais interrupções, enquanto deslocamentos mais longos recorrem a modos mais rápidos, o que torna a relação entre distância e tempo não linear (BARBOSA *et al.*, 2018). Dessa forma, o estudo da mobilidade humana exige não apenas a descrição dos fluxos, mas também a compreensão das restrições físicas e operacionais que condicionam a realização dos deslocamentos no espaço urbano.

Esses elementos conceituais ajudam a compreender por que a mobilidade urbana ocupa posição central nas dinâmicas territoriais contemporâneas. Ao mesmo tempo em que os deslocamentos revelam regularidades empíricas, eles também refletem desigualdades socioespaciais, especializações funcionais das cidades e diferenças de acesso entre grupos populacionais (SONG *et al.*, 2010; GAO *et al.*, 2024; PARK *et al.*, 2024; WANG; YUAN, 2025). Assim, a mobilidade deve ser entendida como um fenômeno ao mesmo tempo quantitativo, social e espacial, cuja análise demanda a integração entre diferentes fontes de dados, medidas empíricas e perspectivas analíticas (BARBOSA *et al.*, 2018; DU *et al.*, 2025).

2.3 REDES COMPLEXAS E MOBILIDADE

A incorporação da perspectiva de redes ao estudo da mobilidade urbana consolidou-se a partir da necessidade de representar os deslocamentos como estruturas de interação

entre localidades, estações, zonas ou pontos de interesse. Nessa abordagem, os vértices representam unidades espaciais, enquanto as arestas correspondem aos fluxos de deslocamento entre esses pontos (DING *et al.*, 2019; XIA *et al.*, 2020; BARBOSA *et al.*, 2018; LOBSANG *et al.*, 2021). Essa forma de representação permite compreender a mobilidade não apenas em termos de volume de viagens, mas também em termos da organização estrutural das conexões, da existência de corredores dominantes e da presença de regiões funcionalmente mais integradas.

No caso dos sistemas de transporte, essa tradição dialoga com estudos clássicos que analisaram redes reais de metrô e discutiram propriedades como eficiência e conectividade do tipo pequeno mundo (LATORA; MARCHIORI, 2002; ANGELOUDIS; FISK, 2006). Em seguida, essa linha foi aprofundada por pesquisas que passaram a enfatizar vulnerabilidade, robustez e identificação de nós críticos, mostrando como estações de transferência e conexões estratégicas desempenham papel central no funcionamento da rede (DERRIBLE; KENNEDY, 2010a; DERRIBLE; KENNEDY, 2010b; DERRIBLE, 2012). Há também contribuições que discutem mudanças de regime em sistemas ferroviários (DOMÈNECH; SAURÍ, 2009), bem como trabalhos voltados à modelagem multicamadas para representar explicitamente a multimodalidade dos sistemas urbanos (ALETA *et al.*, 2016).

Com o aumento da disponibilidade de dados empíricos, a análise de redes passou a ser aplicada de forma mais direta à mobilidade observada, incorporando fluxos de passageiros e variações temporais da demanda. Estudos como os de (XIA *et al.*, 2020) investigam a importância estrutural de estações em redes metroviárias, enquanto trabalhos como (LOBSANG *et al.*, 2021) analisam grafos ponderados de deslocamento para identificar comunidades, padrões de conectividade e possíveis gargalos operacionais. Mais recentemente, representações dinâmicas em rede têm sido utilizadas para descrever reorganizações espaciais dos fluxos e mudanças na conectividade em períodos de perturbação, como aqueles associados à pandemia de COVID-19 (KIM; JUN, 2022; XIN *et al.*, 2022; ROWE *et al.*, 2023; PAN *et al.*, 2024; LI *et al.*, 2024). Essas abordagens mostram que choques externos alteram não apenas a intensidade dos deslocamentos, mas também a centralidade relativa dos nós, a coesão entre subestruturas da rede e os padrões de vulnerabilidade do sistema.

Além da dimensão operacional, estudos recentes também têm destacado o potencial

da análise em redes para discutir desigualdades territoriais e questões de planejamento. Trabalhos como os de (PEREZ *et al.*, 2024) mostram que a integração entre dados de deslocamento e indicadores socioeconômicos permite identificar assimetrias de acesso e orientar políticas públicas mais inclusivas. Em paralelo, resultados analíticos sobre desenho, conectividade e coordenação em redes de transporte oferecem referências úteis para a interpretação de sistemas observados (DAGANZO, 2010). Assim, a literatura demonstra que as redes complexas constituem um arcabouço consolidado e versátil para investigar a mobilidade urbana em diferentes escalas, articulando teoria, dados empíricos e aplicações práticas (DU *et al.*, 2025).

2.3.1 Métricas de redes complexas

A modelagem da mobilidade urbana por meio de redes complexas permite aplicar métricas topológicas capazes de quantificar propriedades centrais da estrutura dos fluxos. Entre as medidas mais utilizadas estão aquelas associadas à conectividade, à coesão local, à integração global e à organização modular da rede (NEWMAN, 2003; BOCCALETTI *et al.*, 2006; DING *et al.*, 2019; XIA *et al.*, 2020). Em estudos de mobilidade, essas métricas são particularmente úteis porque permitem descrever padrões que não aparecem em indicadores agregados de demanda, como a existência de hubs, a presença de subestruturas locais e a fragmentação do sistema (BARBOSA *et al.*, 2018; LOBSANG *et al.*, 2021).

Neste trabalho, a rede de mobilidade é modelada como um grafo em que cada vértice representa uma estação do sistema metroferroviário e cada aresta corresponde a um trecho de deslocamento inferido entre duas estações. Essa representação é amplamente utilizada em estudos de redes complexas para analisar sistemas de transporte e padrões de mobilidade urbana (NEWMAN, 2003; BOCCALETTI *et al.*, 2006). A seguir, são apresentadas as principais métricas utilizadas na análise dos resultados: grau médio, coeficiente de agrupamento, distância média e densidade da rede.

Grau médio.

O grau de um vértice corresponde ao número de arestas que ele mantém com outros vértices da rede. Em termos formais, o grau k_i de um vértice i é definido pelo número de arestas incidentes em i , conforme discutido em estudos clássicos sobre redes complexas (NEWMAN, 2003; BOCCALETTI *et al.*, 2006). O *grau médio* $\bar{k}$ é definido como a média do grau de todos os vértices do grafo,

$$\bar{k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i,$$

em que N representa o número total de vértices da rede considerada. Em redes de mobilidade urbana, o grau médio sintetiza o nível geral de conectividade estrutural entre as estações do sistema, permitindo avaliar o quanto os diferentes pontos da rede estão interligados (BOCCALETTI *et al.*, 2006; NEWMAN, 2003).

Essa métrica é importante em redes de mobilidade porque indica o nível de integração estrutural de uma estação em relação ao restante do sistema, refletindo a quantidade de conexões disponíveis para os deslocamentos dos usuários. O grau médio é amplamente utilizado em análises estruturais de redes urbanas e sistemas de transporte, aparecendo em estudos como (DING *et al.*, 2019; LOBSANG *et al.*, 2021; BARBOSA *et al.*, 2018).

Coefficiente de agrupamento.

O coeficiente de agrupamento (*clustering coefficient*) mede o nível de coesão local em torno de um vértice, isto é, o quanto os vizinhos de um vértice tendem a estar conectados entre si (WATTS; STROGATZ, 1998; NEWMAN, 2003). Para um vértice i , o coeficiente de agrupamento C_i é definido por

$$C_i = \frac{2e_i}{k_i(k_i - 1)},$$

em que k_i representa o grau do vértice i e e_i corresponde ao número de arestas existentes entre os vizinhos desse vértice. O coeficiente de agrupamento médio C é obtido pela média dos valores de C_i para todos os vértices da rede. Em redes de mobilidade, valores elevados de C indicam a presença de regiões localmente densas na rede, importantes para compreender a organização espacial dos deslocamentos (BOCCALETTI *et al.*, 2006).

Essa métrica é relevante em redes de mobilidade porque evidencia a formação de subestruturas locais da rede, nas quais grupos de estações compartilham padrões semelhantes de deslocamento. Valores elevados de C sugerem que essas regiões funcionam como estruturas localmente coesas dentro do sistema, contribuindo para identificar centralidades locais e áreas de forte interconectividade. O coeficiente de agrupamento é amplamente utilizado em estudos aplicados à mobilidade urbana, aparecendo em análises como (XIA *et al.*, 2020; LOBSANG *et al.*, 2021; BARBOSA *et al.*, 2018).

Distância média.

A distância média (*average shortest path length*) corresponde ao comprimento médio dos caminhos mínimos entre todos os pares de vértices alcançáveis na rede. Seja d_{ij} a menor distância entre os vértices i e j ; a distância média ℓ é dada por

$$\ell = \frac{1}{M} \sum_{i \neq j} d_{ij},$$

em que M representa o número de pares de vértices conectados na rede. Em redes de mobilidade, valores reduzidos de ℓ indicam maior integração estrutural e maior eficiência potencial nos deslocamentos entre diferentes partes do sistema (DING *et al.*, 2019; NEWMAN, 2003; BOCCALETTI *et al.*, 2006).

Essa métrica é importante para avaliar a eficiência estrutural da rede de mobilidade, pois indica o número médio de etapas ou conexões necessárias para deslocar-se entre duas estações. Valores menores de ℓ sugerem trajetos mais curtos e maior integração global do sistema, enquanto valores elevados podem indicar fragmentação ou redução da conectividade. A distância média é amplamente utilizada em estudos de redes urbanas e sistemas de transporte, aparecendo em análises como (XIA *et al.*, 2020; LOBSANG *et al.*, 2021) e em discussões estruturais sobre mobilidade urbana (BARBOSA *et al.*, 2018).

Densidade da rede.

A densidade da rede quantifica a proporção de arestas efetivamente observadas em relação ao total de conexões possíveis. Em um grafo simples e não direcionado com N vértices e E arestas, a densidade ρ é expressa por (NEWMAN, 2003; BOCCALETTI *et al.*, 2006)

$$\rho = \frac{2E}{N(N-1)}.$$

Valores elevados de ρ indicam redes mais densamente conectadas, enquanto valores baixos refletem estruturas mais esparsas (DING *et al.*, 2019; BOCCALETTI *et al.*, 2006). Essa métrica é amplamente utilizada para caracterizar a estrutura global de redes complexas.

Essa métrica é útil em análises de mobilidade porque indica o nível de conectividade estrutural do sistema, revelando o quanto as estações estão efetivamente conectadas em relação ao total de conexões possíveis. Redes com alta densidade tendem a oferecer maior variedade de trajetos e redundância estrutural, enquanto valores baixos podem indicar

fragilidade, dependência de poucos caminhos e maior vulnerabilidade a interrupções (XIA *et al.*, 2020; LOBSANG *et al.*, 2021; BARBOSA *et al.*, 2018).

Detecção de comunidades e modularidade.

A estrutura modular de uma rede descreve como seus vértices se organizam em grupos mais densamente conectados entre si do que com o restante da rede. Esses agrupamentos, chamados de *comunidades*, revelam padrões internos de organização e permitem identificar regiões funcionalmente relacionadas dentro da estrutura global do sistema (FORTUNATO, 2010; ROWE *et al.*, 2023).

A medida mais utilizada para quantificar a qualidade da divisão da rede em comunidades é a *modularidade* Q , proposta por (NEWMAN, 2006). Em sua forma clássica para redes não ponderadas, a modularidade é definida por:

$$Q = \frac{1}{2E} \sum_{i,j} \left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2E} \right) \delta(c_i, c_j),$$

em que A_{ij} representa os elementos da matriz de adjacência da rede, k_i e k_j correspondem aos graus dos vértices i e j , E é o número total de arestas e $\delta(c_i, c_j)$ é a função delta de Kronecker, que assume valor 1 quando os vértices pertencem à mesma comunidade e 0 caso contrário.

Como as redes analisadas neste trabalho são ponderadas, com pesos representando a intensidade dos fluxos entre estações, utiliza-se a generalização da modularidade para redes ponderadas:

$$Q = \frac{1}{2W} \sum_{i,j} \left(w_{ij} - \frac{s_i s_j}{2W} \right) \delta(c_i, c_j),$$

em que w_{ij} representa o peso da aresta entre os vértices i e j , s_i e s_j correspondem às forças dos vértices (isto é, a soma dos pesos das arestas incidentes a cada vértice) e W representa o peso total da rede.

Valores elevados de Q indicam a presença de comunidades bem definidas, enquanto valores próximos de zero sugerem ausência de estrutura modular significativa.

No campo aplicado, essas métricas vêm sendo usadas para analisar a importância relativa de estações, a formação de comunidades, a evolução temporal da conectividade e a vulnerabilidade de sistemas de transporte (XIA *et al.*, 2020; KIM; JUN, 2022; PAN *et al.*, 2024; LI *et al.*, 2024). Em particular, redes dinâmicas construídas a partir de dados

de mobilidade em alta resolução temporal permitem acompanhar oscilações sazonais, mudanças estruturais e efeitos de choques externos, fornecendo uma base analítica robusta para estudos longitudinais (ROWE *et al.*, 2023; FU *et al.*, 2023; DU *et al.*, 2025). Nesse sentido, o uso de métricas de redes complexas não apenas complementa medidas tradicionais de mobilidade, mas também amplia a capacidade de interpretar a organização estrutural dos deslocamentos urbanos ao longo do tempo.

A revisão da literatura foi realizada por meio de consultas em bases bibliográficas amplamente utilizadas na área, incluindo Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar. Foram priorizados trabalhos relacionados à mobilidade urbana, bilhetagem eletrônica, inferência de fluxos origem–destino e redes complexas aplicadas ao transporte. A busca contemplou principalmente publicações entre 1998 e 2025, com ênfase em estudos recentes que abordam dados operacionais de mobilidade e análise de redes.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para analisar a mobilidade ferroviária na Região Metropolitana de São Paulo a partir de dados de bilhetagem eletrônica. Inicialmente, descrevem-se a área de estudo e a base de dados utilizada. Em seguida, detalham-se as etapas de pré-processamento e de reconstrução aproximada dos fluxos origem–destino por meio do *Transaction Sequence Number*. Na sequência, apresenta-se o processo de construção das redes diárias de mobilidade, a segmentação temporal adotada, as métricas de rede utilizadas na análise e os procedimentos complementares empregados para investigar a dinâmica de rankings e a comparação contextual com a Pesquisa Origem–Destino. Em conjunto, essas etapas formam o percurso analítico que permite transformar registros operacionais de validação em representações estruturais da mobilidade observada.

3.1 CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA

Do ponto de vista de sua natureza, este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, pois busca desenvolver e empregar um procedimento metodológico para reconstruir e analisar fluxos de mobilidade a partir de registros operacionais de bilhetagem eletrônica, com potencial de uso em estudos de monitoramento e planejamento do transporte público. Quanto à abordagem, trata-se de uma pesquisa quantitativa, baseada no tratamento de grandes volumes de dados, na construção de indicadores numéricos e na análise estrutural de redes de mobilidade.

Em relação aos objetivos, o estudo possui caráter descritivo e exploratório. Descritivo porque procura caracterizar a estrutura e a evolução da mobilidade ferroviária por meio de métricas e representações formais da rede. Exploratório porque investiga as possibilidades analíticas associadas ao uso do TSN para inferência de fluxos origem–destino em um contexto no qual os dados disponíveis registram apenas o embarque dos passageiros.

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa apoia-se em análise documental e computacional de dados secundários, uma vez que utiliza registros anonimizados de validações do sistema de bilhetagem eletrônica fornecidos pela Autopass e SPTrans. Além disso, o estudo pode ser entendido como um estudo de caso aplicado à Região Metropolitana de São Paulo, pois examina em profundidade a mobilidade ferroviária em um

contexto territorial e operacional específico. Do ponto de vista analítico, o trabalho também envolve modelagem em redes complexas, na medida em que transforma os fluxos inferidos em grafos ponderados diários para investigar conectividade, centralidade, eficiência, modularidade e outras propriedades estruturais do sistema.

3.2 ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS

A Região Metropolitana de São Paulo constitui a maior área metropolitana do Brasil, reunindo 39 municípios e aproximadamente 20,7 milhões de habitantes. Nesse contexto, o transporte público sobre trilhos exerce papel central na organização da mobilidade urbana, ao conectar áreas centrais a importantes polos de emprego e serviços, além de atender regiões periféricas marcadas por longos deslocamentos pendulares. O sistema metroferroviário opera em ambiente tarifário integrado e é administrado por diferentes empresas: o Metrô opera as Linhas 1-Azul, 2-Verde, 3-Vermelha e 15-Prata (63 estações e cerca de 71,4 km), a ViaQuatro opera a Linha 4-Amarela (11 estações e 12,8 km) e a ViaMobilidade opera a Linha 5-Lilás (17 estações e cerca de 20,1 km). A CPTM opera as Linhas 7-Rubi, 10-Turquesa, 11-Coral, 12-Safira e 13-Jade (aproximadamente 196 km e 57 estações), enquanto a ViaMobilidade opera também as Linhas 8-Diamante (41,6 km e 22 estações) e 9-Esmeralda (37,3 km e 21 estações) (IBGE, 2022b; Companhia do Metropolitano de São Paulo, 2026; Agência de Transporte do Estado de São Paulo, 2026c; Agência de Transporte do Estado de São Paulo, 2026a; Companhia Paulista de Trens Metropolitanos, 2024; Agência de Transporte do Estado de São Paulo, 2026b).

A base de dados utilizada foi fornecida pela Autopass, responsável pela gestão do Sistema de Bilhetagem Eletrônica, e é composta por registros anonimizados de validações associadas ao sistema TOP e ao Bilhete Único, sob gestão da SPTrans. O período analisado compreende janeiro de 2019 a dezembro de 2020. Nesse intervalo, o sistema registrou 4,79 bilhões de validações em todos os modos de transporte na Região Metropolitana de São Paulo, das quais aproximadamente 1,40 bilhão correspondem ao sistema metroferroviário, subconjunto integralmente analisado neste estudo. Cada registro contém informações de data e hora, identificador da estação ou validador, modo ou linha, identificador anonimizado do cartão e o TSN. Como os dados registram apenas entradas, sem informação explícita de desembarque, tornou-se necessário adotar um procedimento de reconstrução aproximada dos fluxos origem-destino.

3.3 PRÉ-PROCESSAMENTO E RECONSTRUÇÃO OD VIA TSN

Inicialmente, foram selecionadas apenas as validações associadas às operadoras do sistema metroferroviário da Região Metropolitana de São Paulo. Nessa etapa, foram removidos registros referentes a testes operacionais, cartões corporativos, duplicidades e inconsistências cadastrais ou temporais que comprometessem a ordenação dos eventos. Em seguida, as validações remanescentes foram agrupadas por cartão anonimizado e por dia de operação.

Dentro de cada grupo diário, os registros foram ordenados cronologicamente com base no horário da validação, utilizando o *Transaction Sequence Number* como referência complementar de sequenciamento. O uso do TSN é particularmente relevante nesse contexto porque permite preservar a ordem sucessiva dos eventos registrados para um mesmo cartão ao longo do dia, reduzindo ambiguidades em situações nas quais o horário isoladamente não seja suficiente para discriminar a sequência operacional das validações. Assim, para cada cartão e para cada dia t , obtém-se uma sequência ordenada de eventos da forma

$$\text{TSN}_{t,1} < \text{TSN}_{t,2} < \text{TSN}_{t,3} < \dots$$

A reconstrução dos pares origem–destino foi realizada a partir de validações consecutivas observadas nessa sequência. Se um mesmo cartão registra uma validação na estação x e, posteriormente, outra validação na estação y , considera-se um deslocamento aproximado (x, y) . Esse procedimento não busca reconstruir o trajeto físico detalhado do passageiro entre as duas estações, mas sim inferir uma ligação operacional entre validações sucessivas observadas no sistema.

Foram adotadas três restrições principais no processo de reconstrução. A primeira consiste em limitar os pareamentos ao mesmo dia de operação, de modo que pares OD não ultrapassem a meia-noite. A segunda corresponde à remoção de laços próprios, isto é, casos em que $x = y$. A terceira consiste em não inferir etapas intermediárias não observadas, de modo que o par reconstruído representa apenas a sucessão entre duas validações consecutivas registradas no sistema. Ao final desse procedimento, foram obtidos 388,2 milhões de pares OD válidos em 2019 e 212,5 milhões em 2020.

Limitações e consistência da reconstrução

A reconstrução adotada não captura atividades intermediárias, integrações internas não observadas, deslocamentos realizados fora do sistema sobre trilhos nem a etapa final do deslocamento após a saída da estação. Além disso, como os registros utilizados correspondem apenas às validações do sistema metroferroviário, um par sucessivo pode refletir um deslocamento mais amplo que inclua trechos não observados entre duas entradas consecutivas. Dessa forma, os pares inferidos devem ser interpretados como aproximações operacionais dos fluxos de mobilidade entre estações.

A consistência do procedimento é avaliada de forma indireta por meio da coerência temporal e espacial dos fluxos reconstruídos, da compatibilidade entre os padrões observados e a estrutura conhecida da rede metroferroviária e da comparação contextual dos resultados com evidências externas, particularmente com a Pesquisa Origem–Destino 2023. Assim, embora a inferência não produza uma matriz OD observada diretamente, ela permite obter uma representação plausível e analiticamente útil da mobilidade ferroviária registrada no período estudado.

3.4 CONSTRUÇÃO DA REDE

A rede de mobilidade foi construída a partir dos pares origem–destino inferidos na etapa de pré-processamento. Cada dia do período analisado, entre 2019 e 2020, deu origem a uma rede independente, permitindo observar a evolução estrutural do sistema ao longo do tempo.

Para cada dia t , define-se inicialmente uma matriz de fluxos direcionados

$$\tilde{F}^{(t)} = [\tilde{f}_{ij}^{(t)}],$$

em que $\tilde{f}_{ij}^{(t)} \geq 0$ representa o número de deslocamentos inferidos da estação i para a estação j no dia t . Por construção, laços próprios são removidos, isto é,

$$\tilde{f}_{ii}^{(t)} = 0.$$

Como o sistema registra apenas eventos de embarque e a inferência não permite

recuperar de forma inequívoca o sentido completo do deslocamento ao longo da rede, adotou-se, para fins analíticos, uma representação não direcionada dos fluxos. Para isso, os fluxos direcionados entre pares de estações foram agregados em uma matriz simétrica

$$F^{(t)} = [f_{ij}^{(t)}],$$

tal que

$$f_{ij}^{(t)} = \tilde{f}_{ij}^{(t)} + \tilde{f}_{ji}^{(t)}.$$

A partir dessa matriz, constrói-se um grafo simples ponderado

$$G_t = (V, E_t, w^{(t)}),$$

em que V representa o conjunto de estações, E_t o conjunto de conexões observadas no dia t e $w_{ij}^{(t)} = f_{ij}^{(t)}$ corresponde ao peso associado à ligação entre as estações i e j .

3.4.1 Definição dos nós

Os nós da rede representam as estações do sistema metroferroviário da Região Metropolitana de São Paulo. Embora os registros de bilhetagem incluam validações em equipamentos específicos, a estação foi adotada como unidade espacial de referência por corresponder ao ponto físico de acesso do usuário ao sistema, por oferecer granularidade adequada para a análise diária e por facilitar a interpretação topológica das métricas estruturais. No total, foram consideradas 142 estações com registros de validação no período analisado.

3.4.2 Definição das arestas

Uma aresta $\{i, j\} \in E_t$ é criada quando existe ao menos um fluxo inferido entre as estações i e j no dia t , isto é, quando $f_{ij}^{(t)} > 0$. A intensidade dessa conexão é dada por

$$w_{ij}^{(t)} = f_{ij}^{(t)},$$

que representa o número total de pares OD inferidos entre as duas estações no dia considerado.

3.4.3 Ponderação e representação da rede

A análise principal utiliza a versão ponderada da rede, na qual o peso das arestas expressa a intensidade dos fluxos inferidos entre estações. Para métricas estritamente topológicas, como grau e densidade, utiliza-se também a versão não ponderada, considerando apenas a presença ou ausência de conexão. Essa estratégia permite examinar, de forma complementar, tanto a estrutura de conectividade da rede quanto a intensidade efetiva da mobilidade observada.

3.4.4 Construção diária da rede

Para cada dia t , é gerada uma rede independente G_t , composta pelo conjunto de estações ativas no dia, pelo conjunto de arestas observadas e pelos respectivos pesos associados às conexões. A construção diária preserva a alta resolução temporal dos dados de bilhetagem eletrônica e permite analisar variações sazonais, mudanças operacionais e transformações estruturais associadas ao período pandêmico.

3.5 SEGMENTAÇÃO TEMPORAL

A análise foi organizada em resolução diária ao longo de todo o período compreendido entre janeiro de 2019 e dezembro de 2020. O ano de 2019 foi adotado como linha de base pré-pandemia, enquanto 2020 foi considerado o período afetado pela COVID-19. Essa segmentação permite comparar a estrutura da rede antes e durante o choque provocado pela pandemia, preservando a dinâmica temporal fina dos dados.

Além da comparação anual, foi realizada uma análise específica entre março de 2019 e março de 2020. A escolha desse recorte se justifica por corresponder ao período inicial de ruptura mais evidente na mobilidade urbana associada à pandemia, permitindo observar tanto mudanças nas métricas globais da rede quanto variações relativas na intensidade dos fluxos entre pares de estações.

3.6 MÉTRICAS DE REDE

As métricas calculadas para as redes construídas correspondem àquelas apresentadas na Seção 2.3.1. Em cada rede diária, foram analisados indicadores de conectividade, inten-

sidade, integração, coesão local e organização modular, de modo a caracterizar diferentes dimensões da estrutura da mobilidade ferroviária.

Em particular, foram consideradas métricas associadas ao volume total da rede, densidade, força média, distância média, eficiência, coeficiente de agrupamento, número de comunidades e assortatividade. O uso conjunto desses indicadores permite descrever a evolução estrutural da rede ao longo do tempo e identificar mudanças relacionadas à conectividade, fragmentação e reorganização espacial dos fluxos.

3.7 DINÂMICA DE RANKINGS E COMPARAÇÃO COM A OD

Como procedimento complementar de análise, foram construídos rankings mensais Top- k de estações e pares OD. Esses rankings foram baseados na força das estações, nos volumes de fluxo entre pares de estações e na participação dos nós em caminhos mínimos da rede. Em cada caso, o parâmetro k corresponde ao número de posições exibidas em cada visualização, preservando o foco nos elementos mais proeminentes da estrutura observada em cada período.

Para representar a evolução temporal dessas posições relativas, utilizaram-se *bump charts* e mapas de variação relativa entre períodos. Esses recursos permitem observar mudanças na hierarquia das estações e dos pares OD, bem como identificar persistências e reconfigurações estruturais ao longo do tempo. Os resultados foram interpretados à luz da Pesquisa Origem–Destino 2023, utilizada como evidência contextual complementar para a leitura dos padrões identificados nas redes derivadas da bilhetagem eletrônica.

4 RESULTADOS

Esta seção apresenta os padrões empíricos extraídos das redes diárias de mobilidade ferroviária reconstruídas a partir de dados de bilhetagem eletrônica ao longo de 2019–2020. Inicialmente, descreve-se a evolução da demanda em nível sistêmico e da escala espacial das viagens, utilizando séries temporais de contagem de viagens, distância média percorrida, distribuições de distância e entropia em nível de estação. Em seguida, analisa-se como a proeminência relativa das estações e dos pares OD se altera ao longo do tempo por meio da dinâmica mensal de rankings (*bump charts*), e identifica-se a ruptura inicial da COVID-19 comparando fluxos em nível de arestas entre março de 2019 e março de 2020. Posteriormente, são ilustradas redes diárias representativas para apoiar a interpretação dos indicadores quantitativos. Por fim, são apresentadas as trajetórias temporais das métricas de rede, desde o peso total e a densidade até as medidas baseadas em distância efetiva, coeficiente de agrupamento, fragmentação em comunidades e assortatividade, concluindo com a correspondente estrutura de comunidades e seus padrões espaciais.

4.1 EVOLUÇÃO GERAL DA DEMANDA METROFERROVIÁRIA (2019-2020)

A Fig. 4.1 sintetiza o contexto geográfico da análise, indicando os limites municipais, os limites distritais do município de São Paulo e a infraestrutura metroferroviária considerada no estudo. O limite administrativo do município de São Paulo é destacado no mapa com um contorno azul mais espesso, facilitando a distinção visual entre o município propriamente dito e os municípios circundantes da região metropolitana. Para maior clareza, apenas os municípios vizinhos da Região Metropolitana de São Paulo que possuem ao menos uma estação de Metrô ou da CPTM são apresentados na figura, uma vez que são essas as localidades efetivamente cobertas pela rede ferroviária analisada. As estações identificadas no mapa destacam um subconjunto de nós que aparecem de forma recorrente entre os mais proeminentes nas análises baseadas em rankings apresentadas a seguir.

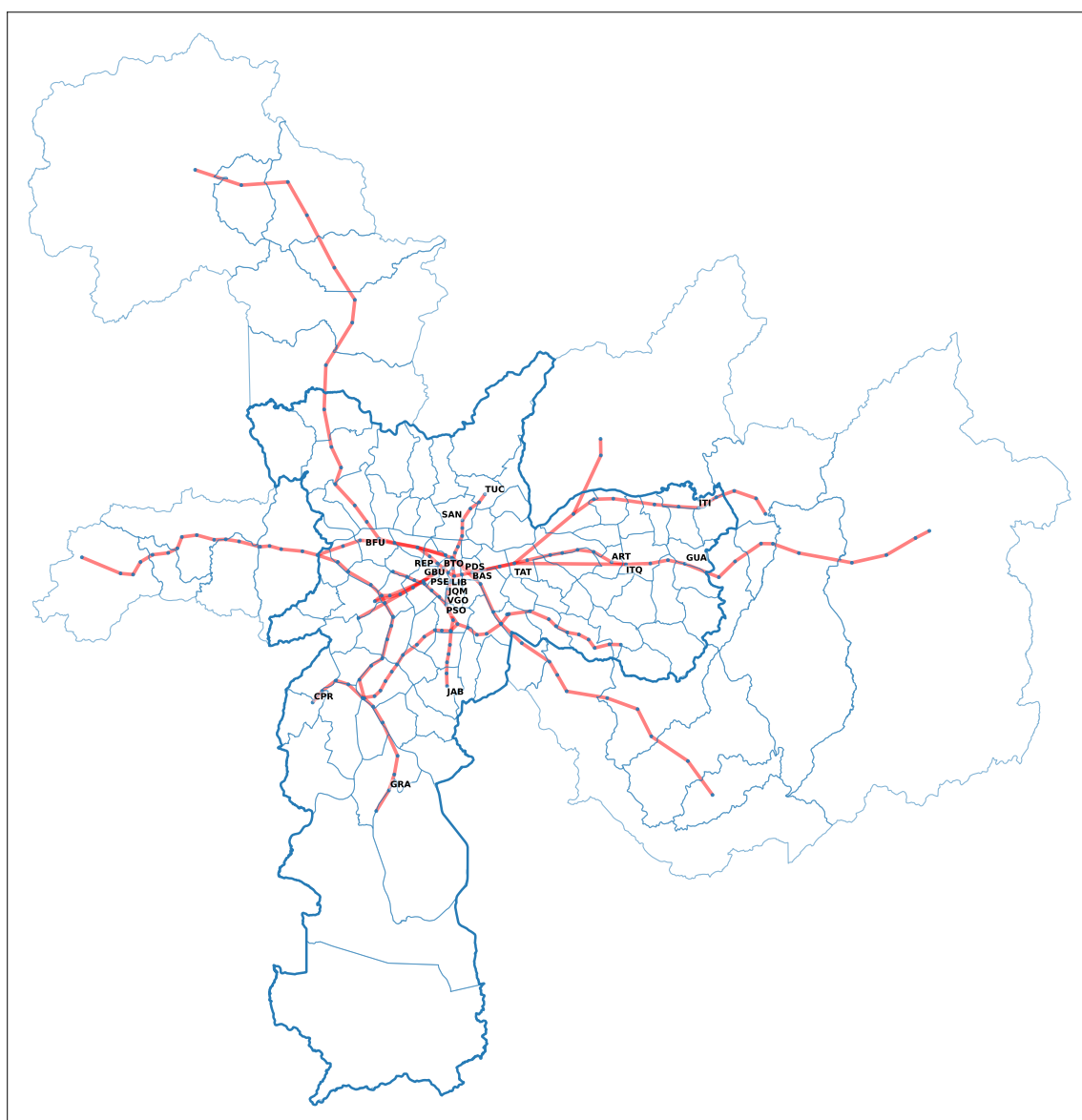


Figura 4.1 – Mapa da rede ferroviária da Região Metropolitana de São Paulo, mostrando os limites municipais, os limites distritais do município de São Paulo, os trechos da rede de Metrô/CPTM e um conjunto selecionado de estações identificadas (escolhidas entre aquelas mais proeminentes nos bump charts).

A evolução temporal geral da mobilidade ferroviária é apresentada na Fig. 4.2, que combina o número total de viagens reconstruídas (eixo direito) e a distância média percorrida por viagem (eixo esquerdo). Ao longo de 2019, a série temporal apresenta um regime comparativamente estável, com oscilações recorrentes consistentes com efeitos de calendário (por exemplo, períodos de feriado). Em 2020, a série exhibe uma contração acentuada da demanda, seguida por uma recuperação lenta e incompleta que persiste ao longo do restante do ano. Paralelamente à redução no número de viagens, a distância média por viagem também se altera ao longo do tempo, indicando que o choque de demanda afeta

não apenas o volume da mobilidade, mas também sua escala espacial.

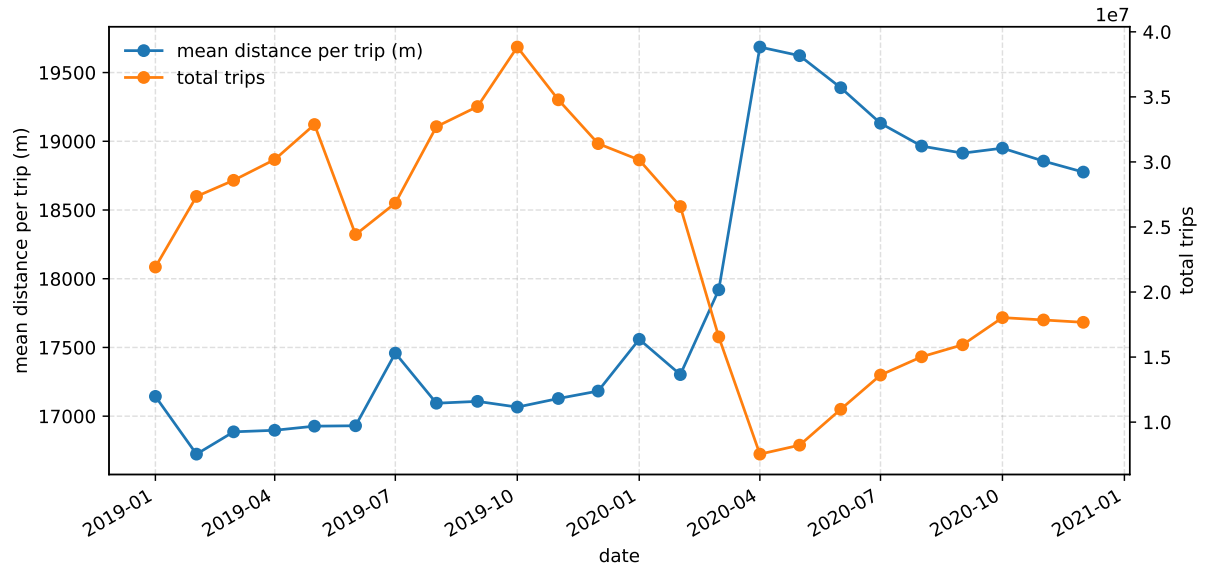


Figura 4.2 – Distância média percorrida por viagem (eixo esquerdo) e número total de viagens (eixo direito) ao longo do período de estudo.

Para investigar como a escala espacial da mobilidade se altera, a Fig. 4.3 apresenta a densidade de probabilidade empírica das distâncias de viagem inferidas para 2019 e 2020 (com eixo de distância em escala logarítmica), juntamente com a razão $\text{PDF}_{2020}/\text{PDF}_{2019}$. Embora a distribuição de 2020 seja, em geral, inferior à de 2019, indicando uma contração global do uso do transporte sobre trilhos, o gráfico da razão revela que a redução não é uniforme ao longo das distâncias: a queda relativa mais intensa ocorre em viagens de curta a média distância (aproximadamente 10^2 – 10^4 m), nas quais a razão permanece sistematicamente abaixo de um, enquanto a razão aumenta com a distância e ultrapassa um em faixas mais longas (da ordem de 2×10^4 – 3×10^4 m e superiores). Assim, condicionalmente à observação de uma viagem nos dados de bilhetagem, deslocamentos de maior distância passam a representar uma parcela relativamente maior da mobilidade ferroviária em 2020, consistente com a interpretação de que viagens mais curtas (frequentemente discricionárias) foram desproporcionalmente suprimidas ou transferidas para modos alternativos, ao passo que deslocamentos mais longos (muitas vezes essenciais) permaneceram relativamente mais prevalentes.

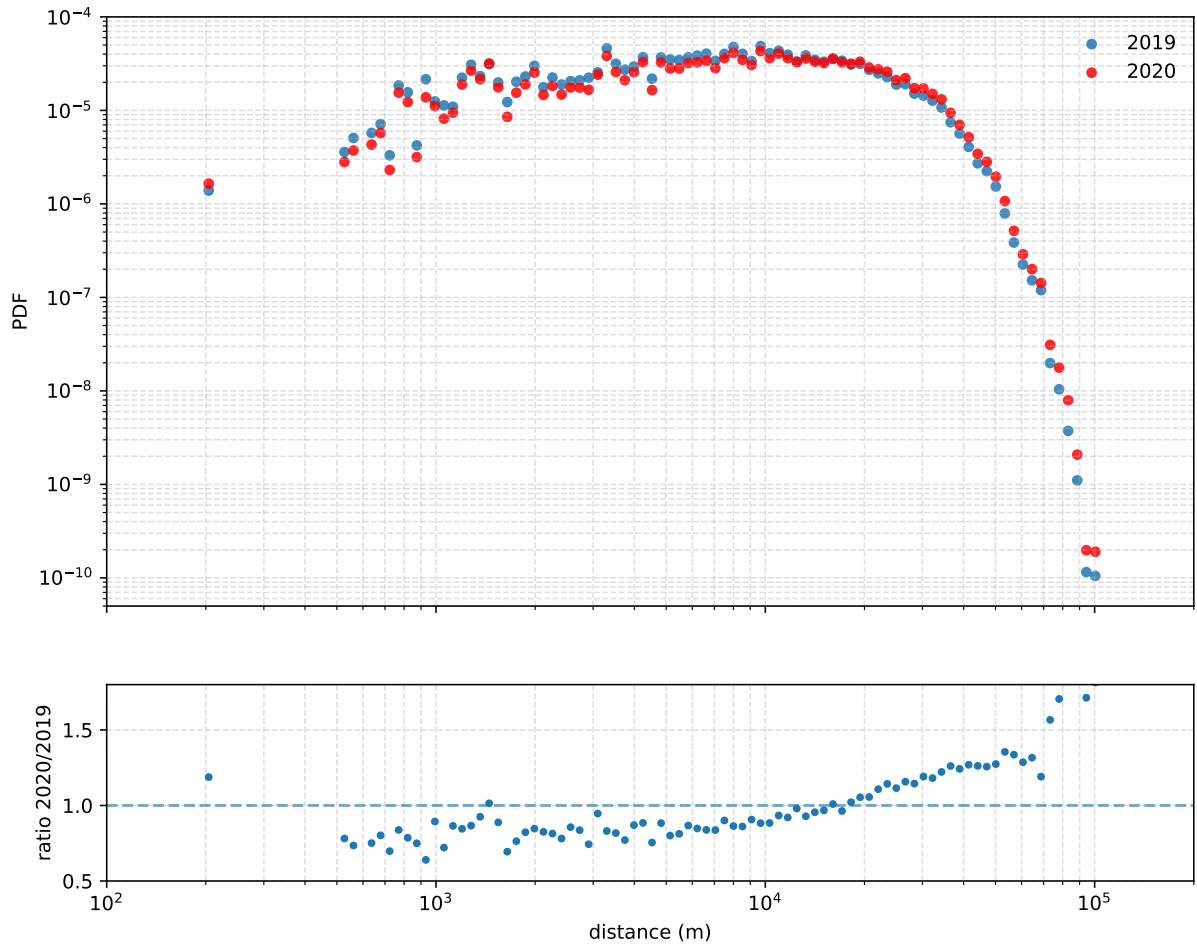


Figura 4.3 – *Distribuição das distâncias e razão entre as distribuições de distância para os dois períodos (2020 sobre 2019).*

Uma perspectiva complementar sobre a distribuição espacial dos destinos é fornecida pela entropia de Shannon em nível de estação, calculada para cada estação de origem i a partir de sua distribuição OD de saída p_{ij} como

$$H_i = - \sum_j p_{ij} \log p_{ij},$$

em que valores mais baixos indicam que as partidas a partir de i se concentram em um conjunto menor de destinos, enquanto valores mais elevados indicam destinos mais diversificados. A Fig. 4.4 mostra que a distribuição de 2020 torna-se mais dispersa em comparação com 2019, apresentando estações na faixa de menor entropia (aproximadamente $H \approx 4.0$ – 4.2), ao mesmo tempo em que mantém uma cauda de alta entropia ($H \gtrsim 4.4$). Esse padrão sugere maior heterogeneidade na organização dos fluxos de origem durante 2020: para muitas estações, os fluxos tornaram-se mais concentrados em determinados des-

tinios (consistente com deslocamentos mais locais e rotineiros e com a redução da mistura ao longo da rede). De modo geral, o deslocamento do histograma sustenta a interpretação de que a mobilidade ferroviária em 2020 torna-se menos uniformemente distribuída entre as estações.

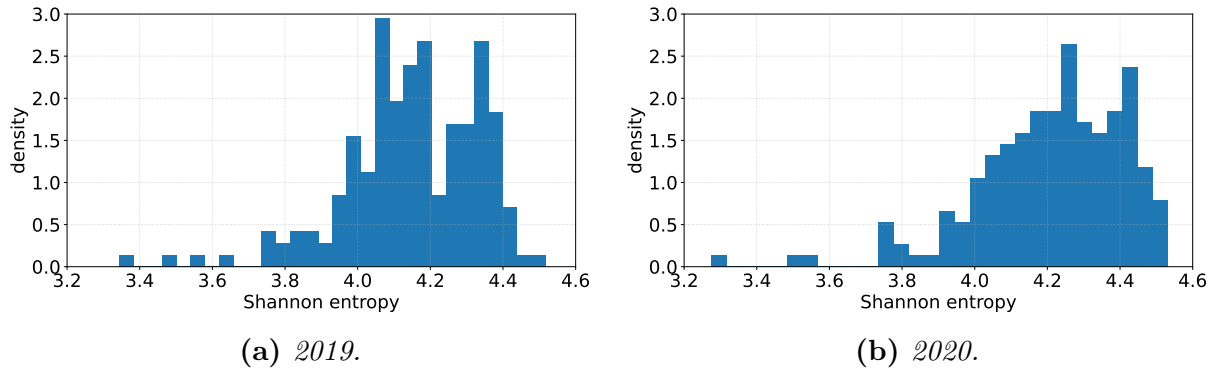


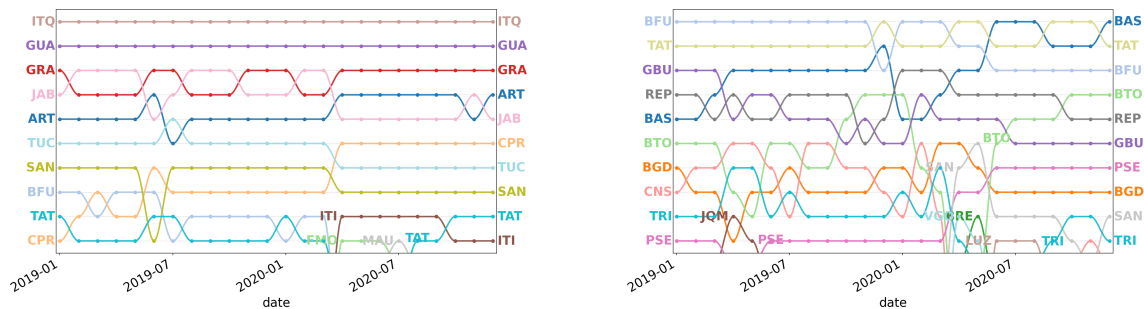
Figura 4.4 – *Distribuições da entropia de Shannon por estação de origem para os dois períodos.*

4.2 DINÂMICA DE RANKINGS DE ESTAÇÕES E PARES OD

Para além dos indicadores agregados, abordagens baseadas em rankings fornecem uma maneira interpretável de acompanhar como a importância relativa é redistribuída ao longo do tempo sob choques de demanda. Aqui usa-se rankings mensais Top- k para acompanhar: (i) as estações com maior volume de viagens inferidas (entradas e saídas), (ii) os pares OD mais ativos e (iii) as estações mais atravessadas ao longo de caminhos mínimos de baixo custo. A Fig. 4.5 apresenta as trajetórias mensais Top- k das estações classificadas pelo volume de viagens inferidas, exibidas separadamente para entradas e saídas na representação por pares OD. Longos patamares na parte superior do gráfico indicam estações que funcionam como hubs persistentes, ao passo que os cruzamentos marcantes e as trocas de posição após o ponto de ruptura no início de 2020 revelam uma reordenação substancial da importância das estações. Embora os dois rankings apresentem ampla concordância, há meses em que a posição de uma estação diverge entre entradas e saídas, possivelmente refletindo mudanças direcionais na demanda, bem como vieses introduzidos pela inferência OD baseada em *single-tap* e por alterações nas sequências típicas de validação.

O cruzamento dessas trajetórias de ranking com a Fig. 4.1 sugere um padrão espacial claro. As estações de entrada que aparecem no Top- k estão predominantemente localiza-

das fora da área central de São Paulo; notadamente, entre as Top-10 ao final de 2020, cinco situam-se na porção leste do município. A estação mais central dessa lista é TAT (“Tatuapé”), um importante ponto de integração entre as redes de trem metropolitano e Metrô, onde as transferências são tarifadas nos horários de pico em dias úteis. As estações de saída, por sua vez, são, em geral, mais centrais e apresentam maior reordenamento ao longo dos meses. BAS (“Brás”) torna-se a principal estação de saída por vários meses em 2020, enquanto BFU (“Barra Funda”) passa de uma posição estável em primeiro lugar em 2019 para a terceira posição em 2020. Juntamente com REP (“República”), essas estações configuram importantes nós de transferência entre linhas. Por fim, BTO (“São Bento”) e GBU (“Anhangabaú”), ambas localizadas no centro da cidade, destacam-se como pontos de acesso a áreas de alta densidade de atividades e a importantes conexões com corredores de ônibus.



(a) Entradas (mensal) — ranking Top-k pelo número de viagens.

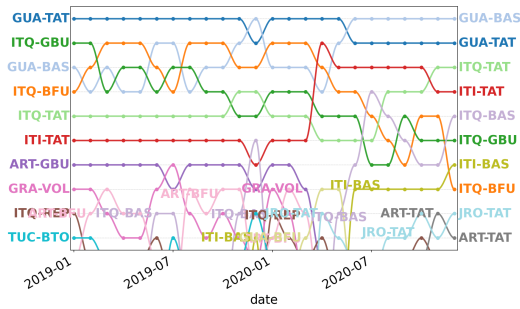
(b) Saídas (mensal) — ranking Top-k pelo número de viagens.

Figura 4.5 – Gráficos do tipo bump chart para **entradas** e **saídas** ao longo do período 2019-01 a 2020-12. Cada linha representa a posição mensal no ranking (Top-k) das estações com maiores volumes de viagens.

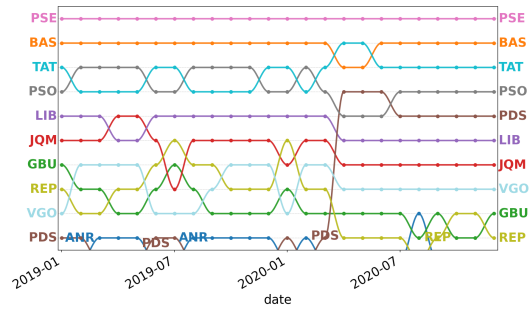
A Fig. 4.6 estende a análise baseada em rankings aos pares OD e às estações mais atravessadas ao longo de caminhos mínimos. O bump chart dos pares OD destaca conexões de alto volume relativamente estáveis no período pré-pandêmico, ao mesmo tempo em que evidencia mudanças substanciais na ordenação relativa dos principais enlaces OD ao longo de 2020. O ranking das estações “mais atravessadas” captura uma noção relacionada, porém distinta, de centralidade: estações que se encontram em um grande número de caminhos mínimos de baixo custo sob a definição de custos baseados em fluxo. Alterações nessas trajetórias de ranking indicam como a espinha dorsal de distâncias efetivas da rede é reorganizada, para além do volume local puramente medido pela força das estações.

Para os pares OD, o ranking também se altera de forma marcante em 2020. Ao final de 2020, nove dos Top-10 enlaces OD estão concentrados na porção leste da cidade, sendo ITQ-GBU a única exceção. Essa concentração indica que uma parcela significativa das viagens ferroviárias de maior volume em 2020 ocorre dentro do corredor leste. Em comparação com 2019, o *bump chart* dos pares OD mostra-se visivelmente mais instável em 2020, sugerindo uma reordenação mais intensa, mês a mês, entre os maiores fluxos.

Para as estações mais atravessadas, o panorama é semelhante, porém enfatiza a espinha dorsal de distâncias efetivas, em vez dos volumes locais de pares OD. Em 2020, apenas duas estações no Top- k não estão predominantemente associadas ao eixo intensamente utilizado leste-centro (aproximadamente ITQ-PSO e o sentido inverso): GBU e REP. Apesar da perturbação, esse ranking permanece relativamente estável ao longo de 2020, com PDS (“Parque Dom Pedro”) consolidando-se em uma quinta posição persistente. Notavelmente, PDS, GBU e LIB (“Liberdade”) estão diretamente conectadas a PSE (“Praça da Sé”), evidenciando a permanência da centralidade do núcleo de transferência central e sua utilização intensiva, mesmo quando os principais fluxos OD tornam-se mais geograficamente concentrados.



(a) Pares OD (mensal) — ranking Top- k pelo volume de viagens.



(b) Estações mais percorridas (mensal) — ranking Top- k pelo número de viagens atribuídas aos caminhos mínimos.

Figura 4.6 – Gráficos do tipo bump chart para **pares OD** e **estações mais atravessadas** ao longo do período 2019-01 a 2020-12. Cada linha representa a posição mensal no ranking (Top- k) dos pares OD e das estações mais frequentemente percorridas ao longo de caminhos mínimos.

4.3 CONTRAÇÃO ESPACIAL DA REDE: MARÇO DE 2019 VS MARÇO DE 2020

Para complementar os indicadores em nível sistêmico, analisa-se a ruptura na escala de *corredores* por meio da comparação dos pesos das arestas entre janelas de calendário correspondentes. Especificamente, calcula-se, para cada segmento da rede, a variação relativa no fluxo inferido de passageiros entre março de 2019 e março de 2020 e projetamos essas variações sobre a configuração geográfica da malha ferroviária. Essa abordagem em nível de arestas permite identificar onde a contração da demanda se concentra espacialmente e avaliar se o choque atua como uma simples redução proporcional dos fluxos ou se, ao contrário, induz uma realocação heterogênea entre corredores.

A Fig. 4.7 sintetiza essas diferenças em nível de arestas. As cores codificam a variação relativa (azul para aumentos, vermelho para reduções), enquanto a espessura das linhas reflete a magnitude da variação (conforme representado na figura). A predominância de tons vermelhos indica uma contração ampla da mobilidade ferroviária em março de 2020, consistente com o início das restrições associadas à COVID-19; entretanto, o mapa também revela acentuada heterogeneidade espacial: os segmentos mais escuros e espessos concentram-se no núcleo central e ao longo dos principais corredores troncais, que normalmente transportam grandes volumes de base, indicando que as maiores perdas absolutas ocorrem precisamente na espinha dorsal de alta demanda do sistema. Em contraste, diversos ramais periféricos exibem tonalidades mais claras e segmentos mais finos, sugerindo reduções absolutas menores (e frequentemente quedas relativas moderadas) fora do núcleo central. Por fim, a presença de um pequeno número de variações próximas de zero ou positivas (tons entre branco e azul), principalmente em torno de conexões centrais, é consistente com uma redistribuição limitada de viagens entre ligações adjacentes, em vez de uma simples redução proporcional, sustentando a interpretação de que o choque reorganiza os padrões de fluxo mesmo dentro de um contexto de colapso geral da demanda.



Figura 4.7 – *Variação percentual na intensidade dos fluxos de passageiros ao longo de cada segmento ferroviário e metroviário entre março de 2019 e março de 2020. Cada segmento de linha representa uma conexão entre duas estações na rede de São Paulo. A escala de cores varia do vermelho, indicando fortes reduções no número de viagens, ao azul, indicando fortes aumentos, sendo o branco associado a variações desprezíveis. A espessura de cada segmento é proporcional à magnitude absoluta da variação no fluxo, de modo que segmentos mais espessos correspondem a mudanças mais intensas, independentemente de serem aumentos ou reduções.*

4.4 EXEMPLOS DE REDES DIÁRIAS DE MOBILIDADE

A Fig. 4.8 ilustra as redes OD inferidas para datas selecionadas, com o objetivo de fornecer uma referência intuitiva sobre o quanto os grafos *diários* variam em termos de aparência, considerando uma representação binária da rede. Um ponto central é que, apesar das flutuações dia a dia, o aspecto binário da rede tende a permanecer estável ao longo de dias úteis ordinários. Em contraste, feriados constituem um contraexemplo, no qual a rede torna-se visivelmente menos densa. A figura também antecipa a lógica da análise baseada em métricas: como muitas redes de dias úteis diferem apenas de forma sutil quanto ao conjunto de ligações ativas, os sinais mais informativos de mudança são esperados nas métricas ponderadas, e não apenas na presença ou ausência topológica de

conexões. Nesse sentido, os painéis visuais funcionam como uma verificação qualitativa da reconstrução OD e como uma ponte entre as representações espaciais brutas e as comparações formais apresentadas a seguir.

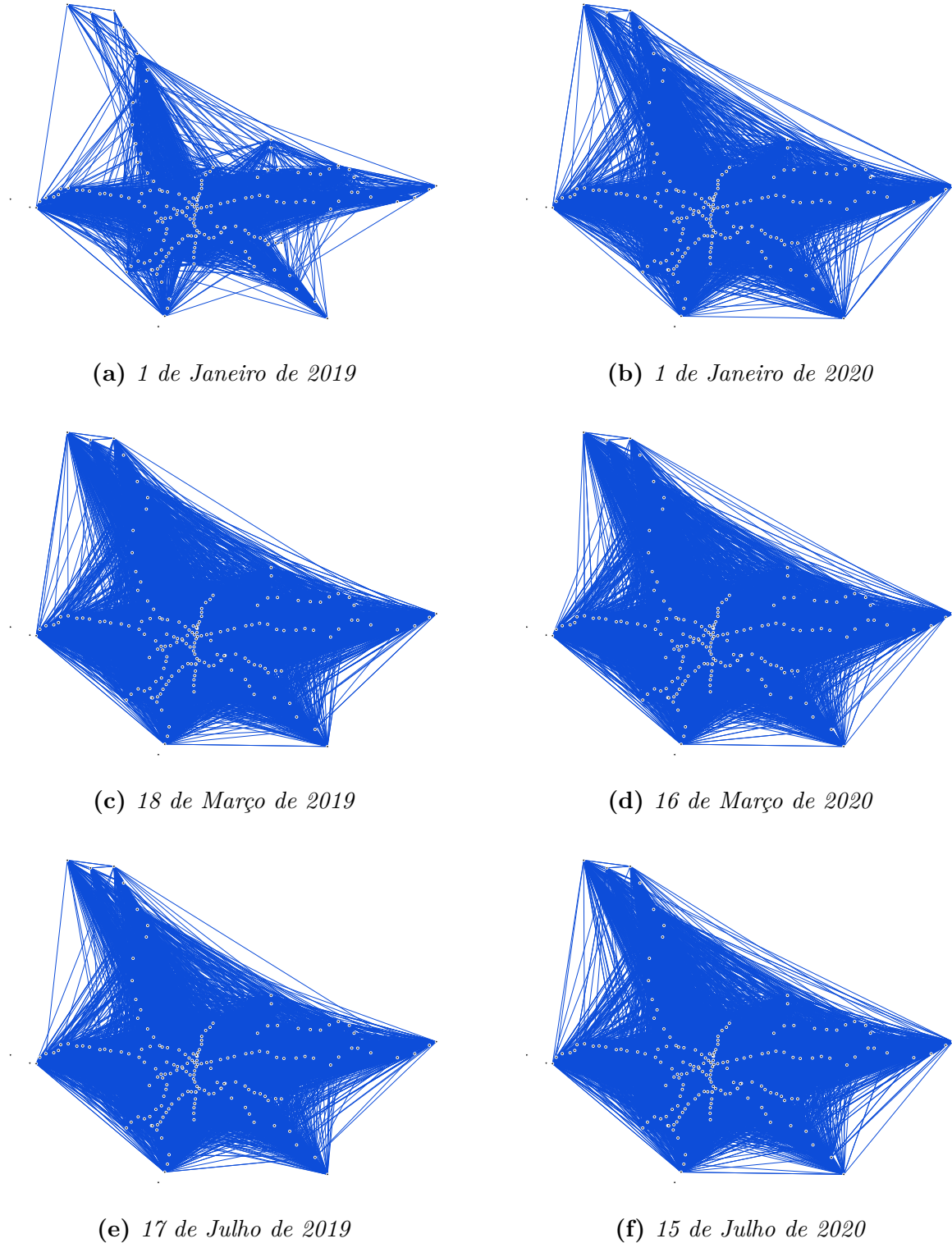


Figura 4.8 – Redes diárias de origem–destino para dias seleccionados entre 2019 e 2020. Cada painel apresenta a rede ferroviária de São Paulo, na qual os nós correspondem às estações e as ligações conectam pares de estações com pelo menos uma viagem registrada.

4.5 TRAJETÓRIAS TEMPORAIS DAS MÉTRICAS DE REDE

Para obter os resultados desta subseção, consideramos os grafos diários ponderados de mobilidade ferroviária G_t para cada dia t em 2019–2020, com fluxos OD inferidos a partir de validações do tipo *single-tap*. Para cada G_t , calculamos as métricas em nível de rede definidas na Seção 2.3.1, lembrando que diversas outras métricas foram testadas, mas as selecionadas foram aquelas que apresentaram as maiores diferenças entre os anos de 2019 e 2020. Isso resulta em um valor por métrica por dia, formando séries temporais diárias. Apresenta-se tanto as trajetórias diárias brutas quanto uma média móvel de 7 dias, e resumimos as diferenças em nível anual calculando a média das métricas ao longo de todos os dias de cada ano e computando as variações relativas entre 2019 e 2020.

As Fig. 4.9a–4.9h apresentam a evolução diária das métricas em nível de rede. Como esperado, o peso total $W_G(t)$ e a força média $S_G(t)$ acompanham de perto a dinâmica da demanda, exibindo uma contração acentuada em 2020 e níveis persistentemente mais baixos no período subsequente. Em contraste, o comprimento médio dos caminhos mínimos baseado em custo $l_G(t)$ aumenta durante o ano de 2020. De forma consistente, a eficiência global $E_G(t)$ diminui, indicando uma redução da eficácia geral da conectividade do sistema quando ponderada pelos fluxos inferidos.

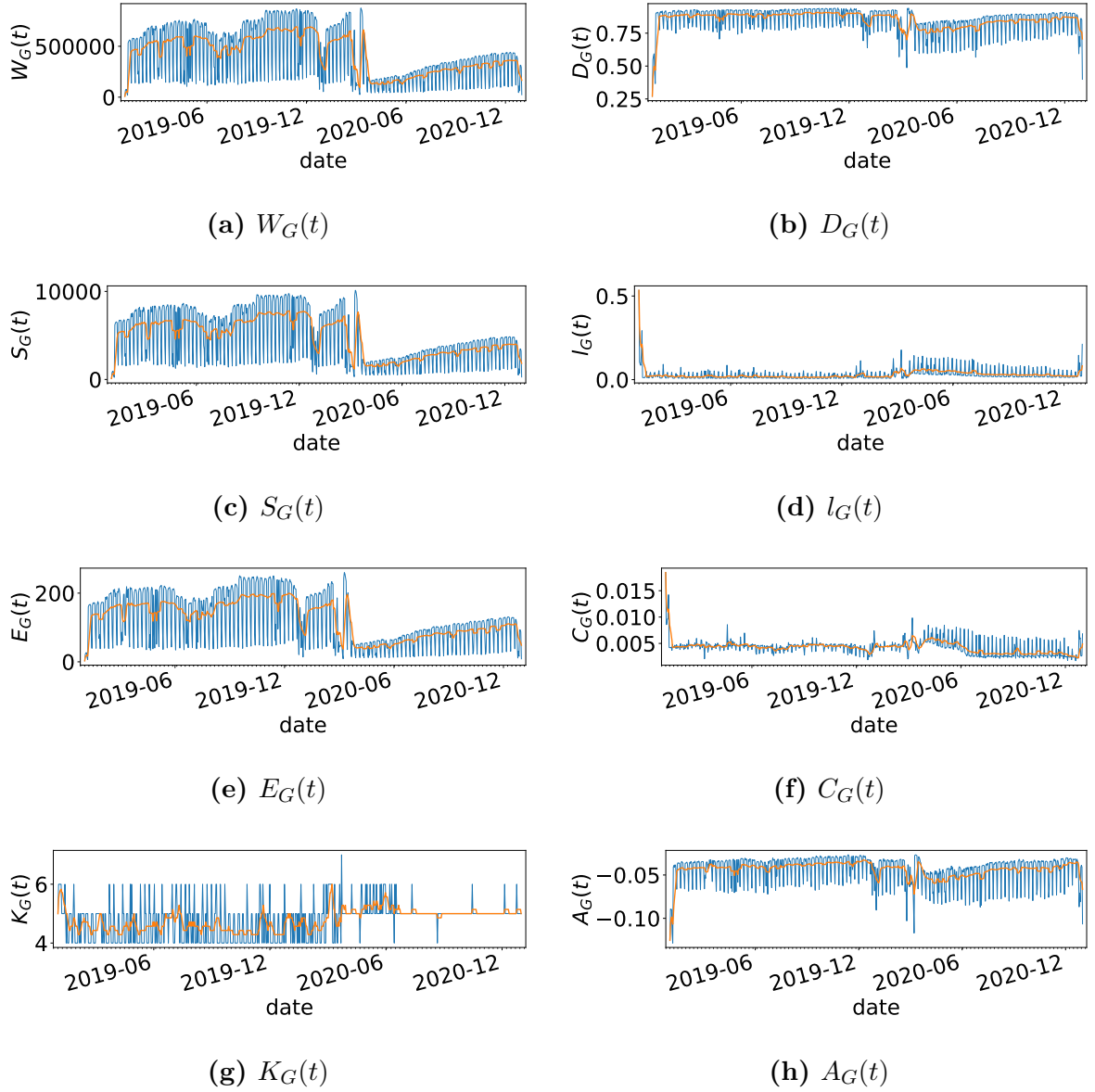


Figura 4.9 – Evolução diária das métricas em nível de rede utilizadas no artigo, calculadas a partir do grafo diário de mobilidade ferroviária G_t . Em cada painel, a curva fina representa o valor diário e a curva espessa representa a média móvel de 7 dias. As métricas são: peso total $W_G(t)$, densidade $D_G(t)$, força média $S_G(t)$, comprimento médio dos caminhos mínimos $l_G(t)$ (baseado em custo), eficiência global $E_G(t)$ (baseada em custo), coeficiente médio de agrupamento ponderado $C_G(t)$, número de comunidades $K_G(t)$ (partição por modularidade via método guloso) e assortatividade por grau $A_G(t)$.

A conectividade topológica também se contrai: a densidade $D_G(t)$ diminui em 2020, sugerindo que menos pares de estações permanecem conectados por fluxos inferidos positivos em um dia típico. A coesão local, medida pelo coeficiente médio de agrupamento ponderado $C_G(t)$, apresenta uma redução moderada, consistente com o enfraquecimento das estruturas triádicas de fluxo. O número de comunidades detectadas $K_G(t)$ aumenta, sugerindo uma maior subdivisão da rede em grupos de estações conectadas. Em conjunto

com a redução da densidade e da coesão local, esse resultado é consistente com uma tendência de fragmentação estrutural da mobilidade observada durante o período analisado.

Por fim, a assortatividade por grau $A_G(t)$ permanece negativa em ambos os anos, com uma variação modesta em sua magnitude, sugerindo a persistência de mistura dissortativa, na qual estações altamente conectadas tendem a se ligar a estações menos conectadas na estrutura OD diária. De modo importante, os valores mais negativos observados em 2020 em relação a 2019 são consistentes com um *aumento da heterogeneidade da rede*: à medida que a demanda se contrai e diversos enlaces mais fracos deixam de existir, a estrutura OD remanescente torna-se mais fortemente organizada em torno de um padrão núcleo-periferia, no qual estações com menos conexões ativas (possivelmente em áreas periféricas) passam a se conectar de forma desproporcional a um conjunto menor de hubs altamente conectados. Essa interpretação é coerente com a contração espacialmente desigual evidenciada pelo mapa em nível de arestas (no qual as maiores reduções absolutas concentram-se nos principais corredores centrais) e com as evidências baseadas na entropia discutidas anteriormente, que indicam uma redistribuição da diversidade dos fluxos de origem entre as estações em direção a um padrão mais localmente estruturado e menos uniformemente distribuído.

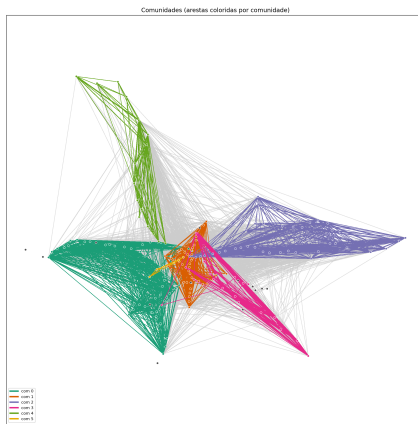
A comparação em nível anual apresentada na Tabela 4.1 sintetiza essas mudanças por meio da média dos valores diários ao longo de cada ano. Em relação a 2019, o ano de 2020 apresenta uma redução acentuada no peso total (-45.2%) e na força média (-46.2%), juntamente com uma diminuição na densidade (-6.3%). Em termos de distância efetiva, $l_G(t)$ aumenta de forma substancial ($+66.192\%$), enquanto a eficiência diminui (-45.0%). O coeficiente de agrupamento apresenta queda (-12.2%), e o número de comunidades aumenta ($+9.0\%$), reforçando a interpretação de uma estrutura de mobilidade ferroviária mais localizada e fragmentada durante o período pandêmico. Essas variações quantitativas estão alinhadas com as evidências visuais apresentadas na Fig. 4.8 e com a contração espacial ilustrada na Fig. 4.7.

Tabela 4.1 – Comparação das métricas diárias em nível de rede (média ao longo dos dias) entre 2019 (pré-pandemia) e 2020 (pandemia). A última coluna apresenta a variação relativa de 2019 para 2020 em termos percentuais.

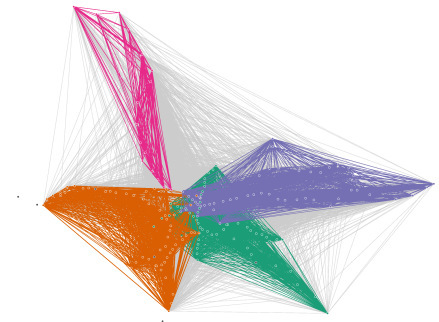
Metric	Mean 2019	Mean 2020	$\Delta(\%)$
$W_G(t)$	544,947.293	298,495.861	−45.2
$D_G(t)$	0.882	0.826	−6.3
$l_G(t)$	0.022	0.036	66.2
$E_G(t)$	159.612	87.740	−45.0
$C_G(t)$	0.005	0.004	−12.2
$K_G(t)$	4.586	5.000	9.0
$A_G(t)$	−0.041	−0.047	13.9
$S_G(t)$	6,202.305	3,336.384	−46.2

4.6 ESTRUTURA DE COMUNIDADES E PADRÕES ESPACIAIS

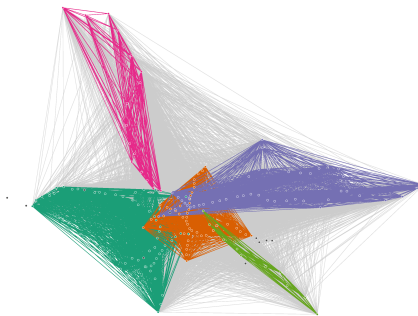
As partições em comunidades extraídas de G_t fornecem uma visão em escala intermediária de como a mobilidade ferroviária inferida se organiza em subestruturas coesas. Aqui, o objetivo é principalmente *visual*: ao representar as atribuições de comunidades para um pequeno conjunto de datas representativas, a Fig. 4.10 oferece uma imagem intuitiva de como os fluxos se agrupam espacialmente e de como a rede pode ser decomposta em blocos semelhantes a corredores. Os exemplos selecionados (feriados e dias úteis, em meses distintos) também ilustram um ponto importante: mesmo quando a rede OD global parece amplamente semelhante de um dia para outro, as partições baseadas em modularidade podem ainda apresentar diferenças *sutis* em seus limites e na composição de seus membros, inclusive entre dias estruturalmente muito distintos em termos de demanda (por exemplo, 1º de janeiro versus dias úteis típicos). Essas variações em nível diário são qualitativamente informativas, mas também motivam o uso de *médias mensais e anuais* (ou outras formas de agregação temporal) para obter uma representação mais clara e estável da organização em escala intermediária.



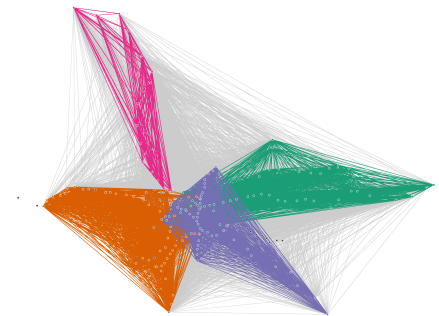
(a) 1 Janeiro 2019



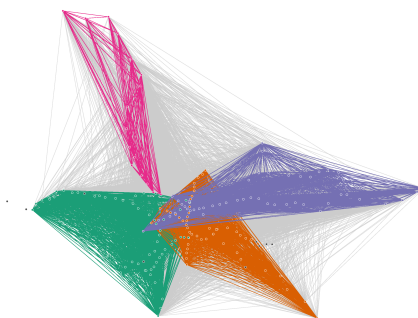
(b) 1 Janeiro 2020



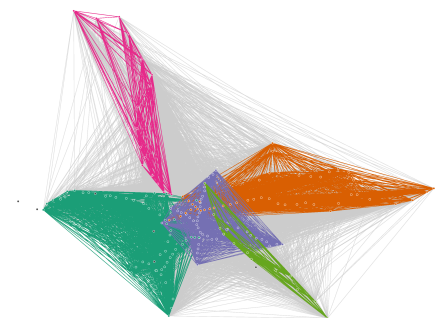
(c) 18 Março 2019



(d) 16 Março 2020



(e) 17 Julho 2019



(f) 15 Julho 2020

Figura 4.10 – *Estrutura diária de comunidades das redes ferroviárias de origem-destino para dias selecionados entre 2019 e 2020. Cada painel apresenta a rede ferroviária de São Paulo, na qual as ligações são coloridas de acordo com sua atribuição de comunidade, e as estações herdam a cor da comunidade à qual pertencem.*

Apesar da variabilidade diária, a Fig. 4.10 revela de forma consistente a presença de “blocos” de comunidades persistentes e espacialmente coerentes. Em particular, um bloco proeminente emerge na porção leste do sistema, indicando uma sub-rede relativamente

coesa, na qual os fluxos OD são densos internamente e comparativamente mais fracos através de suas fronteiras. Esse padrão visual é consistente com as evidências da dinâmica de rankings apresentadas nos *bump charts* (Seção 4.2), que destacaram a proeminência de estações e pares OD concentrados na parte leste da cidade, e sustenta a interpretação de elevada intensidade de mobilidade *local* nessa área. Nesse sentido, os gráficos de comunidades complementam a análise dos *bump charts* ao mostrar onde a persistência de posições elevadas nos rankings se traduz em uma estrutura mesoscópica espacialmente agrupada, além de fornecer uma ponte qualitativa para os resultados baseados em métricas discutidos na seção de trajetórias temporais.

4.7 CONSISTÊNCIA COM EVIDÊNCIAS BASEADAS EM PESQUISA

Os resultados baseados em redes são consistentes com as principais mensagens qualitativas reportadas pela Pesquisa OD oficial da Região Metropolitana de São Paulo. Em particular, a contração acentuada da demanda ferroviária observada no início de 2020 está alinhada com a evidência mais ampla da pesquisa acerca de uma redução da mobilidade diária no período pós-pandemia: a OD 2023 documenta uma diminuição no total de viagens diárias em relação à onda anterior da pesquisa, com as maiores perdas concentradas no transporte coletivo. Isso sustenta a interpretação de que o colapso capturado por $W_G(t)$ e $S_G(t)$ reflete um choque real em nível sistêmico, e não um artefato decorrente de uma mensuração restrita ao transporte sobre trilhos.

No entanto, o principal valor do arcabouço baseado em dados de bilhetagem reside precisamente naquilo que a Pesquisa OD não pode oferecer. Em primeiro lugar, ao operar com resolução *diária*, os grafos inferidos G_t permitem datar, quantificar e decompor a ruptura em fases (início, estabilização, recuperação parcial), além de revelar efeitos marcantes de dia da semana e de feriados, que são intrinsecamente suavizados em pesquisas domiciliares periódicas. Em segundo lugar, a Pesquisa OD fornece matrizes OD e indicadores no nível de zonas OD com representatividade estatística, mas não consegue resolver interações *estação a estação* nem reponderações em nível de corredor em grande escala; em contraste, nossas comparações em nível de arestas (Fig. 4.7) identificam quais segmentos ferroviários perdem (ou preservam) intensidade de fluxo, e a dinâmica de rankings revela como a proeminência de estações e de pares OD é redistribuída ao longo do tempo. Em terceiro lugar, a pesquisa capta “quanto” as pessoas viajam e “por qual modo”, junta-

mente com um rico contexto socioeconômico, mas não fornece uma descrição estrutural direta e de alta frequência da conectividade efetiva: as métricas baseadas em custo ($l_G(t)$ e $E_G(t)$), as assinaturas de fragmentação (por exemplo, $K_G(t)$) e os diagnósticos de localização derivados das razões de distância e das entropias em nível de estação (Figs. 4.3 e 4.4) oferecem medidas interpretáveis de reorganização da rede que podem ser monitoradas continuamente e comparadas em janelas temporais curtas.

Em termos práticos, a OD 2023 deve ser interpretada como uma linha de base socioespacial e um referencial multimodal, enquanto as redes derivadas da bilhetagem constituem uma “camada de monitoramento” operacional para a espinha dorsal metroferroviária: elas tornam possível acompanhar onde e quando a mobilidade se torna mais localizada, como a espinha dorsal de distâncias efetivas é remodelada e como a proeminência se desloca entre estações e corredores durante choques. Utilizadas de forma conjunta, as duas fontes sustentam tanto a interpretabilidade (por meio das características socioeconômicas em nível de zonas OD e dos propósitos de viagem) quanto o diagnóstico estrutural em alta frequência (por meio de G_t e de suas métricas variáveis no tempo), o que é essencial para compreender a anatomia temporal das rupturas e o formato das recuperações subsequentes.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a mobilidade urbana sobre trilhos na Região Metropolitana de São Paulo a partir da reconstrução de fluxos origem–destino inferidos com base em registros de validação de cartões do sistema de bilhetagem eletrônica, que registram apenas o embarque dos passageiros. A partir desses registros, foi possível modelar a mobilidade ferroviária como uma rede dinâmica de interações entre estações e investigar sua evolução estrutural ao longo do período de 2019 a 2020, com atenção especial às transformações associadas à pandemia de COVID-19.

Do ponto de vista metodológico, a pesquisa propôs e aplicou um procedimento de inferência de fluxos OD baseado no TSN, permitindo reconstruir deslocamentos sucessivos a partir de registros de embarque. Com isso, foram construídas redes ponderadas diárias de mobilidade ferroviária, sobre as quais se aplicaram métricas estruturais, análises temporais, dinâmicas de ranking, distribuições de distância, entropia de estações de origem e comparações espaciais entre períodos. Essa abordagem dialoga com trabalhos que utilizam dados de bilhetagem eletrônica para inferência OD e análise operacional da mobilidade (ARNONE *et al.*, 2016; FADEEV; ALHUSSEINI, 2023), bem como com a literatura que modela sistemas metroferroviários como redes complexas (LATORA; MARCHIORI, 2002; ANGELOUDIS; FISK, 2006; DERRIBLE, 2012).

Os resultados evidenciam o impacto estrutural causado pela pandemia no início de 2020. Em termos quantitativos, observou-se redução de 41,2% no volume total de deslocamentos representado por W_G , queda de 44,2% na força média da rede e redução de 44,0% na eficiência global. Em contrapartida, a distância média dos caminhos aumentou 64,0%, enquanto o número de comunidades identificadas cresceu 9,0%. Em conjunto, essas evidências mostram que a pandemia não afetou apenas o volume de mobilidade, mas também a forma como os fluxos passaram a se organizar no sistema. A rede tornou-se menos integrada, mais localizada e mais compartimentalizada. A análise dos rankings de estações e pares OD, bem como os mapas de corredores, mostrou ainda que essa retração não ocorreu de maneira uniforme, mas se deu por meio de uma reorganização espacial seletiva dos fluxos.

Esses achados são consistentes com estudos recentes que identificaram mudanças profundas na mobilidade urbana durante a pandemia, incluindo retração da demanda,

reorganização da conectividade e reconfiguração espacial dos deslocamentos (KIM; JUN, 2022; XIN *et al.*, 2022; ROWE *et al.*, 2023; Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô, 2023). Também convergem com trabalhos que analisam mobilidade urbana por meio de redes, mostrando que choques externos tendem a alterar não apenas a intensidade dos fluxos, mas também a centralidade relativa dos nós, a estrutura de comunidades e os padrões de vulnerabilidade e resiliência do sistema (PAN *et al.*, 2024; LI *et al.*, 2024; PARK *et al.*, 2024). Nesse sentido, os resultados desta dissertação situam a mobilidade ferroviária da RMSP dentro de um padrão mais amplo de reconfiguração estrutural observado em sistemas urbanos sob condições de alto impacto.

A comparação com a Pesquisa OD 2023 mostrou coerência qualitativa entre as duas abordagens. Enquanto a OD fornece um retrato multimodal e socioeconomicamente detalhado da mobilidade metropolitana, os dados de bilhetagem eletrônica permitem observar continuamente o uso efetivo do sistema ferroviário e acompanhar suas mudanças estruturais em alta frequência temporal. Assim, os resultados reforçam a ideia de que redes derivadas de bilhetagem não substituem pesquisas domiciliares, mas as complementam ao oferecer indicadores operacionais e estruturais úteis para o monitoramento da mobilidade e para a identificação de mudanças com alto impacto na organização dos fluxos (Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRÔ), 2025).

Do ponto de vista analítico e aplicado, a abordagem proposta oferece uma camada adicional de diagnóstico para o planejamento e a gestão do transporte público. As redes diárias permitem quantificar não apenas quanto a demanda varia, mas também como a estrutura funcional do sistema se reorganiza ao longo do tempo. Isso possibilita identificar estações e corredores mais sensíveis a choques, acompanhar processos de contração e recuperação e avaliar alterações na fragmentação e na conectividade da rede, contribuindo para análises de vulnerabilidade, resiliência e acessibilidade em sistemas de transporte de alta capacidade (PAN *et al.*, 2024; WANG; YUAN, 2025).

Como continuidade desta pesquisa, destacam-se algumas direções promissoras. Uma delas consiste na ampliação da modelagem para redes multimodais, incorporando dados de ônibus municipais e intermunicipais, o que permitiria representar de forma mais integrada a mobilidade da Região Metropolitana de São Paulo e investigar padrões de substituição e complementaridade entre modos (ALETA *et al.*, 2016; DING *et al.*, 2019). Outra possibilidade envolve a aplicação de métodos de redes dinâmicas, como detecção

temporal de comunidades, identificação de pontos de mudança em métricas estruturais e análise de persistência e resiliência da rede ao longo do tempo (NEWMAN; GIRVAN, 2004; BLONDEL *et al.*, 2008). Além disso, a integração de indicadores socioeconômicos e de uso do solo em escala local pode permitir análises mais diretas sobre desigualdades territoriais associadas à mobilidade urbana (WANG; YUAN, 2025; CHOO *et al.*, 2024). Por fim, avaliações adicionais da robustez do procedimento de inferência OD baseado em TSN, considerando diferentes regras de pareamento e limiares temporais, podem contribuir para ampliar a confiabilidade metodológica e a reprodutibilidade da abordagem proposta (ARNONE *et al.*, 2016; FADEEV; ALHUSSEINI, 2023; DU *et al.*, 2025).

USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Durante o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial generativa como apoio à implementação computacional dos procedimentos analíticos empregados no estudo. Essas ferramentas foram utilizadas para auxiliar na elaboração e revisão de códigos, discussão de algoritmos, consultas a bancos de dados, processamento dos dados e construção das análises em redes complexas.

A utilização dessas ferramentas teve caráter exclusivamente auxiliar, não substituindo as decisões metodológicas, a definição do problema de pesquisa, a seleção dos dados, a interpretação dos resultados ou a elaboração das conclusões. Todas as etapas científicas da pesquisa, incluindo a concepção do método de inferência origem–destino, a modelagem das redes, a análise dos resultados e a validação das evidências apresentadas, foram conduzidas e supervisionadas pelo autor.

O autor permaneceu integralmente responsável pela verificação, interpretação e aprovação final de todo o conteúdo apresentado nesta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência de Transporte do Estado de São Paulo. *ViaMobilidade Linha 5*. 2026. ARTESP. Disponível em: <https://www.artesp.sp.gov.br/artesp/setor-regulado/metroferroviario/viamobilidade5>. Acesso em: 20 Maio. 2026. Citado na pág. 33.
- Agência de Transporte do Estado de São Paulo. *ViaMobilidade Linhas 8 e 9*. 2026. ARTESP. Disponível em: <https://www.artesp.sp.gov.br/artesp/setor-regulado/metroferroviario/viamobilidade8-9>. Acesso em: 20 Maio. 2026. Citado na pág. 33.
- Agência de Transporte do Estado de São Paulo. *ViaQuatro*. 2026. ARTESP. Disponível em: <https://www.artesp.sp.gov.br/artesp/setor-regulado/metroferroviario/via-quatro>. Acesso em: 20 Maio. 2026. Citado na pág. 33.
- ALESSANDRETTI, L.; ASLAK, U.; LEHMANN, S. The scales of human mobility. *Nature*, Nature Research, v. 587, p. 402–407, 11 2020. ISSN 14764687. Citado na pág. 16.
- ALETA, A.; MELONI, S.; MORENO, Y. A multilayer perspective for the analysis of urban transportation systems. *Scientific Reports*, v. 6, p. 28001, 2016. Citado na pág. 17, 26, 57.
- ANGELOUDIS, P.; FISK, D. Large subway systems as complex networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 367, p. 553–558, 2006. Citado na pág. 17, 26, 56.
- ARNONE, M. *et al.* The potential of e-ticketing for public transport planning: The piedmont region case study. In: *Transportation Research Procedia*. [S.l.]: Elsevier B.V., 2016. v. 18, p. 3–10. ISSN 23521465. Citado na pág. 17, 19, 20, 21, 56, 58.
- BARBOSA, H. *et al.* *Human mobility: Models and applications*. [S.l.]: Elsevier B.V., 2018. 1-74 p. Citado na pág. 18, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30.
- BLONDEL, V. D. *et al.* Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, v. 2008, n. 10, p. P10008, 2008. Citado na pág. 58.
- BOCCALETTI, S. *et al.* *Complex networks: Structure and dynamics*. 2006. 175-308 p. Citado na pág. 27, 28, 29.
- BRANDÃO, B. H. B.; BUENO, L. M. de M. Mobility and accessibility in urbanization programs for favelas: Analysis in são paulo and rio de janeiro from 1996 to 2012. *Arquiteturarevista*, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, v. 14, p. 231–242, 2018. ISSN 18085741. Citado na pág. 17.
- BROCKMANN, D.; HUFNAGEL, L.; GEISEL, T. The scaling laws of human travel. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 439, p. 462–465, 1 2006. ISSN 14764687. Citado na pág. 16.
- CHOO, M.; YOON, H.; YOON, D. K. Investigating consistent effects of the urban built environment and human mobility on covid-19 outbreaks: A comprehensive meta-analysis. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier Ltd, v. 102, 3 2024. ISSN 22106707. Citado na pág. 58.

Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRÔ). *Pesquisa Origem e Destino 2023: Relatório Síntese*. São Paulo, Brazil, 2025. Disponível em: <<https://transparencia.metrosp.com.br/dataset/pesquisa-origem-e-destino-2023-relat%C3%B3rio-s%C3%ADntese>>. Citado na pág. 57.

Companhia do Metropolitano de São Paulo. *Infraestrutura da Rede Metroviária*. 2026. Portal da Transparência do Metrô de São Paulo. Disponível em: <https://transparencia.metrosp.com.br/sites/default/files/Infraestrutura-2026-3.pdf>. Acesso em: 20 Maio. 2026. Citado na pág. 33.

Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô. *Pesquisa Origem e Destino 2023*. São Paulo, 2023. Acessado em: 14 maio 2025. Disponível em: <<https://www.metro.sp.gov.br/pesquisa-od>>. Citado na pág. 17, 18, 57.

Companhia Paulista de Trens Metropolitanos. *Linhas da CPTM*. 2024. Disponível em: <<https://www.cptm.sp.gov.br>>. Citado na pág. 33.

DAGANZO, C. F. Structure of competitive transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 44, n. 4, p. 434–446, 2010. Citado na pág. 17, 27.

DERRIBLE, S. Network centrality of metro systems. *PLOS ONE*, v. 7, n. 7, p. e40575, 2012. Citado na pág. 17, 20, 26, 56.

DERRIBLE, S.; KENNEDY, C. Characterizing metro networks: state, form, and structure. *Transportation*, v. 37, n. 2, p. 275–297, 2010. Citado na pág. 17, 26.

DERRIBLE, S.; KENNEDY, C. The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 389, n. 17, p. 3678–3691, 2010. Citado na pág. 17, 26.

DING, R. *et al.* Application of complex networks theory in urban traffic network researches. *Networks and Spatial Economics*, Springer, v. 19, p. 1281–1317, 12 2019. ISSN 15729427. Citado na pág. 16, 19, 20, 26, 27, 28, 29, 57.

DOMÈNECH, A.; SAURÍ, A. A topological phase transition between small-worlds and fractal scaling in urban railway transportation networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 388, n. 21, p. 4658–4668, 2009. Citado na pág. 17, 26.

DU, Y.; AOKI, T.; FUJIWARA, N. A review of human mobility: Linking data, models, and real-world applications. *Journal of Computational Social Science*, Springer, v. 8, 11 2025. ISSN 24322725. Citado na pág. 17, 23, 24, 25, 27, 31, 58.

FADEEV, A. I.; ALHUSSEINI, S. Determination of urban public transport demand by processing electronic travel ticket data. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, Budapest University of Technology and Economics, v. 51, p. 394–408, 2023. ISSN 15873811. Citado na pág. 17, 19, 20, 21, 56, 58.

FERNANDES, L. A. de C. *et al.* Covid-19 and the brazilian reality: The role of favelas in combating the pandemic. *Frontiers in Sociology*, Frontiers Media S.A., v. 5, 12 2020. ISSN 22977775. Citado na pág. 17.

FORTUNATO, S. *Community detection in graphs*. 2010. 75-174 p. Citado na pág. 30.

- FU, J. *et al.* Visual analytics of spatio-temporal urban mobility patterns via network representation learning. *Multimedia Tools and Applications*, Springer, 2023. ISSN 15737721. Citado na pág. 24, 31.
- GALLOTTI, R. *et al.* Distorted insights from human mobility data. *Communications Physics*, Nature Research, v. 7, 12 2024. ISSN 23993650. Citado na pág. 16.
- GAO, Q. L. *et al.* Income estimation based on human mobility patterns and machine learning models. *Applied Geography*, Elsevier Ltd, v. 163, 2 2024. ISSN 01436228. Citado na pág. 24, 25.
- GONZÁLEZ, M. C.; HIDALGO, C. A.; BARABÁSI, A. L. Understanding individual human mobility patterns. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 453, p. 779–782, 6 2008. ISSN 14764687. Citado na pág. 16, 24.
- IBGE. *Censo Demográfico 2022: Resultados Preliminares*. 2022. <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 23 mai. 2025. Citado na pág. 17.
- IBGE. *Região Metropolitana de São Paulo*. 2022. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Citado na pág. 33.
- KIM, Y. L.; JUN, B. Inside out: human mobility big data show how covid-19 changed the urban network structure in the seoul metropolitan area. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, Oxford University Press, v. 15, p. 537–550, 11 2022. ISSN 17521386. Citado na pág. 17, 18, 26, 30, 57.
- LATORA, V.; MARCHIORI, M. *Is the Boston subway a small-world network?* [S.l.], 2002. v. 314, 109-113 p. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/physa>. Citado na pág. 16, 17, 26, 56.
- LEITE, C. São paulo, megacidade e redesenvolvimento sustentável: uma estratégia propositiva. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana (Brazilian Journal of Urban Management)*, p. 117–126, 7 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.7213/urbe.02.001.SE01>>. Citado na pág. 24.
- LI, S. *et al.* Evaluating urban vitality and resilience under the influence of the covid-19 pandemic from a mobility perspective: A case study in shenzhen, china. *Journal of Transport Geography*, Elsevier Ltd, v. 117, 5 2024. ISSN 09666923. Citado na pág. 26, 30, 57.
- LOBSANG, T. *et al.* Methodological framework for understanding urban people flow from a complex network perspective. *Journal of Urban Planning and Development*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 147, 9 2021. ISSN 0733-9488. Citado na pág. 26, 27, 28, 29, 30.
- MU, X.; YEH, A. G. O.; ZHANG, X. The interplay of spatial spread of covid-19 and human mobility in the urban system of china during the chinese new year. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, SAGE Publications Ltd, v. 48, p. 1955–1971, 9 2021. ISSN 23998091. Citado na pág. 18.
- NEWMAN, M. E. J. *The Structure and Function of Complex Networks* *. [S.l.], 2003. v. 45, 167-256 p. Disponível em: <<http://www.siam.org/journals/ojsa.php>>. Citado na pág. 27, 28, 29.

NEWMAN, M. E. J. *arXiv:physics/0602124v1 [physics.data-an] 17 Feb 2006*. [S.l.], 2006.

Citado na pág. 30.

NEWMAN, M. E. J.; GIRVAN, M. Finding and evaluating community structure in networks. *Physical Review E*, v. 69, n. 2, p. 026113, 2004. Citado na pág. 58.

NOULAS, A. *et al.* A tale of many cities: Universal patterns in human urban mobility. *PLoS ONE*, v. 7, 5 2012. ISSN 19326203. Citado na pág. 24, 25.

PAN, S. *et al.* On the dynamic vulnerability of an urban rail transit system and the impact of human mobility. *Journal of Transport Geography*, Elsevier Ltd, v. 116, 4 2024. ISSN 09666923. Citado na pág. 16, 17, 19, 26, 30, 57.

PARK, J. *et al.* Examining human mobility changes during covid-19 across socioeconomic groups: a comparative analysis of san diego county and new york city. *Computational Urban Science*, Springer, v. 4, 12 2024. ISSN 27306852. Citado na pág. 24, 25, 57.

PEREZ, Y.; PEREIRA, F. H. Estimating pandemic effects in urban mass transportation systems: An approach based on visibility graphs and network similarity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier B.V., v. 620, 6 2023. ISSN 03784371.

Citado na pág. 17.

PEREZ, Y.; SCHIMIT, P. H. T.; PEREIRA, F. H. Analysis of the impact of the covid-19 pandemic on the mobility patterns and accessibility to public transportation in informal settlements in the municipality of são paulo. *Revista de Gestao Ambiental e Sustentabilidade*, Universidade Nove de Julho-UNINOVE, v. 13, 2024. ISSN 23169834.

Citado na pág. 19, 24, 27.

POUDYAL, B. *et al.* Dynamic predictability and activity-location contexts in human mobility. *Royal Society Open Science*, Royal Society Publishing, v. 11, 9 2024. ISSN 20545703. Citado na pág. 16.

ROWE, F. *et al.* Urban exodus? understanding human mobility in britain during the covid-19 pandemic using meta-facebook data. *Population, Space and Place*, John Wiley and Sons Ltd, v. 29, 1 2023. ISSN 15448452. Citado na pág. 18, 26, 30, 31, 57.

SIMINI, F. *et al.* A universal model for mobility and migration patterns. *Nature*, v. 484, p. 96–100, 4 2012. ISSN 00280836. Citado na pág. 23.

SONG, C. *et al.* Limits of predictability in human mobility. *Science*, v. 327, p. 1018–1021, 2 2010. ISSN 00368075. Citado na pág. 16, 24, 25.

WANG, P.; YUAN, Y. Analyzing key factors influencing human mobility before and during covid-19 with explainable machine learning. *Transactions in GIS*, John Wiley and Sons Inc, v. 29, 2 2025. ISSN 14679671. Citado na pág. 24, 25, 57, 58.

WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, v. 393, n. 6684, p. 440–442, 1998. Citado na pág. 28.

XIA, F. *et al.* Ranking station importance with human mobility patterns using subway network datasets. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 21, p. 2840–2852, 7 2020. ISSN 15580016.

Citado na pág. 16, 17, 19, 20, 26, 27, 28, 29, 30.

XIN, R. *et al.* Impact of the covid-19 pandemic on urban human mobility - a multiscale geospatial network analysis using new york bike-sharing data. *Cities*, Elsevier Ltd, v. 126, 7 2022. ISSN 02642751. Citado na pág. [18](#), [26](#), [57](#).