

# Efeitos socioespaciais e temporais na elasticidade da demanda por ônibus em Fortaleza

*Effects of fare variation on bus transit demand in Fortaleza considering spatial, temporal, and socioeconomic attributes*

Artur Bruno Leitão de Vasconcelos<sup>1</sup>, Francisco Moraes de Oliveira Neto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

**Contato:** artur.vasconcelos@det.ufc.br,  (ABLV); moraes@det.ufc.br,  (FMON)

## Recebido:

4 de agosto de 2024

## Revisado:

3 de abril de 2025

## Aceito para publicação:

30 de junho de 2025

## Publicado:

6 de outubro de 2025

## Editora de Área:

Helena Beatriz Bettella Cybis,  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

## Palavras-chave:

Demanda por transporte público.  
Elasticidade-tarifa da demanda.  
Elasticidade renda de passageiros.  
Redução da demanda por ônibus.

## Keywords:

Public transportation demand.  
Tariff elasticity of demand.  
Income elasticity of passengers.  
Bus demand decline.

DOI: 10.58922/transportes.v33.e3033

## RESUMO

O transporte por ônibus no Brasil vem passando por uma crise, possivelmente oriunda do ciclo vicioso da queda da demanda. Em busca de compreender este fenômeno, a comunidade científica sugere analisar a associação entre tarifa e demanda por ônibus. No entanto, poucos estudos analisam como características espaciais, temporais e socioeconômicas podem influenciar essa relação causal e, de modo geral, não partem de um modelo a priori que fundamenta teoricamente as hipóteses de causalidade, o que pode levar a vieses na análise. Assim, este estudo busca analisar a relação entre tarifa e demanda a partir de uma representação conceitual dos determinantes que podem influenciá-la, fundamentada em uma revisão da literatura. Em razão disso, propõe-se um mapa mental para representar as hipóteses de causalidade de efeitos imediatos e de médio e longo prazo das mudanças tarifárias. A partir dos dados disponíveis, um diagrama causal é elaborado para avaliar os efeitos diretos e indiretos dessas variações ao longo do tempo, estimados por regressões com dados em painel, controlando fatores espaciais, temporais e socioeconômicos, por meio de efeitos fixos. Os resultados mostraram principalmente efeitos significativos de mudança do modo em diferentes regiões da cidade para diferentes períodos do dia, e efeitos significativos de redução de viagens no horário de pico em regiões em que predominam a população de baixa renda em comparação às regiões com maior concentração de população de alta renda.

## ABSTRACT

Public bus transportation in Brazil has been facing a crisis, possibly stemming from the vicious cycle of declining demand. To understand this phenomenon, the scientific community suggests analyzing the relationship between fare and bus demand. However, few studies analyze how spatial, temporal, and socioeconomic characteristics may influence this causal relationship and, in general, do not rely on a priori models that theoretically support causality hypotheses, which can lead to biases in the analysis. Thus, this study seeks to examine the relationship between fare and demand based on a conceptual representation of the determinants that may influence it, grounded in a literature review. Therefore, a mental map is proposed to represent the causality hypotheses regarding the immediate-, medium-, and long-term effects of fare changes. Based on the available data, a causal diagram is developed to assess the direct and indirect effects of these variations over time, estimated through panel data regressions while controlling for spatial, temporal, and socioeconomic factors using fixed effects. The results primarily showed significant effects of mode shift in different city regions at various times of the day, and significant effects of reduced trips during peak hours in regions with predominately low-income populations compared to areas with higher concentration of high-income population.



## 1. INTRODUÇÃO

A demanda por transporte coletivo por ônibus no Brasil caiu aproximadamente 30% nos últimos 30 anos, segundo a NTU (2021). Essa redução no volume de passageiros contribui diretamente para o aumento do preço desse serviço, visto que o custeio da operação do transporte é feito, principalmente, pelas receitas arrecadadas com a tarifa paga pelos usuários. De acordo com Mankiw (2013), na teoria econômica, um aumento de preço pode produzir uma redução na demanda, implicando para a operadora de transportes por ônibus uma possível queda de receita mesmo com aumento da taxa cobrada. Na visão de Carvalho e Pereira (2012), esse cenário implica elevar o custo da tarifa, dificultando o acesso das camadas menos abastadas da sociedade, conseqüentemente propendendo uma nova redução na demanda, ocasionando um ciclo vicioso. A literatura consolida essa queda na demanda como um ciclo vicioso oriundo do aumento tarifário (Vuchic, 2005).

O aumento tarifário concatenado com a redução da renda da população restringe o acesso da população de baixa renda a esses serviços e, em sua condição mais extrema, problemas de exclusão social. Além disso, essa população mais vulnerável economicamente em grandes cidades da América do Sul cada vez mais vive em áreas periféricas e distante das atividades, enquanto a população de alta renda ocupa principalmente a região central, onde há maior concentração de atividades (Gomide, 2006; Lucas, 2019; Guzman et al., 2021).

Como consequência dessas inadequações nos padrões de uso do solo, tem-se a elevação dos custos do serviço de transporte público para atender uma demanda cada vez mais espalhada, e intensificação da desigualdade socioespacial no acesso às atividades (Lima, 2017; Garcia et al., 2018; Sousa, 2019). Por exemplo, na cidade de Fortaleza há uma desigualdade socioespacial, caracterizada por grupos de baixa renda localizados nas zonas periféricas da cidade, e grupos de renda mais alta concentrados em áreas centralizadas onde concentram a maior parte das atividades econômicas (Lima, 2017).

Com intuito de combater essas problemáticas, as políticas tarifárias podem incentivar a migração de usuários, de um modo para outro e no acesso ao sistema de transportes, se dispor de estratégia com o propósito de atrair a demanda mais elástica para modos de transportes coletivos (Ferronato, 2002). Em Fortaleza, por exemplo, adota-se políticas de redução de preço como a tarifa social, em que no período de 9 às 10 h e de 15 às 16 h existe uma redução da tarifa. Essa diferenciação de preços é uma estratégia com potencial para atrair a demanda para o sistema.

Avaliar a eficácia de políticas tarifárias em impactar a demanda por ônibus requer a consideração de diversos fatores que podem interferir nesta relação (Litman, 2004). Contudo, são incipientes os estudos com propósito de entender essa relação sob uma ótica causal, considerando o controle estatístico desses outros fatores. Isto é relevante porque, conforme o pensamento de Pearl (2001), quando não há um esforço de controlar possíveis fatores de confundimento ou efeitos indiretos é plausível manifestar-se associações espúrias nas análises estatísticas. Sendo assim, o ferramental da inferência causal fornece mecanismos eficazes de mitigar fontes de correlações espúrias e endogeneidades, podendo ser recorrente na modelagem estatística, principalmente quando não há um esforço na etapa do controle. Com base nesse paradigma, Siqueira (2020) propõe um modelo conceitual, adotado nesta pesquisa, que estabelece um enquadramento teórico servindo como ponto de partida para a formulação de hipóteses sobre a causalidade dos determinantes da demanda por transportes. Esse modelo fornece as bases para a construção de um mapa mental do fenômeno investigado, que, por sua vez, se traduz em um diagrama causal.

Diante do exposto, a demanda por transporte coletivo por ônibus é influenciada por fatores espaciais, temporais e socioeconômicos, sendo que poucos estudos na literatura analisam a

elasticidade tarifária considerando essas dimensões (Guzman et al., 2021). Nesse contexto, este trabalho busca estimar a elasticidade da demanda por ônibus em relação à tarifa, incorporando a influência de fatores relacionados às variações da tarifa e da demanda ao longo do tempo, espacialmente ou entre grupos socioeconômicos, sob uma ótica de causalidade conforme proposto por Pearl (2001), que evite vieses decorrentes de vários fatores de confundimento.

A proposta metodológica segue a abordagem de Pearl (2001), que consiste em: i) identificar e representar as hipóteses das relações de interesse a partir de uma representação conceitual prévia. Para isso, propõe-se um mapa mental abrangente, fundamentado na revisão da literatura e no modelo conceitual de Siqueira (2020), com o objetivo de representar as hipóteses de causalidade de efeitos imediatos e de médio e longo prazo das mudanças tarifárias; ii) elaborar um diagrama causal para avaliar os efeitos de interesse; e iii) propor um modelo estatístico para medir os efeitos. Considerando a estrutura de dados disponível, em painel e com agregação espacial no nível da zona de tráfego, essa configuração permite medir os efeitos imediatos das mudanças tarifárias ao longo do tempo, bem como os efeitos diretos e indiretos causados por restrições de renda ou mudança de modo. Como modelo de medição, adotou-se uma estrutura de regressão com dados em painel, controlando fatores espaciais, temporais e socioeconômicos por meio de efeitos fixos. Dessa forma, o trabalho busca contribuir para a sistematização de como medir o impacto das mudanças tarifárias na demanda, utilizando uma abordagem causal que combina a teoria de Pearl (2001) com a medição desses efeitos com dados em painel

Para atingir esses objetivos, inicialmente realiza-se uma revisão da literatura acerca dos fatores que influenciam na sensibilidade da demanda por ônibus (Seção 2). Esta revisão permite compreender a sensibilidade da demanda frente a mudanças tarifárias e evidenciar as hipóteses de causalidade a priori. Na Seção 3, apresenta-se a contextualização da cidade de Fortaleza, estudo de caso dessa pesquisa. A Seção 4 apresenta a proposta metodológica de estimação da elasticidade-tarifa da demanda com base na inferência causal. A metodologia está focada em compreender a elasticidade frente a variações socioeconômicas, espaciais e temporais da demanda por ônibus em Fortaleza. Os resultados são discutidos na Seção 5, onde são analisadas as contribuições das variáveis estudadas para a demanda por transporte público. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões da análise, ressaltando as principais contribuições, achados, implicações e recomendações para pesquisas futuras.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

O transporte coletivo por ônibus é um importante balizador da demanda por transporte e da mobilidade urbana, promovendo interações econômicas e sociais, garantindo o direito de locomoção dos cidadãos no território urbano (Carvalho, 2021). No Brasil, em 2021, 28% das viagens foram realizadas por meio de transporte coletivo, com 85,7% desse valor pertencente à modalidade ônibus. A relevância social desse sistema de transporte baseia-se na constatação de que o transporte público (TP) viabiliza o deslocamento da população para suas mais diversas atividades (NTU, 2021). Apesar da relevância desse meio de transporte, um grande problema é o aumento dos preços das tarifas.

No Brasil, entre 1995 e 2008, as tarifas de transporte aumentaram, em média, 60% acima da inflação medida pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor (INPC) (Carvalho e Pereira, 2012). Após esse período, as tarifas se estabilizaram devido aos protestos de 2013 contra o aumento das tarifas do transporte público. No entanto, esse controle tarifário foi acompanhado pela deterioração da qualidade dos serviços oferecidos e pelo maior incentivo ao uso do

transporte motorizado individual, o que levou muitos usuários a migrarem para alternativas de transporte. É importante destacar que, entre 2002 e 2014, houve uma redução no preço real da gasolina e do etanol, o que coincidiu com o crescimento significativo do transporte individual (Carvalho, 2021). Como resultado, entre 2014 e 2018, o número de passageiros pagantes tem diminuído significativamente, com uma redução de aproximadamente 30% nas principais capitais brasileiras (NTU, 2018). Esse declínio na demanda por transporte público se intensificou após a pandemia de Covid-19, agravando a perda de competitividade do setor em relação a outras alternativas de mobilidade (NTU, 2022).

Essa problemática colabora para a redução da demanda por ônibus, uma vez que os usuários podem optar por outros meios, como o transporte individual motorizado (Vuchic, 2005). Dessa forma, ao longo do tempo, dois processos têm influenciado a queda na demanda. O primeiro, observado entre 1995 e 2014, refere-se ao aumento sistemático das tarifas de ônibus urbanos acima da inflação, combinado com a melhora nas condições de renda da população, que incentivou a substituição do transporte coletivo por modos individuais (Carvalho e Pereira, 2012). O segundo processo diz respeito à precarização do serviço e ao crescente desestímulo ao uso do transporte público, especialmente após a pandemia de Covid-19, intensificado pelo surgimento e expansão dos serviços de transporte por aplicativo nos últimos anos (Carvalho, 2021). Dessa forma, variações na tarifa contribuem para a redução do uso desse meio de transporte ou até mesmo impede seu acesso devido à falta de recursos financeiros, sendo este um fator determinante para a inclusão no sistema (Paulley et al., 2006). Assim, a redução das tarifas pode ajudar a aumentar a demanda, especialmente entre a população de baixa renda (Litman, 2004).

Para Carvalho (2021), mudanças no custo dos transportes afetam de forma variada o orçamento familiar, uma vez que o serviço de transportes se tornou um item típico. Segundo Lima (2017), essas restrições financeiras influenciam nas decisões locacionais, o que pode contribuir para a periferização e o espraiamento da população mais carente. Isso pode gerar dificuldade no acesso às oportunidades e, em alguns casos, restringir a realização de atividades cotidianas.

Em relação à elasticidade da demanda em função da tarifa, alguns estudos indicam que ela pode variar conforme o horário do dia, dependendo do propósito da viagem, e também pode mudar no longo prazo. Litman (2004) descreve que, de forma geral, a elasticidade da demanda por ônibus no curto prazo varia de acordo com o horário. Para a demanda geral, a elasticidade em relação à tarifa de ônibus varia de -0,2 a -0,5. Durante os horários de pico, a elasticidade é menor, variando de -0,15 a -0,3, o que indica que os passageiros são menos sensíveis aos aumentos de tarifa. Fora do horário de pico, a elasticidade é maior, entre -0,3 e -0,6, sugerindo que os passageiros são mais sensíveis às mudanças no preço. Além disso, no longo prazo, de cinco a dez anos, estudos indicam uma elasticidade maior, variando entre -0,6 e -0,9 (Litman, 2004; Guzman et al., 2021).

Diversos fatores podem influenciar a demanda por transporte público e sua relação com a tarifa em termos de elasticidade. A qualidade do serviço é um dos principais aspectos que impactam tanto a demanda quanto o nível da tarifa (Carvalho, 2021). Além disso, o crescente incentivo ao uso de modos individuais, facilitado pela maior acessibilidade e aquisição desses meios, tem levado à redução do uso do transporte público (Vuchic, 2005; Ortúzar e Willumsen, 2011; Carvalho, 2016). A literatura também destaca uma elasticidade negativa entre a renda e o uso do transporte público, indicando que, à medida que a renda aumenta, a utilização do transporte coletivo tende a diminuir (Carvalho e Pereira, 2012; Carvalho, 2021).

Ressalta-se que os estudos tradicionais sobre o ciclo vicioso da queda da demanda por transporte público abordam os efeitos mencionados anteriormente, mas com foco exclusivo no subsistema de



Segundo Siqueira (2020), as restrições individuais, especificamente neste caso, as restrições financeiras, afetam as decisões de viagens de forma imediata devido à dificuldade de acesso ao modo, ou indiretamente por meio da decisão de participar em atividades ou por meio de decisões locacionais, no longo prazo, que afetam às distâncias as oportunidades. Especificamente em relação à demanda por transporte público, a facilidade de acesso ou aquisição de modos individuais de transporte influencia o uso do transporte coletivo, conforme apontado por Ortúzar e Willumsen (2011) e Carvalho (2016). Nessas interações, tarifas elevadas podem desestimular a utilização do transporte público, impactando negativamente a qualidade do serviço devido à redução da receita. Esse cenário tende a intensificar a migração para o transporte individual motorizado, gerando externalidades negativas (Vuchic, 2005; Ortúzar e Willumsen, 2011; Carvalho, 2016). Esse processo é conhecido como o ciclo vicioso entre tarifa e demanda, no qual o aumento tarifário leva à redução do uso do transporte público, resultando na precarização do sistema e possivelmente em novos reajustes tarifários (Vuchic, 2005; Ortúzar e Willumsen, 2011; Carvalho, 2016; Carvalho, 2021). Esses efeitos podem se manifestar imediatamente de forma indireta, por meio da mudança de modo, ou de forma direta, levando à não realização da viagem ou da atividade, especialmente para grupos com restrições financeiras severas.

No mapa da Figura 1, também são considerados efeitos de longo prazo decorrentes das mudanças no uso do solo ao longo do tempo. As restrições financeiras podem levar à periferização da população de baixa renda, aumentando as distâncias até as oportunidades e dificultando o acesso ao transporte público. Essa distribuição espacial da população em relação à localização das atividades no meio urbano não apenas influencia a participação em atividades e a realização de viagens, mas também pode elevar os custos e comprometer a qualidade da oferta do transporte público, resultando em possíveis aumentos tarifários (Lima, 2017; Castro, 2019; Pinto, 2021). Sabe-se que a frequência e a inserção de atividades nas áreas centrais estão diretamente relacionadas à oferta e qualidade do transporte público, cuja precarização pode intensificar desigualdades sociais, restringindo a mobilidade da população economicamente vulnerável (Paulley et al., 2006; Siqueira, 2020; Pinto, 2021).

O diagrama da Figura 1, portanto, mostra como fatores socioeconômicos, como renda e acesso a modos de transporte, e fatores de uso do solo, como a distribuição da população em relação às atividades, ambos sujeitos a variações espaciais e temporais, podem influenciar as mudanças na tarifa e o uso do transporte público coletivo. Embora o diagrama considere diversas interações que afetam a relação entre tarifa e demanda ao longo do tempo, este trabalho concentra-se na análise dos efeitos imediatos das alterações tarifárias, conforme discutido na Seção 4.1. Como descrito no método desta seção, o paradigma de inferência causal de Pearl (2001) recomenda a definição prévia de uma representação teórica das relações causais de interesse. Essa representação serve de base para a análise por meio de diagramas causais e de modelos estatísticos de inferência, sendo construída não apenas a partir das hipóteses formuladas, mas também com base nos dados disponíveis.

### 3. CONTEXTO URBANO DE FORTALEZA E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Fortaleza, capital do Ceará, é a quarta capital mais populosa do Brasil com mais de 2,4 milhões de habitantes, segundo o último Censo (IBGE, 2024), sendo também a capital com maior densidade populacional do Brasil. A cidade apresenta uma considerável desigualdade de renda, em que 36,9% dos moradores relataram renda mensal inferior à metade do salário-mínimo do país (próximo a R\$ 600,00). Em Fortaleza, observa-se também uma desigualdade socioespacial no acesso às atividades, com uma alta concentração de pessoas de baixa renda nas regiões Oeste e Sul da cidade, enquanto as oportunidades de emprego e os indivíduos com rendimentos elevados tendem a agrupar-se nas regiões Central e Leste da cidade (Lima, 2017; Castro, 2019; Pinto, 2021).

Para delimitação da área de estudo para a realização da análise da elasticidade da demanda em Fortaleza, a cidade é subdividida em 241 zonas de tráfego e seis regiões (Lima, 2017; Pinto, 2021), como mostrado na Figura 2. A definição do zoneamento seguiu a proposta metodológica para criar unidades espaciais economicamente homogêneas, agrupando setores censitários com base em variáveis como renda média e faixa etária da população.

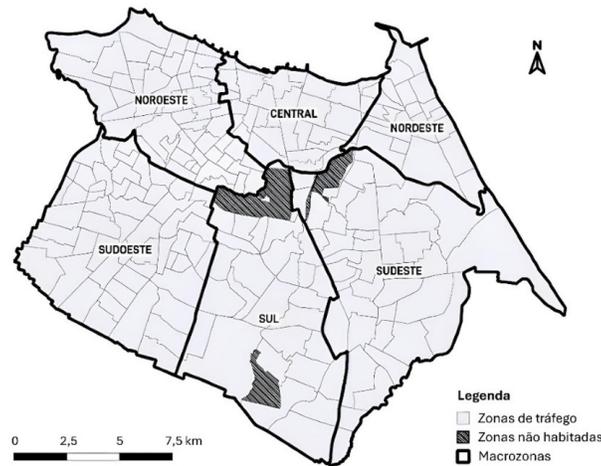


Figura 2. Zoneamento proposto para a análise.

A Figura 3 apresenta as distribuições espaciais da população e da renda média por zona de tráfego. Os dados de renda *per capita* foram obtidos do censo de 2010 (IBGE, 2011), enquanto os dados populacionais do censo 2022 (IBGE, 2024). Os mapas da Figura 3 mostram, como já mencionado, que a população de menor renda em Fortaleza está mais concentrada nas regiões Noroeste e Sudoeste da cidade. Essa concentração está associada a maiores volumes de viagens no transporte público gerados nessas regiões. Nessas áreas com maior concentração de população de baixa renda, espera-se que a variação da tarifa tenha efeitos diferentes em comparação com outras regiões. Conforme discutido na Seção 4.3, foram formuladas hipóteses sobre o impacto das variações tarifárias na demanda dessa população, considerando diferentes regiões da cidade e períodos do dia. Essas hipóteses indicam a influência da renda e do acesso a veículos individuais na realização de viagens, tanto compulsórias quanto não compulsórias.

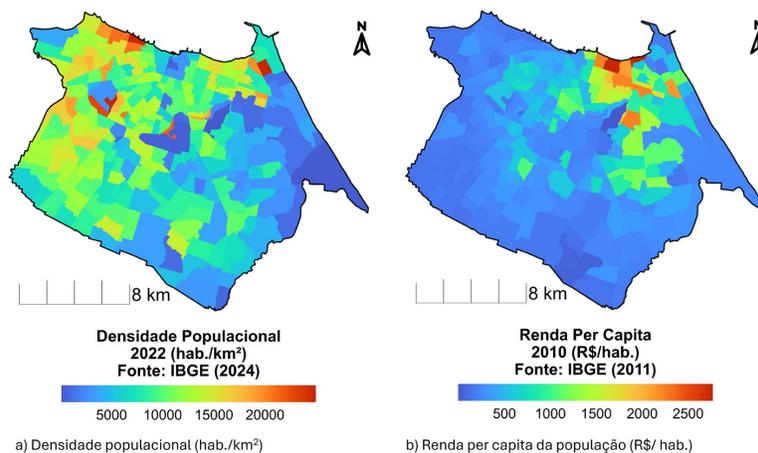


Figura 3. Distribuição espacial da população e da renda *per capita*.

De acordo com a mais recente pesquisa domiciliar de viagens (Fortaleza, 2019), a população de Fortaleza se desloca predominantemente por meios privados (carro ou moto) (37,7%), seguido por caminhada (30,8%), transporte público (23,2%), bicicleta (6,2%), metrô (0,4%) e outros modos (1,7%). O sistema de ônibus é responsável pela maioria das viagens de transporte público.

O sistema de TP de Fortaleza apresenta uma rede com estrutura tronco-alimentada e 10 terminais de integração físicos. Em 2018, o sistema de ônibus transportou aproximadamente um milhão de passageiros por dia. Embora a rede de ônibus apresente uma cobertura geralmente bem distribuída em toda a cidade, há deficiência nas áreas periféricas, devido à menor frequência de linhas alimentadoras, e notável concentração na área central. Com relação a estrutura tarifária, o sistema opera em estrutura de tarifa fixa com integração tarifária temporal por meio de bilhetagem eletrônica, dentro de um período de duas horas a partir do pagamento, o que permite múltiplas integrações tarifárias entre ônibus. Ressalta-se que o período de interesse desse estudo, os valores das passagens corresponderam a R\$ 2,75 em 2016, R\$ 3,20 em 2017, e R\$ 3,40 em 2018. O sistema promove uma tarifa social com desconto de R\$ 0,20 nos horários fora de pico (de 9h00 até 10h00 e 14h00 até 15h00).

## 4. MÉTODO PROPOSTO

Seguindo o paradigma da inferência causal proposto por Pearl (2001), o método de análise proposto neste estudo consiste em três etapas principais: (1) elaboração de um mapa mental de hipóteses de interesse entre tarifa e demanda; (2) construção de um diagrama causal; (3) e definição do modelo estatístico de regressão com dados em painel com efeitos fixos que permite controlar fatores espaciais, temporais, ou socioeconômicos que afetam a demanda por transporte coletivo por ônibus. O mapa mental da Figura 1 corresponde ao primeiro produto do método proposto. Partiu-se inicialmente deste mapa mental para fundamentar as hipóteses de interesse neste estudo. Contudo, devido à limitação de disponibilidade dados longitudinais que permitam avaliar os efeitos da mudança no uso do solo na relação entre tarifa e uso do TP, considerou-se neste estudo somente a análise de efeitos imediatos de mudanças tarifárias ao longo do tempo, conforme discutido na Seção 4.1.

### 4.1. Diagrama de hipóteses causais

Com base no mapa mental da Figura 1 e na disponibilidade de dados (veja Seção 4.2) para a análise dos efeitos imediatos da tarifa, foi definido o diagrama de hipóteses causais na Figura 4, estabelecendo as relações entre as variáveis de interesse para examinar esses efeitos. Esse tipo de diagrama, denominado Diagrama Causal Acíclico, segue a abordagem proposta por Pearl (2001). Ele fornece uma representação gráfica do processo causal sugerido pelo mapa mental, relacionando variáveis e indicadores que representam os fatores de interesse. Os nós representam as variáveis adotadas neste estudo e os arcos os sentidos de causalidade. Portanto, sua construção deve ser fundamentada em um conhecimento prévio do fenômeno em estudo, conforme representado no mapa mental. Além disso, o diagrama auxilia na identificação dos efeitos causais de interesse e na seleção das variáveis que precisam ser controladas, possibilitando uma modelagem mais precisa para estimar esses efeitos.

No diagrama da Figura 4, considera-se dois caminhos causais de interesse previstos no mapa mental da Figura 1. Um impacto da mudança da tarifa na participação em atividades por pessoas em situação de pobreza de renda, que deixariam de realizar atividades não mandatórias caso a

tarifa fosse elevada. Outro efeito da variação da tarifa seria a mudança no modo de transporte, levando indivíduos a optarem cada vez mais pelo transporte individual motorizado, desde que tenham acesso a esse meio. O efeito causal da tarifa na participação em atividades é representado no diagrama pela seta direta entre tarifa e demanda, sendo denominado de efeito direto. Já o efeito da tarifa na mudança de modo é representado no diagrama pelo caminho intermediado pelo acesso ao modo individual, sendo denominado de efeito indireto.

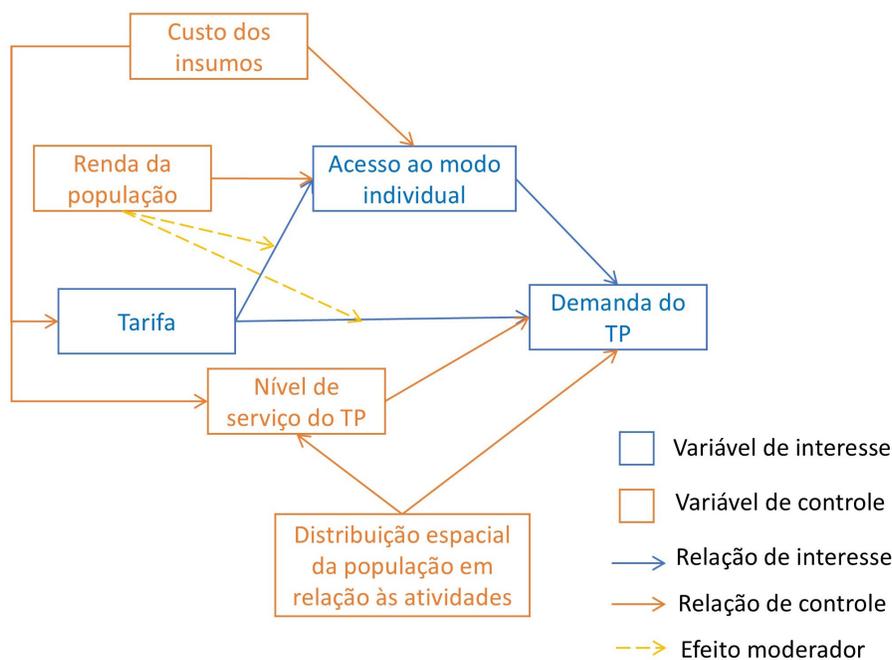


Figura 4. Diagrama causal.

No diagrama causal da Figura 4, também são considerados os caminhos de controle, ou efeitos de *backdoor*, conforme a teoria de Pearl (2001), que devem ser considerados para evitar vieses nas estimativas causais de interesse. Considerou-se, portanto, os seguintes fatores socioeconômicos que podem variar espacialmente ou ao longo de um curto espaço de tempo (p. ex., mês a mês): restrições financeiras da população de interesse; custos de transportes; a qualidade do serviço de transporte público, distribuição espacial das atividades ou oportunidades, e a distribuição espacial da população de interesse.

Com relação à restrição financeira, no mapa mental da Figura 1, este fator influencia tanto a participação ou inserção nas atividades quanto o acesso a modos de transporte individuais. Dessa forma, esse fator foi representado pela renda dos indivíduos, considerando seu efeito moderador na relação entre tarifa e demanda. Assim, foram definidas setas conectando a renda à relação entre tarifa e demanda, bem como à relação entre tarifa e acesso ao modo individual. Nestes dois efeitos, quanto maior a renda mais provável de ocorrer a viagem e a mudança de modo. Neste estudo, considera-se que o nível de renda está relacionado às zonas (Figura 3), já que as zonas periféricas são predominantemente habitadas por populações de baixa renda, enquanto as zonas centrais abrigam residentes com maior poder econômico (Lima, 2017; Pinto, 2021).

Os custos de transportes são representados pelos custos dos insumos da operação (despesas com combustíveis, manutenção de veículos, salários dos funcionários e investimentos em infraestrutura)

(Litman, 2004). Esses custos influenciam o valor da tarifa, o nível de serviço do transporte público e o acesso ao modo individual. É importante destacar que, com exceção do custo de operação do transporte público, os demais custos de transporte não estão explicitamente representados na Figura 1, pois o foco principal dessa representação é ilustrar os fatores relacionados à relação causal entre tarifa e demanda do transporte público.

Considera-se que a oferta e qualidade do serviço é função da distribuição espacial da população em relação às atividades disponíveis no meio urbano, com a premissa de que a oferta é planejada para atender um dado volume de passageiros que desejam realizar atividades. Considera-se também que a distribuição espacial da população e o nível de serviço afetam diretamente a demanda pelo TP. Espacialmente, espera-se que estes efeitos sejam diferentes, já que em Fortaleza, áreas centrais oferecem melhores serviços e maior disponibilidade de transporte público, enquanto as zonas periféricas apresentam uma oferta menor (Lima, 2017; Pinto, 2021).

É importante ressaltar que, como o objetivo é demonstrar a aplicabilidade da representação proposta na Figura 1 para avaliar os efeitos imediatos da tarifa na demanda por transporte público, não foi considerado o efeito de retroalimentação da variação da demanda sobre a tarifa, mediado pela receita, nem o impacto de mudanças no uso do solo na oferta do serviço e nos custos operacionais.

Considerando os dados disponíveis, conforme discutido na Seção 4.2, foram adotados como indicadores e variáveis de controle neste estudo: a renda dos indivíduos (associada às zonas e regiões de estudo, adotando assim a localização como *proxy*), o preço mensal da gasolina (representando tanto a variação dos custos ao longo do tempo quanto a disponibilidade do transporte individual) e a frequência das linhas de transporte público por ônibus (refletindo a distribuição da oferta e a qualidade do serviço no espaço). Assumiu-se que a distribuição espacial da população e das atividades no meio urbano permaneceu constante durante o período analisado, sendo modelada como efeitos fixos de cada zona no modelo estatístico (Seção 4.3). Essa abordagem foi adotada devido à indisponibilidade de dados populacionais e de uso do solo para o período neste estudo em que ocorreram mudanças na tarifa. A demanda por TP foi representada pelo volume gerado de registros da bilhetagem eletrônica para cada zona em cada período do dia analisado, conforme descrito na Seção 4.2.

## 4.2. Dados

Os efeitos da tarifa na demanda foram avaliados para o horário de pico da demanda do TP (6 h às 7 h) e para o horário correspondente a tarifa social (9 h às 10 h). Adotou-se como período de estudo os dias típicos dos anos de 2016 a 2018, considerando a disponibilidade de dados. A Tabela 1 apresenta as bases de dados utilizadas e as variáveis adotadas. As principais bases de dados utilizadas neste estudo foram obtidas das seguintes fontes: Sistema de Bilhetagem Eletrônica (SBE), Sistema de Rastreamento de Veículos por GPS, e os dados da operação do TP (*General Transit Feed Specification - GTFS*).

**Tabela 1:** Variáveis e fontes de dados

Variáveis	Fontes de dados
Demanda - Validações por zona na hora pico ou hora social	SBE, GPS, GTFS (ETUFOR)
Tarifa - Valor da tarifa	ETUFOR
Acesso ao transporte individual - Valor da gasolina por semana	ANP
Frequência do TP - Quantidade de veículos por hora na zona	SBE, GPS (ETUFOR)

O SBE contém dados dos registros de transações tarifárias (validações) no sistema de TP por ônibus. Estes dados foram usados para calcular a quantidade de passageiros usando o sistema nos períodos de análise do dia, representando a demanda em cada período (passageiros por hora do dia). A base de dados de GPS contém informações geográficas sobre a localização dos veículos a cada 30 segundos. Esta base foi utilizada para localizar geograficamente os registros de validação dos usuários, o que permitiu a segmentação da demanda de passageiros por zona de tráfego, além do horário do dia. Os dados de GTFS consistem em arquivos padronizados com informações sobre a programação operacional do sistema, incluindo arquivos geográficos de itinerários das linhas e localização das paradas e estações. Estes dados foram usados para localizar as validações quando não era possível localizar devido às falhas nos dados de GPS.

Os dados históricos com valores de tarifa de transporte público foram obtidos da Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza (ETUFOR) para os dois períodos do dia de análise e para os anos de 2016 a 2018. Nestes anos, ocorreram dois ajustes no valor da tarifa (aumento de 16% em janeiro de 2017, e aumento de 6% em janeiro de 2018). Os valores das tarifas foram ajustados pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), para defasar os valores com base na inflação.

Para representar o nível de serviço do TP, adotou-se a variável frequência do TP por zona da cidade e horário de análise. Esta variável corresponde ao número de veículos operando em cada zona durante o período de análise (veículos por hora) e foi calculada a partir da integração das bases de dados de SBE e GPS. Assim, a informação dos veículos em operação em cada linha obtida do SBE foi associada aos dados de localização dos veículos dos dados de GPS, o que permitiu determinar a frequência por zona de tráfego.

Os dados sobre os preços da gasolina em Fortaleza foram obtidos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Esses dados foram também ajustados pelo IPCA para refletir a defasagem de preços em termos reais.

### 4.3. Estimação e análise dos efeitos da tarifa sobre a demanda

Os efeitos da tarifa na demanda por transporte público neste estudo foram medidos em termos de elasticidade da demanda em relação à tarifa. Considerando que a unidade de análise adotada foi a zona de tráfego, e que os dados neste nível de agregação foram organizados numa estrutura em painel (dados em estrutura transversal com base nas zonas de tráfego e longitudinal com base nos períodos do dia de análise), considerou-se, partindo do diagrama causal da Figura 4, que o efeito moderador da renda na relação entre tarifa e demanda varia espacialmente, conforme as seguintes hipóteses:

- Hipótese 1: A elasticidade da demanda em relação à tarifa é menor nas regiões com maior concentração de população de baixa renda e que tenha acesso restrito a modos de transportes individuais, possivelmente devido à falta de opção de modo de transportes para esta população em realizar viagens que sejam compulsórias;
- Hipótese 2: A elasticidade da demanda em relação à tarifa é maior nas regiões com maior concentração de população que tenha acesso a modos de transportes individuais, como resultado da possível migração para o modo individual com aumento da tarifa do transporte público;
- Hipótese 3: A elasticidade da demanda em relação a tarifa é maior em regiões com maior concentração de população com severas restrições orçamentárias, podendo ser o resultado da não realização de certas atividades, e, conseqüentemente, da redução de viagens não compulsórias, devido ao orçamento restrito;

- Hipótese 4: Durante o horário de pico, quando a maioria das viagens é motivada por trabalho ou educação, espera-se que os indivíduos com maior restrição ao uso do transporte individual continuem utilizando o transporte público, mesmo diante de aumentos na tarifa. Em contrapartida, fora desse período, quando uma parcela maior das viagens ocorre por outros motivos, como compras ou saúde, os indivíduos com restrições orçamentárias tendem a reduzir a frequência de viagens.

As duas primeiras hipóteses estão relacionadas ao efeito indireto da tarifa na demanda mediado pelo acesso ao modo de transportes, enquanto a terceira está relacionada ao efeito direto de não realizar atividades não compulsórias devido às restrições orçamentárias para realizar viagens. Já a última hipótese, refere-se à variação destes efeitos ao longo do dia devido às variações tarifárias. Estes efeitos serão medidos a partir da especificação de um modelo de regressão com controles definidos com base no diagrama causal da Figura 4.

Conforme o diagrama causal proposto, os efeitos de interesse podem ser influenciados por diferentes fontes de vieses causados por variáveis que afetam tanto a tarifa como a demanda e as suas relações, por meio de diferentes caminhos indiretos (efeitos de *backdoor*). Essas variáveis são chamadas de variáveis de confundimento na literatura de inferência causal (Huntington-Klein, 2021; Shrier e Platt, 2008; Textor et al., 2017) porque elas não fazem parte do caminho causal de interesse, relação entre tarifa e demanda, mas podem gerar uma associação espúria entre as variáveis de interesse. Assim, analisando os caminhos do diagrama proposto, os dois efeitos causais de interesse no diagrama (efeitos direto e indireto) da relação entre tarifa e demanda, podem ser estimados controlando (incluindo no modelo) as variáveis que fecham os caminhos que podem causar viés no modelo. Tais variáveis são: o custo dos insumos, a renda da população, a população de interesse, o número de atividades e o nível de serviço da oferta de ônibus.

Dessa forma, os dois efeitos de interesse relacionados às hipóteses mencionadas foram estimados em termos de elasticidade da demanda. Com base nas variáveis de controle selecionadas, adotou-se inicialmente um modelo de regressão de efeitos fixos com dados em painel, conforme especificado na Equação 1, que permite estimar o efeito direto da tarifa em cada região.

$$\log(Demanda_{it}) = \beta_0 + \beta_c \log(Tarifa_t) + \sum_{r=2}^6 \mu_r Reg_r \log(Tarifa_t) + \beta_f \log(Freq_{it}) + \beta_g \log(Gas_t) + \sum_{m=2}^{12} \delta_m Mes_m + \sum_{z=2}^{240} \gamma_z Zona_z + \alpha t + \epsilon_{it} \quad (1)$$

em que:  $Demanda_{it}$  é o volume de passageiros por transporte coletivo por ônibus gerados na zona  $i$  para um dado período de um dia  $t$ ;  $Tarifa_t$  é a tarifa do serviço para um dado período de um dia  $t$ ;  $Reg_r$  é a variável indicadora de uma região  $r$ ;  $Freq_{it}$  é a taxa total de veículos por hora por zona  $i$  num dado período de um dia  $t$ ;  $Gas_t$  é o preço do combustível ajustado pelo IPCA para um dado dia  $t$ ;  $Mes_m$  é uma variável binária (1 para o mês  $m$ , 0 caso contrário);  $Zona_z$  é uma variável indicadora para a zona  $z$ ;  $\beta_c$  é a elasticidade tarifa para a região central  $c$ ;  $\mu_r$  é a variação da elasticidade tarifa para uma região  $r$  em relação a  $c$ ;  $\beta_f$  é o efeito do nível de oferta do sistema de ônibus;  $\beta_g$  é o efeito da variação temporal dos custos de transporte;  $\delta_m$  é efeito sazonal na demanda para o mês  $m$ ;  $\gamma_z$  são os efeitos fixos das zonas;  $\alpha$  é o efeito de tendência da demanda ao longo do tempo, associado à facilidade de acesso aos modos de transporte individuais;  $\epsilon_{it}$  é o termo aleatório considerando outros fatores não observados na zona  $i$  e para um dado período de um dia  $t$ .

No modelo da Equação 1, o efeito moderador da tarifa sobre a realização de viagens não compulsórias (efeito direto) é avaliado por meio da especificação de diferentes elasticidades, de acordo com a região de estudo. Essa abordagem considera a hipótese de que regiões com populações em condições orçamentárias críticas tendem a apresentar maior elasticidade. Devido à indisponibilidade de dados socioeconômicos do censo para o período de estudo, considerou-se apenas o efeito da variação espacial da população e das atividades no meio urbano, assumindo que não houve alteração no uso do solo durante esse período. Dessa forma, o efeito da distribuição espacial da população e das atividades foi modelado a partir da definição de efeitos fixos, denotados como  $\gamma_z$ , das zonas de tráfego.

O efeito espacial do nível de oferta do sistema de ônibus foi incorporado por meio da variável *Freq*, que representa a frequência média das linhas de ônibus em cada zona de estudo e em cada período do dia. Já o efeito da variação temporal dos custos de transporte foi capturado pela variável *Gas*, que indica o preço diário da gasolina. Além disso, foram considerados os efeitos sazonais da demanda por mês, representados por  $\delta_m$ .

O termo  $\alpha t$  representa uma tendência da demanda ao longo do tempo, presumidamente associada à crescente facilidade de acesso aos modos de transporte individuais. Dessa forma, esse termo reflete o efeito da migração modal dos usuários do transporte público ao longo do tempo, em linha com as duas primeiras hipóteses. Espera-se, portanto, que regiões com população de maior renda e maior acesso a modos individuais apresentem elasticidades mais elevadas. Incorporando esse termo, assume-se que o modelo da Equação 1 permite estimar o efeito direto da tarifa para cada região,  $\beta_{rd}$ , como segue:

$$\beta_{rd} = \beta_c + \mu_r \quad (2)$$

Considerando que o termo  $\alpha t$  controla o efeito causal mediado pelo acesso aos modos individuais, sua remoção permite medir o efeito total da variação da tarifa na demanda, abrangendo tanto a não realização de viagens quanto a mudança de modo. Para estimar esse efeito total por região, define-se um novo modelo semelhante ao da Equação 1, porém sem o termo de tendência da demanda  $\alpha t$ . Nesse novo modelo, o resultado da Equação 2 representa o efeito total da tarifa na demanda por região, denominado  $\beta_{rt}$ . Assim, o efeito indireto da tarifa na demanda em cada região é dado pela Equação 3, a seguir:

$$\beta_{ri} = \beta_{rt} - \beta_{rd} \quad (3)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados neste estudo para cada período do dia de análise apresentam uma estrutura em painel compreendendo um total de 745 dias de registros e categorizados em 241 zonas de tráfego. No horário de pico, observou-se os seguintes volumes médios de validações por zona em cada região para os três anos de estudo: 543,81 (Central), 234,67 (Nordeste), 325,20 (Noroeste), 341,52 (Sudeste), 461,63 (Sudoeste), e 410,85 (Sul). Já para o período de hora social, observou-se: 308,84 (Central), 139,85 (Nordeste), 174,21 (Noroeste), 165,65 (Sudeste), 166,85 (Sudoeste), 161,84 (Sul). Considerando o maior adensamento da população nas regiões Noroeste e Sudoeste, que apresentam um maior número de zonas (Figura 3), estas são as regiões com maior demanda por transporte público em qualquer horário do dia. A região Central também se destaca devido a proximidade das atividades. Já as regiões ao leste da cidade, Nordeste e Sudeste, são as menos expressivas, como esperado.

### 5.1. Resultados dos modelos de regressão com efeitos fixos

A Tabela 2 apresenta os resultados dos modelos de regressão com efeitos fixos (os efeitos fixos das zonas não são apresentados). Todas as estimativas são significativas ao nível de 1%. Observa-se que os coeficientes estimados das variáveis de controle, preço da gasolina e frequência do serviço, estão consistentes com o esperado, sendo positivos. Embora o interesse não seja em avaliar o efeito dessas estimativas, de acordo com modelo, a elasticidade preço da gasolina na demanda por transporte público é menor do que 1 em todos os casos, indicando uma demanda inelástica. O fato desta estimativa ser positiva indica, portanto, que o custo elevado associado ao uso de veículos motorizados individuais diante do aumento dos preços de combustível pode levar ao aumento da demanda por transporte público. Já o efeito da frequência do serviço, indica uma demanda elástica com relação ao nível de serviço, especialmente no período de tarifa social. Isso corresponderia a uma elevada sensibilidade da população com relação ao nível de serviço medido em termos de frequência do serviço.

**Tabela 2:** Estimativa dos coeficientes dos modelos com e sem o termo de tendência,  $t$

Variáveis	Horário de pico	Horário de pico com termo de tendência	Horário social	Horário social com termo de tendência
$\log(\text{Tarifa})$	-0,674 (0,020)	-0,254 (0,026)	-0,482 (0,014)	-0,179 (0,019)
$\log(\text{Gasolina})$	0,520 (0,009)	0,648 (0,010)	0,623 (0,010)	0,680 (0,009)
$\log(\text{Frequência})$	1,017 (0,002)	1,001 (0,002)	1,053 (0,002)	1,036 (0,002)
$t$	-	-0,0002 ( $\approx$ 0.00)	-	-0,0002 ( $\approx$ 0.00)
<i>Nordeste.log(Tarifa)</i>	1,018 (0,020)	0,550 (0,027)	0,506 (0,015)	0,238 (0,019)
<i>Noroeste.log(Tarifa)</i>	-0,050 (0,023)	-0,049 (0,028)	0,002 (0,015)	0,001 (0,015)
<i>Sudeste.log(Tarifa)</i>	0,352 (0,024)	0,353 (0,024)	0,011 (0,017)	0,011 (0,017)
<i>Sudoeste.log(Tarifa)</i>	0,124 (0,022)	0,126 (0,023)	0,059 (0,016)	0,058 (0,016)
<i>Sul.log(Tarifa)</i>	0,212 (0,026)	0,217 (0,026)	0,022 (0,018)	0,025 (0,018)
<i>Mês 2</i>	0,066 (0,002)	0,070 (0,002)	-0,026 (0,002)	-0,024 (0,002)
<i>Mês 3</i>	0,080 (0,002)	0,085 (0,002)	-0,040 (0,002)	-0,037 (0,002)
<i>Mês 4</i>	0,068 (0,002)	0,078 (0,002)	-0,029 (0,002)	-0,022 (0,002)
<i>Mês 5</i>	0,062 (0,002)	0,072 (0,002)	-0,041 (0,002)	-0,034 (0,002)
<i>Mês 6</i>	0,025 (0,002)	0,035 (0,002)	-0,043 (0,002)	-0,034 (0,002)
<i>Mês 7</i>	-0,055 (0,002)	-0,041 (0,002)	0,005 (0,002)	0,007 (0,002)
<i>Mês 8</i>	0,071 (0,002)	0,091 (0,002)	-0,036 (0,001)	-0,020 (0,002)
<i>Mês 9</i>	0,063 (0,002)	0,082 (0,002)	-0,048 (0,002)	-0,032 (0,002)
<i>Mês 10</i>	0,061 (0,002)	0,083 (0,002)	-0,037 (0,002)	-0,017 (0,002)
<i>Mês 11</i>	0,057 (0,002)	0,082 (0,002)	-0,027 (0,002)	-0,005 (0,002)
<i>Mês 12</i>	-0,043 (0,002)	-0,019 (0,002)	0,008 (0,002)	0,030 (0,002)

$R^2 = 0,99$  (o resultado foi o mesmo para todos os modelos)

Tamanho da série (dias) = 745

Erro padrão entre parênteses

Os efeitos sazonais nos modelos para o horário de pico estão consistentes com o esperado, indicando uma menor demanda neste período do dia para os meses de julho e dezembro em relação a janeiro. Considerando que a demanda neste período corresponde em sua maioria às viagens com propósito trabalho e educação, os resultados mostram que o modelo está consistente conforme o que seria esperado para os meses de férias escolares do ano. No entanto, os efeitos sazonais para o período de tarifa social indicam um padrão inverso para os meses de julho e dezembro, indicando um aumento de demanda nestes meses, quando comparado aos outros meses do ano. Isso indica que durante os meses de julho e dezembro ocorre um acréscimo de viagens por outros motivos, que não sejam trabalho e educação, tais como compras e lazer.

A variável de tendência,  $t$ , indica uma queda da demanda ao longo do tempo, em ambos os períodos de análise. Esta tendência, conforme as hipóteses, pode estar relacionada a mudança de modo dos usuários que vem ocorrendo ao longo tempo devido possivelmente ao aumento da disponibilidade de veículos individuais, como a motocicleta. Além disso, ao comparar os efeitos da tarifa e da frequência, observa-se que a demanda por transporte público é mais sensível à frequência do serviço, utilizada como *proxy* para o nível de serviço, do que à tarifa. Isso sugere que a redução da demanda pode estar mais associada à qualidade do serviço do que ao valor da tarifa, levando alguns usuários a migrar para outros modos de transporte em resposta à deterioração do serviço ao longo do tempo.

Os modelos da Tabela 2 não apresentam explicitamente os efeitos diretos e indiretos por região. Os resultados indicam, em geral, que a demanda é inelástica em relação à tarifa para os ambos os períodos de estudo. Os resultados também mostram que os efeitos negativos da tarifa são maiores para o período de pico. Esses resultados reforçam a suposição da Hipótese 4, apresentada na Seção 4.3, de que, no horário de pico, indivíduos que realizam viagens regulares para trabalho e educação seriam mais sensíveis às variações na tarifa caso não fossem cativos do transporte público. O impacto mais significativo nesse período pode estar relacionado ao fato de que aqueles que desempenham atividades compulsórias ao longo do dia tendem a ter maior acesso a modos motorizados individuais. Para uma avaliação mais abrangente da Hipótese 4, seria essencial analisar os efeitos da variação tarifária considerando o tipo de viagem e o horário do dia, controlando o acesso a modos individuais de transporte, o que não é viável com os dados disponíveis.

Os resultados indicam uma tendência de atenuação do impacto negativo da tarifa em outras regiões, se comparadas à Região Central, uma vez que a maioria dos coeficientes das variáveis de interação foi positiva. No entanto, na Região Noroeste, durante o horário de pico, o efeito negativo da tarifa se intensifica. Esta região concentra uma parcela significativa da população de baixa renda e que depende do transporte público (Figura 3). Consequentemente, ela não só registra a maior demanda pelo serviço na cidade, como também possui uma infraestrutura robusta, com muitos residentes próximos a corredores importantes de transporte coletivo. Dessa forma, é provável que, ao longo da semana, o aumento tarifário impeça a realização de algumas viagens nessa área, enquanto, em regiões onde os moradores estão mais afastados dos centros de atividade, a frequência de viagens, já inferior, permaneça inalterada.

Esses resultados sugerem que o impacto da tarifa sobre a demanda é mais pronunciado em regiões próximas à área central (onde se concentram a maioria das atividades em Fortaleza), que possuem uma alta concentração de população de baixa renda e elevada demanda por transporte público. Isso corrobora a Hipótese 3, indicando que indivíduos de menor renda, residentes nas proximidades do centro, usariam o sistema com menor frequência caso a tarifa aumente.

## 5.2. Análise dos efeitos diretos e indiretos da tarifa na demanda

A Tabela 3 apresenta os efeitos totais, diretos e indiretos da tarifa, conforme definidos na Seção 4.3. Os resultados indicam que em todas as regiões os efeitos indiretos devido a mudança de modo são mais intensos do que o efeito direto de não realizar certas viagens. Com exceção da Região Nordeste, estes efeitos indiretos foram similares entre as regiões, sendo próximo a -0,4 para o período de pico, e próximo a -0,3 para o período de hora social. Esses resultados corroboram com as Hipóteses 1 e 2 do estudo, sugerindo que, em diversas regiões da cidade, indivíduos de menor renda com acesso a outros modos de transporte estão deixando o transporte público ao longo do tempo, possivelmente devido ao menor peso no orçamento familiar em usar modos como a motocicleta. No entanto, é fundamental destacar que essa constatação deve ser investigada mais a fundo, especialmente no que tange ao impacto do uso da motocicleta na demanda por transporte público em Fortaleza. Ademais, o fato de a elasticidade ser similar entre as regiões pode indicar que o acesso a modos individuais, como a motocicleta, entre domicílios de baixa renda não apresenta variações espaciais significativas, o que requer uma análise futura.

**Tabela 3:** Resultados dos efeitos total, direto e indireto

Região	Efeito Total (Pico)	Efeitos Diretos (Pico)	Efeitos Indiretos (Pico)	Efeito Total (Hora Social)	Efeitos Diretos (Hora Social)	Efeitos Indiretos (Hora Social)
<i>Centro</i>	-0,67	-0,25	-0,42	-0,48	-0,17	-0,31
<i>Nordeste</i>	0,33	0,0,29	0,04	0,02	0,05	-0,03
<i>Noroeste</i>	-0,72	-0,30	-0,42	-0,48	-0,17	-0,31
<i>Sudoeste</i>	-0,55	-0,12	-0,43	-0,42	-0,12	-0,30
<i>Sudeste</i>	-0,32	0,09	-0,41	-0,47	-0,16	-0,31
<i>Sul</i>	-0,46	-0,03	-0,43	-0,46	-0,15	-0,31

Durante o horário de pico, os resultados mostram que nas regiões Noroeste e Sudoeste, predominantemente habitadas por populações de baixa renda, apresentam efeito direto negativo mais intenso em relação às regiões de alta renda situadas no leste da cidade. Este resultado, em alinhamento com a Hipótese 3, sugere que uma parte da população de baixa renda pode estar reduzindo a frequência das viagens semanais no sistema devido ao aumento da tarifa, especialmente em regiões onde a demanda por transporte coletivo é maior. Esse cenário pode sinalizar um problema de exclusão social, conforme discutido na contextualização da área de estudo, ou ainda de sustentabilidade do sistema.

No horário social, verifica-se uma tendência de redução nas viagens (elasticidade negativa) em todas as regiões, com exceção da Nordeste, devido às restrições orçamentárias. Estes efeitos diretos são semelhantes entre as regiões, o que contraria as Hipóteses 3 e 4, segundo as quais uma maior concentração de população de baixa renda com restrições orçamentárias resultaria em uma elasticidade mais elevada da demanda em relação à tarifa, especialmente para viagens não compulsórias. Isso porque se espera, conforme discutido anteriormente, uma distribuição espacial heterogênea de indivíduos com restrições orçamentárias, o que influencia a realização de viagens. Esse resultado, portanto, ressalta a necessidade de investigações futuras.

A Região Nordeste apresentou resultados contrários às hipóteses descritas na Seção 4.3, apresentando efeitos positivos no pico e positivos, porém pouco expressivos, no horário social. Essa região possui a menor demanda por transporte público e uma infraestrutura precária em

comparação com outras áreas da cidade. Dessa forma, os resultados podem indicar a influência de algum fator não considerado nas análises, afetando as estimativas. É possível que esses efeitos estejam relacionados a mudanças no padrão socioeconômico, demográfico ou no uso do solo dessa região ao longo do tempo, variações temporais que não foram incorporadas ao modelo especificado na Seção 4.3. Em resumo, os principais resultados deste estudo confirmam as hipóteses do diagrama causal apresentado na Figura 4, indicando que a tarifa pode afetar a demanda de duas maneiras: i) diretamente, por meio da não realização da viagem; e ii) indiretamente, por meio da mudança de modo. De maneira geral, com exceção de uma região de Fortaleza, esses efeitos, medidos em termos de elasticidade, foram negativos, como esperado. Os efeitos indiretos foram mais evidentes nas análises, especialmente durante o período de pico, o que revela uma tendência de mudança de modo ao longo do tempo entre a população de baixa renda com frequência regular de viagens. Em relação aos efeitos diretos, estes foram mais pronunciados no pico e em regiões com maior concentração de população de baixa renda, sugerindo uma redução na participação dessa população em atividades devido às restrições orçamentárias familiares.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou analisar a elasticidade da demanda por transporte coletivo em Fortaleza em relação à mudança na tarifa. Enfatiza-se a relevância de se estimar a elasticidade da demanda num contexto de heterogeneidade espacial, temporal e socioeconômica. Sendo assim, a metodologia buscou sistematizar os fatores que afetam a relação entre tarifa e demanda por transporte coletivo. Com base nesta representação, propôs-se um método por meio de um modelo de regressão com efeitos fixos para estimar a elasticidade tarifa da demanda por transporte público, considerando aspectos que variam ao longo do tempo e entre regiões da cidade. O método foi utilizado para analisar a elasticidade da demanda em relação às variações tarifárias ocorridas em Fortaleza entre 2016 e 2018.

O estudo ressalta a importância de considerar fatores, que variam no espaço ou no tempo, que possam confundir a relação entre tarifa e demanda, evitando conclusões equivocadas. Para isso, foi adotada uma abordagem baseada em inferência causal, a partir da construção de um diagrama causal (fundamento numa representação conceitual de relações de interesse), distinguindo efeitos diretos (não realização da viagem) e indiretos (mudança de modo). Foram incluídas variáveis como o preço da gasolina, associado ao acesso a modos individuais; a frequência do transporte coletivo, relacionada ao nível de serviço; além da distribuição espacial da população, das atividades e da renda, modeladas como efeitos fixos. Essa abordagem, viabilizada por uma estrutura de dados em painel, demonstrou eficácia no controle de efeitos espúrios, possibilitando a estimativa da elasticidade em diferentes regiões e horários do dia. Dessa forma, o método proposto neste estudo permite estimar a elasticidade de curto prazo mesmo em contextos em que dados demográficos, socioeconômicos ou de uso do solo – que tendem a permanecer estáveis em um horizonte temporal reduzido – não estejam disponíveis para o período analisado.

Os resultados indicam que as variações tarifárias têm induzido, de forma generalizada, a migração para outros modos de transporte ao longo do tempo, especialmente no horário de pico. Além disso, nesse período, observou-se um impacto mais significativo da tarifa na redução do volume de viagens, sobretudo em regiões com maior concentração de população de baixa renda, que enfrenta restrições orçamentárias e depende mais do transporte público. Essa maior elasticidade da demanda no horário de pico difere do que se observa em outros contextos urbanos.

No contexto atual de Fortaleza, assim como em outras cidades do Sul Global, há uma forte concentração de viagens no transporte público durante o pico, predominantemente associadas a deslocamentos para o trabalho e realizadas por indivíduos com maior acesso a modos individuais. Esse resultado traz implicações relevantes para políticas tarifárias e estratégias de planejamento, uma vez que alterações nos preços, embora em um cenário de demanda ainda relativamente inelástica, mas sensível ao nível de serviço, podem impactar significativamente o uso do transporte público e comprometer sua sustentabilidade. Isso se torna especialmente crítico no período pós-pandemia de Covid-19, em que a demanda por transporte coletivo já sofreu uma queda expressiva.

Apesar de este trabalho ter mostrado evidências que corroboram com as hipóteses levantadas, foram identificadas algumas limitações no método proposto. Alguns resultados contraintuitivos, como elasticidades positivas em determinadas regiões, indicam limitações deste estudo. Uma dessas limitações decorre da indisponibilidade de dados que capturem variações na renda e em aspectos demográficos ao longo do tempo para o período analisado, o que poderia ser mitigado com a atualização dos dados censitários. Além disso, a ausência de informações sobre o acesso a veículos individuais e sobre a segmentação das viagens por motivo impossibilitou a verificação completa das hipóteses sobre a variação da elasticidade entre os horários do dia e entre regiões.

Ademais, as conclusões deste estudo estão restritas às variações tarifárias observadas no período pré-pandemia. Recomenda-se, sempre que possível, a utilização de dados mais recentes, especialmente considerando a acentuada queda na demanda por transporte público em Fortaleza nos últimos anos, intensificada após a pandemia de Covid-19. Vale ressaltar, que a disponibilidade de dados observacionais numa estrutura em painel, que permitam a análise proposta neste estudo, mesmo que num nível mais agregado de zonas de tráfego, representa ainda um desafio a ser superado. O zoneamento considerando é outro aspecto que merece destaque já que pode afetar os resultados encontrados, conforme o problema da área modificável.

Dado o potencial de aplicação do mapa mental de hipóteses proposto neste estudo, recomenda-se que pesquisas futuras voltadas à análise de efeitos de curto prazo incluam variáveis de controle adicionais que possam influenciar a demanda por transporte público. Entre elas, destacam-se atributos do sistema relacionados à qualidade do serviço, como tempos de viagem e sua variabilidade, tempos de espera nas paradas e número de transbordos. Além disso, fatores intangíveis, como a percepção de segurança dos usuários, e aspectos ligados ao sistema de atividades, como os propósitos das viagens (obtidos por meio de pesquisas domiciliares), também devem ser considerados. O acesso a outros modos de transporte, viabilizado pela disponibilidade de alternativas como motocicletas e serviços por aplicativo, assim como fatores demográficos e socioeconômicos com variações ao longo do tempo, são igualmente relevantes. Ainda com base no mapa de hipóteses causais proposto, sugere-se também para estudos futuros a análise dos efeitos causais de longo prazo da tarifa na demanda, levando em conta o impacto das alterações no uso do solo na oferta de serviços de transporte público, bem como o efeito de retroalimentação da variação da demanda sobre a tarifa, aspectos que não foram abordados neste estudo. Esse tipo de análise representa um grande desafio devido à dificuldade de se obter dados longitudinais sobre esses aspectos.

## CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

ABL: Conceituação, Metodologia, Curadoria de dados, Investigação, Análise formal, Escrita – rascunho original; FMON: Supervisão, Metodologia, Investigação, Recursos, Escrita – revisão e edição.

## DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram que não há conflito de interesses.

## USO DE TECNOLOGIA ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram que nenhuma ferramenta de inteligência artificial foi usada na pesquisa aqui relatada ou na preparação deste artigo.

### AGRADECIMENTOS

A presente pesquisa foi realizada com apoio da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

### REFERÊNCIAS

- Carvalho, C.H.R. e R.H.M. Pereira (2012) Efeitos da variação da tarifa e da renda da população sobre a demanda de transporte público coletivo urbano no Brasil. *Transportes*, v. 20, n. 1, p. 31-40. DOI: 10.4237/transportes.v20i1.464.
- Carvalho, C.H.R. (2016) *Aspectos Regulatórios e Conceituais das Políticas Tarifárias dos Sistemas de Transporte Público Urbano no Brasil*. Brasília: Ipea. Disponível em: <<http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/6635>> (acesso em 30/06/2025).
- Carvalho, C.H.R. (2021) *Alteração da Base de Precificação e Custeio dos Sistemas de Transporte Público Urbano no Brasil*. Tese (doutorado). Economia, Universidade de Brasília. Brasília, DF. Disponível em: <<http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/872626>> (acesso em 30/06/2025).
- Cascetta, E. (2009) *Transportation Systems Analysis, Models and Applications* (Vol. 29, 2a ed.). Berlin: Springer.
- Castro, I.R. (2019) *Compreensão das Mudanças no Uso do Solo e na Acessibilidade ao Trabalho da População de Baixa Renda em Fortaleza*. Dissertação (mestrado). Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/50146>> (acesso em 30/06/2025).
- Ferronato, L.G. (2002) *Potencial de Medidas de Gerenciamento da Demanda no Transporte Público Urbano por Ônibus*. Dissertação (mestrado). Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/1964>> (acesso em 30/06/2025).
- Garcia, C.S.H.F.; R. Macário; E.D.A.G. Menezes et al. (2018) Strategic assessment of Lisbon's accessibility and mobility problems from an equity perspective. *Networks and Spatial Economics*, v. 18, n. 2, p. 415-39. DOI: 10.1007/s11067-018-9391-4.
- Geurs, K.T. e B. Van Wee (2004) Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography*, v. 12, n. 2, p. 127-40. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005.
- Gomide, A.D.A. (2006) Mobilidade urbana, iniquidade e políticas sociais. *Políticas Sociais: Acompanhamento e Análise*, v. 12, n. 1, p. 242-250.
- Guzman, L.A.; J. Arellana; V. Cantillo-García et al. (2021) Revisiting the benefits of combining data of a different nature: Strategic forecasting of new mode alternatives. *Journal of Advanced Transportation*, v. 2021, p. 1-15. DOI: 10.1155/2021/6672961.
- Huntington-Klein, N. (2021) *The Effect: An Introduction to Research Design and Causality*. Boca Raton: CRC Press. DOI: 10.1201/9781003226055.
- IBGE (2011) *Censo Demográfico 2010: Características da População e dos Domicílios: Resultados do Universo*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/9662-censo-demografico-2010.html?edicao=10503&t=resultados>> (acesso em 30/06/2025).
- IBGE (2024) *Censo Demográfico 2022: Agregados por Setores Censitários: Resultados do Universo*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=41852&t=resultados>> (acesso em 30/06/2025).
- Lima, L.S. (2017) *Espraiamento Urbano por Autosegregação e seus Impactos na Acessibilidade Urbana de Fortaleza*. Dissertação (mestrado). Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/30015>> (acesso em 30/06/2025).
- Litman, T.A. (2004) Transit price elasticities and cross-elasticities. *Journal of Public Transportation*, v. 7, n. 2, p. 37-58. DOI: 10.5038/2375-0901.7.2.3.
- Lopes, A.S. (2015) *Transportes, Uso do Solo e Atividades: Modelagem Conceitual para o Planejamento da Acessibilidade Urbana*. Tese (doutorado). Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/14598>> (acesso em 30/06/2025).
- Lopes, A.S.; C.F.G. Loureiro e B. Van Wee (2019) LUTI operational models review based on the proposition of an a priori ALUTI conceptual model. *Transport Reviews*, v. 39, n. 2, p. 204-25. DOI: 10.1080/01441647.2018.1442890.
- Lucas, K. (2019) A new evolution for transport-related social exclusion research. *Journal of Transport Geography*, v. 81, p. 102529. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.102529.
- Mankiw, N.G. (2013) *Introdução à Economia* (6a ed.). São Paulo: Cengage Learning.
- Mokhtarian, P.L. e X. Cao (2008) Examining the impacts of residential self-selection on travel behavior: a focus on methodologies. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 42, n. 3, p. 204-28. DOI: 10.1016/j.trb.2007.07.006.
- NTU (2018) *Anuário 2017-2018*. Brasília: NTU. Disponível em: <<https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub636687203994198126.pdf>> (acesso em 30/06/2025).

- NTU (2021) *Anuário 2020-2021: A Reestruturação do Transporte Público Urbano*. Brasília: NTU. Disponível em: <<https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub637677328510412847.pdf>> (acesso em 30/06/2025).
- NTU (2022) *Anuário 2021-2022*. Brasília: NTU. Disponível em: <<https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub637956588268708311.pdf>> (acesso em 30/06/2025).
- Ortúzar, J.D. e L.G. Willumsen (2011) *Modelling Transport* (4th ed.). Hoboken: John Wiley and Sons, Ltd. DOI: 10.1002/9781119993308.
- Fortaleza (2019) *PASFOR: Plano de Acessibilidade Sustentável de Fortaleza*. Fortaleza: Prefeitura Municipal de Fortaleza. Disponível em: <<https://www.pasfor.com.br/>> (acesso em 30/06/2025).
- Paulley, N.; R. Balcombe; R. Mackett et al. (2006) The demand for public transport: The effects of fares, quality of service, income and car ownership. *Transport Policy*, v. 13, n. 4, p. 295-306. DOI: 10.1016/j.tranpol.2005.12.004.
- Pearl, J. (2001) *Causality: Models, Reasoning, and Inference*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pinto, D.G.L. (2021) *Compreensão das Desigualdades Socioespaciais na Acessibilidade ao Trabalho Formal e Informal em Fortaleza*. Dissertação (mestrado). Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/53751>> (acesso em 30/06/2025).
- Shrier, I. e R.W. Platt (2008) Reducing bias through directed acyclic graphs. *BMC Medical Research Methodology*, v. 8, n. 1, p. 70. DOI: 10.1186/1471-2288-8-70. PMID:18973665.
- Siqueira, M.F. (2020) *Metodologia de Análise dos Determinantes da Demanda por Transportes no Paradigma da Inferência Causal*. Dissertação (mestrado). Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/71005>> (acesso em 30/06/2025).
- Sousa, F.F.L.M. (2019) *Diagnóstico Estratégico das Desigualdades Socioespaciais na Acessibilidade ao Trabalho em Fortaleza*. Tese (doutorado). Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/51535>> (acesso em 30/06/2025).
- Textor, J.; B. Van der Zander; M.S. Gilthorpe et al. (2017) Robust causal inference using directed acyclic graphs: the R package 'dagitty'. *International Journal of Epidemiology*, v. 45, n. 6, p. 1887-94. DOI: 10.1093/ije/dyw341. PMID:28089956.
- Van Acker, V.; B. Van Wee e F. Witlox (2010) When transport geography meets social psychology: toward a conceptual model of travel behaviour. *Transport Reviews*, v. 30, n. 2, p. 219-40. DOI: 10.1080/01441640902943453.
- Van Wee, B. (2002) Land use and transport: research and policy challenges. *Journal of Transport Geography*, v. 10, n. 4, p. 259-71. DOI: 10.1016/S0966-6923(02)00041-8.
- Vuchic, V.R. (2005) *Urban Transit: Operations, Planning and Economics* (1a ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Wegener, M. (2004) Overview of land use transport models. In David, A.H.; K.J. Button; K.E. Haynes et al. (eds.) *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*. Leeds: Emerald Publishing, p. 127-146. DOI: 10.1108/9781615832538-009.