

SENSIBILIDADE DOS INDICADORES DE ACESSIBILIDADE AO TRABALHO À VARIABILIDADE DOS TEMPO DE VIAGEM POR TRANSPORTE PÚBLICO

Carlos Kauê Vieira Braga

Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes
Universidade Federal do Ceará

RESUMO

Estudos recentes têm investigado a problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade por transporte público nas cidades brasileiras. Em comum, esses estudos se baseiam em horários programados de GTFS para estimar a acessibilidade, porém novas pesquisas têm mostrado que a variabilidade nos tempos reais pode resultar em estimativas enviesadas dos indicadores de acessibilidade. Entretanto, esses esforços de pesquisa ainda não avaliaram como esse impacto se comporta para indicadores que consideram a competição por oportunidades. Utilizando dados de GPS para gerar arquivos GTFS que incorporem a dispersão dos tempos observados, este trabalho analisou o comportamento espacial desse impacto para dois indicadores locais: oportunidades cumulativas e 2SFCA. Encontrou-se que o efeito da variabilidade dos tempos de viagem na acessibilidade depende do tipo de indicador, do tempo limite adotado e da configuração espacial do uso do solo e da rede de transportes. Recomenda-se analisar esse efeito sobre a avaliação de intervenções de transporte público.

ABSTRACT

Recent studies have investigated the problematic issue of socio-spatial inequalities in accessibility by public transport in Brazilian cities. In common, these studies rely on GTFS scheduled timetables to estimate accessibility, but new research has shown that the variability in actual travel times may result in biased estimates of accessibility indicators. However, these research efforts have not yet evaluated what are the impacts on indicators that take into account the competition for opportunities. Using GPS data to generate GTFS files which incorporate the dispersion of observed travel times, this work analyzed the spatial behavior of such impact for two locational indicators: cumulative opportunities and 2SFCA. It was found that the effect of travel time variability on accessibility depends on the indicator type, the adopted time threshold, and on the spatial configuration of land use and transport network. It is recommended to assess this effect on the evaluation of public transport projects.

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, as condições de acessibilidade por transporte público no Sul Global têm atraído mais atenção dos pesquisadores. No Brasil, já foi mostrado em várias cidades que famílias de baixa renda e comunidades negras estão em desvantagem em termos de acessibilidade (Bittencourt *et al.*, 2020; Boisjoly *et al.*, 2020), enquanto que investimentos em transporte público aumentaram as desigualdades socioespaciais no acesso a empregos e escolas de ensino médio no Rio de Janeiro (Pereira *et al.*, 2019). Em Fortaleza, Lima *et al.* (2021) mostraram como o espraiamento urbano gera desigualdades socioespaciais na acessibilidade ao trabalho.

A escolha da métrica de acessibilidade nessas análises pode ser determinante para as conclusões encontradas (Neutens *et al.*, 2010; Tillema *et al.*, 2011; Pinto *et al.*, 2020). Pereira (2019) e Boisjoly *et al.* (2020) mediram a acessibilidade usando uma medida de oportunidades cumulativas, a mais usada na literatura devido à sua facilidade de cálculo e comunicação. Bittencourt *et al.* (2020) e Giannotti *et al.* (2021), por sua vez, adotaram uma medida que leva em conta a competitividade pelas oportunidades, trazendo o componente da demanda. O uso de indicadores de acessibilidade, em geral, envolve um *tradeoff* entre interpretabilidade e solidez teórica (Geurs e Wee, 2004).

Medidas de acessibilidade em redes de transporte público baseiam-se normalmente em horários programados de operação das linhas, através dos dados de GTFS, para incorporar o componente de transporte, não levando em consideração a incerteza e a variabilidade nos tempos de viagem. Não incorporar essa aleatoriedade pode produzir avaliações de acessibilidade enviesadas, dado o quão pouco claro é: a) como cada cidade constrói seu GTFS; e b) dimensão e distribuição da variabilidade do tempo de viagem sobre o território da cidade.

Com essa questão em mente, Wessel *et al.* (2017) e Arbex e Cunha (2020) desenvolveram metodologias para usar dados de GPS para corrigir horários programados GTFS para a frota de Toronto e São Paulo, respectivamente. Wessel e Farber (2019) aplicaram seu método para mais cidades e medidas de acessibilidades para trabalho, avaliando o impacto do uso de dados GTFS agendados. Indo adiante, Braga *et al.* (2020) propuseram uma metodologia para agregar tempos de viagem coletados de vários dias de GPS em segmentos GTFS, parada a parada por intervalo de tempo, sendo mais adequados às realidades do Sul Global, onde os dados GPS arquivados podem estar incompletos. Contudo, em geral, a avaliação espacial do impacto da incorporação de dados de GPS na acessibilidade nesses estudos foi baseada em uma única métrica de acessibilidade, sem considerar indicadores que incorporem a competição por oportunidades.

Buscando melhor considerar a variabilidade, Braga *et al.* (2020) propuseram também a reconstrução dos horários GTFS usando uma medida de dispersão dos tempos de viagem observados pelo GPS, trazendo explicitamente a sua variação dia-a-dia na rede de transporte público (Mazloumi *et al.*, 2010) para a estimativa do indicador de acessibilidade. Uma avaliação espacial mais completa dessa nova medida (em comparação com uma medida baseada na média) possibilitará análises sobre como os cálculos da acessibilidade por métricas distintas podem ser afetados pela incerteza do tempo de viagem do transporte público no dia-a-dia.

Portanto, este trabalho tem como objetivo principal analisar o impacto dos tempos de viagem observados e da variabilidade dia-a-dia dos tempos de viagem de transporte público na estimativa da acessibilidade às oportunidades de trabalho utilizando diferentes indicadores. Adota-se como estudo de caso o sistema de transporte público por ônibus de Fortaleza, de modo a investigar as diferenças espaciais entre as múltiplas estimativas de acessibilidade para as análises comparativas. Na seção 2, revisa-se inicialmente a importância da acessibilidade, trazendo os prós e os contras de cada indicador e como eles são adequados para diferentes fins. Em seguida, são discutidas as atuais metodologias que incorporam a incerteza do tempo de viagem no cálculo da acessibilidade. A seção 3 descreve a metodologia para a reconstrução do GTFS e o método para analisar indicadores locais de acessibilidade. Na seção 4, a proposta metodológica é aplicada ao caso específico de Fortaleza. Finalmente, a seção 5 apresenta as principais conclusões sobre as contribuições metodológicas, além de recomendações de análises que ampliem sua validade para contextos urbanos com distintas configurações socioespaciais.

2. INDICADORES DE ACESSIBILIDADE AO TRABALHO

Em um conceito mais geral e clássico, acessibilidade pode ser definida como o potencial de oportunidade de interação no espaço urbano (Hansen, 1959). De acordo com a classificação

proposta por Geurs e van Wee (2004), um indicador de acessibilidade pode ter quatro componentes principais: componente de uso do solo, transportes, temporal e individual. Baseados nesses componentes, os autores dividem as medidas em quatro tipos: medidas baseadas em infraestrutura, em localização, em pessoas, e em utilidade. Cada perspectiva incorpora cada componente de diferentes formas, com maior ou menor complexidade.

Dentre os tipos delimitados, destacam-se os indicadores baseados em localização. Esses indicadores incorporam o componente de transportes (geralmente através do tempo de viagem), de uso do solo (através da localização das atividades), temporal (através da acessibilidade calculada para hora pico, por exemplo) e individual. Nos estudos de caracterização da acessibilidade e avaliação de intervenções no Brasil, Pereira *et al.* (2019) e Boisjoly *et al.* (2020) mediram a acessibilidade usando uma medida locacional, a de oportunidades cumulativas, que calcula a quantidade de oportunidades alcançáveis dado um limite de tempo de viagem (função binária). Esta é a medida mais utilizada na literatura devido à sua facilidade de cálculo e comunicação, mas carece de solidez teórica, porque: a) considera que todas as oportunidades dentro do limiar têm a mesma atratividade; e b) não incorpora a demanda pelas oportunidades. Por isso, Geurs (2020) considera que essa medida não é adequada para avaliações econômicas de intervenções.

2.1. Indicadores que incorporam a competição pelas oportunidades

Indicadores locacionais de acessibilidade que incorporam a competição da demanda pelas oportunidades de atividades começaram a ter maior destaque a partir do trabalho de Shen (1998). O autor propôs um indicador que incorporava a competição a partir do cálculo da demanda potencial de cada localidade, onde era calculada a quantidade de pessoas que disputariam as oportunidades em cada local. Essa demanda potencial funcionaria como um valor a ponderar o cálculo da acessibilidade de cada origem. Uma reformulação do indicador de Shen (1998) foi proposta por Luo e Wang (2003), com a nova métrica sendo denominada de *Two-Step Flow Catchment Area* (2SFCA). O cálculo desse indicador começa pela definição de uma área de influência das localidades com atividades (sejam hospitais, escolas, empregos), computando a quantidade de pessoas em cada uma dessas áreas, e por fim dividindo essa quantidade demandada pelo total de atividades em cada localidade. Então, cada local com alguma atividade tem um número (chamado de *Provider to Population ratio*, ou PPR) como matrículas/pessoa, ou leitos/pessoa, ou empregos/pessoa. Por fim, o índice de acessibilidade de cada localidade é a soma dos PPR dentro de sua área de influência.

O indicador 2SFCA tem sido utilizado para medir a acessibilidade principalmente às atividades de saúde (Ni *et al.*, 2015; Wan *et al.*, 2012), mas também para outras atividades (Page *et al.*, 2018). Entretanto, em sua formulação original, essa métrica tem duas limitações principais: i) utiliza uma função binária para determinar a sua área de influência (mesma função de um indicador cumulativo, por exemplo); ii) infla a demanda e a oferta quando há sobreposição de áreas de influência. Avanços recentes aprimoraram a medição da área de influência com funções do tipo *stepwise* e gaussiana (Luo e Qi, 2009), enquanto outros atacaram o problema da inflação da demanda (Wan *et al.*, 2012) e oferta (Paez *et al.*, 2019).

Estudos que fizeram análises comparativas com a incorporação da competição encontraram resultados diversos. Giannotti *et al.* (2021) concluíram que medidas de desigualdades são semelhantes quando a competição é incorporada através do 2SFCA. Pinto *et al.* (2020), por sua vez, encontraram resultados divergentes de desigualdades ao incorporar competição

através do indicador de *Balancing Time* (Barboza *et al.*, 2021), que os autores creditaram à forma como a competição é incorporada no indicador. Outros indicadores de competitividade incluem medidas que usam uma abordagem probabilística (Cheng e Bertolini, 2013), assim como outras adaptações da formulação de Shen (1998), como o desenvolvido por Kelobonye *et al.* (2020).

3. DADOS DE GPS PARA APRIMORAR A MENSURAÇÃO DA ACESSIBILIDADE

O cálculo dos indicadores de acessibilidade em redes de transporte público evoluiu nos últimos anos (Farber e Fu, 2017), culminando com o uso de dados GTFS (*General Transit Feed Specification*) como sua principal entrada. A padronização do GTFS permitiu a criação de ferramentas de escolha de rota, que por sua vez calculam o tempo de viagem na rede entre os pontos de origem-destino, considerando caminhada, espera, integração e tempo dentro do veículo. O principal arquivo do GTFS que determina os horários de operação das linhas de transporte público é o arquivo *stop_times*, que lista o serviço programado do sistema. No entanto, foi demonstrado como os horários programados podem diferir significativamente dos horários reais (Mandelzys e Hellinga, 2010; Palm *et al.*, 2020), e essa realidade pode ser agravada em cidades brasileiras. Além disso, não está claro como cada cidade constrói seus horários representados no GTFS. Esses fatores podem levar a tempos de viagem estimados não confiáveis, o que pode produzir uma avaliação de acessibilidade enviesada.

Trabalhos recentes têm abordado esse problema. Wessel *et al.* (2017) e Arbex *et al.* (2020) desenvolveram metodologias para usar dados de localização automatizada de veículos (AVL, do GPS) para corrigir horários GTFS programados para frota de Toronto e São Paulo, respectivamente, melhorando a precisão da acessibilidade. Wessel *et al.* (2017) contavam com GPS coletado de um serviço API, quando os dados já estavam pré-processados. A metodologia proposta corrigiu os horários do GTFS diretamente com o atendimento observado durante o dia. Com proposta metodológica diferente, Braga *et al.* (2020) processaram dados de GPS brutos arquivados incompletos de Fortaleza. Os autores desenvolveram uma metodologia que primeiro processou os dados e calculou os tempos de viagem entre cada parada por intervalo de tempo, a partir de um banco de dados GPS de vários dias. Isso resultou em uma distribuição de tempo de viagem para cada segmento por intervalo de tempo, permitindo a seleção do valor mediano dessa distribuição para corrigir os horários para cada segmento-intervalo correspondente.

Em outro trabalho, Wessel e Farber (2019) aplicaram a metodologia proposta para GTFS de quatro cidades norte-americanas e calcularam dois indicadores de acessibilidade para empregos, comparando o acesso antes e depois da correção. Eles descobriram que: a) a acessibilidade baseada em horários programados pode superestimar as medidas em cerca de 5 a 15 % em média; e b) há padrões espaciais significativos na variabilidade, com grupos de sub e superestimação consistentes entre as cidades. A comparação, que contabilizou indicadores cumulativos e gravitacionais (função de impedância exponencial negativa), avaliou para cada cidade como o erro médio de acessibilidade variava conforme os parâmetros de cada função eram alterados.

3.1. Variabilidade dia-a-dia na estimação da acessibilidade

As aplicações atuais de correção por GPS de dados GTFS discutidas acima usaram amostras de mais de um dia de localização da frota, mas acabaram tirando a média de medidas para calcular a acessibilidade. Wessel e Farber (2019) tiveram acesso à localização de todos os

veículos em cada uma das cidades durante cinco dias, com exceção de algumas linhas onde foram utilizados dados programados. Em seguida, eles construíram um GTFS para cada dia e calcularam a acessibilidade resultante do serviço observada no dia correspondente, calculando finalmente uma acessibilidade média para essa amostra.

Mazloumi *et al.* (2010) mencionam que a variabilidade dos tempos de viagem em uma rota pode ser vista de três perspectivas: i) variabilidade de veículo a veículo, que é a variabilidade dos veículos que viajam na mesma rota ao mesmo tempo; ii) variabilidade dentro do dia, que é a variabilidade do tempo de viagem de acordo com a hora do dia; e iii) variabilidade dia a dia, que é a variabilidade de uma mesma viagem feita no mesmo horário, em dias diferentes. Trabalhos como Wessel *et al.* (2017) e Conway *et al.* (2018) abordaram a acessibilidade em função da variabilidade dos tempos de viagem durante o dia, apesar de ainda usarem dados programados. Wessel *et al.* (2017), ao considerar o horário observado a cada dia para reconstruir o GTFS, incorporou o primeiro tipo de variabilidade, além de aumentar a confiabilidade das medidas ao incorporar os tempos observados. No entanto, os autores utilizaram apenas a acessibilidade média dos dias analisados, não avaliando como a acessibilidade é impactada pela variabilidade do dia-a-dia do sistema de transporte público.

Entende-se que a amostra de GPS coletada pode ser usada para além de uma análise baseada em valores médios, principalmente em realidades onde o tempo de viagem em transporte público pode ser tão variável ao longo dos dias. Arbex *et al.* (2020) usaram AVL e dados de bilhetagem para calcular os tempos de viagem observados entre os pares OD para vários dias, propondo então a aplicação de um buffer de tempo de viagem (diferença entre o 95º e o 50º do tempo de viagem em cada OD) para cada tempo de viagem OD estimado para representar um cenário de variabilidade. Braga *et al.* (2020), por sua vez, propuseram a agregação dos tempos de viagem (recolhidos a partir de um mês de dados GPS) em cada segmento por intervalo de tempo, extraindo a medida do percentil 85 desses tempos como valor representativo de um cenário de variabilidade de medição. Os autores realizaram uma análise comparativa dos valores de acessibilidade (para oportunidades de trabalho e educação) calculados a partir do GTFS construído com a mediana dos tempos de viagem (P50) e com o percentil 85 (P85), sugerindo fortes variações de padrões espaciais sobre o território de Fortaleza.

Como lacuna principal, ainda não se sabe como a incorporação dos tempos de viagem observados impacta a acessibilidade de diferentes regiões a partir de indicadores que levam a competição por oportunidades em consideração. A competição, ao trazer a demanda pelas oportunidades através da distribuição da população, adiciona uma camada de complexidade ao indicador locacional de acessibilidade, levantando questões de como é impactada pela variabilidade dos tempos de viagem.

4. DADOS E MÉTODOS

4.1. Área de estudo: Fortaleza, CE

Fortaleza é a quinta cidade mais populosa do Brasil, com uma população estimada em 2,7 milhões de habitantes (IBGE, 2019). Seu sistema de transporte público conta com 318 linhas de ônibus e um total de cerca de um milhão de viagens realizadas diariamente. A Figura 1 apresenta um mapa contextualizando as regiões de Fortaleza propostas por Lima *et al.* (2021), destacando seus principais eixos de transporte. Já a Figura 2 mostra a distribuição espacial das variáveis demográficas e atividades sobre o território da cidade, que serão consideradas no

cálculo dos indicadores de acessibilidade.

4.2 Reconstrução dos arquivos *stop_times*

O método adotado acompanha a metodologia desenvolvida no trabalho de Braga *et al.* (2020). Primeiramente, as coordenadas brutas de GPS são transformadas em viagens de cada um dos veículos, com a identificação precisa do momento em que cada veículo passou por cada parada. Essa tabela resultante é semelhante a encontrada no arquivo *stop_times* do GTFS. Sabendo que os dados de GPS são incompletos e de que o objetivo é analisar a variabilidade dia-a-dia dos tempos de viagem, o método de Braga *et al.* (2020) propõe a agregação dos tempos de viagem em cada segmento de transporte público (cada trecho entre paradas), para intervalos temporais de 15 minutos. Assim, cada segmento terá uma distribuição de tempo de viagem para cada intervalo, com a quantidade de observações a depender da frequência de ônibus em cada via.

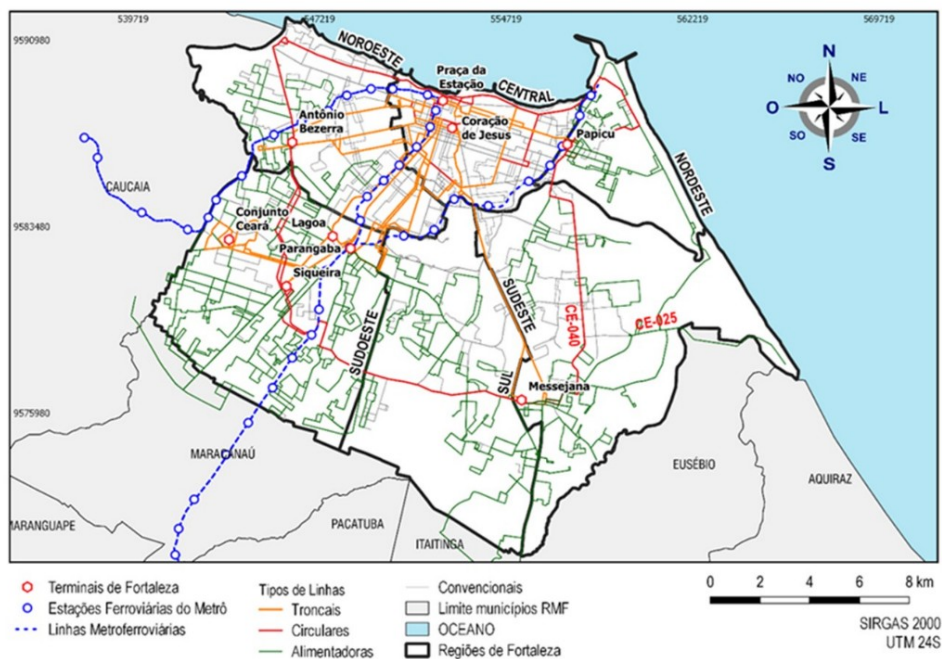


Figura 1: Regiões e eixos de transportes de Fortaleza

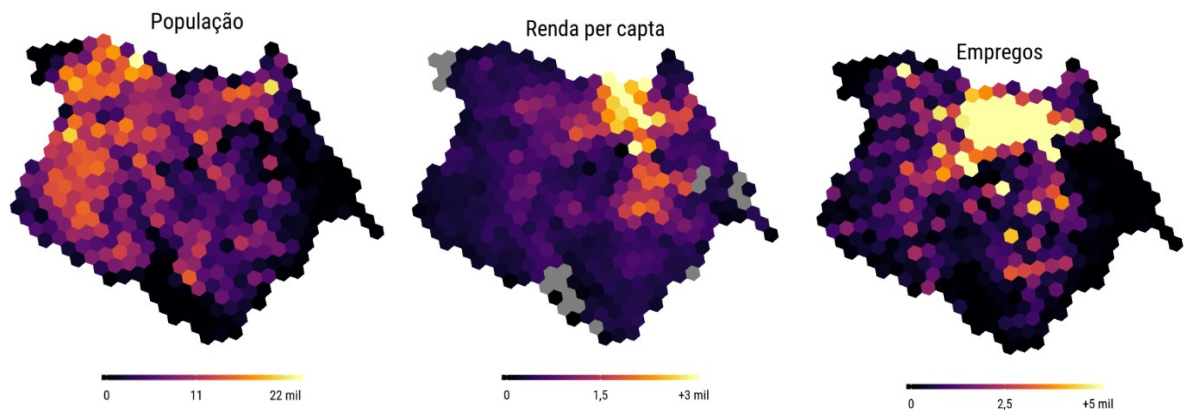


Figura 2: Distribuição espacial das variáveis socioeconômicas em Fortaleza

O método busca calcular: i) uma acessibilidade mediana do sistema que sirva de comparação para a acessibilidade calculada pelo GTFS programado; e ii) uma acessibilidade de dispersão que sirva de comparação para uma acessibilidade mediana. Dessa forma, a partir da distribuição dos tempos de viagem de cada trecho e intervalo, foi escolhida: a) a mediana dessas distribuições (P50) para representar o estado mediano do sistema; e b) o percentil 85 (P85) para representar o estado de dispersão, que representa a variabilidade dia-a-dia. A recomposição dos GTFS P50 e GTFS P85 acontece a partir da substituição dos valores de tempo de viagem escolhidos das distribuições, em cada trecho equivalente, para o mesmo intervalo temporal, encontrados no arquivo *stop_times* do GTFS. O GTFS P50, portanto, é usado para calcular a acessibilidade a ser comparada com a acessibilidade calculada pelo GTFS Programado, enquanto que o GTFS P85 é usado para calcular a acessibilidade a ser comparada com a acessibilidade calculada pelo GTFS P50.

4.3. Cálculo da acessibilidade

As análises comparativas da incorporação dos tempos de viagem observados foram feitas para dois indicadores de acessibilidade para a atividade de trabalho. Essa atividade foi escolhida por já ter sido extensivamente estudada na literatura, com destacados padrões socioespaciais. O primeiro indicador, o de oportunidades cumulativas, é o mais utilizado na literatura, inclusive em estudos que avaliaram o impacto da incorporação de dados de GPS no cálculo da acessibilidade (Wessel e Farber, 2019), e tem todas as suas limitações já bem delimitadas e discutidas na literatura (Geurs e van Wee, 2004). Como forma de incorporar a competição, foi escolhido o indicador 2SFCA. Em relação às mais recentes evoluções dessa família de indicadores, o mais simples 2SFCA foi escolhido porque seu uso e análise é mais consolidado na literatura e é de mais fácil interpretação. Além disso, foi utilizado para caracterizar a acessibilidade em estudos recentes no Brasil (Bittencourt *et al.*, 2020; Giannotti *et al.*, 2021).

A primeira etapa no cálculo dos indicadores de acessibilidade é estimar o tempo de viagem entre os pares de origem-destino (OD). Para isso, é utilizado o mecanismo de roteamento r5, através do pacote de R r5r (Pereira *et al.*, 2021). A aplicação da ferramenta fornece estimativas detalhadas do tempo de viagem considerando todas as etapas da viagem porta a porta: tempo de caminhada até a parada, tempo de espera, tempo no veículo e tempo de espera para possíveis integrações. Os pares OD são produzidos a partir do centróide das agregações espaciais H3 desenvolvidas pelo Uber. A agregação escolhida é um hexágono com diagonal de 357 metros, o que permite analisar a variabilidade da acessibilidade em alta resolução espacial.

Para cada um dos GTFS comparados, foi calculada uma matriz de tempo de viagem que representa a mediana dos tempos considerando o cálculo de uma matriz por minuto, entre 6h e 8h da manhã. O cálculo de uma matriz por minuto é feito porque, para viagens em transporte público, mesmo pequenas diferenças no horário de início da viagem podem implicar em grandes diferenças no tempo total de viagem, principalmente pela perda de integrações e longas esperas (Stepniak *et al.*, 2019). Com as matrizes disponíveis, os indicadores de acessibilidade podem ser calculados. O indicador cumulativo (aqui chamado de CMA) respeita a Equação 1, onde D_j é o total de oportunidades no local j .

$$A_i = \sum_{j=1}^j D_j f(c_{ij}) \quad \begin{aligned} f(c_{ij}) &= 1, \text{ se } t_{ij} \leq t_{max} \\ f(c_{ij}) &= 0, \text{ se } t_{ij} > t_{max} \end{aligned} \quad (1)$$

Já o cálculo do 2SFCA começa com o cálculo do valor de R, para cada local de destino, que é o quociente da quantidade de oportunidades no local j pela soma da quantidade de pessoas que conseguem alcançar aquele local j, dentro de um tempo limite t_{max} (Equação 2, esquerda). Esse número, para o caso de empregos, pode ser interpretado como a quantidade de empregos disponíveis no local para cada pessoa que tem capacidade de acessá-lo. Com isso, a acessibilidade de cada origem (A_i) é calculada como soma de cada um dos valores R que estão dentro de uma área de influência de um tempo limite t_{max} a partir da origem (Eq. 2, centro).

$$R_j = \frac{D_j}{\sum_k P_k f(c_{kj})} \quad A_i = \sum_{j=1}^n R_j f(c_{ij}) \quad \begin{aligned} f(c_{ij}) &= 1, \text{ se } t_{ij} \leq t_{max} \\ f(c_{ij}) &= 0, \text{ se } t_{ij} > t_{max} \end{aligned} \quad (2)$$

Tendo em vista o já estudado problema da unidade de tempo modificável (MTUP - *Modifiable Temporal Unit Problem*) (Pereira, 2019), ambos os indicadores serão avaliados para os tempos limites t_{max} de 60 e 90 minutos, que já foram utilizados em outros estudos de cidades brasileiras (Pereira, 2019). O tempo maior de 90 minutos também foi escolhido em virtude da variabilidade dos tempos de viagem, que tende a estender o tempo necessário para se alcançar as oportunidades. Os dados de empregos são representados pela Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) de 2017, do Ministério da Economia, que contém os empregos formais, enquanto a população total foi extraída dos dados do Censo 2010 do IBGE.

Com os indicadores estimados, o método de análise comparativa é então estabelecido. Duas comparações de acessibilidade são sugeridas. A primeira, entre o GTFS Programado e o GTFS P50, busca investigar o efeito do uso de dados empíricos da frota na acessibilidade. Por fim, a comparação entre o GTFS P50 e o GTFS P85 avalia o uso de uma medida de dispersão dos tempos de viagem, em comparação com uma medida de tendência central, no cálculo da acessibilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 mostra, para referência, as atuais condições de acessibilidade para dois indicadores para os tempos máximos estabelecidos, calculados utilizando o GTFS_P50. Observam padrões espaciais semelhantes para os dois indicadores.

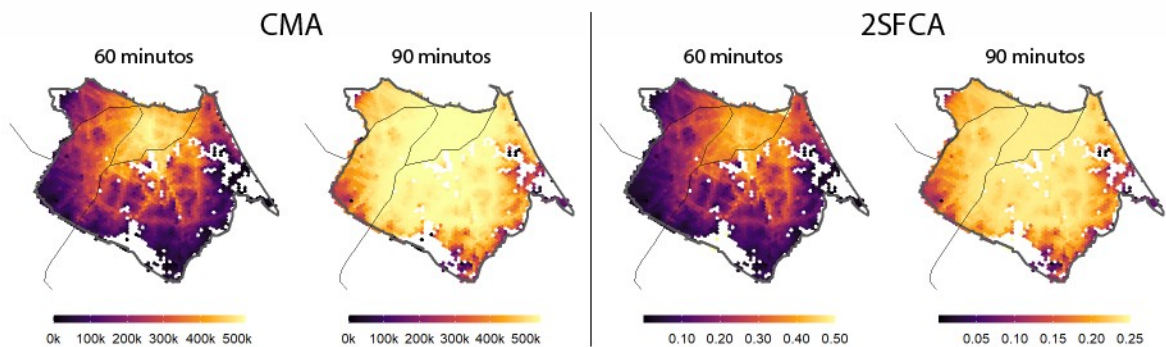


Figura 3: Acessibilidade por transporte público calculada pelo GTFS_P50

Já a Figura 4 mostra a diferença percentual da acessibilidade quando comparado o GTFS Programado (GTFS_PR) com o GTFS P50 (GTFS_P50), para os dois indicadores e tempos limite. Regiões em vermelho denotam localidades onde o GTFS Programado superestimou a acessibilidade. Nota-se que, em comum para ambos os indicadores para 60 min. de tempo limite, a região Central apresenta-se em destaque como a que sofre menos variação na sua acessibilidade. Áreas no entorno dessa região apresentam na sua maioria um cenário de superestimação pelo GTFS_PR, com exceção da região Sudoeste, provavelmente em virtude da Linha Sul do metrô. Comparando os dois indicadores, pode-se afirmar que os padrões de variabilidade da acessibilidade são bem semelhantes, com a exceção da região Sudeste que está mais a favor do GTFS_PR para o 2SFCA. Para 90 min., grande parte das regiões da cidade já tem um tempo de viagem suficiente para alcançar um número proporcional alto da quantidade total de oportunidades, o que faz com que a diferença seja mais uniforme e próxima de zero.

Partindo para comparação da incorporação dos tempos de viagem dia-a-dia, a Figura 5 mostra a diferença relativa entre o GTFS_P50 e o GTFS_P85. Regiões em vermelho indicam as localidades que foram mais impactadas pela variabilidade dia-a-dia dos tempos. Para o indicador cumulativo, como já observado por Braga *et al.* (2020), não foram registrados valores de variação positiva, ou seja, não há localidades que tiveram ganho de acessibilidade com a incorporação da variabilidade. Em geral, a região Central da cidade é menos afetada pela variabilidade, enquanto as regiões periféricas apresentam maior impacto, com alguns bolsões de maior valor. Aqui é mais nítido o impacto da Linha Sul do metrô que, por ser um serviço que opera em via totalmente segregada, não apresenta variabilidade nos tempos de viagem ao longo dos dias, resultando em uma grande área que se apresenta quase que inafetada pela variabilidade.

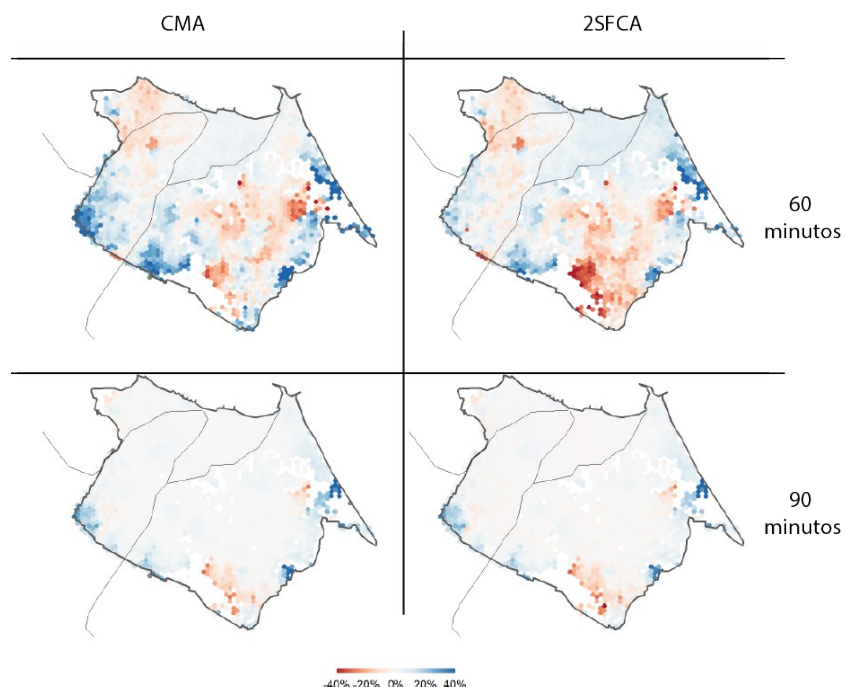


Figura 4: Diferença relativa da acessibilidade GTFS_PR x GTFS_P50

A incorporação da competição através do 2SFCA muda o cenário de super/subestimação em algumas regiões da cidade. A região Central é a que tem mais destaque quando comparada com o cenário mostrado no CMA, para 60 minutos. Com a competição, nessa região o impacto da variabilidade é invertido: o GTFS_P85 passa a superestimar. Isso pode ser explicado por como a competição é incorporada: ao mesmo tempo que essas regiões estão acessando menos localidades com a variabilidade incorporada (vide indicador cumulativo), menos pessoas de outras regiões estão disputando as oportunidades com as pessoas que moram na região Central. Com menos competição, a acessibilidade aumenta, e esse aumento acaba compensando a diminuição ocasionada pelo menor alcance às demais localidades.

Para 90 min., observa-se uma “expansão” das manchas mais claras que foram observadas nos indicadores de 60 min. Ainda assim, observam-se bolsões de grande impacto nas regiões mais extremas da cidade, em especial Sudoeste e Sudeste. A variabilidade afeta de forma tão intensiva essas regiões que mesmo com 90 min. de tempo total de viagem elas são impactadas na sua acessibilidade. Isso fornece evidências de que, enquanto 60 min. pode ser um limite mais adequado à acessibilidade medida pela mediana P50, um tempo limite maior como 90 min. talvez seja mais adequado para medir acessibilidade usando um valor de dispersão P85.

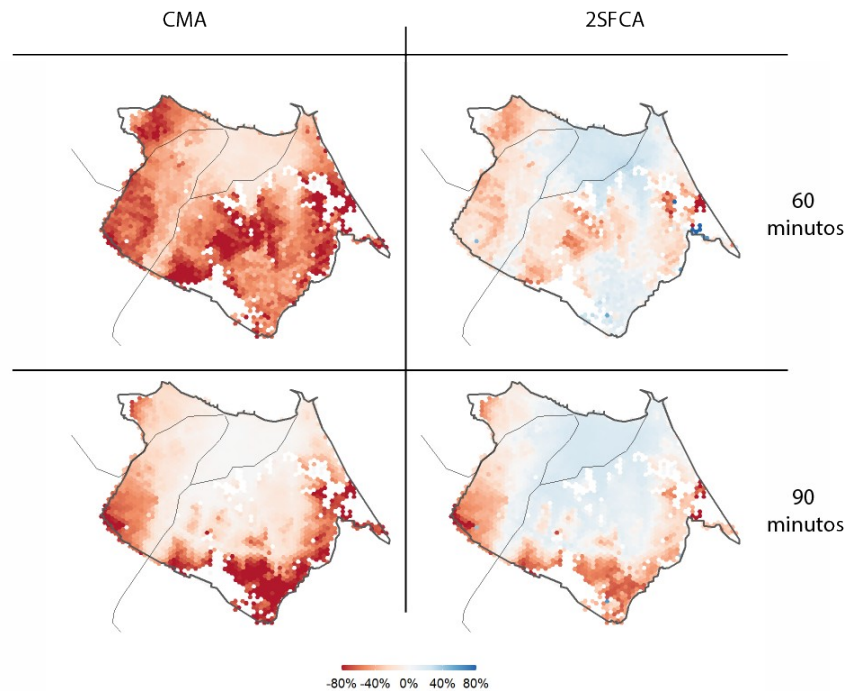


Figura 5: Diferença relativa da acessibilidade GTFS_P50 x GTFS_P85

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise das diferenças relativas da acessibilidade para indicadores locais com tempos limites diferentes deu evidências adicionais da importância da inclusão da variabilidade dos tempos de viagem em métricas distintas. Foi mostrado que o padrão espacial dessa diferença pode mudar consideravelmente dado o tipo de indicador e o valor do tempo limite. Para o impacto do GTFS mediano (P50) em relação ao programado, observou-se um padrão semelhante entre os indicadores, tanto quando comparados para 60 como para 90 minutos. Comparando os tempos limites, observamos que, enquanto para 60 min. há um padrão consolidado de diferença centro-periferia em Fortaleza, para 90 min. essa diferença acaba

sendo mais uniforme, pois grande parte da cidade já tem altos valores de acessibilidade.

Para o impacto da variabilidade dia-a-dia, observou-se um padrão diferente entre os indicadores no que diz respeito às regiões em que o GTFS_P85 sub ou superestima a acessibilidade. Para o indicador cumulativo, como esperado, a variabilidade dia-a-dia causa uma diminuição geral da acessibilidade, com o centro sendo menos impactado que a periferia. Para o indicador de competição, entretanto, são observadas algumas regiões da cidade com aumento da acessibilidade, em especial a sua região Central. O aumento é explicado porque, apesar da variabilidade causar uma diminuição no alcance de outras localidades, também diminui a quantidade de pessoas que estão competindo. Outro ponto a ser destacado nessa comparação é a importância do metrô que, por não ter variabilidade dia-a-dia, impacta positivamente uma grande população que mora no seu entorno.

Algumas limitações devem ser destacadas. Os dados de empregos só se referem a empregos formais, o que, apesar de se saber que seu padrão não difere significativamente dos empregos informais para Fortaleza (Pinto *et al.*, 2020), pode impactar de forma diferentes outras cidades brasileiras. Adicionalmente, sugere-se um aprimoramento e extensão da metodologia aqui aplicada para o cálculo dos indicadores. Primeiro, seria interessante fazer a mesma comparação aqui feita só que utilizando outras funções de impedância além da binária, como a do tipo gravitacional, para avaliar o impacto da variabilidade dos tempos de viagem. Segundo, recentes avanços dos indicadores da família 2SFCA oferecem metodologia mais concisas, com correção de limitações, que podem ser utilizadas (Pereira *et al.*, 2021).

Por fim, os resultados obtidos levantam questões sobre as conclusões encontradas em alguns estudos aqui revisados. Análises de caracterização da acessibilidade por transporte público, ao não considerarem a correção dos horários programados e a variabilidade dia-a-dia, podem estar superestimando a acessibilidade de localidades periféricas, resultando na subestimação dos níveis de desigualdades no acesso às oportunidades. A subestimação da desigualdade, por sua vez, pode ocasionar em resultados divergentes na avaliação dos impactos de intervenções de transporte público. Recomenda-se, portanto, uma extensão do impacto aqui discutido para análises de caracterização da problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade urbana, assim como em esforços de avaliação ex-ante e ex-post de projetos de transportes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arbex, R.; C. B. Cunha (2020) Estimating the influence of crowding and travel time variability on accessibility to jobs in a large public transport network using smart card big data. *Journal of Transport Geography*, 85(February), 102671. doi:10.1016/j.jtrangeo.2020.102671
- Barboza, M. H. C.; M. S. Carneiro, C. Falavigna, G. Luz e R. Orrico (2021) Balancing time: Using a new accessibility measure in Rio de Janeiro. *Journal of Transport Geography*, 90(October 2020). doi:10.1016/j.jtrangeo.2020.102924
- Bittencourt, T. A.; M. Giannotti e E. Marques (2020) Cumulative (and self-reinforcing) spatial inequalities: Interactions between accessibility and segregation in four Brazilian metropolises. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 0(0), 1–17. doi:10.1177/2399808320958426
- Boisjoly, G., B. Serra, G. T. Oliveira e A. El-Geneidy (2020) Accessibility measurements in São Paulo, Rio de Janeiro, Curitiba and Recife, Brazil. *Journal of Transport Geography*, 82(September 2019), 102551. doi:10.1016/j.jtrangeo.2019.102551
- Braga, C. K. V.; C. F. G. Loureiro e R. H. M. Pereira (2020) Analisando a variabilidade de estimativas de acessibilidade por transporte público a partir de dados de GPS. *Transportes*, 28(5), 169–184. doi:10.14295/transportes.v28i5.2175
- Cheng, J. e L. Bertolini (2013) Measuring urban job accessibility with distance decay, competition and diversity. *Journal of Transport Geography*, 30, 100–109. doi:10.1016/j.jtrangeo.2013.03.005

- Conway, M. W.; A. Byrd e M. Van Eggermond (2018) Accounting for uncertainty and variation in accessibility metrics for public transport sketch planning. *Journal of Transport and Land Use*, 11(1), 541–558. doi:10.5198/jtlu.2018.1074
- Farber, S. e L. Fu (2017) Dynamic public transit accessibility using travel time cubes: Comparing the effects of infrastructure (dis)investments over time. *Computers, Environment and Urban Systems*, 62, 30–40. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2016.10.005
- Geurs, K. (2020) Accessibility and Transport Appraisal - Approaches and Limitations. *International Transport Forum*.
- Geurs, K. T. e B. van Wee (2004) Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. doi:10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005
- Giannotti, M.; J. Barros, D. Tomasiello, D. Smith, B. Pizzol, B. M. Santos, C. Zhong, Y. Shen, E. Marques e M. Batty (2021) Inequalities in transit accessibility: Contributions from a comparative study between Global South and North metropolitan regions. *Cities*, 109(October), 103016. doi:10.1016/j.cities.2020.103016
- Hansen, W. G. (1959) How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Planning Association*, 25(2), 73–76. doi:10.1080/01944365908978307
- Kelobonye, K.; H. Zhou, G. McCarney e J. Xia (Cecilia). (2020) Measuring the accessibility and spatial equity of urban services under competition using the cumulative opportunities measure. *Journal of Transport Geography*, 85(January), 102706. doi:10.1016/j.jtrangeo.2020.102706
- Lima, L. S.; C. F. G. Loureiro, F. F. L. de M. Sousa e A. S. Lopes (2021) Espreadimento urbano e seus impactos nas desigualdades socioespaciais da acessibilidade ao trabalho em Fortaleza. *Transportes*, 29(1), 229–246. doi:10.14295/transportes.v29i1.2348
- Luo, W. e Y. Qi (2009) An enhanced two-step floating catchment area (E2SFCA) method for measuring spatial accessibility to primary care physicians. *Health and Place*, 15(4), 1100–1107. doi:10.1016/j.healthplace.2009.06.002
- Luo, W. e F. Wang (2003) Measures of spatial accessibility to health care in a GIS environment: Synthesis and a case study in the Chicago region. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(6), 865–884. doi:10.1068/b29120
- Mandelzys, M. e B. Hellinga (2010) Identifying Causes of Performance Issues in Bus Schedule Adherence with Automatic Vehicle Location and Passenger Count Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2143(1), 9–15. doi:10.3141/2143-02
- Mazloumi, E.; G. Currie e G. Rose (2010) Using GPS Data to Gain Insight into Public Transport Travel Time Variability. *Journal of Transportation Engineering*, 136(7), 623–631. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000126
- Ni, J., Wang, J., Rui, Y., Qian, T., e Wang, J. (2015) An enhanced variable two-step floating catchment area method for measuring spatial accessibility to residential care facilities in Nanjing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(11), 14490–14504. doi:10.3390/ijerph121114490
- Paez, A.; C. D. Higgins e S. F. Vivona (2019) Demand and level of service inflation in Floating Catchment Area (FCA) methods. *PLoS ONE* (Vol. 14). doi:10.1371/journal.pone.0218773
- Page, N.; M. Langford e G. Higgs (2018) An evaluation of alternative measures of accessibility for investigating potential ‘deprivation amplification’ in service provision. *Applied Geography*, 95(April), 19–33. doi:10.1016/j.apgeog.2018.04.003
- Palm, M.; A. Shalaby e S. Farber (2020) Social Equity and Bus On-Time Performance in Canada’s Largest City. *Transportation Research Record*, 2674(11), 329–342. doi:10.1177/0361198120944923
- Pereira, R. H. M. (2019) Future accessibility impacts of transport policy scenarios: Equity and sensitivity to travel time thresholds for Bus Rapid Transit expansion in Rio de Janeiro. *Journal of Transport Geography*, 74(October 2018), 321–332. doi:10.1016/j.jtrangeo.2018.12.005
- Pereira, R. H. M.; D. Banister, T. Schwanen e N. Wessel (2019) Distributional effects of transport policies on inequalities in access to opportunities in Rio de Janeiro. *Journal of Transport and Land Use*, 12(1), 741–764. doi:10.5198/jtlu.2019.1523
- Pereira, R. H. M.; C. K. V. Braga, L. Servo, B. Serra, P. Amaral, N. Gouveia e A. Paez (2021) Geographic access to COVID-19 healthcare in Brazil using a balanced float catchment area approach. *Social Science & Medicine*, 273(January), 113773. doi:10.1016/j.socscimed.2021.113773
- Pereira, R. H. M.; M. Saraiva, D. Herszenhut, C. K. V. Braga e M. W. Conway (2021) r5r: Rapid Realistic Routing on Multimodal Transport Networks with R 5 in R . *Findings*, 1–10. doi:10.32866/001c.21262
- Pinto, D. G. L.; C. F. G. Loureiro, F. F. L. de M. Sousa e B. Motte-baumvol (2020) Caracterização espacial da acessibilidade ao trabalho formal e informal da população de baixa renda em Fortaleza. *Anais da ANPET*, 2106–2118.
- Pinto, D. G. L.; C. F. G. Loureiro e F. F. L. de M. Souza (2020) As desigualdades socioespaciais na

- acessibilidade ao trabalho em Fortaleza sob distintas métricas. *Anais da ANPET*, 2191–2203.
- Shen, Q. (1998) Location characteristics of inner-city neighborhoods and employment accessibility of low-wage workers. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25(3), 345–365. doi:10.1068/b250345
- Stepniak, M.; J.P. Pritchard, K. Geurs e S. Goliszek (2019) The impact of temporal resolution on public transport accessibility measurement: Review and case study in Poland. *Journal of Transport Geography*, 75(January), 8–24. doi:10.1016/j.jtrangeo.2019.01.007
- Wan, N.; B. Zou e T. Sternberg (2012) A three-step floating catchment area method for analyzing spatial access to health services. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(6), 1073–1089. doi:10.1080/13658816.2011.624987
- Wessel, N.; J. Allen e S. Farber (2017) Constructing a routable retrospective transit timetable from a real-time vehicle location feed and GTFS. *Journal of Transport Geography*, 62(January), 92–97. doi:10.1016/j.jtrangeo.2017.04.012
- Wessel, N. e S. Farber (2019) On the accuracy of schedule-based GTFS for measuring accessibility. *Journal of Transport and Land Use*, 12(1), 475–500. doi:10.5198/jtlu.2019.1502

Carlos Kauê Vieira Braga (kaue@det.ufc.br)
Carlos Felipe Grangeiro Loureiro (felipe@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará - Departamento de Engenharia de Transportes7
Campus do Pici, Bloco 703, CEP 60440-900 – Fortaleza, CE – Fone/Fax: (85) 3366 9488