

Além do tempo de comutação: os efeitos da acessibilidade nos comportamentos de viagem até o emprego na Região Metropolitana de São Paulo

Luiz Pedro Couto Santos Silva¹

Admir Antônio Betarelli Júnior¹

Resumo

O padrão de crescimento urbano orientado pelo uso do transporte motorizado resultou em dispersão espacial do emprego e da moradia, levando a aumentos no tempo de viagem de casa até o trabalho (comutação). Diante disso, a implementação de novas estações de transporte de alta capacidade tem sido uma das alternativas para melhorar o acesso ao serviço de transporte público, o nível de cobertura espacial, e reduzir o tempo médio de comutação, para melhorar as condições de mobilidade urbana. Este estudo contribui para esse debate e avalia os efeitos intraurbanos de estações de alta capacidade (metrô, trem, VLT e BRT) na probabilidade de comutação na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Para acomodar esta tarefa, esta análise procede a partir de uma abordagem de comutação gravitacional com uma estratégia de identificação dos efeitos de localização de 65 novas estações de alta capacidade. Os resultados conclusivos apontam que há efeitos gravitacionais relacionados à acessibilidade até o serviço de transporte público da RMSP, além de uma relação não linear de influência geográfica das estações nos comportamentos de viagem dos usuários de transporte público. Este estudo contribui com evidências que sugerem a necessidade de um aprofundamento da discussão sobre a acessibilidade ao serviço de transporte público nas motivações econômicas para os comportamentos de viagem em grandes regiões metropolitanas.

Palavras-chave: Comutação gravitacional; Economia dos transportes; Acessibilidade; Região Metropolitana de São Paulo

Código JEL: R41; R53; R11:

Área de pesquisa: Área 10 – Economia Regional e Urbana.

Abstract

The urban consolidation process oriented by motorized transport led to spatial dispersion of employment and residences. Thus, the expansion of high-capacity transit stations is an alternative to improve the access to transit service, as well as spatial coverage and reduction of mean commuting time, which might improve urban mobility. This study aims to contribute with this discussion, and evaluates the intraurban effects of high-capacity transit stations (subway, train, vlt and brt) in the commuting probability within the São Paulo Metropolitan Area (RMSP). For this purpose, this analysis uses a gravitational commuting approach in an identification strategy for the effects of 65 new transit high-capacity stations. The results are in favour of gravitational effects related to the accessibility to transit service in the RMSP, and for a non-linear geographic influence of such stations in the commuting behaviour for transit users. This study contributes to

¹ Programa de Pós-graduação em Economia da Universidade Federal de Juiz de Fora (PPGE-UFJF).

the debate about the influence of accessibility to transit service in the economic motivations for the commuting behaviours in large metropolitan areas.

Keywords: Gravitational commuting; Transport economics; Aecessibility; São Paulo Metropolitan Area

1. Introdução

Os comportamentos dos indivíduos nos mercados urbanos refletem motivações que direcionam geograficamente a alocação de recursos, e resultam na consolidação do espaço urbano (Anas et al., 1998; Fujita e Ogawa, 1996). Assim, o transporte motorizado orientou a consolidação urbana a partir do século XX, levando à dispersão e periferização espacial das moradias e dos postos de trabalho nas grandes cidades (Anas et al., 1998; Glaeser e Kahn, 2001). Esse processo de consolidação do espaço é endógeno, e as externalidades locais são forças econômicas que levam a aglomeração e congestão de atividades humanas nas cidades (Rossi-Hansberg, 2004). Diante disso, os comportamentos de viagem do local de residência até o trabalho dependem do quanto os indivíduos estão propensos a gastar os seus recursos com o deslocamento intraurbano, e, portanto, refletem as suas escolhas entre tais localizações (Ahfeldt, 2015).

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), foram observados aumentos na taxa de motorização das famílias e nos tempos de viagem do local de residência até o trabalho (Carvalho e Pereira, 2013), um problema inerente aos processos de consolidação de grandes espaços urbanos que foram voltados ao transporte motorizado (Cervero e Kang, 2011; Gaduh et al., 2022; Tang, 2021). As consequências de ineficiências da rede de transporte na produtividade dos trabalhadores da RMSP são altas. Estima-se que cada 10 minutos gastos no trânsito desta região reduzem o salário potencial médio do trabalhador em 2.7% (Haddad et al., 2015), e há evidências de grandes níveis de desigualdade de acessibilidade ao mercado de trabalho (Vieira e Haddad, 2015; Gianotti et al., 2021), resultante de um processo de urbanização endógeno aos seus mercados urbanos (Haddad e Barufi, 2016; Ostrensky et al., 2022).

Diante desses problemas de mobilidade urbana na infraestrutura de transporte, a RMSP expandiu a sua rede de transporte público através de novas estações de metrô, trem e BRT entre o período (2007-2017), a fim de promover velocidade de viagem. Apesar de avanços na compreensão dos efeitos do ambiente econômico e da estrutura urbana da RMSP, que levam a alta valoração econômica do tempo gasto com deslocamento da residência até o trabalho (Vieira e Haddad, 2015), há limitações em utilizar apenas o tempo de deslocamento como um mecanismo para a produtividade econômica. Uma importante suposição lógica sobre isso é a de que o esforço potencial do trabalhador é diluído com o aumento do tempo de deslocamento até o local de trabalho (Zenou, 2002; Haddad e Barufi, 2016).

Não obstante, para se criar um caminho causal entre comportamentos de viagem e produtividade, é necessário observar o custo da viagem de forma mais ampla. Assim, a

facilidade de acesso físico (acessibilidade) ao serviço do sistema de transporte público se torna um poderoso elemento para compreender os comportamentos de viagem dos indivíduos (El-geneidy et al., 2013; Lee e Bancekri, 2021; Murray et al., 1998). Nessa variante, este artigo tem por objetivo principal avaliar os efeitos locais estáticos da melhoria na acessibilidade por modal ativo (caminhada) até estações de transporte público de alta capacidade nos comportamentos de viagem na RMSP. Para tanto, a análise procede a partir de modelos econométricos derivados de uma abordagem da comutação gravitacional (Ahfeldt et al., 2015; Gaduh et al., 2022) sobre os dados longitudinais de viagem na RMSP, de infraestruturas viária e de transporte. As hipóteses subjacentes neste estudo denotam que o tempo de caminhada entre o trabalho e a residência até o local da estação importa para a decisão de realizar a viagem por transporte público, e de que estações de alta capacidade exercem força gravitacional nas localizações dos empregos e das residências. Os resultados desse estudo sustentam ambas as hipóteses e encontram relação decrescente das influências das estações com os tempos de caminhada que servem de referência para os índices de acessibilidade. Além desta introdução, o estudo contém uma revisão de literatura relevante para o tema, uma breve caracterização da RMSP, a descrição dos dados e da metodologia utilizados pela investigação empírica, os resultados e as considerações finais.

2. Referencial teórico

O modelo teórico AMM, sintetizado a partir dos trabalhos seminais de Alonso (1964), Muth (1969) e Mills (1969), pressupõe que os custos das viagens intraurbanas até o local de trabalho (comutação) são determinísticos para as escolhas dos locais de moradia na cidade. A estilização do modelo AMM advém do pressuposto de um único centro de emprego para toda a cidade (CBD), e permite inferir os custos dessas viagens no equilíbrio espacial urbano de forma linear, dado que todos os moradores comutam até a direção do CBD. A dispersão espacial do emprego nos centros urbanos a partir do século XX, impulsionada pelo transporte motorizado (Anas et al., 1998; Glaeser e Kahn, 2001), encontrou explicação teórica para a determinação dos locais das atividades econômicas através do potencial de produtividade local das firmas (Fujita e Ogawa, 1982; Fujita e Thisse, 1996). Assim, os efeitos das economias de aglomeração e dispersão em centros urbanos afetam o tamanho e a forma das estruturas internas do uso de solo nas cidades (Lucas e Rossi-Hansberg, 2002; Rossi-Hansberg, 2004).

Diante disso, os padrões de dispersão e aglomeração espacial de externalidades que conduziram as geografias econômicas nas cidades afetaram os comportamentos de viagem dos indivíduos, dado que o transporte motorizado alterou significativamente os custos de transporte intraurbanas (Bento et al., 2005; Gordan e Lee, 2015; Anas et al., 1998). Em alguns centros urbanos, a dispersão do emprego e das moradias elevaram as distâncias espaciais das comutações (Zhato et al., 2017; Bento et al., 2005). Porém, em regiões que tiveram sucesso em promover maior uso do transporte público, houve tendência de redução de efeitos de congestão do crescimento urbano (Van de Coevering e Schwanen, 2006; Acker e Witlox, 2010).

Os sistemas de transporte público visam criar externalidades locais, as quais podem ser observadas por meio da facilitação entre interações de atividades em diversos mercados urbanos, tais como moradia (Du e Mulley, 2006; Cervero e Kang, 2011; Martínez e Viegas, 2009; Lieske et al., 2021), em mercados de trabalho (Boijosly et al., 2017; Haddad e Barufi, 2016; Bastiaansseen et al., 2021).

Em suma, há relação entre os níveis de satisfação dos indivíduos que vivem nas cidades e a facilidade de deslocamento até múltiplas regiões intraurbanas que cada local tem o potencial de proporcionar. Ademais, a decisão do local de residência e de trabalho tende a ser simultânea, e além das forças de mercado, envolve aspectos idiossincráticos, que apresentam alguma relação com as características locais (Ahfeldt et al., 2015). Esses elementos levam a implicações não negligenciáveis de auto-seleção entre moradores em localidades urbanas (Bagley e Mokhtarian, 2002; Cao et al., 2009).

Como a distribuição espacial das atividades econômicas é dispersa e o uso do solo urbano tende a ser misto entre residencial e comercial, a mensuração do nível acessibilidade local deve ser multidirecional. Assim, Hansen (1959) define a acessibilidade como a facilidade de interação entre uma localidade e diversas atividades de uso do solo, dentro das condições da rede de transporte. Nessa variante, Geurs e Wee (2004) defendem que nível de acessibilidade deve ser sensível à qualidade do serviço da rede de transporte público, além de se relacionar com a mudança de custo de viagem e de produtividade das firmas. Dessa forma, a acessibilidade relativa capta o grau de conexão geográfica potencial entre duas localidades. Destarte, quanto maior for o número de opções acessíveis ao menor custo, seja ele em termos monetários ou de tempo, então melhor será o nível de acessibilidade que uma localidade oferece (Handy e Niemeier, 1997).

Dentre os modos de transporte para viagens intra urbanas, há o de transporte ativo, conceituado como aquele que ocorre por meio de caminhada, bicicleta, ou cuja mobilidade é autossuficiente, isto é, movida exclusivamente pelo esforço a nível individual (Handy, 2015). Já o transporte público, utilizado para deslocamentos mais longos, é essencial para a sustentabilidade de redes de transporte urbanas (Vale, 2021). O transporte ativo e o transporte público podem ser considerados dois lados de uma mesma moeda. Esta conexão é essencial para a qualidade da viagem por transporte público, pois toda viagem realizada por este modo de transporte se inicia ou finaliza com a caminhada até ou do local da estação (Lee e Bancekri, 2021; Murray et al., 1998). Dessa maneira, o acesso individual ao serviço de transporte público é definido como o nível da oportunidade de utilizar o sistema de transporte público (Murray et al., 1998).

Diante disso, defende-se a existência de distâncias de decaimento das áreas geográficas de influência das estações de transporte público (El-geneidy et al., 2014). Assim, em cada sistema de transporte público, as suas estações apresentam um raio de cobertura, que varia de acordo com características populacionais, design das ruas e da forma urbana, e a capacidade de cobertura da rede de transporte público (El-geneidy et al., 2014; Boijosly et al., 2020; Florindo et al., 2019).

As áreas de influência das estações de transporte público reforçam o caráter local das espacialidades das externalidades urbanas, na dimensão da acessibilidade. Desse modo, é possível explicar a formação dos incentivos econômicos de ocupação do solo nas proximidades da rede de transporte público (Rossi-Hansberg, 2004). Esses incentivos econômicos se refletem nos comportamentos de viagem intraurbanas. A estrutura interna das atividades econômicas se relaciona diretamente com as condições de mobilidade, em que locais com melhores condições de infraestrutura urbana, tanto para as firmas quanto para os trabalhadores, exercem forças de gravitação nas comutações entre pares de origem e destino (Ahfeldt, 2015). Isso é observado por meio de um parâmetro de impedância na probabilidade de comutação entre localidades, que tem demonstrado consistência em diferentes áreas urbanas, variando apenas em magnitude (Ahfeldt e Wendland, 2016; Ahrens et al., 2020; Gaduh et al., 2022).

É possível vincular o conceito do parâmetro de impedância de comutações gravitacionais com mudanças de infraestruturas locais, que se traduzem em efeitos estáticos de ganhos de economias de aglomeração (Combes e Gobillon, 2015). Dessa forma, supõe-se que mudanças de infraestrutura na rede de transporte podem alterar significativamente as forças de comutação gravitacional nas localidades que usufruírem deste benefício (Gaduh et al., 2022).

3. A estrutura espacial da Região Metropolitana de São Paulo

A região metropolitana de São Paulo (RMSP) é a maior aglomeração urbana da América Latina, com aproximadamente 22 milhões de habitantes, e concentra aproximadamente 19 % do PIB nacional (IBGE, 2021). Esta região apresenta alto nível de integração territorial, através de um sistema de transporte terrestre estruturado com linhas de metrô, trem e BRT (Haddad et al., 2015; Boijosly et al., 2021). A grande densidade populacional e extensão territorial da RMSP tem desafiado a eficiência da sua rede de transporte, com aumentos significativos no tempo médio de deslocamento de casa até o trabalho em anos recentes (Carvalho e Pereira, 2013; Pereira e Schwanen, 2013).

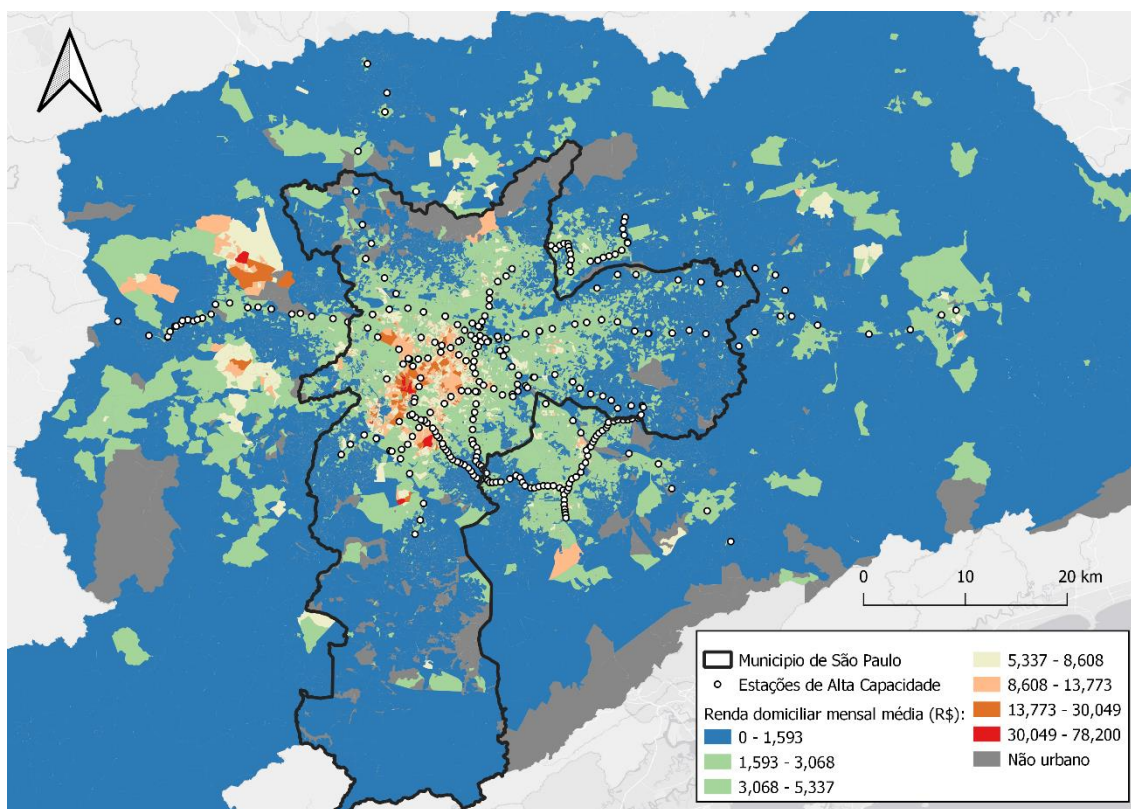
Assim, os itens de habitação e transporte apresentaram pesos crescentes ao longo do período (1996-2009) no custo de vida na RMSP, que figurou como a segunda região metropolitana com o maior custo de vida do Brasil em 2014 (Almeida e Azzoni, 2016). Esta lógica de consumo pode ser explicada porque o desempenho no mercado de trabalho desta região está diretamente ligado ao tempo de comutação (Haddad e Vieira, 2015; Haddad e Barufi, 2016). Nesse cenário, houve grande demanda social pela melhoria da eficiência da rede de transporte urbano.

A princípio, entre os anos de 2008 e 2020, foram previstas expansões do sistema transporte público da RMSP através de 253 km da rede de metrô em 130 estações, 249 km de trem ou veículos leves sobre trilhos (VLTs) em 70 estações, e 230 km de corredores exclusivos de ônibus (BRTs) em 29 estações (Silva, 2017). Porém, entre o período (2007-2017), foram entregues apenas 65 novas estações de alta capacidade para estas três dimensões do transporte público.

Todavia, diante do contexto socioeconômico da RMSP, há uma intensa disputa pela proximidade do sistema de transporte público de alta capacidade, resultando em um processo de segregação espacial da rede de transporte público para a população mais pobre (Ostrensky et al., 2022). Assim, esse processo de ocupação do solo urbano na RMSP alimenta uma forte restrição econômica de acesso à velocidade de comutação para esta região (Boijosly, 2021; Gianotti et al., 2021).

A Figura 1 ilustra que mesmo em 2017, após a expansão do número de estações de alta capacidade, a infraestrutura de transporte público de alta capacidade na RMSP esteve melhor servida para a população de maior renda. Perante a discussão sobre a importância de minimizar o tempo de comutação para melhor desempenho no mercado de trabalho (Haddad e Barufi, 2016; Vieira e Haddad, 2016), é razoável pressupor que, mesmo entre os usuários de transporte público, há forte relação de disputa pela proximidade física de estações de transporte público de alta capacidade.

Figura 1 – Distribuição espacial da renda em 2010 e das estações de alta capacidade em 2017, na RMSP



Fonte: Censo 2010 e Mobilidados.

Partindo do pressuposto de que menores distâncias de caminhada até ou da estação de transporte público aumentam o conforto da viagem, então é razoável supor que a infraestrutura de transporte público da RMSP exerce forças endógenas na decisão da localização da residência e da moradia, o que por sua vez, afetaria os comportamentos de viagem dos seus usuários. Esta é, portanto, a hipótese a ser testada por este estudo.

4. Metodologia

A seguir, são apresentadas as bases de dados utilizadas pelo estudo, bem como a estratégia para compatibilizá-las espacialmente nas unidades espaciais utilizadas por este estudo. Assim, é apresentada a estratégia para calcular a acessibilidade até estações de alta capacidade, e as formas reduzidas dos modelos econométricos utilizados para a identificação dos efeitos das estações de alta capacidade nos comportamentos de viagem.

4.1. Base de dados

Este estudo utilizou duas bases de dados para obter as informações de viagens intraurbanas ao longo da Região Metropolitana de São Paulo. Para as informações individuais, foram utilizados microdados das Pesquisas Origem Destino de São Paulo (OD SP) dos anos de 2007 e 2017, que contém informações detalhadas sobre viagens realizadas dentro de 39 municípios da RMSP (Metro, 2007, Metro, 2017). Essas bases de dados da pesquisa OD SP informam a geolocalização de moradia, trabalho e diversas características socioeconômicas dos entrevistados, com amostragem baseada em setores censitários.

Foram geocodificadas as localizações dos respectivos locais de residência da população que comutou até o trabalho dentro da RM SP por transporte público (metrô, trem, BRT), bem como os seus respectivos locais de trabalho. Ambos foram agregados espacialmente a nível de hexágonos de resolução 7 do h3jsr, com áreas de 0,517 km², que compuseram a unidade espacial utilizada nos modelos econométricos desse estudo.

Para dados da rede de transporte, foi utilizada uma base de dados geocodificada de estações de alta capacidade, isto é, aquelas que operam dentro das redes de: metrô, trem de superfície e BRT. Esses dados são fornecidos pelo site Mobilidados, idealizado pelo Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (IDTP) do Brasil². Com essa base, foi possível localizar as estações de alta capacidade de toda a rede de transporte público da RMSP, levando em conta as datas de início das suas operações.

Os dados de informação de viagem por transporte ativo até as estações da rede de transporte público foram obtidos por matrizes de tempo de viagem calculadas pelo pacote r5r, em linguagem R, desenvolvido por Pereira et al., (2022). Estes dados de tempo de viagem são calculados a partir de uma rede de vias disponível na plataforma Open Street Map.

Dentro dessa rede de transporte, foi calibrada uma velocidade de caminhada de 3.6 quilômetros por hora³, atribuindo as informações de tempo de viagem à hexágonos na RMSP em resolução 9 do h3jsr, que possuem área de 0.11 km. Optou-se por utilizar esta resolução menor com base na região de influência da estação (El-geneidy et al., 2014;

² Para mais detalhes, ver: https://mobilidados.org.br/database?category_slug=dados-georreferenciados-da-infraestrutura-de-transporte.

³ Esta é a velocidade de caminhada comum observada pela literatura. Ver: (Pereira et al., 2022 e).

Florindo, 2019), dado que cada diagonal desses hexágonos em resolução 9 tem a medida de 400 metros.

A Tabela 1 aponta que, entre os anos de 2007 e 2017, o tempo médio de viagem entre os usuários de transporte público cresceu em média 25%, enquanto que as distâncias de comutação cresceram em média 19%. Esse aumento desproporcional entre distância e tempo de viagem sugere que houve uma leve redução de velocidade nas viagens realizadas por estes meios de transporte.

Tabela 1 – Estatística Descritiva para usuários de transporte público na RMSP.

Ano	2007				2017			
	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Tempo de comutação	55	38.98	1	270	69 11,36	35.97	5	240
Distancia total ⁴	9,530	8,176	16.42	8,4099	6	8,515	189	64,735
% do tempo caminhando	15.28	16	1	97.5	22.26	14.98	1	93.3
N. de Comut. por hexágono ⁵	27.76	31.12	10	459	26.83	30.5	10	446

Fonte: Elaboração própria, a partir das bases de dados das pesquisas OD SP.

Ainda na Tabela 1, os tempos totais de caminhada durante a viagem por transporte público cresceram em média quase 7 pontos percentuais, mesmo havendo expansão do número de estações de alta capacidade dentro da região de estudo. Além disso, as unidades espaciais adotadas por este estudo detectaram, em média, valores próximos a 27 viagens entre pares de hexágonos (origem e destino) para os dois anos de análise. Para que os pares de origem e destino entrem na análise, devem atender ao critério de haver pelo menos 10 viagens entre si, considerando os dados brutos. Este é o mesmo critério utilizado por Ahfeldt et al. (2015) e Gaduh et al. (2022) para reduzir algum potencial viés amostral nas estimativas, devido a uma baixa quantidade informações de viagem.

4.2. Índice de Acessibilidade Cumulativa

Com as informações obtidas nas matrizes de viagem, foram calculados índices de acessibilidade cumulativa por caminhada até estações de alta capacidade de transporte público para a RMSP, representados da seguinte forma:

$$A_{ia} = \sum_{j=1}^n Est_i \cdot f C_{ij} \quad (1)$$

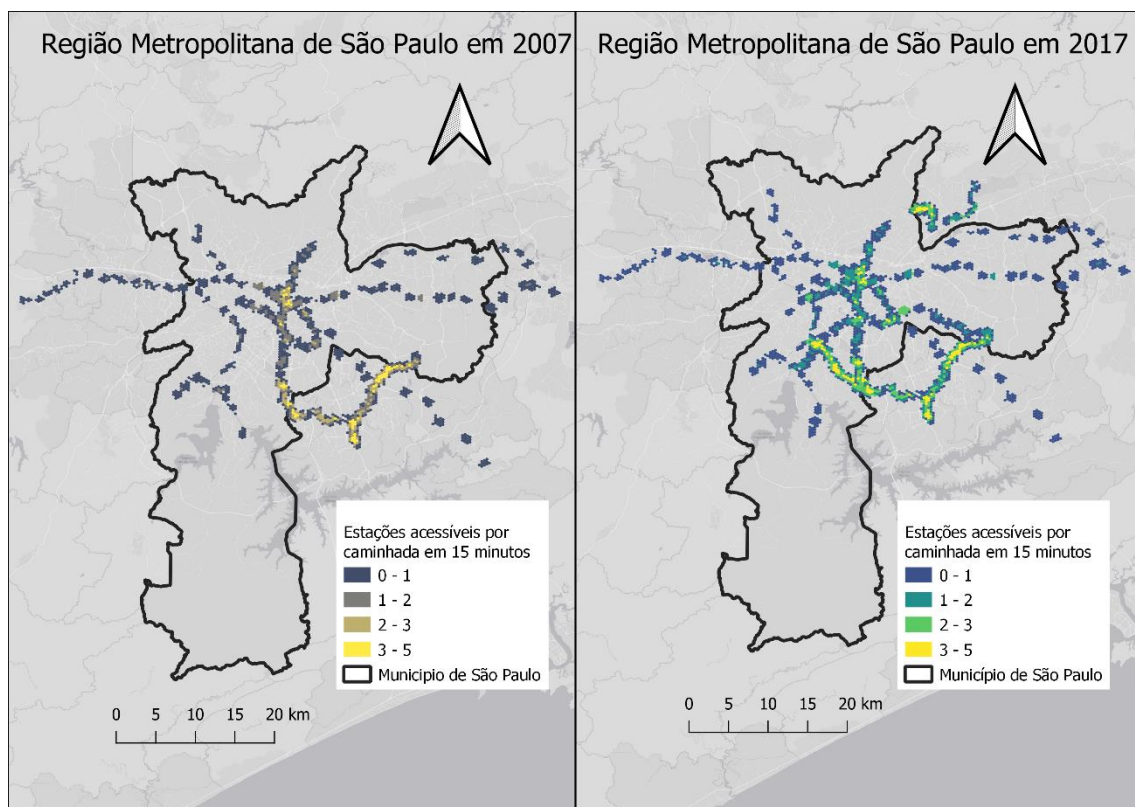
⁴ Distância linear entre os pares de origem e destino.

⁵ Em resolução 7 do h3sjr, com área de 0.517 km².

$$fC_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } C_{ij} \leq t \\ 0 & \text{se } C_{ij} > t \end{cases} \quad (2)$$

em que A_i é a acessibilidade cumulativa por modal ativo do hexágono i no ano a até estações de alta capacidade na RMSP. Dessa forma, fC_{ij} são funções de peso para os índices de acessibilidade, e t é o tempo limite adotado para alcançar uma estação de alta capacidade caminhando pela rede de calçadas da RMSP⁶. Como medida de sensibilidade, foram adotados quatro limites de tempo para t : 10, 15 e 20 minutos. Assim, a acessibilidade por transporte ativo adotada na metodologia deste estudo é observada a nível local (Vale et al., 2013; Geurs e Wee, 2004), sendo cada um deles, um hexágono de 0.1 km² (resolução 9). A figura 2 apresenta a distribuição espacial da acessibilidade ao serviço de transporte público.

Figura 2. Distribuição da acessibilidade cumulativa a estações de alta capacidade na RMSP, para os anos de 2007 e 2017.



Fonte: Elaboração própria, a partir da base de dados do estudo.

⁶ Para isto, foram utilizados dados do Open Street Maps, assumindo que não houve mudanças significativas nesta rede viária durante o período (2007-2017).

4.3 Modelos Econométricos

As estratégias de identificação desse estudo utilizaram modelos econométricos com a abordagem de comutação gravitacional (Ahfeldt et al, 2015), que são representados da seguinte forma:

$$\log\pi_{oda} = \beta_0 + \beta_1 \log\text{Tempo}_{oda} + O_{oa} + D_{da} + \varepsilon \quad (3)$$

em que $\log\pi_{od}$ é o log da probabilidade condicional de os indivíduos da zona de origem o terem comutado das suas residências até os seus respectivos locais de trabalho na zona de destino d , por transporte público no ano a . Esta probabilidade de comutação é obtida pelo total de viagens realizadas de o até d , dividido pela população total que reside em o . Tempo é o log da média do tempo de viagem entre os pares de origem-destino o e d . Além disso, O e D são efeitos fixos para as zonas de origem e destino, respectivamente, e controlam efeitos de *push* e *pulling* nas comutações, e ε é um termo de erro robusto.

A outra estratégia de identificação adotada por este estudo é uma expansão da abordagem de modelagem econométrica gravitacional da equação (3), e segue a intuição de Gaduh et al. (2022), para captar efeitos locais de mudanças de infraestrutura de transporte público nos comportamentos de viagem. Porém, o modelo desenvolvido pelo presente estudo incorpora o conceito de acessibilidade, e tem seguinte especificação:

$$\log\pi_{oda} = \beta_0 + \varphi_{od} + \beta_1 \text{AcessEst}_{oa} + \beta_2 \text{AcessEst}_{da} + \beta_3 (\text{AcessEst}_{oa} \cdot \text{AcessEst}_{da}) + \varepsilon \quad (4)$$

em que AcessEst é uma dummy que indica se o local de origem ou destino está a menos de 10, 15 ou 20 minutos de uma estação de alta capacidade da rede metropolitana de transporte público da RMSP, conforme metodologia de cálculo descrita na seção 4.1. Por fim, φ é um efeito fixo do par da unidade espacial de origem-destino, e ε é um termo de erro robusto.

Portanto, β_3 é um coeficiente que estima se os locais de origem e de destino em que A_{ia} é maior do que zero há alguma diferença estatística, com relação a todos os hexágonos, na probabilidade de comutação entre si.

5. Resultados

Foram adotadas duas estratégias de estimação para entender o comportamento de viagem para a RMSP entre o período (200-2017). A primeira delas está na Tabela 2, e segue a equação (3), com o objetivo de captar os parâmetros de impedância de probabilidade de comutação entre pares de origem e destino. Os modelos (1-3) da Tabela 2 sugerem relações negativas entre o tempo total de comutação e a probabilidade de viagem entre os pares de origem destino para quem utilizou o modo de transporte público. É possível observar nos modelos 1 e 2, estimados por MQO, que há diferenças nas magnitudes entre os dois períodos.

De acordo com o modelo 1, em 2007 a probabilidade de comutar apresentava uma elasticidade de -1.56 para cada minuto gasto com comutação, enquanto em 2017 este valor caiu para -1.30. Portanto, os modelos 1 e 2 indicam que houve uma redução da sensibilidade do comportamento de viagem com relação ao tempo gasto no percurso do local de residência até o local de trabalho. A origem desta redução de sensibilidade em um período de 10 anos para a RMSP pode ter a diferentes fatores, como aumento de congestionamento, dos preços de moradia, ou até mesmo redução de vagas de emprego, dada a crise econômica que se iniciou em 2014. Assim, todas as possíveis fontes mencionadas afetariam o comportamento de viagem dos trabalhadores de forma exógena. Porém, a compreensão das origens desta redução da sensibilidade para os usuários e transporte público na RMSP está além do escopo deste estudo.

Tabela 2 – Resultados dos modelos de comutação gravitacional para o tempo

	<i>Variável dependente: Probabilidade de comutação</i>			
	2007	2017	2007-2017	Painel
	(1)	(2)	(3)	(4)
Log do tempo de comutação	-1.566*** (0.085)	-1.308*** (0.080)	-1.083*** (0.047)	-1.026*** (0.045)
Ef da Origem	Sim	Sim	Sim	Não
Ef do Destino	Sim	Sim	Sim	Não
Ef da Origem-Destino	Não	Não	Não	Sim
Observações	800	814	1,614	1,636
R ²	0.905	0.941	0.869	0.239
R ² Ajustado	0.757	0.792	0.774	0.238
Residual Std. Error	0.578 (df = 314)	0.529 (df = 229)	0.563 (df = 930)	
F Statistic	6.132***	6.306***	9.067***	513.711***

Fonte: Elaboração própria, a partir da base de dados do estudo.

Notas: Erros-padrão robustos em parênteses. p-valor < 0.1*, p-valor < 0.5**, p-valor < 0.1***.

Já o modelo 3 segue uma especificação de dados empilhados que capta efeitos fixos da origem e do destino, e o modelo 4, com dados em painel, capta os efeitos fixos do par origem e destino ao longo do período. Em ambos os modelos, foram encontradas relações que corroboram o tempo total de viagem como um parâmetro de impedância para comutações entre o período (2007-2017). Estes resultados para os modelos 3 e 4

corroboram os obtidos por Ahfeldt et al. (2015), Gaduh et al., (2022), Ahfeldt e Wendland (2016) e Ahrens et al. (2020). A magnitude dos coeficientes encontrados para a RMSP é superior àquela obtida para a região metropolitana de Jakarta, na Indonésia, e inferior ao valor de impedância observado para a região metropolitana de Frankfurt, na Alemanha.

Uma outra estratégia empírica feita por este estudo buscou identificar efeitos da acessibilidade ao serviço de transporte público no comportamento de viagem. Os modelos 5-7 na Tabela 3 seguem a especificação da equação 4. Esses resultados sugerem que os pares de hexágonos de origem e destino que contém localidades cujo tempo médio de caminhada até uma estação de alta capacidade é de até 20 minutos tendem a apresentar forças de comutação gravitacionais entre os usuários de transporte público. Os modelos 5-7 seguem uma especificação com efeitos fixos intragrupo para cada par de origem destino, eventualmente controlando todas as características de infraestrutura e de amenidades locais que não se alteraram ao longo do período de 10 anos. Como pode ser observado na Figura 2, 65 estações de alta capacidade foram entregues ao longo da região de estudo.

Assim, os efeitos estáticos dessas mudanças locais de infraestrutura na probabilidade de comutação são observados através da mudança de acessibilidade local ao longo do período (2007-2017). Portanto, os resultados dos modelos 5-7 sugerem que os locais que apresentaram ganhos de acessibilidade ao serviço de transporte público de alta capacidade na Figura 2 passaram a usufruir de externalidades locais que aumentam as suas respectivas forças gravitacionais de comutação. Os resultados do teste de sensibilidade do tempo de acessibilidade adotado por este estudo mostram que quanto maior for o tempo mínimo para alcançar uma estação de alta capacidade, menor é o efeito que estas estações exercem nos comportamentos de viagem da RMSP. Este resultado é coerente diante dos coeficientes que medem a impedância do tempo de viagem diante da probabilidade de comutação.

A análise de sensibilidade da acessibilidade dos modelos 5-7 sublinha a hipótese de que é importante observar a heterogeneidade do efeito dos tempos totais das viagens realizadas pelo modo de transporte público nos comportamentos de viagem. Isso porque observa-se que há uma relação não linear entre cada minuto de caminhada que é gasto até uma estação de alta capacidade, dado o forte decaimento do efeito da acessibilidade entre os modelos 6 e 7. Portanto, os resultados da Tabela 3 estão de acordo com os encontrados por Florindo (2019), no qual há maior probabilidade de viagens por caminhada até estações de trem e de metrô dentro de uma distância de um quilômetro⁷.

O apelo da abordagem desenvolvida por este estudo utilizada nos modelos 5-7 é de que, intuitivamente, o tempo de caminhada entre a estação e a origem ou o destino da viagem podem afetar a decisão de viagem por transporte público até as localidades analisadas (El-geneidy, 2014). Portanto, essa metodologia busca dar uma contribuição para o uso de modelos de comutação gravitacional com a finalidade da compreensão de comportamentos de viagem intraurbanas (Ahfeldt, 2015; Gaduh, 2022). Ao contrário do que foi encontrado por Gaduh et al. (2022) para Jakarta, há indícios de efeitos estáticos

⁷ Ao se adotar uma velocidade de caminhada de 3.6 km por hora, estima-se que são percorridos 900 metros em 15 minutos.

das novas estações nos comportamentos de viagem. Porém, esses resultados não são diretamente comparáveis, dado que Gaduh et al. (2022) utilizaram a distância linear de até 1 km de localidades até estações. A métrica utilizada pelo presente estudo apresenta maior potencial em captar os comportamentos de viagem, por observar a malha de ruas as quais são realizados os percursos dos trabalhadores até ou das estações.

Tabela 3 – Resultados dos modelos gravitacionais por painel de efeitos fixos

	Tempo limite até uma estação		
	10 minutos	15 minutos	20 minutos
	(5)	(6)	(7)
Iteração de Acessibilidade	1.063***	0.907***	0.588***
Cumulativa entre pares OD	(0.117)	(0.122)	(0.131)
Observações	1,636	1,636	1,636
R ²	0.223	0.247	0.269
Ajustado R ²	0.221	0.245	0.267
F Statistic	155.928***	178.056***	200.103***

Fonte: Elaboração própria, a partir da base de dados do estudo.

Notas: Erros-padrão robustos em parênteses. p-valor < 0.1*, p-valor < 0.5**, p-valor < 0.1***.

Vale ressaltar que o escopo do estudo feito por Gaduh et al. (2022) abrange apenas estações de BRT, enquanto o do presente estudo contém a acessibilidade até estações de metrô, trem, VLT e BRT. Portanto, como as viagens realizadas pelas outras três categorias de transporte público tendem a provir maior velocidade de viagem e usualmente são implementadas em regiões com maior densidade populacional e de emprego do que estações de BRT, torna-se razoável esperar um efeito gravitacional de comutação mais forte para a região observada pelo presente estudo.

6. Considerações finais

Este estudo testou a hipótese de que os comportamentos de viagem intraurbanas feitas por transporte público devem incorporar medidas de conforto do usuário, que não são totalmente captadas pelo tempo total da viagem. Diante disso, foi desenvolvida uma abordagem para modelos de gravitação comutacional baseada no conceito da acessibilidade, com o objetivo de captar efeitos de mudanças estáticas na facilidade de acesso ao serviço de transporte público da RMSP nas probabilidades de comutação.

O conjunto dos resultados sugere que as estações de alta capacidade exercem forças gravitacionais nos comportamentos de viagem dos usuários de transporte público da RMSP. Isso porque há uma força de impedância na realização da viagem do local de residência até o local de trabalho em função do tempo médio da viagem. Os modelos que incorporam as mudanças de acessibilidade até o serviço de transporte público sugerem que cada minuto de caminhada até uma estação de alta capacidade exerce efeito marginal negativo crescente na probabilidade de realizar a comutação. Desse modo, observa-se a importância da relação do desgaste físico do usuário na decisão de viagem.

Como a observação do comportamento de viagem através da abordagem da comutação gravitacional pressupõe uma decisão simultânea entre o local de residência e de trabalho, pressupõe-se que as mudanças estáticas na acessibilidade captam as disputas pelos locais de residência e de trabalho que usufruíram das melhorias de externalidade. Entretanto, os modelos econométricos apresentam limitações quanto ao viés de seleção dos hexágonos para os seus contrafactuais e nas variáveis de controle, dada a suposição de que em 10 anos apenas houve mudanças na infraestrutura de transporte.

Portanto, outros estudos podem avançar metodologicamente para inferir causalidade entre as mudanças de acessibilidade e os comportamentos de viagem. Além disso, os resultados deste estudo mostram que houve mudança da força de impedância quando se observa o tempo médio de viagem. Isto sugere que os trabalhadores da RMSP passaram a ficar mais suscetíveis a enfrentar maiores tempos de viagem entre os anos de 2007 e 2017. Outros estudos podem investigar as origens desse fenômeno.

Referências

- ALMEIDA, N. A.; AZZONI, R. C. Custo de vida comparativo das regiões metropolitanas brasileiras: 1996-2014. **Estudos Econômicos**, v. 46, 1. 253-276, 2016.
- AHLFELDT, G. M. et al. The economics of density: Evidence from the Berlin Wall. **Econometrica**, v. 83, n. 6, p. 2127–2189, 2015.
- AHLFELDT, G. M.; WENDLAND, N. The spatial decay in commuting probabilities: Employment potential vs. commuting gravity. **Economics Letters**, v. 143, p. 125–129, 2016.
- AHRENS, A.; LYONS, S. Do rising rents lead to longer commutes? A gravity model of commuting flows in Ireland. **Urban Studies**, v. 58, n. 2, p. 264–279, 2021.
- ANAS, A.; ARNOTT, R.; SMALL, K. A. Urban spatial structure. **Journal of economic literature**, v. 36, n. 3, p. 1426–1464, 1998.
- BAGLEY, M. N.; MOKHTARIAN, P. L. The impact of residential neighborhood type on travel behavior: A structural equations modeling approach. **The Annals of regional science**, v. 36, n. 2, p. 279–297, 2002.

- BASTIAANSEN, J.; JOHNSON, D.; LUCAS, K. Does better job accessibility help people gain employment? The role of public transport in Great Britain. **Urban Studies**, v. 59, n. 2, p. 301–322, 2022.
- BOISJOLY, G. et al. Accessibility measurements in São Paulo, Rio de Janeiro, Curitiba and Recife, Brazil. **Journal of Transport Geography**, v. 82, p. 102551, 2020.
- BOISJOLY, G.; MORENO-MONROY, A. I.; EL-GENEIDY, A. Informality and accessibility to jobs by public transit: Evidence from the São Paulo Metropolitan Region. **Journal of Transport Geography**, v. 64, p. 89–96, 2017.
- CAO, X.; MOKHTARIAN, P. L.; HANDY, S. L. Examining the impacts of residential self-selection on travel behaviour: a focus on empirical findings. **Transport reviews**, v. 29, n. 3, p. 359–395, 2009.
- CARVALHO, C. H. R. DE; PEREIRA, R. H. M. Indicadores de mobilidade urbana da PNAD 2012. 2013.
- CERVERO, R.; KANG, C. D. Bus rapid transit impacts on land uses and land values in Seoul, Korea. **Transport policy**, v. 18, n. 1, p. 102–116, 2011.
- DU, H.; MULLEY, C. Relationship between transport accessibility and land value: Local model approach with geographically weighted regression. **Transportation Research Record**, v. 1977, n. 1, p. 197–205, 2006.
- EL-GENEIDY, A. et al. New evidence on walking distances to transit stops: Identifying redundancies and gaps using variable service areas. **Transportation**, v. 41, n. 1, p. 193–210, 2014.
- FLORINDO, A. A. et al. Walking for transportation and built environment in Sao Paulo city, Brazil. **Journal of transport & health**, v. 15, p. 100611, 2019.
- FUJITA, M.; THISSE, J.-F. Economics of agglomeration. **Journal of the Japanese and international economies**, v. 10, n. 4, p. 339–378, 1996.
- GADUH, A.; GRAČNER, T.; ROTHENBERG, A. D. Life in the slow lane: Unintended consequences of public transit in Jakarta. **Journal of Urban Economics**, v. 128, p. 103411, 2022.
- GEURS, K. T.; VAN WEE, B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. **Journal of Transport geography**, v. 12, n. 2, p. 127–140, 2004.
- GIANNOTTI, M. et al. Inequalities in transit accessibility: Contributions from a comparative study between Global South and North metropolitan regions. **Cities**, v. 109, p. 103016, 2021.
- GLAESER, E. L.; KAHN, M. E. **Decentralized employment and the transformation of the American city**. National Bureau of Economic Research Cambridge, Mass., USA, , 2001.

HADDAD, E. A. et al. The underground economy: tracking the higher-order economic impacts of the São Paulo subway system. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 73, p. 18–30, 2015.

HADDAD, E. A.; BARUFI, A. M. B. From rivers to roads: Spatial mismatch and inequality of opportunity in urban labor markets of a megacity. **Habitat International**, v. 68, p. 3–14, 2017.

HANDY, S. L.; NIEMEIER, D. A. Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives. **Environment and planning A**, v. 29, n. 7, p. 1175–1194, 1997.

HANSEN, W. G. How accessibility shapes land use. **Journal of the American Institute of planners**, v. 25, n. 2, p. 73–76, 1959.

LEE, S.; BENCECRI, M. Urban Form and public transport design. Chapter 17. In: Mulley, C.; Nelson, D, J. (2021). *Urban Form and Accessibility: Social, Economic, and Environmental Impacts*. Elsevier, 2021.

LIESKE, S. N. et al. A novel hedonic price modelling approach for estimating the impact of transportation infrastructure on property prices. **Urban Studies**, v. 58, n. 1, p. 182–202, 2021.

LUCAS, R. E.; ROSSI–HANSBERG, E. On the internal structure of cities. **Econometrica**, v. 70, n. 4, p. 1445–1476, 2002.

MARTÍNEZ, L. M.; VIEGAS, J. M. Effects of transportation accessibility on residential property values: Hedonic Price Model in the Lisbon, Portugal, metropolitan area. **Transportation Research Record**, v. 2115, n. 1, p. 127–137, 2009.

MILLS, E. S. An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area. **The American Economic Review**, v. 57, n. 2, p. 197–210, 1967.

MURRAY, A. T. et al. Public transportation access. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 3, n. 5, p. 319–328, 1998.

MUTH, R. F. The derived demand for urban residential land. **Urban studies**, v. 8, n. 3, p. 243–254, 1971.

OSTRENSKY, V. P.; PORSSSE, A. A.; DA FROTA, L. M. Public transport and gentrification. Evidence from São Paulo metro new stations. **Regional Science Policy & Practice**, 2022.

PEREIRA, R. H. M.; SCHWANEN, T. **Tempo de deslocamento casa-trabalho no Brasil (1992-2009): diferenças entre regiões metropolitanas, níveis de renda e sexo**. [s.l.] Texto para Discussão, 2013.

ROSSI-HANSBERG, E. Optimal urban land use and zoning. **Review of Economic Dynamics**, v. 7, n. 1, p. 69–106, 2004.

SILVA, S. V. A ampliação das redes de transporte público no estado de São Paulo: Articulações institucionais e uso do território. Dissertação de Mestrado em geografia: **Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”**, 2017.

TANG, C. K. The cost of traffic: evidence from the London congestion charge. **Journal of Urban Economics**, v. 121, p. 103302, 2021.

VALE, S, D. Active accessibility and transit-oriented development: Connecting two sides of the same coin. (Chapter 8) In: Mulley, C.; Nelson, D, J. (2021). *Urban Form and Accessibility: Social, Economic, and Environmental Impacts*. Elsevier, 2021.

VAN ACKER, V.; WITLOX, F. Car ownership as a mediating variable in car travel behaviour research using a structural equation modelling approach to identify its dual relationship. **Journal of Transport Geography**, v. 18, n. 1, p. 65–74, 2010.

VAN DE COEVERING, P.; SCHWANEN, T. Re-evaluating the impact of urban form on travel patterns in Europe and North-America. **Transport policy**, v. 13, n. 3, p. 229–239, 2006.

VIEIRA, R. S.; HADDAD, E. A. An accessibility index for the metropolitan region of São Paulo. Em: **The Rise of the City**. [s.l.] Edward Elgar Publishing, 2015. p. 242–258.

WILLIAM, A. Location and Land use. **Towards a General Theory of Land Rent: Havard University Press, Cambridge**, 1964.

ZENOU, Y. How do firms redline workers? **Journal of urban Economics**, v. 52, n. 3, p. 391–408, 2002.