



Análise do impacto da Pandemia de COVID-19 nos padrões de mobilidade e na acessibilidade ao transporte público em assentamentos informais do município de São Paulo

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

Yuri Perez¹ Pedro Henrique Triguís Schimit² and Fabio Henrique Pereira³

¹ Doutorando em Informática e Gestão do Conhecimento. Programa de Pós-graduação em Informática e Gestão do Conhecimento da Universidade Nove de Julho – PPGI/UNINOVE. yurinit@uni9.edu.br

² Doutor em Ciências. Programa de Pós-graduação em Informática e Gestão do Conhecimento da Universidade Nove de Julho – PPGI/UNINOVE. São Paulo, SP – Brasil. schimit@uni9.pro.br

³ Doutor em Ciências. Programa de Pós-graduação em Informática e Gestão do Conhecimento da Universidade Nove de Julho – PPGI/UNINOVE. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – PPGE/UNINOVE. fabiohp@uni9.pro.br

Notas dos autores

Os autores não têm conflitos de interesse a declarar.

A correspondência referente a este artigo deverá ser endereçada a Fabio Henrique Pereira.

Agradecimentos: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)

Cite como - American Psychological Association (APA)

Perez, Y., Schimiti, P. H. T., & Pereira, F. H. (2024). 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. *J. Environ. Manag. & Sust.*, 13(2), 1-31, e25170, Section: Territorial Inequalities and Socio-environmental Vulnerabilities in the COVID-19 Pandemic. <https://doi.org/10.5585/2024.25170>





Resumo

Objetivo: Este estudo examina o impacto da pandemia de COVID-19 na mobilidade urbana em assentamentos informais do município de São Paulo, investigando a acessibilidade e as mudanças nos padrões de mobilidade durante a pandemia.

Métodos: Utilizando técnicas de redes complexas, analisamos a proximidade de linhas de ônibus e estações em relação aos assentamentos informais, a partir de dados temporais de passageiros de ônibus para comparar os padrões de mobilidade antes e durante a pandemia.

Relevância: Compreender os efeitos da pandemia nos padrões de mobilidade de comunidades marginalizadas é crucial para o planejamento urbano inclusivo, apoiando políticas para melhorar os serviços de transporte e reduzir disparidades.

Resultados: Observamos dificuldades de acesso às linhas de ônibus para moradores de áreas periféricas e mudanças nos padrões de mobilidade que refletem alterações nos deslocamentos.

Contribuições Teóricas: Combinação de técnicas de redes complexas e análise de dados temporais para investigar a acessibilidade e medir o impacto da pandemia de COVID-19 no transporte público, analisar as relações entre linhas de transporte público e assentamentos informais e proporcionar insights sobre a mobilidade nesses locais.

Contribuições para a Gestão: Os resultados têm implicações práticas para a gestão urbana, destacando-se a necessidade de melhorar a acessibilidade ao transporte público em áreas periféricas e exigências de estratégias e políticas adaptativas que priorizem as necessidades das comunidades marginalizadas em tempos de crise.

Conclusão: Este estudo revela os desafios de acessibilidade e as mudanças nos padrões de mobilidade causadas pela pandemia de COVID-19 em assentamentos informais, fornecendo subsídios para decisões que promovam o desenvolvimento urbano sustentável e inclusivo.

Palavras-Chave: mobilidade urbana, favela, assentamentos informais, COVID-19, redes complexas





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

Abstract

Objective: This study examines the impact of the COVID-19 pandemic on the urban mobility in informal settlements in the municipality of São Paulo, investigating accessibility and changes in mobility patterns during the pandemic.

Methods: Using complex network techniques, we analyze the proximity of bus lines and metro stations to favelas, based on temporal bus passenger data to compare mobility patterns before and during the pandemic.

Relevance: Understanding the effects of the pandemic on mobility patterns in marginalized communities is crucial for inclusive urban planning, supporting policies to improve transportation services and reduce disparities.

Results: We observe difficulties in accessing bus lines for residents of peripheral areas and changes in mobility patterns reflecting alterations in travel. Theoretical.

Contributions: The combination of complex network techniques and temporal data analysis allows for investigating accessibility, measuring the impact of the COVID-19 pandemic on public transportation, analyzing relationships between public transportation lines and favelas, and providing insights into mobility in informal settlements.

Management Contributions: The results have practical implications for urban management, highlighting the need to improve accessibility to public transportation in peripheral areas and demanding adaptive strategies and policies that prioritize the needs of marginalized communities in times of crisis.

Conclusion: This study reveals challenges to accessibility and changes in mobility patterns caused by the COVID-19 pandemic in informal settlements, providing input for decisions that promote sustainable and inclusive urban development.





Key Words: urban mobility, slum, informal settlements, COVID-19, complex networks

Análisis del impacto de la Pandemia de COVID-19 en los patrones de movilidad y accesibilidad al transporte público en asentamientos informales del municipio de São Paulo

Resumen

Objetivo: Este estudio examina el impacto de la pandemia de COVID-19 en la movilidad urbana en asentamientos informales de la ciudad de São Paulo, investigando la accesibilidad y los cambios en los patrones de movilidad durante la pandemia.

Métodos: Utilizando técnicas de redes complejas, analizamos la proximidad de las líneas de autobús y las estaciones de metro a los asentamientos informales, utilizando datos temporales de los pasajeros de autobús para comparar los patrones de movilidad antes y durante la pandemia.

Relevancia: Comprender los efectos de la pandemia en los patrones de movilidad de las comunidades marginadas es crucial para una planificación urbana inclusiva, apoyando políticas para mejorar los servicios de transporte y reducir las disparidades. Resultados: Se observaron dificultades en el acceso a las líneas de autobús para los residentes de zonas periféricas y cambios en los patrones de movilidad que reflejan cambios en los desplazamientos.

Contribuciones teóricas: Combinación de técnicas de redes complejas y análisis de datos temporales para investigar la accesibilidad y medir el impacto de la pandemia de COVID-19 en el transporte público, analizar las relaciones entre las líneas de transporte público y los asentamientos informales, y proporcionar información sobre la movilidad en estos lugares.

Contribuciones a la gestión: Los resultados tienen implicaciones prácticas para la gestión urbana, destacando la necesidad de mejorar la accesibilidad al transporte público en las zonas periféricas y las demandas de estrategias y políticas adaptativas que prioricen las necesidades de las comunidades marginadas en tiempos de crisis.





Conclusión: Este estudio revela los desafíos de accesibilidad y los cambios en los patrones de movilidad causados por la pandemia de COVID-19 en asentamientos informales, proporcionando insumos para la toma de decisiones que promuevan el desarrollo urbano sostenible e inclusivo.

Palabras clave: movilidad urbana, favela, asentamientos informales, COVID-19, redes complejas

Introdução

A pandemia de COVID-19 teve impactos significativos nos sistemas urbanos de transporte público. Restrições de mobilidade, medidas de distanciamento social e preocupações com a saúde levaram a uma redução drástica na demanda por transporte público, resultando em quedas significativas na receita das operadoras e dificuldades financeiras (Dong et al., 2021). Além disso, a necessidade de implementar protocolos de segurança, como a limitação da capacidade dos veículos e a intensificação da higienização, aumentaram os custos operacionais. Essas mudanças abruptas e os desafios financeiros resultantes afetaram a disponibilidade e a qualidade dos serviços de transporte público, impactando negativamente a mobilidade das pessoas, especialmente as mais vulneráveis, e contribuindo para uma maior dependência de meios de transporte individuais (Fernandes et al., 2020).

O transporte público desempenha um papel fundamental na vida da população, especialmente em áreas urbanas, sendo essencial para promover a mobilidade das pessoas, garantir o acesso a serviços básicos, oportunidades de emprego, educação e saúde. Redes de transporte público eficientes podem auxiliar na redução do tráfego e no desenvolvimento sustentável (Delgado et al., 2022). Ao fornecer uma opção de transporte acessível e eficiente, os serviços de transporte público desempenham um papel significativo na construção de comunidades mais inclusivas e justas, permitindo que as pessoas se conectem, interajam e

prosperem em suas vidas diárias.

Em situações de crise, como na pandemia de COVID-19, é possível que moradores de assentamentos informais tenham enfrentado desafios adicionais relacionados aos impactos no transporte público, em comparação com moradores de outros tipos de ocupação urbana (Fernandes et al., 2020). Isso pode ter incluído a menor acessibilidade a opções de transporte de qualidade devido à concentração de linhas de ônibus em áreas centrais, menor frequência de serviços de transporte, dificuldade em cumprir as medidas de distanciamento social devido à superlotação nos transportes públicos, falta de recursos financeiros para arcar com os custos de transportes alternativos e menor acesso a informações atualizadas sobre as mudanças nos serviços de transporte público. Esses fatores podem ter agravado a desigualdade em relação à mobilidade e limitado as oportunidades de deslocamento seguro e eficiente para os residentes de assentamentos informais durante a pandemia (Rocha, 2021). Apesar dessa constatação, uma análise quantitativa do impacto da pandemia nessas desigualdades se faz necessária.

Redes complexas são estruturas que consistem em um conjunto de elementos interconectados, chamados de nós, com padrões de conexões e interações não triviais. Essas redes podem representar os sistemas de transporte público. Os algoritmos usados em modelos de rede complexa permitem uma análise detalhada das interações entre elementos, e, com isso, estimar a localização de pontos frágeis e gargalos do sistema, investigar a tolerância a falhas e a presença de rotas alternativas, além de possíveis assimetrias na arquitetura do sistema (Boccaletti et al., 2006). Abordagens mais recentes possibilitam usar redes complexas para estudar séries temporais, extraindo padrões que as técnicas tradicionais não conseguem obter (Zou et al., 2019).

Hipergrafos permitem uma representação mais flexível das interações complexas entre os elementos de uma rede em comparação aos modelos baseados em grafos, sendo particularmente eficazes na modelagem de situações em que uma única aresta não é suficiente para expressar a relação entre vários nós. No contexto do transporte público, onde diferentes

linhas de ônibus podem convergir ou se sobrepor, e a presença de estações de transferência multilaterais é comum, hipergrafos se destacam ao capturar essas relações multivariadas de maneira direta (Wolf et al., 2016).

Ademais, os grafos de visibilidade, quando derivados da conversão de séries temporais em redes complexas, destacam-se pela capacidade de lidar eficientemente com séries temporais não-lineares ou não-estacionárias (Lacasa & Toral, 2010b). A abordagem de grafos de visibilidade é especialmente robusta em capturar relações complexas entre eventos ao longo do tempo, mesmo em situações onde a evolução temporal apresenta não-linearidades ou variações significativas.

Apesar dessas vantagens, há poucos exemplos de aplicação de hipergrafos e grafos de visibilidade no estudo de sistemas de transporte, indicando uma oportunidade de pesquisa.

Neste trabalho, foram realizadas duas tarefas que se complementam, ambas utilizando modelos de rede complexa como base. A primeira modelou a disponibilidade de acesso ao transporte público aos moradores de assentamentos informais da cidade de São Paulo, obtendo a relação de linhas que passam por cada assentamento informal por meio do uso de hipergrafos. A segunda, a partir da demanda diária de passageiros das linhas obtida na tarefa anterior, comparou os padrões observados em grafos de visibilidade, presentes antes e durante a pandemia de COVID-19, trazendo indícios da intensidade do impacto causado. Com isso, espera atingir o objetivo de examinar o impacto da pandemia de COVID-19 na mobilidade urbana em assentamentos informais do município de São Paulo, investigando a acessibilidade e as mudanças nos padrões de mobilidade durante a pandemia, utilizando técnicas de redes complexas.

Materiais e Métodos

Redes complexas e hipergrafos

Um grafo é uma forma de representar relações entre elementos. O grafo compreende um conjunto de vértices (ou nós) que podem representar bairros, comunidades ou outros



pontos de interesse específicos no sistema, e um conjunto de arestas que representam as possíveis conexões entre os vértices. Por exemplo, em um sistema de transporte, um grafo poderia representar um modelo em que os nós são os cruzamentos semaforizados e as arestas são as ruas que formam os cruzamentos. O conjunto de arestas e vértices caracteriza a arquitetura do grafo, chamada de topologia (Strogatz, 2001).

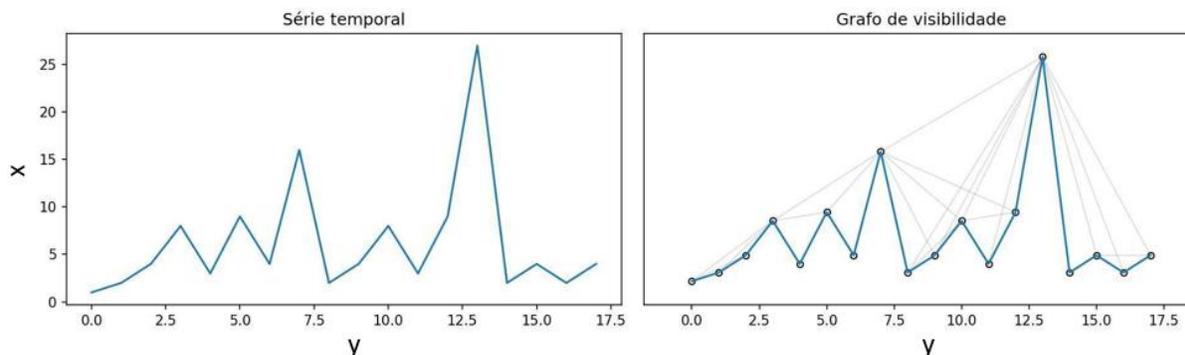
Redes complexas são grafos em que as relações exibem características coletivas ou comportamentos do sistema que surgem de interações entre os seus componentes individuais, mas não são diretamente previsíveis ou explicáveis apenas pela análise desses componentes isoladamente (Yerra & Levinson, 2005). Essas redes podem ser encontradas em diversos contextos, como nas redes sociais, nos sistemas de transporte, nas cadeias de suprimentos e em muitos outros sistemas complexos. As topologias observadas em redes complexas apresentam uma distribuição não-uniforme de conexões, agrupamentos e interdependências entre os nós. A análise dessas redes permite identificar padrões de conectividade, correlação ou proximidade entre os elementos de um sistema, e com isso auxilia a compreender melhor os comportamentos que ele apresenta, bem como sua robustez, modularidade e eficiência (Ding et al., 2019; Hearnshaw & Wilson, 2013).

A teoria de redes complexas também pode ser utilizada para estudar séries temporais. Isso é feito a partir da conversão da série temporal em uma estrutura de rede. Neste trabalho, adota-se o grafo de visibilidade como a técnica de conversão. No contexto de séries temporais, o grafo de visibilidade é uma representação que captura as relações de visibilidade entre os pontos da série. Ele é construído considerando a ordem temporal dos dados e estabelecendo conexões diretas entre os pontos que são mutuamente visíveis. Dois pontos são considerados mutuamente visíveis se não existir nenhum outro ponto que obstrua a linha de visão entre eles. Em outras palavras, se um ponto P_1 é visível a partir de um ponto P_2 , e vice-versa, uma aresta é criada entre P_1 e P_2 no grafo de visibilidade (Lacasa & Toral, 2010). A Figura 1 traz um exemplo de como os pontos de uma série temporal se transformam em vértices e arestas em

um grafo de visibilidade.

Figura 1

Analogia entre séries temporais e grafo de visibilidade



Fonte: Elaborado pelos autores

Na Figura 1, cada ponto da série temporal é convertido em um nó do grafo de visibilidade. As linhas em cinza representam as arestas.

Uma rede complexa envolve interações entre nós. Por outro lado, um hipergrafo é uma generalização de um grafo convencional, permitindo a modelagem de relações mais complexas entre os elementos. Enquanto um grafo tradicional consiste em nós conectados por arestas, um hipergrafo permite que uma aresta conecte um número qualquer de nós. As arestas de um hipergrafo são chamadas hiperarestas (Lee et al., 2022). Essa representação mais flexível é especialmente útil em situações onde as relações entre os elementos não se limitam a pares, mas podem envolver grupos maiores, como, por exemplo, em redes de transporte público com múltiplas linhas ou modais (López & Lozano, 2020).

Inserido na teoria de hipergrafos, um conceito fundamental é o de hipercaminho. Um hipercaminho em um hipergrafo é uma sequência de vértices e hiperarestas, podendo indicar, entre outras coisas, a existência de um trajeto entre dois pontos que não estão diretamente conectados por uma mesma hiperaresta. Essa definição estende o conceito tradicional de



caminho em grafos para incluir relações mais complexas em estruturas hipergráficas (Berge, 1984).

Dados de demanda de passageiros por linha de ônibus

Para este trabalho, considerou-se, na amostra, as linhas diurnas que estiveram ativas por mais de 90% do período na janela de tempo que compreende os períodos pré-pandêmico, pandêmico e o período a partir do fim das medidas de isolamento social, isto é, entre janeiro de 2016 e dezembro de 2022. É importante destacar que, embora existam algumas estatísticas sobre a demanda diária de passageiros no metrô, os dados disponíveis não correspondem a séries temporais, e sim a estatísticas descritivas, inviabilizando a aplicação dos grafos de visibilidade. Portanto, neste trabalho, apenas a série temporal da demanda de passageiros em linhas de ônibus foi considerada.

Os dados de demanda de passageiros de ônibus são fornecidos gratuitamente pela SPTRANS ¹em seu portal oficial, em forma de planilhas no formato .xls. Os dados foram abertos e manipulados utilizando a biblioteca *pandas*, em *Python*. Os dados de demanda de passageiros fornecidos pela SPTRANS necessitaram de pré-processamento, visto que continham, por exemplo, a presença de espaçamentos ou o uso inconsistente de caixa alta e/ou abreviaturas, o que poderia fazer com que uma mesma linha fosse computada como duas ou mais linhas diferentes. Para solucionar esse problema, filtrou-se do campo apenas os códigos das linhas. Depois, foi obtido do portal Geosampa ² um arquivo em formato shapefile contendo todas as linhas de ônibus e seus respectivos trajetos, cujos formatos são sequências de segmentos de reta, isto é, geometrias do tipo linestring.

Cruzando os dados de demanda de passageiros com os dados geográficos das linhas de ônibus obteve-se uma planilha contendo as linhas de ônibus, seus trajetos mapeados e sua

¹Disponível em:

https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/mobilidade/institucional/sptrans/aceso_a_informacao/index.php?p=343693

² Disponível em: https://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx



demanda de passageiros em cada dia do período estudado.

Em relação a demanda, considerou-se a demanda total de passageiros, inclusive aqueles que utilizaram o transporte gratuitamente devido à idade, deficiência física, entre outras condições. Observou-se que algumas tabelas apresentaram erros ao serem abertas com o uso da biblioteca *pandas*, sendo necessário abri-las por meio de um editor de planilhas, copiar os registros ali presentes e salvá-los em outra planilha. Os dados manipulados em *pandas* foram organizados de forma a gerar uma tabela de séries temporais.

As séries temporais foram subsequentemente convertidas em grafos de visibilidade com pesos, isto é, as arestas do grafo têm um valor embutido que diz respeito à natureza da conexão entre eles. Neste trabalho, considerando pares de pontos (x_0, y_0) e (x_1, y_1) , o peso das arestas reflete a distância euclidiana entre eles, dada por $d_{01} = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}$, em que x_0 e x_1 representam os valores medidos nos instantes de tempo y_0 e y_1 . Este método de cálculo da distância foi escolhido por ajudar a refletir as variações de demanda ao longo do tempo.

Dados geográficos e construção dos hipergrafos

Os conjuntos de dados contêm dados geográficos sobre todos os assentamentos informais, as linhas de ônibus e as estações de trem e metrô. Todos esses dados foram obtidos por meio do portal GeoSampa.

A manipulação dos dados geográficos foi realizada utilizando a biblioteca *geopandas*, do *Python*. Para estabelecer relações de proximidade entre os diferentes objetos geográficos, como assentamentos informais, estações, estações de trem e linhas de ônibus, foram necessárias manipulações preliminares com o objetivo de facilitar a aplicação dos algoritmos.

Os conjuntos de dados de estações de metrô e trem fornecem apenas a localização do centro da estação. No entanto, neste estudo, o objetivo foi identificar quais linhas de ônibus cruzam com assentamentos informais, bem como com estações de metrô e trem. Como os



dados obtidos trazem apenas o centroide das estações e não as dimensões completas dos edifícios que muitas vezes abrigam pontos de chegada para diversas linhas de ônibus, foi criado um *buffer de 50 metros* ao redor das estações.

Após a etapa de pré-processamento, foi criada uma tabela contendo todas as relações de interseção geométrica entre linhas de ônibus, assentamentos informais e estações/trem. Os dados foram, então, filtrados para a obtenção dos hipergrafos, representando as relações de interseções existentes. Foram selecionadas aqui todas as favelas, núcleos e cortiços (agrupados sob o nome de “assentamentos informais”) com mais de 100 domicílios, e todas as estações presentes apenas no interior dos limites do município de São Paulo. Excluiu-se os assentamentos com menos de 100 domicílios para evitar que ao construir o hipergrafo, uma estação fosse considerada como muita conectada aos assentamentos quando na verdade a maioria das conexões poderia estar se referindo a assentamentos muito pequenos, com poucas famílias. Além disso, ao usar todos os assentamentos, o resultado final da análise não se alterou de forma significativa.

Construção dos hipergrafos para a análise de acessibilidade

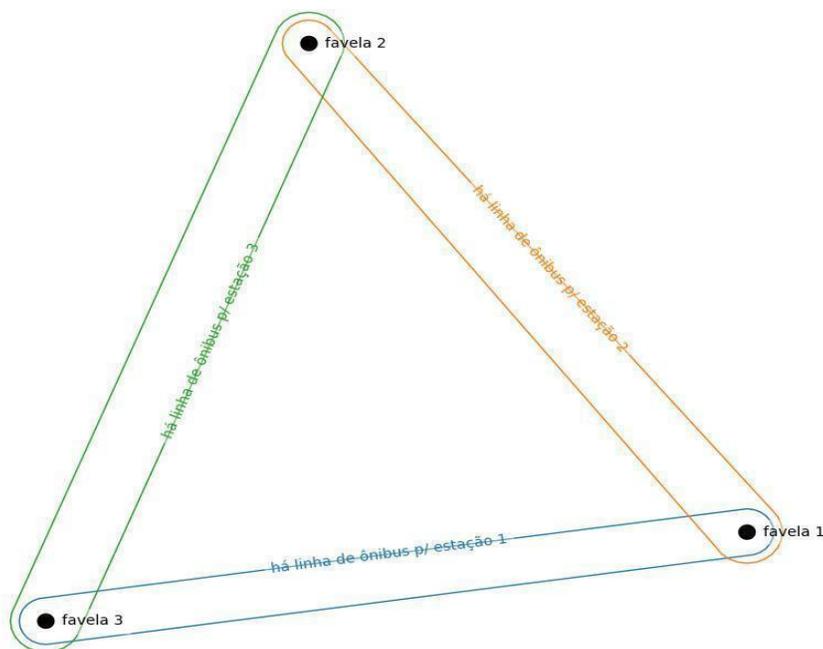
Para entender como os assentamentos informais se integram ao sistema de transporte, foram construídos diferentes modelos de hipergrafo, de modo a representar as distintas particularidades do sistema de transporte público.

O primeiro hipergrafo, chamado H_1 , foi construído para investigar a acessibilidade de assentamentos informais às estações por meio de linhas de ônibus. Para isso, cada assentamento informal foi considerado um nó e cada hiperaresta é uma estação alcançável por meio de ao menos uma linha de ônibus. Então, dois assentamentos informais estarão ligados entre si se puderem alcançar, por meio de ao menos uma linha de ônibus, a mesma estação. É possível que algumas estações sejam alcançáveis a pé, ou via aplicativos de transporte como o Uber, mas optou-se, aqui, por investigar o acesso via modal ônibus apenas, a fim de entender como os múltiplos modais de transporte público em massa se interconectam para fornecer

mobilidade. Um exemplo de hipergrafo H_1 é apresentado na Figura 2.

Figura 2

Ilustração de exemplo de hipergrafo H_1 .



Fonte: Elaborado pelos autores.

O acesso às estações também pode ser avaliado de forma mais realista se considerarmos que, por vezes, é preciso pegar mais de uma linha de ônibus para chegar a uma determinada localidade. Portanto, para representar esse aspecto da realidade, foi preciso inserir as estações e os assentamentos informais como nós em um segundo hipergrafo, H_2 , e as hiperarestas como linhas de ônibus, tal que dois elementos pertencem a uma mesma hiperaresta se forem interseccionados pela mesma linha.

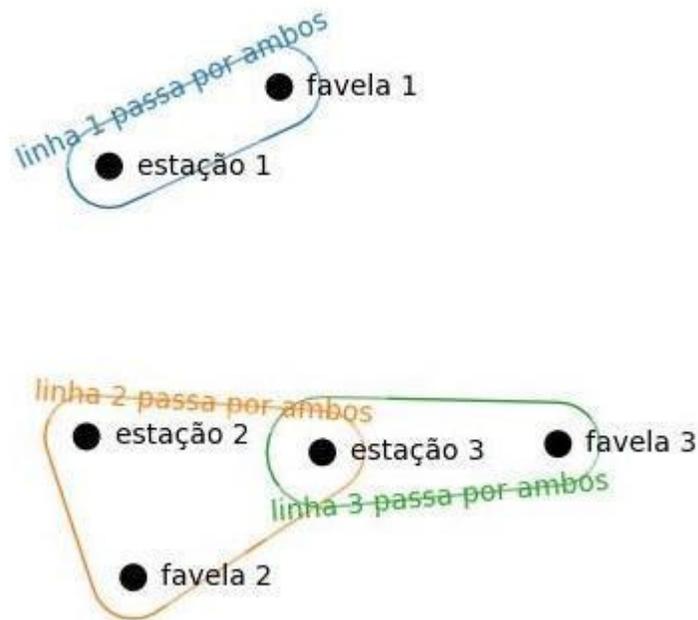
Com isso, a distância entre assentamentos informais e estações é o número de hiperarestas pelas quais um morador precisa passar para chegar até determinada estação.

Segundo a pesquisa Origem-Destino, realizada pelo metrô de São Paulo em 2017 (Metrô de São Paulo, 2019), apenas 9,14% das viagens realizadas, seja por ônibus, metrô ou trem, necessitavam de duas baldeações. Para três baldeações este número caía para 1,43%.

Embora seja incomum que um usuário procure chegar a uma estação por meio de sucessivas baldeações no modal ônibus apenas para acessar os modais trem e metrô, é importante lembrar que estações geram intenso impacto socioeconômico em seus arredores, gerando postos de trabalho e empreendedorismo e afetando a especulação imobiliária, o que se traduz em um componente relevante para avaliar o potencial de atração do local. É importante observar também que, de forma geral, a transferência entre modais é mais custosa do que manter-se no mesmo modal até chegar ao destino. A Figura 3 apresenta um exemplo do hipergrafo H_2 .

Figura 3

Ilustração de exemplo de hipergrafo H_2 .



Fonte: Elaborado pelos autores.

Avaliação das mudanças ocorridas durante a pandemia de COVID-19

O hipergrafo H_2 , explicado na seção 3.3, possui como hiperarestas as linhas de ônibus. Para cada linha de ônibus, foi selecionada a série temporal de demanda de passageiros, obtida conforme o método descrito na seção 3.1, e construído o grafo de visibilidade. Seja N o número de nós de um grafo, i um nó qualquer, $|E_i|$ o número de arestas pelas quais o nó se conecta a outros nós, k_i o número de vizinhos do nó, E_{vi} a soma do peso das arestas que os vizinhos do nó têm entre si, e $d(i, j)$ a distância do menor caminho entre dois nós, foram selecionados três parâmetros, descritos na Tabela 1.

Tabela 1

Definição e explicação dos parâmetros usados para avaliar o impacto da pandemia de COVID-19 nos grafos de visibilidade gerados a partir das séries temporais de demanda de passageiros antes e durante a pandemia

Parâmetro	Definição	Equação
Valor médio do grau (k) de um nó	Soma dos pesos das arestas de um nó i do grafo de visibilidade.	$G_i = \sum_{j \in E_i} E_{ij}$
Valor médio do coeficiente de <i>clustering</i>	Mede a tendência dos vizinhos de um nó i estarem interconectados entre si.	$C_i = \frac{2E_{vi}}{k_i(k_i - 1)}$
Mínimo caminho médio	O caminho entre dois nós i e j é o número de arestas que precisam ser atravessadas de um nó até outro. O caminho mínimo é aquele que, dentre todos os possíveis caminhos, possui o menor número de arestas.	$L = \frac{1}{N(N - 1)} \sum_{i \neq j} d(i, j)$

Fonte: elaborado pelos autores.

Resultados e Discussão

Infraestrutura disponível

Nesta seção, são apresentados os resultados que descrevem a estrutura de transporte



público disponível para as comunidades por meio dos hipergrafos H_1 e H_2 . Isso foi feito a partir dos métodos descritos nas seções 2.4 e 2.5. Assentamentos informais costumam se localizar em regiões periféricas ou de difícil acesso, prejudicando a mobilidade dos cidadãos que habitam esses locais (Brandão & de Mello Bueno, 2018). A fim de melhor contextualizar a discussão dos resultados, a Figura 4 apresenta um gráfico de barras que mostra o número de assentamentos informais com mais de 100 domicílios por região do município de São Paulo, conforme divisão da prefeitura de São Paulo³. Observa-se que a região Sul 2 é a que possui maior número de assentamentos. Em segundo e terceiro lugar, as regiões Leste 2 e Norte 2. Isto é, as regiões mais distantes do centro.

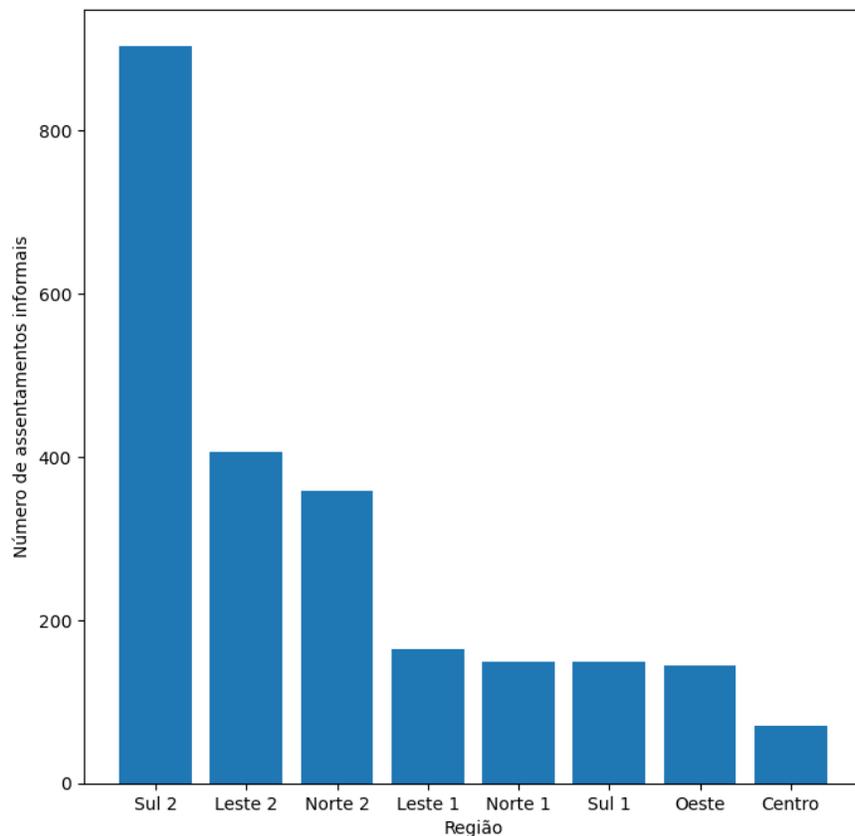
³ Disponível em:

https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infocidade_mapabase_subp+regiao8_A3_retrato_2.pdf



Figura 4

Número de assentamentos informais com mais de 100 domicílios por região. Município de São Paulo, 2021



Fonte: Elaborado pelos autores.

Foi identificado que uma grande quantidade de nós do hipergrafo H_1 (representando os assentamentos) tem grau nulo, o que significa que não pertencem a nenhuma hiperaresta (não há nenhuma linha de ônibus interseccionando um assentamento e uma estação simultaneamente). Naturalmente, pessoas podem acabar acessando estações por outros meios, como bicicleta, carona, motoristas de aplicativo, ou a pé, mas os resultados aqui apresentados se referem especificamente àqueles obtidos por meio dos hipergrafos H_1 e H_2 . Os assentamentos informais com maior número de estações alcançáveis ficam localizados nas regiões Sul 2, e é possível notar que eles ficam próximos a cruzamentos de diferentes linhas de



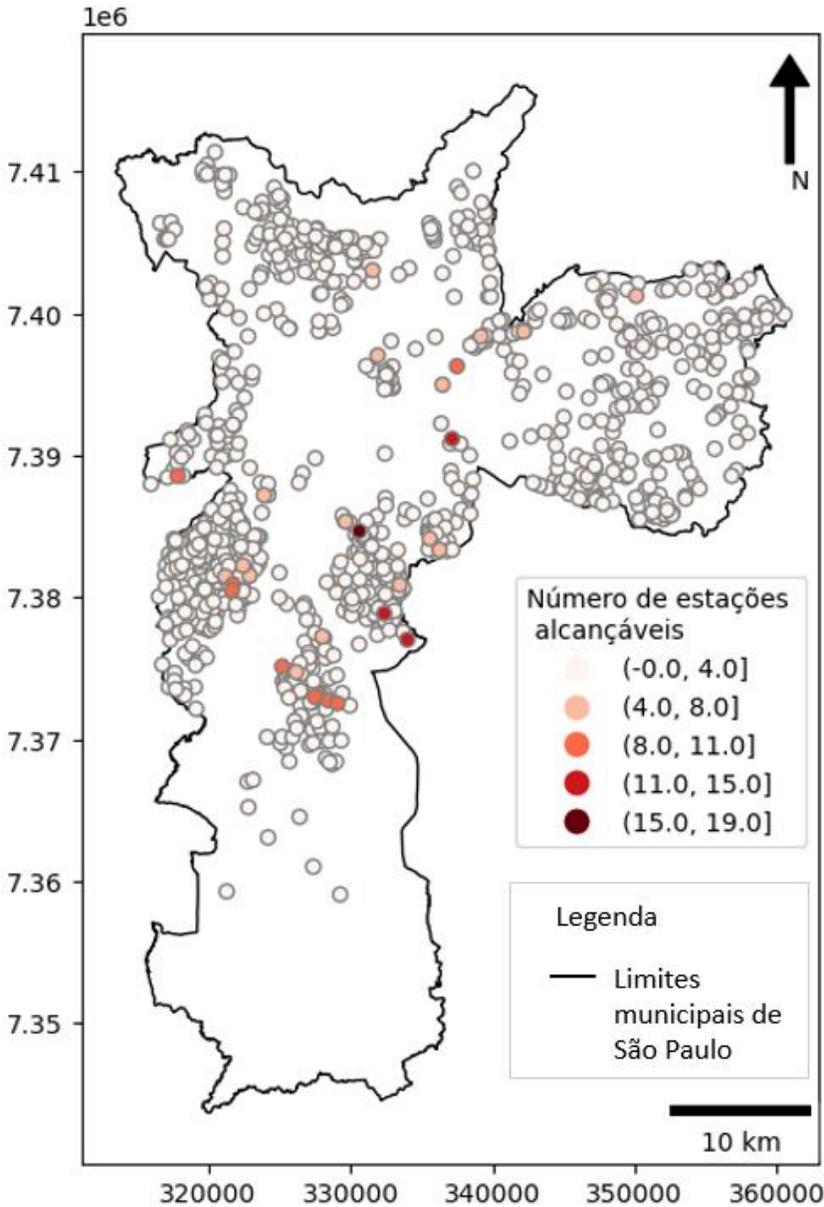
metrô e trem. Percebe-se também uma concentração das redes de trem e metrô ao redor do centro urbano de São Paulo, onde o volume de assentamentos informais é muito reduzido em comparação às periferias.

A Figura 5 apresenta as estações de metrô e trem e, a partir destas estações, quantos assentamentos informais são alcançáveis por meio de linhas de ônibus. As Figuras 5 e 6 mostram que os nós de H_1 com grau mais elevado representam assentamentos localizados nas regiões Sul 1 e Sul 2. Da mesma forma, o tamanho das hiperarestas (o número de comunidades alcançáveis pelas estações) é relativamente maior nessas regiões, embora possamos observar uma estação na região oeste que alcança muitas comunidades.

O acesso às estações possui uma dificuldade adicional notória, que é a superlotação em horários de pico. Ainda assim, estes são modais mais velozes do que o ônibus, que compete pelo espaço com um imenso volume de veículos particulares, ciclistas e pedestres, além de estar sujeito a aspectos urbanos e ambientais complexos, como inundações, ruas esburacadas etc. Sendo assim, a dificuldade de acesso a esses modais é bastante prejudicial para a mobilidade dos moradores de assentamentos informais.

Figura 5

Mapas contendo a posição de cada assentamento informal, colorido em função do número de linhas de ônibus próximas que chegam até alguma estação de trem ou metrô. Município de São Paulo, 2021

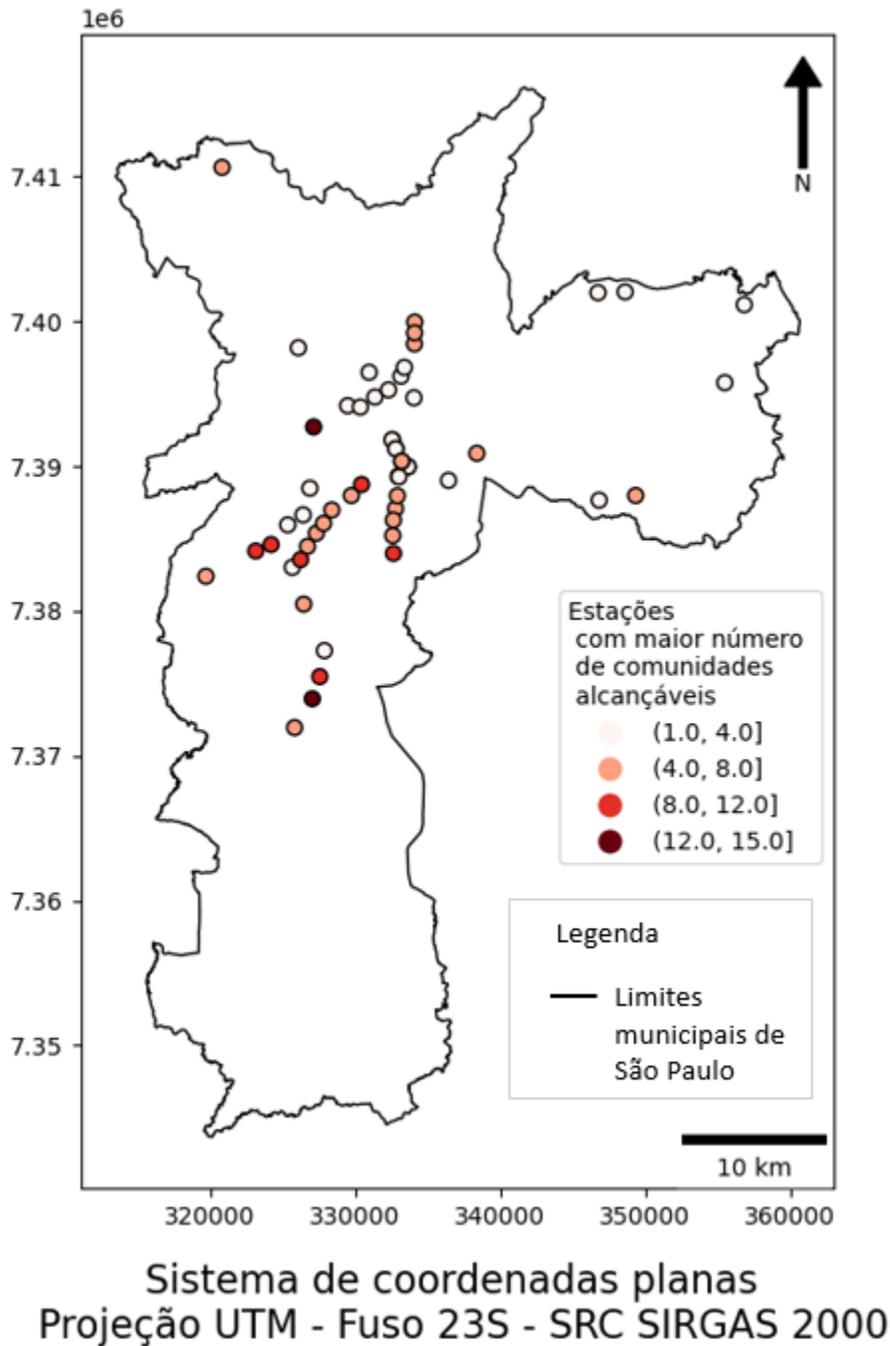


Sistema de coordenadas planas
Projeção UTM - Fuso 23S - SRC SIRGAS 2000

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 6

Estações coloridas em função do número de comunidades alcançáveis por meio de linhas de ônibus. Município de São Paulo, 2021



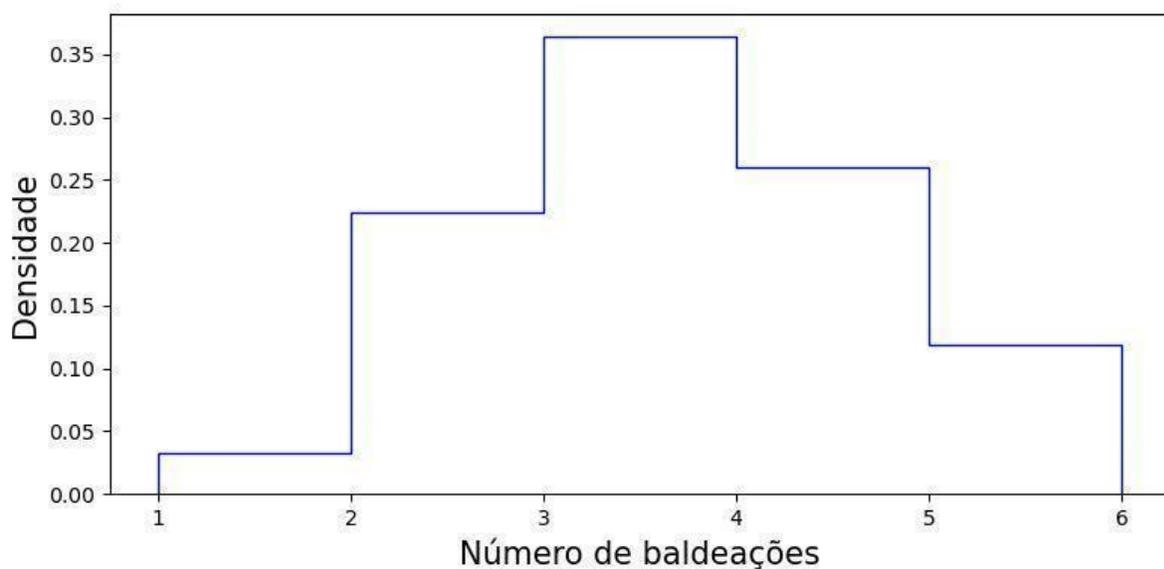
Fonte: Elaborado pelos autores.

O uso do hipergrafo H_2 permitiu calcular o número de baldeações necessárias a partir de um assentamento informal até uma estação de metrô ou trem. O histograma na Figura 6 apresenta os resultados obtidos. Vale lembrar que no hipergrafo H_2 , estações e assentamentos informais são os nós, enquanto as linhas de ônibus são as hiperarestas.

Uma grande vantagem do hipergrafo é permitir a representação adequada de situações que um modelo baseado em grafos não permitiria de forma tão simples, como, por exemplo, quando há a coexistência de duas hiperarestas, em que uma hiperaresta é um subconjunto da outra, mas representando linhas diferentes. Também não seria possível distinguir relações envolvendo três ou mais elementos, pois todas as relações seriam transformadas em relações par-a-par (Wolf et al., 2016). Isso possibilita averiguar mais detalhadamente a quantidade mínima de baldeações entre duas localidades.

Figura 7

Histograma contendo a distribuição do número de baldeações entre assentamentos informais e estações de trem e metrô. Município de São Paulo, 2021



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 7 foi construída calculando a menor quantidade de hiperarestas (linhas de

ônibus) que um morador de um assentamento informal precisa utilizar para chegar a uma estação qualquer por meio de uma linha de ônibus, ou, em linguagem de teoria dos grafos, o caminho mínimo entre dois nós no hipergrafo H_2 . Para melhor contextualizar essa informação, calcula-se um índice simples de eficiência para um assentamento informal, dado pela equação 1:

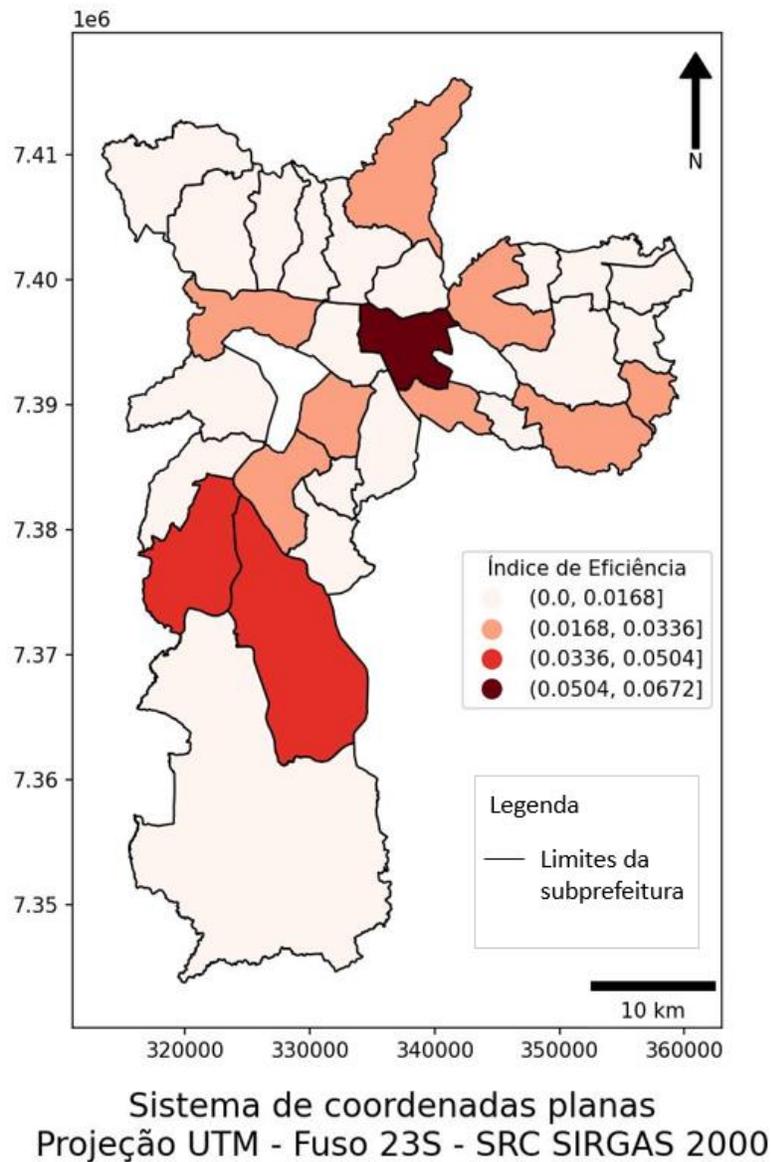
$$E_i = \sum_m^M \frac{1}{d_m} \quad (1)$$

em que E_i é o índice de eficiência do assentamento i , e d_m é o número de baldeações entre o assentamento informal i e a estação m . Quando não há um caminho no hipergrafo H_2 entre um assentamento e uma estação, $d = \infty$ e $\frac{1}{d} = 0$. Quanto maior E_i , mais opções de estações estão disponíveis ao assentamento e menor o número de baldeações necessárias para se chegar até uma estação.

Na Figura 8, apresenta-se o valor médio do índice de eficiência dos assentamentos em cada subprefeitura.

Figura 8

Distribuição da eficiência para as subprefeituras de São Paulo. Município de São Paulo, 2021



Fonte: Elaborado pelos autores.

O hipergrafo H_2 apresenta alguns detalhes interessantes que já podiam ser observados a partir da análise do hipergrafo H_1 (ambos hipergrafos foram descritos na seção 2.4). A maioria dos moradores de assentamentos informais não possui uma linha direta que os leve, de ônibus, até o metrô ou o trem, enquanto a média de baldeações necessárias entre os

assentamentos e as estações fica entre 3 e 4. É importante lembrar que, no hipergrafo H_2 (exemplificado na Figura 3 e representado efetivamente nas Figuras 7 e 8), as hiperarestas são linhas de ônibus, portanto, este é o único mecanismo que permite que um usuário, presente em um determinado local, se desloque neste modelo. Destaca-se que um modelo ainda mais realista levaria em conta também a transferência entre os diferentes modais. Ainda assim, o hipergrafo H_2 traz elementos adicionais para auxiliar a perceber a dificuldade de uma parcela significativa da sociedade em conseguir meios de integração com o sistema de transporte público.

Mudanças ocorridas durante a pandemia de COVID-19 analisada por meio de grafos de visibilidade

A pandemia de COVID-19 afetou os diferentes grupos sociais de formas distintas. Moradores da favela, em geral trabalhadores informais e autônomos, tiveram que continuar trabalhando normalmente (Gonçalves & Malfitano, 2022).

Consideram-se nesta análise dois cenários - um pré-pandemia e outro a partir do ano de 2020, ou seja, do início da pandemia. Ao observarmos o número de nós em uma hiperaresta, temos uma estimativa de quantas localidades uma linha de ônibus atende. A Figura 7 exhibe *boxplots* representando a distribuição de valores dos seguintes parâmetros: grau médio, coeficiente de *clustering* médio e mínimo caminho médio (obtidos por meio do grafo de visibilidade, conforme explicitado na seção 2.5) das 50 hiperarestas de H_2 com o maior número de nós. Tomou-se o cuidado de dividir as linhas de ônibus em três grupos, ranqueados segundo os valores médios de demanda antes de 2020, a saber, grupos com demanda baixa, média e elevada.

O grau médio de um grafo de visibilidade traz um indicativo dos pesos das arestas (a diferença de demanda de passageiros entre dois pontos da série temporal). Um maior grau médio pode indicar uma maior variabilidade de demanda de passageiros ou uma maior magnitude nos valores observados. Aqui, nota-se que a média e a variabilidade do grau médio



caíram para as linhas de média e alta demanda durante a pandemia, o que pode ter relação com a queda da demanda. No entanto, observa-se que a mudança foi bastante discreta para as linhas de baixa demanda.

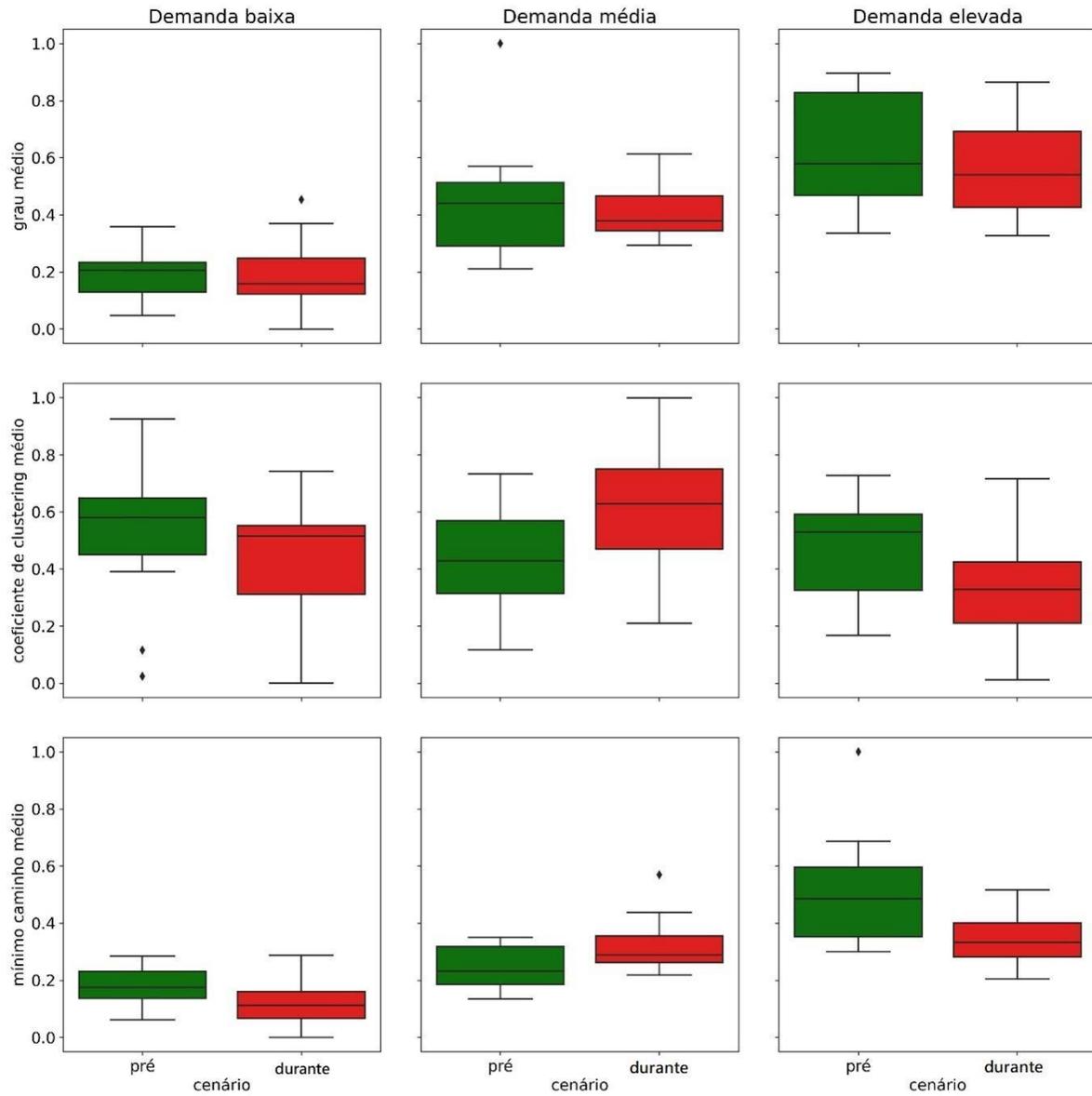
O coeficiente de *clustering* médio é um indicativo da distribuição de mínimos locais em uma série temporal, já que um ponto de mínimo local costuma ser visível para os pontos anterior e posterior, e ambos estes pontos também são visíveis um para o outro. Neste caso, esses três pontos se conectam entre si formando um padrão triangular, e o ponto de mínimo local possuirá um coeficiente de *clustering* elevado. Assim, uma variação do coeficiente de *clustering* médio de um grafo indica uma mudança nas relações de visibilidade. Para os casos de demanda média, observou-se um aumento do coeficiente de *clustering* médio no período pandêmico, o que pode ser tanto um indicativo de que há um pico predominante nas séries temporais após o início da pandemia (os picos são visíveis pela maioria dos nós) ou que existe a presença de periodicidades ou sazonalidades de forma mais consistente, em que picos e vales da série temporal se alternam de modo mais regular. Esta última opção é a mais provável, uma vez que a presença de picos nas séries temporais também influenciaria na variabilidade do grau médio de forma muito mais significativa do que a observada. O resultado difere para as linhas de demandas baixas e elevadas, nas quais os valores dos coeficientes de *clustering* médios caíram.

Por fim, o mínimo caminho médio segue a mesma tendência observada para o coeficiente de *clustering* médio. O fato de as linhas com demanda média e elevada possuírem menor variabilidade durante a pandemia é um indicador de que a demanda apresenta uma periodicidade mais estável nessas linhas neste período. Essas variabilidades caíram ainda mais para os casos de demanda elevada. Para as linhas de demanda baixa, a variabilidade do mínimo caminho médio ficou praticamente estável.



Figura 9

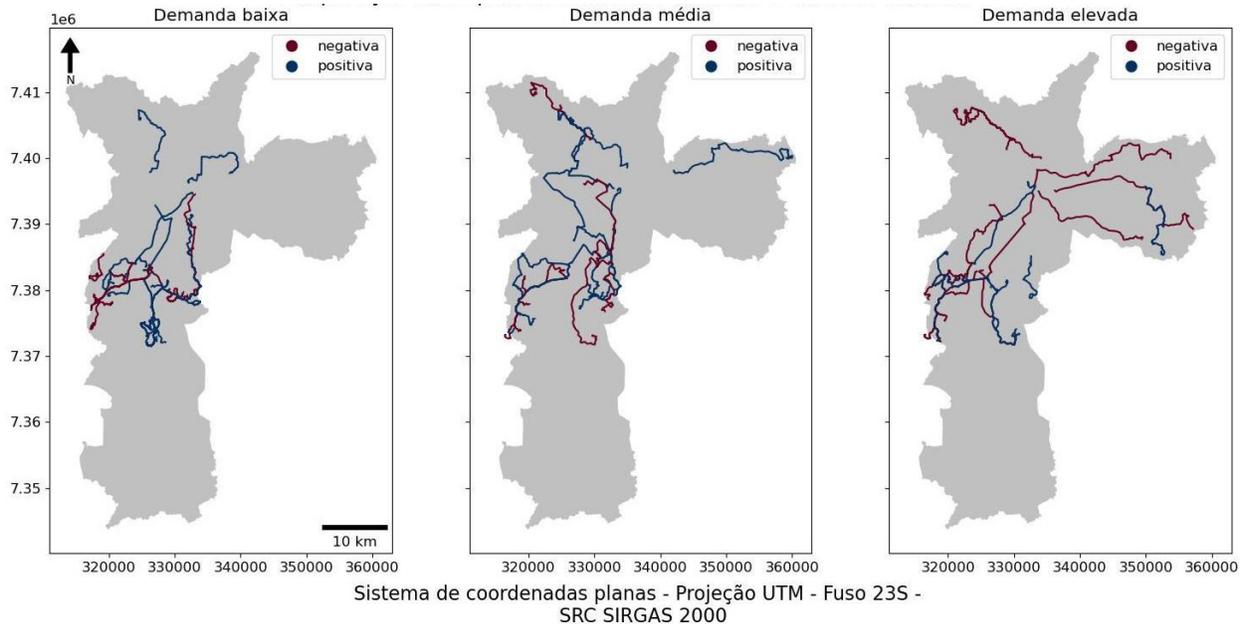
Boxplots dos parâmetros dos grafos de visibilidade, segundo tipo de demanda. Município de São Paulo, jan/2017 a dez/2022



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 10

Varição do grau médio dos grafos de visibilidade entre o período anterior (01/2016-12/2019) e o período durante a pandemia (01/2020-12/2022). Município de São Paulo. Período: 01/2016 a 12/2022



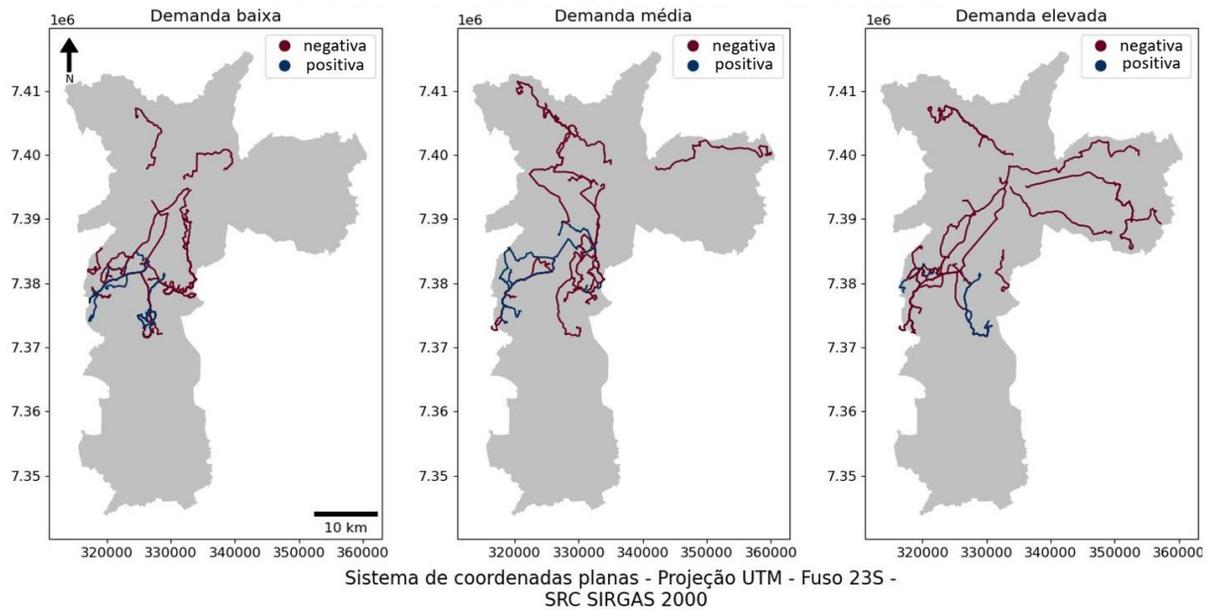
Fonte: elaborado pelos autores.

Observando a Figura 10, é possível perceber que, para as demandas baixas e médias, as linhas que tiveram uma variação negativa de grau médio parecem estar mais distantes do centro em relação às que tiveram variação positiva. Já para os casos de demanda elevada, algumas das linhas que tiveram variação negativa parecem estar mais próximas do centro, enquanto a maioria das linhas que tiveram variação positiva estão mais distantes.

Na Figura 11, a mesma análise é realizada tomando como métrica a variação do coeficiente de *clustering* médio. É possível observar que as linhas com trajeto próximo ao centro da cidade sofreram uma redução do coeficiente de *clustering* médio, indicando que a demanda se tornou mais irregular. Foi observada uma variação positiva do coeficiente de *clustering* médio em linhas mais próximas das regiões Sul 1 e Sul 2 do município.

Figura 11

Variação do coeficiente de clustering médio dos grafos de visibilidade entre o período anterior (01/2016-12/2019) e o período durante a pandemia (01/2020-12/2022). Município de São Paulo, 01/2016 a 12/2022



Fonte: elaborado pelos autores.

Considerações Finais

O uso de diferentes técnicas baseadas em redes complexas permitiu modelar e representar as relações espaciais entre assentamentos informais, linhas de ônibus, estações de trem e metrô. Foi possível averiguar que ainda há diversos desafios para melhor integrar a população de assentamentos informais ao sistema de transporte público no município de São Paulo, fornecendo melhores condições de acesso a emprego, saúde e educação. O modelo monocêntrico e as dificuldades de integrar, por meio de múltiplos modais, as regiões periféricas ao centro pode ser um fator impeditivo para o desenvolvimento dessas regiões.

Com base nas informações obtidas, analisou-se como os padrões de demanda de usuários se modificaram durante a pandemia de COVID-19. Foi possível notar que as mudanças atingiram as diferentes regiões da cidade de forma desigual. Além disso, linhas com maiores volumes de demanda apresentaram comportamento diferenciado em comparação às

linhas com menores volumes de demanda. As primeiras tendem a fazer um movimento centro-periferia e seu grau médio caiu, assim como a periodicidade das séries temporais, indicando que a demanda se modificou. O coeficiente de *clustering* médio e o mínimo caminho médio corroboram essa informação, e, ainda, apontam para um possível efeito de um planejamento mais restrito, pois as variabilidades observadas na Figura 7 caíram em alguns casos.

Como limitação, pontua-se que ainda é preciso estimar de forma mais aprofundada como cada propriedade da série temporal se reflete no grafo de visibilidade. Uma possível expansão deste trabalho seria decompor os pesos horizontais e verticais da série ao invés de usar a distância euclidiana entre as observações, o que permitiria isolar melhor os efeitos decorrentes da demanda e das mudanças de periodicidade. Este trabalho pode, ainda, ser expandido a partir da avaliação de outros hipergrafos mais completos ou enfatizando outros aspectos espaciais, como a proximidade da população com hospitais e escolas.

As relações capturadas pelo hipergrafo podem ser usadas para avaliar desigualdades de acesso a pólos de emprego, hospitais ou escolas, ou modificar os trajetos de linhas de ônibus de modo a aumentar a redundância do sistema. Os padrões capturados pelos grafos de visibilidade permitem discriminar diferentes alterações na dinâmica de sistemas de transporte, tal como a sensibilidade da demanda devido a uma alteração na política de transportes, o efeito de feriados, isenção da tarifa de transporte, eventos de massa, entre outros. O uso conjunto de ambas as técnicas facilita o direcionamento da análise para os elementos críticos de interesse, sem a necessidade de aplicar filtros em séries não estacionárias.

Referências

Berge, C. (1984). *Hypergraphs: combinatorics of finite sets* (Vol. 45). Elsevier. Available in:

<https://shop.elsevier.com/books/hypergraphs/berge/978-0-444-87489-4>

Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., & Hwang, D.-U. (2006). Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*, 424(4), 175–308.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>



Brandão, B. H. B., & de Mello Bueno, L. M. (2018). Intervenções de mobilidade e acessibilidade em programas de urbanização de favelas: análise em São Paulo e Rio de Janeiro de 1996 a 2012. *Arquiteturarevista*, 14(2), 231–242.

<https://doi.org/10.4013/arq.2018.142.11>

Delgado, F. C. M., Jesus, G. M. K., Alves, M. W. B. F., & Bezerra, B. S. (2022). Public Transport Perspectives for 2030 In Brazil: A Path Towards Sustainable Mobility. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 16(1), e02840–e02840. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v16.2840>

Ding, R., Ujang, N., Hamid, H. Bin, Manan, M. S. A., Li, R., Albadareen, S. S. M., Nochian, A., & Wu, J. (2019). Application of complex networks theory in urban traffic network researches. *Networks and Spatial Economics*, 19, 1281–1317.

<https://doi.org/10.1007/s11067-019-09466-5>

Dong, H., Ma, S., Jia, N., & Tian, J. (2021). Understanding public transport satisfaction in post COVID-19 pandemic. *Transport Policy*, 101, 81–88.

<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.12.004>

Fernandes, L. A. de C., Silva, C. A. F. da, Dameda, C., & Bicalho, P. P. G. de. (2020). Covid-19 and the Brazilian Reality: The Role of Favelas in Combating the Pandemic. *Frontiers in Sociology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsoc.2020.611990>

Gonçalves, M. V., & Malfitano, A. P. S. (2022). Jovens brasileiros em situação de pobreza: O cotidiano na favela. *Journal of Occupational Science*, 29(2), 263–278.

<https://doi.org/10.1080/14427591.2020.1854040>

Hearnshaw, E. J. S., & Wilson, M. M. J. (2013). A complex network approach to supply chain network theory. *International Journal of Operations & Production Management*, 33(4), 442–469. <https://doi.org/10.1108/01443571311307343>

Lacasa, L., & Toral, R. (2010). Description of stochastic and chaotic series using visibility graphs. *Phys. Rev. E*, 82(3), 36120. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.036120>



- Lee, G., Yoo, J., & Shin, K. (2022). Mining of real-world hypergraphs: Patterns, tools, and generators. *Proceedings of the 31st ACM International Conference on Information & Knowledge Management*, 5144–5147. <https://doi.org/10.1145/3511808.3557505>
- López, D., & Lozano, A. (2020). Shortest hyperpaths in a multimodal hypergraph with real-time information on some transit lines. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 137, 541–559. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.020>
- Metrô de São Paulo (2019). Relatório-Síntese OD 2017. Disponível em: <https://transparencia.metrosp.com.br/dataset/pesquisa-origem-e-destino/resource/b3d93105-f91e-43c6-b4c0-8d9c617a27fc>
- Rocha, F. (2021). Gestão dos corpos nas favelas e periferias no Rio de Janeiro: Das remoções à Covid-19. *Margens*, 15(24), 47–60. <http://dx.doi.org/10.18542/rmi.v15i24.10087>
- Strogatz, S. H. (2001). Exploring complex networks. *Nature*, 410(6825), 268–276. <https://doi.org/10.1038/35065725>
- Wolf, M. M., Klinvex, A. M., & Dunlavy, D. M. (2016). Advantages to modeling relational data using hypergraphs versus graphs. *2016 IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/HPEC.2016.7761624>
- Yerra, B. M., & Levinson, D. M. (2005). The emergence of hierarchy in transportation networks. *The Annals of Regional Science*, 39, 541–553. <https://doi.org/10.1007/s00168-005-0230-4>
- Zou, Y., Donner, R. V, Marwan, N., Donges, J. F., & Kurths, J. (2019). Complex network approaches to nonlinear time series analysis. *Physics Reports*, 787, 1–97. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.10.005>