



Avaliação da Usabilidade do MDE TOPODATA para Mensurar a Acessibilidade de Ciclistas: Um Estudo de Caso para uma Cidade Pequena

Evaluating the Usability of the TOPODATA DEM to Measure Cyclist Accessibility: A Case Study of a Small Town

Marcelo Monari ¹, Paulo Cesar Lima Segantine ² e Irineu da Silva ³

¹ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Carlos-SP, Brasil. marcelo.monari@usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5562-3235>

² Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Carlos-SP, Brasil. pelsegantine@usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1012-0666>

³ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Carlos-SP, Brasil. irineu@sc.usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5775-6683>

Recebido: 03.2022 | Aceito: 06.2022

Resumo: A elaboração de planos de mobilidade urbana para as cidades brasileiras, principalmente as de pequeno porte, carece de subsídios técnicos, como levantamentos altimétricos que permitam representar o relevo de forma precisa, fazendo com que muitos planejadores em transportes recorram a Modelos Digitais de Elevação (MDEs). Este trabalho tem o objetivo de avaliar a usabilidade do MDE TOPODATA para mensurar a acessibilidade de ciclistas a seus potenciais destinos de viagem. Um estudo de caso foi conduzido em Bariri-SP, onde dispunha-se previamente de dados altimétricos levantados com a tecnologia GNSS. Velocidades esperadas para os ciclistas foram atribuídas aos segmentos viários em função de suas respectivas declividades TOPODATA e GNSS, permitindo identificar e comparar os caminhos mínimos homólogos entre as unidades de análise e Polos Geradores de Viagem (PGVs) por bicicleta. As acessibilidades homólogas, em cada unidade de análise, também foram comparadas entre si e as diferenças entre elas foram avaliadas de acordo com sua autocorrelação espacial, além de sua dependência espacial com relação às altitudes e declividades TOPODATA. O impacto à acessibilidade geral de diferentes grupos populacionais de Bariri-SP, quando utilizado o MDE, também foi verificado. Os resultados sugerem caminhos mínimos correlatos bastante semelhantes entre si, apesar das amostras de acessibilidades para ambas as fontes de informações altimétricas divergirem estatisticamente. Observou-se uma forte autocorrelação espacial entre as diferenças de acessibilidades homólogas, porém dependências espaciais de moderadas a fracas entre esta variável e as altitudes ou declividades TOPODATA. A acessibilidade geral de cada grupo populacional avaliado é similar inobstante ao critério utilizado.

Palavras-chave: Bicicleta. Acessibilidade. MDE. TOPODATA. GNSS.

Abstract: Devising urban mobility plans for Brazilian cities, especially small ones, lacks technical support, such as altimetric surveys that allow the representation of the terrain accurately, causing many transportation planners to benefit from Digital Elevation Models (DEMs). This study aims to evaluate the usability of TOPODATA DEM to measure the accessibility of cyclists to their potential travel destinations. A case study was conducted in the city of Bariri-SP (Brazil), where altimetric data collected using GNSS technology was previously available. Expected speeds for cyclists were assigned to the road segments as a function of their respective TOPODATA and GNSS slopes, allowing the identification and comparison of the shortest homologous paths between the units of analysis and bicycle Trip Attractors (TAs). The homologous accessibilities in each unit of analysis were also compared with each other, and the differences between them were evaluated according to their spatial autocorrelation, in addition to their spatial dependence on TOPODATA altitudes and slopes. The impact on the overall accessibility of different population groups in the city when using the DEM was also observed. The results suggest the shortest homologous paths that are quite similar to each other, although the accessibility samples for both sources of altimetric information differ statistically. A strong spatial autocorrelation was observed between differences in homologous accessibilities, but moderate to weak spatial dependences were observed between this variable and TOPODATA altitudes or slopes. The overall accessibility of each evaluated population group is similar regardless of the criterion used.

Keywords: Bicycle. Accessibility. DEM. TOPODATA. GNSS.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os primeiros esforços voltados ao planejamento cicloviário a nível nacional resultaram do 1º Choque do Petróleo, na década de 1970, período caracterizado pela restrição do uso de veículos motorizados (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2007). Desde então, políticas cicloviárias como o Programa Brasileiro de Mobilidade por Bicicleta têm sido importantes, porém não suficientes para prover subsídios técnicos que auxiliem, por exemplo, na elaboração de planos de mobilidade urbana. Nota-se ainda que diversos episódios pontuais de caráter recente têm trazido à tona a discussão sobre o panorama da mobilidade urbana no Brasil, como as popularmente chamadas “Jornadas de Junho”, em 2013, e a “Greve dos Caminhoneiros”, em 2018 (ANDRADE et al., 2016; MONARI et al., 2018). Não diferentemente, a pandemia do Coronavírus (COVID-19) declarada oficialmente no Brasil no início de 2020 também teve reflexos no cicloativismo brasileiro. Estima-se que a venda de bicicletas aumentou em 34,17% no primeiro semestre de 2021 com relação ao mesmo período do ano anterior (ALIANÇA BIKE, 2021), o que pode ser explicado, em partes, pela migração de muitos usuários do transporte público para o transporte ativo com o intuito de evitar aglomerações.

A fidelização dos novos adeptos do ciclismo, no entanto, apresenta-se como um desafio, uma vez que autores como Aldred e Jungnickel (2014) defendem que o uso da bicicleta, para além da existência de ciclofaixas e ciclovias, é estimulado por uma questão cultural. Mesmo nos menores municípios nacionais, onde a “cultura da bicicleta” sempre se fez presente, são observadas consequências notórias da priorização do transporte motorizado, principalmente no que se refere ao crescimento enérgico da frota de motocicletas na última década, estimulado, entre outros motivos, pela redução do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) e por demais estímulos econômicos e fiscais por parte do governo federal (SOARES; GUTH, 2018).

Neste contexto, a despeito das autoridades brasileiras em transportes se prontificarem a ajudar a reverter este quadro, é imprescindível que repasses federais sejam criteriosamente alocados em cidades de diferentes portes com notório potencial ciclável, e não só, como ocorre na prática, em regiões metropolitanas (RUBIM; LEITÃO, 2013; LOURENÇO; BOSCO JÚNIOR; BERNARDINIS, 2019). Mais ainda, conjuntos de informações indispensáveis ao planejamento territorial dos transportes também são particularidades destes municípios maiores, como pesquisas de origem-destino, georreferenciamento de acidentes de trânsito, contagens volumétricas de veículos, sistemas de gerência do pavimento urbano e levantamentos altimétricos que permitam representar com maior precisão o relevo estudado. Para o último caso, no entanto, Modelos Digitais de Elevação (MDEs) são costumeiramente utilizados para suprir a carência por subsídios técnicos, como o disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), intitulado TOPODATA.

O modelo TOPODATA é um MDE derivado dos dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). A missão SRTM foi realizada em fevereiro do ano 2000 em parceria entre a *US National Aeronautics and Space Administration* (NASA), o Centro Aeroespacial Alemão (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*, ou DLR) e a Agência Espacial Italiana (*Agenzia Spaziale Italiana*, ou ASI), e beneficiou-se da tecnologia de interferometria, isto é, da aquisição de dados altimétricos por intermédio de duas antenas SAR (*Synthetic Aperture Radar*) separadas por um dispositivo extensor de 60 metros (FARR et al., 2007), cobrindo cerca de 80% da superfície terrestre.

Com relação à América do Sul, o modelo SRTM foi originalmente disponibilizado com uma resolução espacial de 90 metros, porém, após o reprocessamento destes dados (interpolação) ao longo de todo o território brasileiro, o INPE passou a disponibilizar, em 2004, o MDE TOPODATA, cuja resolução espacial é de 30 metros (VALERIANO; ROSSETI, 2012), não no sentido de espaçamento amostral, mas de “tamanho do pixel” da camada *raster* oferecida a usuários de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Desta forma, apesar de manter as propriedades geomorfológicas do modelo original, os dados geoespaciais TOPODATA devem ser avaliados com relação à sua consistência lógica, completude, acurácias posicional e temporal e, para fins de planejamento cicloviário, sobretudo, com relação à sua usabilidade, ou seja, se os dados em questão atendem às especificações de uma determinada aplicação de interesse do usuário (ARAÚJO, 2016; IBGE, 2017).

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a usabilidade do MDE TOPODATA para mensurar a acessibilidade de ciclistas a potenciais Polos Geradores de Viagens (PGVs) por bicicleta. Um estudo de caso foi conduzido na cidade de Bariri-SP, para a qual dispunha-se de levantamentos altimétricos prévios (nivelamento das vias de tráfego auxiliado pela tecnologia *Global Navigation Satellite System*, ou GNSS), com

o intuito de comparar ambas as fontes de informações altimétricas no processo de identificação das rotas mais rápidas (rotas mínimas) até estes PGVs, partindo-se do princípio que a velocidade de circulação de ciclistas é diretamente influenciada pelas rampas dos segmentos viários por onde trafegam (TOOLE, 2010). Desta forma, as seguintes perguntas devem ser respondidas:

- a) Qual a diferença, em termos percentuais relativos, entre as rotas mínimas homólogas, identificadas com base no MDE TOPODATA e em dados altimétricos coletados em campo, para se acessar os PGVs por bicicleta?
- b) Existe diferença significativa entre as acessibilidades de ciclistas a PGVs por bicicleta mensuradas com base no MDE TOPODATA e em dados altimétricos coletados em campo?
- c) É possível identificar algum padrão espacial nas diferenças entre acessibilidades homólogas?
- d) Quando da ponderação da acessibilidade em cada unidade de análise pela população residente, a utilização do MDE TOPODATA reflete em uma acessibilidade geral distinta daquela calculada para os dados de campo?

Em virtude da abordagem metodológica da pesquisa (reprodutibilidade a outros locais de estudo ou utilizando-se de outros MDEs), a seleção do modelo TOPODATA é justificada unicamente por ser um dos MDEs mais familiares e difundidos entre pesquisadores e profissionais brasileiros. É imprescindível destacar, no entanto, que outros MDEs também estão atualmente à disposição do planejamento territorial dos transportes. O NASADEM de 2020, por exemplo, consiste em um reprocessamento dos dados SRTM de forma a preencher *gaps* de elevações existentes em modelos anteriores, como no próprio TOPODATA, garantindo uma melhor precisão altimétrica (NASA JPL, 2020; SILVA; RANGEL; CAMPOS, 2020). Modelos gratuitos concebidos a partir da fotogrametria, como o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) e o ALOS World 3D-30m (AW3D30), possuem cobertura global e resolução espacial similar à de seus pares (CARRERA-HERNÁNDEZ, 2021). O TanDEM-X, que assim como o SRTM também foi produzido a partir da interferometria por radar (porém utilizando-se dois satélites em formação controlada), embora apresente uma resolução espacial de 12 metros (DONG et al., 2021), consiste em um modelo comercial. Derivações deste último com resolução espacial similar à de outros MDEs (30 metros), no entanto, são livres de custo, como o Copernicus-DEM (CENCI et al., 2021) e o *Forest and Buildings removed Copernicus-DEM*, ou FABDEM (HAWKER et al., 2022).

2 REVISÃO DA LITERATURA

Acessibilidade é interpretada como a facilidade em se alcançar destinos de viagem (HANSEN, 1959) e entende-se que tal facilidade é inversamente proporcional à distância ou ao tempo de viagem. O tempo de viagem é um fator que exerce grande influência não só na decisão de indivíduos em utilizarem a bicicleta como modo de transporte, mas também na escolha do percurso pelo qual desejam trafegar (AULTMAN-HALL; HALL; BAETZ, 1997; STINSON; BATH, 2003; MENGHINI et al., 2010; SEGADILHA, 2014). Apesar de intrinsecamente ligada ao condicionamento físico e à idade dos ciclistas, esta variável também está relacionada com as características da própria via, sejam elas geométricas, operacionais ou que remetem ao seu entorno, visto que os ciclistas procuram sempre que possível desviar de segmentos viários caracterizados por condições adversas, objetivando manter um nível homogêneo de segurança e conforto ao longo de suas viagens (HOOD; SALL; CHARLTON, 2011; BROACH; DILL; GLIEBE, 2012).

Neste contexto, as declividades das vias (rampas) são reiteradamente citadas na literatura como potenciais barreiras ao transporte cicloviário (SENER; ELURU; BATH, 2009; WINTERS et al., 2010). Aclives íngremes demandam grande esforço físico e despendimento de energia dos ciclistas, enquanto declives íngremes atrapalham a segurança viária por dificultarem a manutenção do equilíbrio por parte dos mesmos. Entretanto, de maneira dissonante de outros fatores que influenciam no uso da bicicleta como modo de transporte urbano, para os quais podem ser previstas soluções técnicas (altas velocidades do tráfego motorizado podem ser atenuadas por meio de uma efetiva fiscalização eletrônica, interseções perigosas podem receber o tratamento adequado, a disponibilidade de espaço pode ser beneficiada da proibição de estacionamento de veículos etc.), nem sempre é possível modificar o greide da via de forma a torná-la mais atrativa ao ciclismo,

em virtude de restrições físicas e orçamentárias (ambiente construído, custos da terraplenagem etc.). Desta forma, sempre que possível, aconselha-se que vias cicláveis sejam planejadas por itinerários com declividades limitadas a uma taxa de 3% (CHIPS, 2021), sendo admissíveis valores de até 5% (AASHTO, 1999), e para os casos em que esta premissa não pode ser obedecida, rampas mais íngremes devem ser avaliadas de acordo com seu comprimento em aclave admissível ao ciclismo (FHWA, 1977; AUSTRROADS, 2014).

Apesar desta notória importância das características do relevo ao planejamento cicloviário, a carência de mapas topográficos acurados produzidos a partir de levantamentos a nível do solo faz com que muitos profissionais afins utilizem MDEs (ZIEMKE; METZLER; NAGEL, 2017; MASRI; BIGAZZI, 2019). No Brasil, por exemplo, autores como Neri (2012) e Simeão, Manzato e Viviani (2019) beneficiaram-se destes produtos cartográficos digitais para, respectivamente, planejar e avaliar a adequação de redes cicloviárias; e outros como Magalhães, Campos e Bandeira (2015) e Monari, Segantine e Silva (2019) buscaram identificar rotas cicláveis atribuindo impedâncias em função do grau de inclinação das vias extraído de MDEs. Além disto, diversas pesquisas desenvolvidas internacionalmente com o intuito de mensurar a acessibilidade a PGVs por bicicleta, principalmente na última década, devido à crescente evolução dos SIG, têm se beneficiado da avaliação de particularidades do relevo da área estudada.

Winters et al. (2013) elencaram cinco parâmetros distintos para a composição de um índice ciclável, dentre eles, as características do relevo que, para um estudo de caso conduzido em Vancouver (Canadá), foram obtidas de um MDE com resolução espacial de 30 metros. Krenn, Oja e Titze (2015), por meio de um estudo de caso em Graz (Áustria), também buscaram propor um índice ciclável que contabilizava as condições topográficas do relevo de uma unidade de análise, em termos da classe de declividade média dentro de uma região de influência de 200 metros a partir da mesma. Lin e Wei (2018) mensuraram o potencial ciclável relativo entre zonas de tráfego do distrito de Daan, em Taipei (Taiwan), sendo as regiões pior avaliadas aquelas afetadas por terrenos acidentados.

Lowry, Furth e Hadden-Loh (2016) visaram identificar segmentos viários que garantissem a conectividade entre áreas residenciais e PGVs por bicicleta em Seattle (EUA). Para isto, além de classificados com relação a seus níveis de estresse ao ciclismo, foram atribuídos também aos segmentos viários fatores de ponderação relacionados às suas declividades, de acordo com Taxas Marginais de Substituição (TMS) propostas por Broach, Dill e Gliebe (2012), ou seja, estima-se que os ciclistas estejam dispostos a trafegar até 37% a mais para evitarem trechos com aclives entre 2% e 4%; 120% a mais, para aclives entre 4% e 6%; e 323% a mais, para aclives superiores a 6%. Os resultados permitiram a identificação de regiões com acessibilidade prejudicada.

Ma e Dill (2017), em um estudo conduzido em Portland (EUA), buscaram investigar possíveis razões para o desacordo entre outros trabalhos da literatura no tocante à relação entre o potencial ciclável “mensurado” objetivamente, em função de atributos do ambiente construído, e “percebido” subjetivamente pelos ciclistas. Com relação ao primeiro, neste contexto, um dos atributos considerados no trabalho foi a porcentagem da área de influência (uma milha, em rede) de uma unidade de análise com declividades superiores a 25%. Os resultados sugerem que a disparidade entre potenciais cicláveis objetivo e subjetivo pode estar relacionada com o tipo de viagem e que, para viagens utilitárias, ambos desempenham um papel importante.

Grigore et al. (2019), por meio de estudo realizado em Basel (Suíça), buscou analisar a influência do relevo e de outros fatores à acessibilidade cicloviária, de acordo com diretrizes de normas técnicas que remetem à influência das declividades na redução da velocidade de ciclistas, para rampas ascendentes, e no risco de envolvimento em acidentes por parte dos mesmos, para rampas descendentes. Os resultados sinalizam para um limitado impacto da inserção de infraestruturas cicloviárias à acessibilidade dos ciclistas estudados, sendo os mesmos possivelmente mais sensíveis às distâncias de viagem e à influência do relevo.

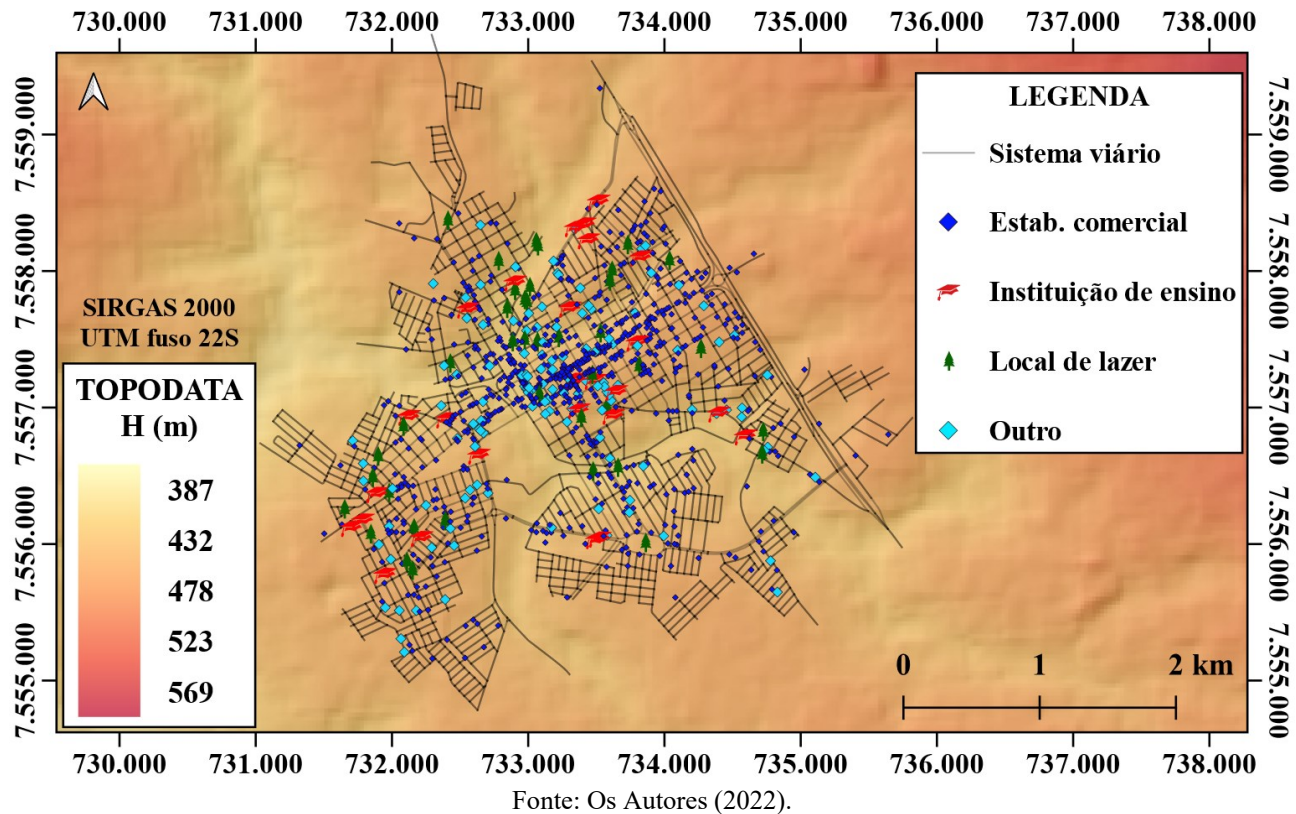
3 MATERIAIS E MÉTODO

Nesta seção, são apresentados os materiais e o método da pesquisa. Destaca-se que em praticamente todas as etapas foi utilizado o *software* QGIS versão 3.8.2 “Zanzibar” para o geoprocessamento dos dados espaciais, um SIG de código aberto disponibilizado gratuitamente para *download*.

3.1 Dados do estudo de caso

A Figura 1 apresenta o MDE TOPODATA referente à cidade de Bariri, localizada no interior do Estado de São Paulo e pertencente à mesorregião de Bauru-SP. Estima-se que sua população atual seja de 35.844 habitantes (IBGE, 2021). De acordo com a classificação proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1979), pouco mais de 62% da área urbana do município é avaliada como terreno plano (declividades inferiores a 3%), cerca de 37% como suave ondulado (declividades entre 3% e 8%) e o pequeno restante como moderadamente ondulado (declividades entre 8% e 13%).

Figura 1 – Bariri-SP: MDE TOPODATA, sistema viário e PGVs por bicicleta.



Para a representação do sistema viário do local estudado, foram utilizados dados abertos de mapeamento colaborativo da plataforma *OpenStreetMap* (OSM). Ao todo, conforme também apresentado na Figura 1, foram filtradas 2.261 feições vetoriais correspondentes aos segmentos viários de Bariri-SP, as quais foram submetidas à validação topológica e avaliadas de acordo com os sentidos de circulação permitidos. Nesta última etapa, os complementos do QGIS próprios ao cálculo de rotas pedem que o usuário especifique valores numéricos característicos dos distintos movimentos na rede, isto é, à vante, à ré, ou em ambas as direções, em uma coluna da tabela de atributos, geralmente padronizados, nesta ordem, como 1, -1 e 0. Para isto, primeiramente, os sentidos de circulação permitidos em cada segmento viário foram identificados por meio da navegação ao nível do solo na plataforma *Google StreetView*. Em seguida, sabendo-se que movimentos ascendentes e descendentes na rede devem ser avaliados de maneira distinta (por exemplo, um segmento viário de “mão dupla” com inclinação de 3% permite que os ciclistas trafeguem por um aclive de +3% ou, no sentido contrário, por um declive de -3%), os segmentos caracterizados pelo tráfego em ambas as direções foram duplicados e a cada segmento sobreposto foi atribuído um único sentido de circulação. Assim, a rede final do local de estudo foi aumentada para 3.900 segmentos viários (“arestas”), os quais se interceptam ou terminam em 1.428 “nós”, constituindo um grafo. Por último, a análise conjunta da direção de cada segmento viário desta rede final e das altitudes de seus respectivos nós inicial e final, extraídas do MDE TOPODATA por meio do complemento *Point Sampling Tool* do QGIS, permitiram calcular suas declividades médias.

Os potenciais PGVs por bicicleta em Bariri-SP foram georreferenciados por meio de uma busca

sistemática por estas instalações na plataforma *Google Maps*. É importante destacar que, nesta etapa, não foram consideradas as poucas indústrias ou fábricas do local de estudo. A justificativa para isto reside no fato de que estes PGVs específicos estão intimamente ligados às viagens por motivo de trabalho, aos quais ciclistas geralmente estão dispostos a trafegar maiores distâncias ou por mais tempo para acessá-los quando comparados com outros tipos de instalações (DILL; GLIEBE, 2008; KRIZEK; FORSYTH; BAUM, 2009). Consequentemente, alguns autores da literatura argumentam que medidas de acessibilidade relacionadas ao trabalho podem não refletir a facilidade de alcance de ciclistas a importantes destinos de viagem, como supermercados, escolas, locais de lazer etc. (MCCA HILL, 2018), enquanto medidas de acessibilidade não relacionadas ao trabalho podem auxiliar no planejamento territorial dos transportes por serem bons previsores de viagens a nível local e de atividade física (MERLIN, 2014; CHUDYK et al., 2015).

Neste contexto, quatro distintas categorias de PGVs por bicicleta foram elencadas: 1) Estabelecimento comercial, 2) Instituição de ensino, 3) Local de lazer e 4) Outro, cada qual também estratificada em subcategorias, conforme mais bem explicado ao longo das próximas seções. Ao todo, 950 potenciais PGVs foram georreferenciados, conforme também apresentado pela Figura 1.

No que se refere às unidades de análise para se mensurar a acessibilidade de ciclistas, optou-se por um conjunto de células regulares (200 x 200 metros) georreferenciadas que integram a chamada grade estatística, disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Dados referentes à população residente em cada célula e às suas características socioeconômicas (idade e renda) foram transferidos de maneira ponderada pela área de interseção com setores censitários, que agregam resultados do Censo Demográfico de 2010. A opção por este recurso é justificada pelo fato de que unidades maiores de análise estão sujeitas à “falácia ecológica”, isto é, ao assentimento de que a acessibilidade a PGVs por bicicleta ocorre de maneira homogênea entre todos os indivíduos que residem nas mesmas (IACONO; KRIZEK; EL-GENEIDY, 2010). Desta forma, para a cidade de Bariri-SP, foram filtradas 475 unidades de análise, correspondentes às células da grade estatística que configuram seus limites urbanos.

Com o intuito de avaliar a usabilidade do MDE TOPODATA para mensurar a acessibilidade de ciclistas do local de estudo, o mesmo foi comparado com dados altimétricos levantados por método preciso satelital. O levantamento previamente existente em Bariri-SP consiste em um nivelamento das vias de tráfego por meio do posicionamento relativo GNSS *Post-Processed Kinematic* (PPK), conduzido entre os dias 7 e 22 de setembro de 2017. Para esse levantamento, foram utilizados dois receptores GNSS de dupla frequência, sendo a antena fixa (tomada com referência) posicionada próxima da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do município, local de acesso restrito ao público e com pouquíssimos obstáculos como árvores e edificações, com o intuito de rastrear dados ininterruptamente por um intervalo de 9 horas, a uma taxa de rastreamento de 1 de segundo, e, com isso, obter-se as coordenadas da mesma por meio do ajustamento de linhas de base, pós-processadas a partir de 3 estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) próximas do local de estudo, isto é, EESC (São Carlos), SPBO (Botucatu) e SPPI (Piracicaba). A antena remota, por sua vez, foi transportada com o auxílio de um veículo por todos os locais acessíveis do sistema viário de Bariri-SP, além de também configurada com uma taxa de rastreamento de 1 segundo (simultâneo ao da antena fixa). O pós-processamento das informações beneficiou-se do *software* LEICA Geo Office Combined 7.0. Com relação aos principais parâmetros de processamento, foram considerados um ângulo de corte (α) de 15°, o modelo troposférico de Hopfield e desconsiderados modelos ionosféricos (SILVA; SEGANTINE, 2015; MONARI, 2018).

De posse dos dados pós-processados, todos os pontos para os quais não pôde ser fixada a ambiguidade foram descartados e os remanescentes foram submetidos a um processamento em lote no *software* MAPGEO2015, disponibilizado gratuitamente pelo IBGE, para definição de suas respectivas ondulações geoidais e subsequente conversão de suas alturas geométricas em altitudes ortométricas. Em seguida, os mesmos foram exportados em formato *shapefile* (.shp) para serem geoprocessados via SIG. Desta forma, foi possível definir as altitudes dos nós inicial e final e calcular a declividade média para a grande maioria das arestas do grafo, e para os locais não acessados durante o levantamento de campo ou cujos pontos levantados foram previamente descartados, essas altitudes foram definidas via interpolação, utilizando-se o método de ponderação pelo inverso das distâncias (*Inverse Distance Weighting*, ou IDW).

3.2 Acessibilidade a potenciais PGVs por bicicleta

A formulação matemática mais recorrente para se calcular a acessibilidade de uma determinada zona de origem i é amparada por métricas gravitacionais adaptadas do trabalho de Ingram (1971), conforme apresentado na Eq. (1).

$$A_i = \sum_{j=1}^n Y_j \times f(t_{ij}) \quad (1)$$

onde A_i é a acessibilidade da zona de origem i ; Y_j é a importância relativa da zona j ; e $f(t_{ij})$ é a função impedância para o tempo de viagem entre i e j .

3.2.1 IDENTIFICAÇÃO DAS ROTAS MÍNIMAS

As ferramentas computacionais utilizadas no cálculo de rotas, inclusive por muitos complementos de análise de rede de plataformas SIG, são amparadas pelo algoritmo de Dijkstra (1959), baseado na teoria dos grafos. Uma vez representado um sistema viário por nós e arestas, sendo para estas últimas atribuídos pesos em função dos tempos necessários para percorrê-las, a rota mínima entre um determinado par origem-destino é aquela cuja sequência de arestas contínuas minimiza o tempo acumulado de viagem, respeitando-se as restrições de movimentos na rede.

O tempo de viagem para se percorrer um determinado segmento viário da rede, por sua vez, pode ser calculado pela razão entre o comprimento deste segmento e a velocidade de circulação dos ciclistas ao longo dos mesmos. Em contrapartida, revisões da literatura direcionadas a investigar a velocidade operacional de ciclistas sugerem que não há um consenso entre as autoridades em transportes a respeito deste parâmetro (ALLEN et al., 1998; LIN et al., 2008), uma vez que o mesmo pode variar em função do grau de desenvolvimento de um país e do conseqüente perfil da demanda cicloviária, assim como do tipo de infraestrutura empregada ou de atributos geométricos da via, como as rampas. Neste último caso, em uma revisão do manual técnico *Guide for the Development of Bicycle Facilities* (AASHTO, 1999) realizada por Toole (2010), são sugeridos alguns intervalos de velocidades esperadas para ciclistas adultos que trafegam sob a influência de distintas rampas, isto é, 13 a 24 km/h para terrenos planos; 8 a 19 km/h para subidas; e 32 a 50 km/h para descidas (FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2000; LANDIS; PETRISCH; HUANG, 2004).

Desta forma, considerando-se como terreno plano subidas ou descidas com inclinação limitada a 3%, foi adotada para esta situação a máxima velocidade sugerida à mesma para fins de planejamento cicloviário (24 km/h). Para rampas mais íngremes que 3%, porém ainda admissíveis ao ciclismo, isto é, limitadas a 5%, foi considerado um decréscimo de 8 km/h com relação à velocidade para terrenos planos no caso de subidas, e um acréscimo de 8 km/h no caso de descidas, resultando em velocidades, nesta ordem, de 16 e 32 km/h, coerentes com o intervalo sugerido para cada situação. Analogamente, para o caso de rampas superiores a 5%, foi adotada uma variação de 16 km/h com relação à velocidade para terrenos planos, resultando em velocidades de 8 km/h, para subidas; e 40 km/h, para descidas. A Tabela 1 sintetiza os valores adotados para cada situação.

Tabela 1 – Velocidades adotadas para ciclistas sob influência de diferentes rampas.

Rampa	Velocidade para subidas (km/h)	Velocidade para descidas (km/h)
< 3%	24	24
3% - 5%	16	32
> 5%	8	40

Fonte: Adaptado de Toole (2010).

A Eq. (2) apresenta a função impedância para o tempo de viagem considerada neste trabalho. É importante destacar que em trabalhos similares da literatura, normalmente, são empregadas funções de

decaimento contínuas na forma exponencial negativa, as quais demandam, no entanto, dados robustos sobre as viagens realizadas por bicicleta no local estudado para calibração de seus coeficientes (IACONO; KRIZEK; EL-GENEIDY, 2010; VALE; PEREIRA, 2017; HAMIDI; CAMPOREALE; CAGGIANI, 2019). Não dispondo destes dados, uma alternativa para se definir a função de decaimento da medida de acessibilidade gravitacional consiste em arbitrar e ponderar intervalos de tempos de viagem coerentes com o limite tolerável por ciclistas (GEHRKE et al., 2020). Neste contexto, para o estudo de caso, o limite definido para caracterizar um determinado PGV não relacionado a trabalho como acessível por bicicleta é baseado em outras pesquisas que sugerem ambientes de influência do ciclismo entre 15 e 20 minutos de viagem (MCNEIL, 2011; HOSFORD; BEAIRSTO; WINTERS, 2022).

$$f(t_{ij}) = \begin{cases} 1,00, & \text{se } t_{ij} \leq 5 \\ 0,75, & \text{se } 5 < t_{ij} \leq 10 \\ 0,50, & \text{se } 10 < t_{ij} \leq 15 \\ 0,25, & \text{se } 15 < t_{ij} \leq 20 \\ 0,00, & \text{se } t_{ij} > 20 \end{cases} \quad (2)$$

onde t_{ij} é o tempo mínimo de viagem entre i e j , em minutos.

3.2.2 IMPORTÂNCIA RELATIVA DAS ZONAS DE DESTINO

No tocante à importância relativa das zonas de destino, propõe-se que cada PGV por bicicleta seja ponderado de acordo com o sistema de pontuação apresentado na Tabela 2. Os valores adotados têm por base diretrizes propostas no trabalho de McNeil (2011), contudo, sujeitas a algumas adaptações. Em síntese, o autor amparou-se em um estudo intitulado *US 2009 National Household Travel Survey* (FHWA, 2009) para quantificar a importância relativa de diferentes instalações, elencadas de forma a integrar um conjunto completo (“basket”) de potenciais destinos de viagem por bicicleta não motivadas por trabalho, de forma que pontos seriam atribuídos a cada tipo de destino caso um número mínimo dos mesmos, também estipulado pelo autor, fosse acessível a distância de até 4 km.

Tabela 2 – Sistema de ponderação para PGVs por bicicleta.

Categoria	Tipo de PGV (k)	Peso (pk)
Estabelecimento comercial	Comércio de mercadorias específicas (1)	2,5
	Salão de estética, cabeleireiro etc. (2)	2,5
	Loja de roupas (3)	5,0
	Restaurante, lanchonete, bar etc. (4)	7,5
	Supermercado ou mercearia (5)	7,5
Instituição de ensino	Creche (6)	2,5
	Pré-escola (7)	2,5
	Ensino Fundamental (8)	5,0
	Ensino Médio (9)	7,5
Local de lazer	Ensino Superior (10)	7,5
	Praça ou parque público (11)	15
	Clube (12)	10
Outro	Serviço em geral (banco, correios etc.) (13)	7,5
	Organização religiosa (14)	7,5
	Unidade de saúde (15)	10
Total	-	100

Fonte: Adaptado de McNeil (2011).

Neste trabalho, analogamente, para cada categoria dos PGVs georreferenciados foram criadas novas subcategorias, de forma a contabilizar também essa importância relativa entre as mesmas. Por exemplo: dentro da categoria “Estabelecimento comercial”, assim como sugerido por McNeil (2011), espera-se que supermercados atraíam um maior contingente de ciclistas quando comparados com lojas específicas, como floriculturas, lojas de informática etc. Por outro lado, alguns PGVs considerados na publicação original foram

excluídos do sistema de pontuação em virtude de sua rara existência nas cidades brasileiras, como pontos de parada de Veículos Leves sobre Trilhos (VLT), e pontos de parada de ônibus não foram incluídos em virtude de que, nesta pesquisa, optou-se por não estudar a integração entre as bicicletas e o transporte público. Por último, alguns tipos de destino de viagem considerados separadamente no trabalho base foram aqui reagrupados (por exemplo, bancos e agências de correios pertencem agora a uma nova subcategoria, a de “Serviço em geral”) e outros PGVs até então desconsiderados foram incluídos, como unidades de saúde.

Uma vez atribuídos os correspondentes pontos a cada PGV georreferenciado e identificada a densidade de pontos por unidade de análise, a importância relativa de cada zona de destino j pode ser calculada conforme as Eq. (3) e (4).

$$y_j = \sum_{k=1}^{15} p_k \times q_{j,k} \quad (3)$$

$$Y_j = \frac{y_j}{\sum_{j=1}^n y_j} \quad (4)$$

onde y_j é o potencial de atratividade da zona j ; p_k é o peso do PGV tipo k ; $q_{j,k}$ é a quantidade de PGVs tipo k inseridos em j ; Y_j é a importância relativa da zona j ; e n é o número de unidades de análise.

3.3 Autocorrelação espacial

A identificação de um padrão espacial nas diferenças entre acessibilidades homólogas é baseada no Índice de Moran Global (I), que busca avaliar a interdependência entre os valores observados para uma variável em uma determinada unidade de análise e em seus vizinhos por meio da covariância entre eles (BLACK, 1992; LUZARDO; CASTAÑEDA FILHO; RUBIM, 2017). Em uma análise univariada, isto é, quando se busca avaliar a autocorrelação de uma variável entre um determinado polígono e aqueles próximos a ele, o cálculo de I pode ser realizado conforme apresentado pela Eq. (5), com valores variando de -1 a 1, sendo que valores menores que zero indicam autocorrelação espacial negativa; e maiores que zero, positiva (MORAN, 1947). Além disso, *clusters* de associação espacial positiva e *outliers* de associação espacial negativa podem ser identificados através de *Local Indicators of Spatial Association* (LISA), via Índice de Moran Local, conforme apresenta a Eq. (6) (ANSELIN, 1995).

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \times (x_i - \bar{x}) \times (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

$$LISA_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{m} \times \sum_{j=1}^n w_{ij} \times (x_j - \bar{x}) \quad (6)$$

onde I é o Índice de Moran Global; $LISA_i$ é o Índice de Moran Local da zona i ; n é o número de unidades de análise; w_{ij} é igual a 1, se a zona i é contígua à zona j ; e 0, caso contrário; x_i e x_j são, respectivamente, os valores da variável de análise x para as zonas i e j ; \bar{x} é o valor médio de x ; e m é a variância de x .

Neste trabalho, foram conduzidas análises espaciais com o auxílio do programa *GeoDa*, disponível gratuitamente para *download* e que, diferentemente de outros softwares afins, permite que o usuário conduza também análises bivariadas, isto é, verificações da dependência espacial de uma variável observada em uma unidade de análise com relação a outra variável observada em unidades adjacentes, sendo a formulação matemática para tal simplesmente adaptada da aqui apresentada (a expressão $(x_j - \bar{x})$ passa a ser substituída por elementos referentes à segunda variável de interesse).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados e discussões da pesquisa.

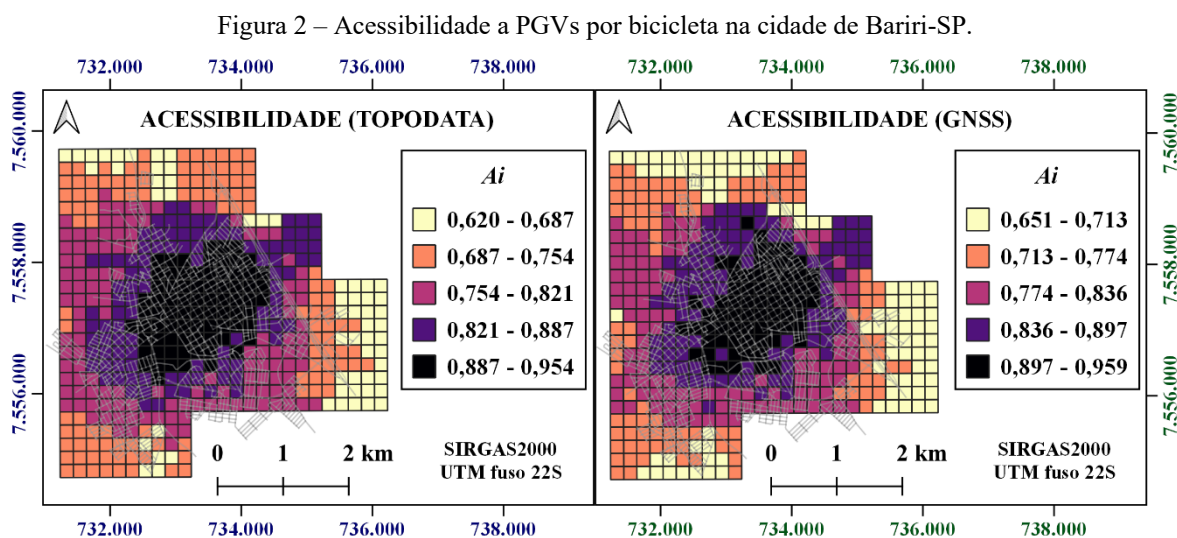
4.1 Comparação entre rotas mínimas homólogas

As rotas mínimas foram calculadas utilizando-se ambas as fontes de informações altimétricas da área estudada e então comparadas. Ao todo, para cada uma das 475 unidades de análise, foram identificadas 950 rotas mínimas para se acessar os PGVs georreferenciados, resultando em 451.250 pares de rotas homólogas, dentre os quais apenas 9.789 (2,17%) correspondem a um trajeto idêntico.

Em termos práticos, não foram observadas diferenças significativas entre os tempos de viagem referentes às rotas homólogas, sendo aquelas calculadas por meio dos dados GNSS, em média, apenas 7 segundos mais rápidas que seus pares, além de 448.708 (99,43%) rotas homólogas calculadas divergentes em menos de 1 minuto entre si. Foram identificados, no entanto, alguns casos em que a diferença entre os tempos para se acessar um mesmo PGV por bicicleta, partindo de uma mesma origem, é da ordem de 2 minutos, particularmente com origens no extremo sudeste da área de estudo e com destino à região central. Já com relação às distâncias de viagem, em termos percentuais relativos, os resultados também sinalizam para rotas correlatas sistematicamente semelhantes entre si, diferindo, em média, em 1,7%, porém sendo observados casos extremos em que essa diferença é de 70%.

4.2 Comparação entre acessibilidades TOPODATA e GNSS

A Figura 2 apresenta mapas comparativos da acessibilidade de ciclistas a PGVs por bicicleta na cidade de Bariri-SP, mensuradas com base no MDE TOPODATA e nos dados GNSS. Visualmente, nota-se uma evidente semelhança entre eles, sendo a região central da cidade, onde está concentrada a maior parte dos PGVs, caracterizada por altos índices de acessibilidade; e as regiões periféricas, para as quais os tempos de viagem até estes destinos são consideravelmente maiores, caracterizadas por menores índices de acessibilidade.



A Tabela 3 apresenta estatísticas descritivas para as acessibilidades TOPODATA e GNSS, assim como para as diferenças entre valores homólogos das mesmas ($\Delta_i = A_{i,GNSS} - A_{i,TOPODATA}$). No que se refere à acessibilidade TOPODATA, os valores para a área de estudo variam entre 0,620 e 0,954; e à GNSS, entre 0,651 e 0,959. A diferença média entre acessibilidades homólogas sugere que, quando utilizado para fins de planejamento ciclovitário, o MDE TOPODATA reflete em índices de acessibilidade da ordem de 0,4% menores que aqueles mensurados por dados de campo, podendo variar de -2,4% a 6,6% para algumas unidades de análise.

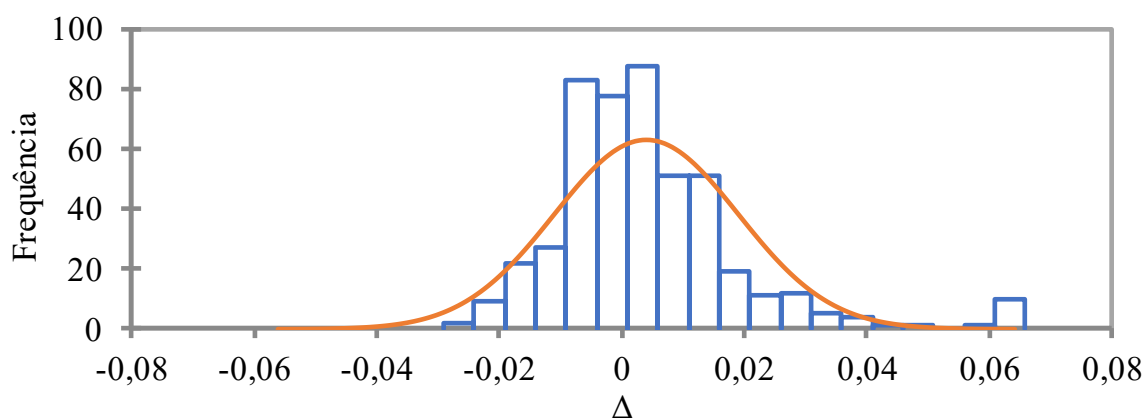
Com o intuito de comparar as amostras de acessibilidades homólogas, as diferenças entre elas foram previamente submetidas a testes de normalidade, para posterior seleção do teste estatístico mais adequado, isto é, o teste *t* para amostras pareadas, em caso afirmativo; e testes não-paramétricos equivalentes, caso negativo (FIELD, 2009). Ambos os testes de Shapiro-Wilk e de D’Agostino-Pearson foram conduzidos com o auxílio do suplemento gratuito *Real Statistics* para Microsoft Excel e, para ambos, não foi verificada a distribuição normal da amostra, o que também pode ser visualmente confirmado pela distribuição de frequências apresentada na Figura 3. Desta forma, procedeu-se com o teste bicaudal de postos sinalizados de Wilcoxon para amostras pareadas, cujos resultados (*z-score* = 4,41; $p = 1 \times 10^{-5} < 0,05$) sugerem rejeitar a hipótese nula de que não há diferença entre as medianas das acessibilidades TOPODATA (0,792) e GNSS (0,797).

Tabela 3 – Estatística descritiva: acessibilidades TOPODATA, GNSS e Δ entre elas.

Estatística descritiva	A_i (TOPODATA)	A_i (GNSS)	Δ
Média	0,793	0,797	0,004
Desvio padrão	0,082	0,082	0,015
Variância	0,007	0,007	0,000
Mediana	0,792	0,797	0,002
Moda	0,744	0,738	-0,006
Assimetria	0,031	0,079	1,647
Curtose	-0,930	-1,113	4,491
Máximo	0,954	0,959	0,066
Mínimo	0,620	0,651	-0,024
<i>n</i>	475	475	475

Fonte: Os Autores (2022).

Figura 3 – Distribuição de frequências das diferenças entre acessibilidades homólogas.

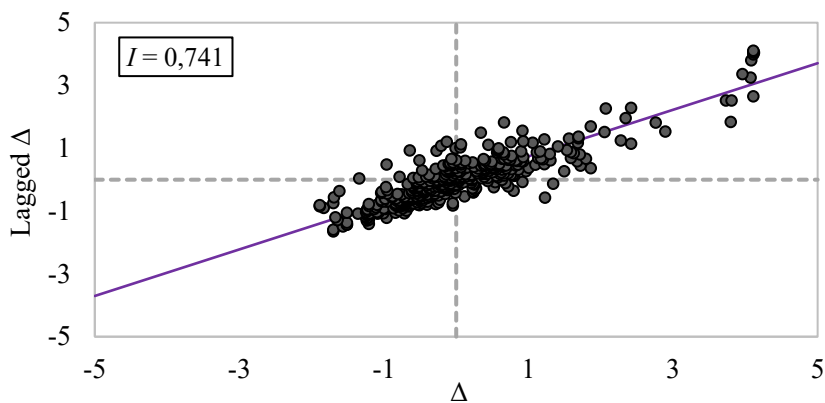


Fonte: Os Autores (2022).

4.3 Autocorrelação espacial entre as diferenças de acessibilidades homólogas

O diagrama de “espalhamento” de Moran é apresentado na Figura 4, o qual permite observar, assim como sugere o valor do Índice de Moran Global ($I = 0,741$), uma forte autocorrelação espacial positiva entre as diferenças de acessibilidades homólogas.

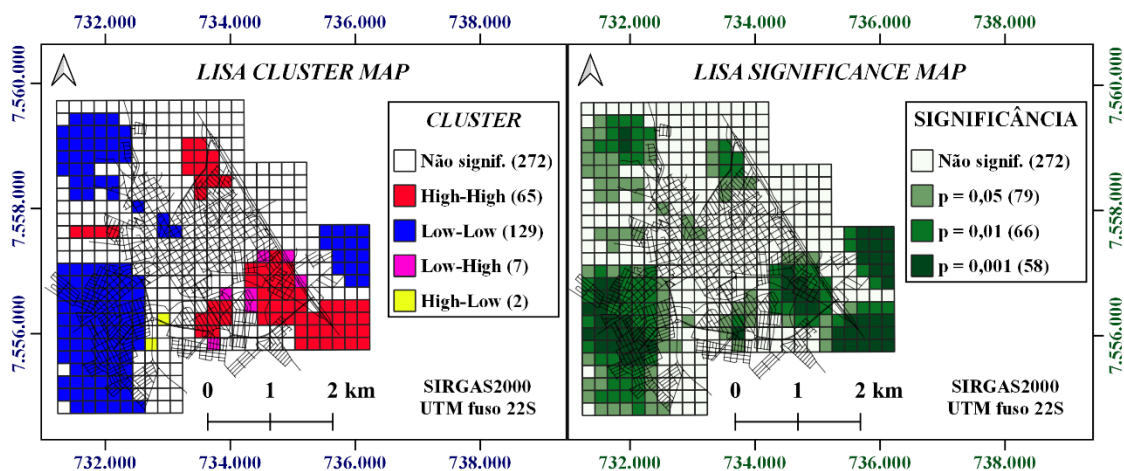
Figura 4 – Diagrama de “espalhamento” de Moran.



Fonte: Os Autores (2022).

A Figura 5, por sua vez, apresenta os mapas de *clusters* (agrupamentos) e significâncias referentes aos valores LISA. É possível observar *clusters* “*High-High*” majoritariamente concentrados no extremo sudeste da área de estudo, além de alguns em menor escala em outras regiões (todas elas afastadas da região central), os quais consistem em células da grade censitária onde existem diferenças positivas significativas entre acessibilidades homólogas, isto é, onde a acessibilidade GNSS é maior que a TOPODATA, próximas de outras células caracterizadas pelo mesmo fenômeno. Já *clusters* “*Low-Low*”, que sugerem associação espacial entre unidades de análise onde a acessibilidade TOPODATA é superior à GNSS, são identificados em maior escala na região sudoeste da área estudada, além de agrupamentos menores serem observados também nas regiões noroeste e sudeste. Em apenas 9 células da grade foram observados *outliers* com relação às diferenças entre acessibilidades homólogas, isto é, 7 células em que a acessibilidade TOPODATA supera a GNSS, contíguas a outras onde observa-se o fenômeno contrário (“*Low-High*”); e 2 células em que a acessibilidade GNSS supera a TOPODATA, próximas a outras em que a acessibilidade do MDE é superestimada (“*High-Low*”).

Figura 5 – Autocorrelação espacial entre as diferenças de acessibilidades homólogas.



Fonte: Os Autores (2022).

4.3.1 ANÁLISES ESPACIAIS BIVARIADAS

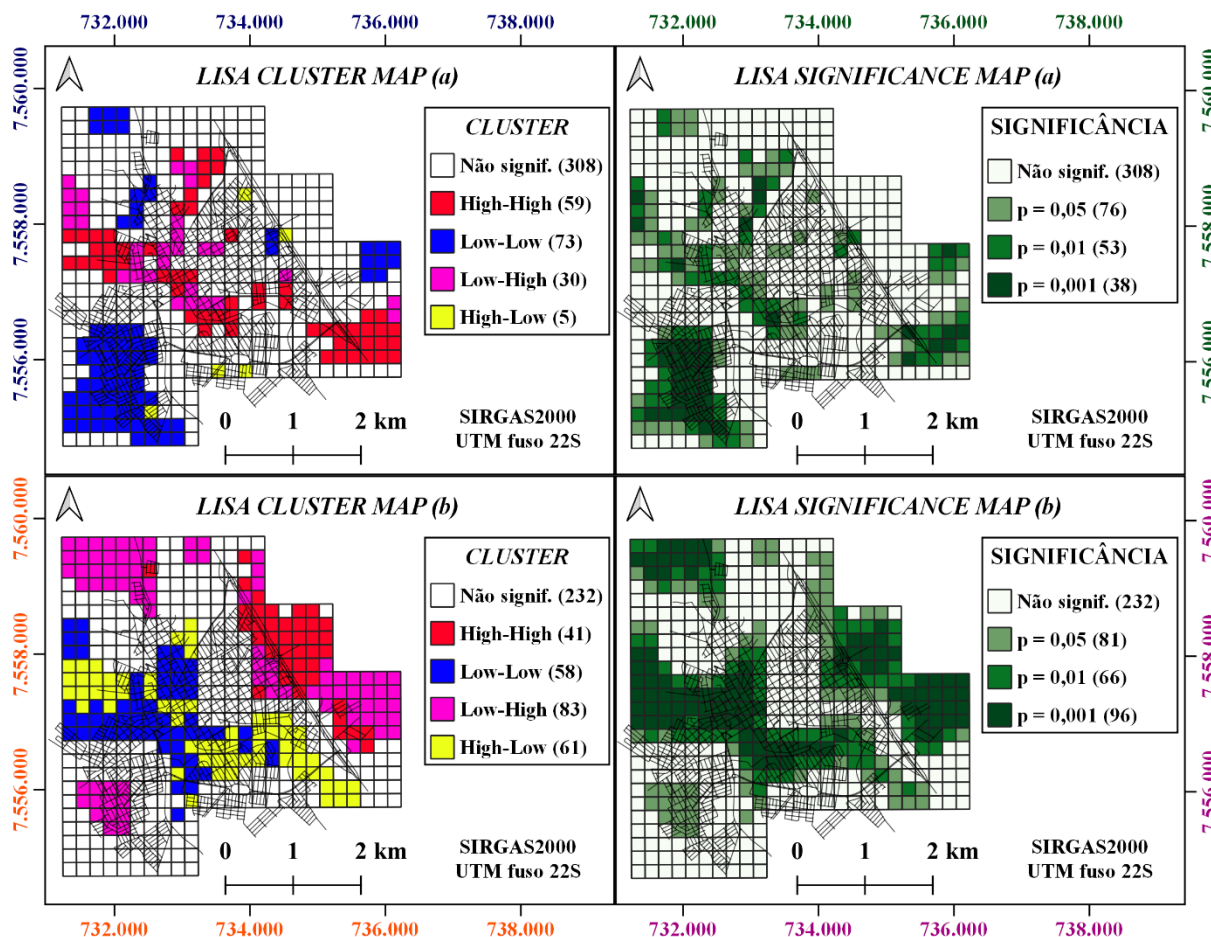
Buscando-se investigar possíveis razões para a forte autocorrelação positiva da variável previamente avaliada, foram conduzidas duas outras análises, bivariadas, cujos resultados são apresentados na Figura 6.

Na primeira análise, a partir da geração de um mapa de declividades TOPODATA derivado do *raster* original, avaliou-se a dependência espacial entre as diferenças de acessibilidades homólogas e as declividades médias TOPODATA das células adjacentes. Já na segunda, esta dependência espacial foi avaliada em termos das próprias altitudes médias TOPODATA destes vizinhos imediatos. Para o cálculo dos valores médios, em ambos os casos, foi utilizado o complemento *RasterStats* do QGIS.

Com relação à primeira análise, o valor do Índice de Moran Global ($I = 0,270$) indica que existe uma dependência espacial positiva de moderada a fraca entre as variáveis analisadas. No que tange aos indicadores locais, são observados *clusters* “High-High” em diversas regiões da área de estudo, com destaque para o extremo sudeste e para as regiões noroeste e central, os quais consistem em células da grade censitária onde a acessibilidade TOPODATA é subestimada, próximas de células caracterizadas por fortes declividades médias do modelo. Já *clusters* “Low-Low” são majoritariamente encontrados na região sudoeste de Bariri-SP, mais plana, onde a acessibilidade TOPODATA é superestimada. Ao todo, 35 *outliers* desta primeira análise bivariada foram identificados, sendo 30 agrupados como “Low-High” e 5 como “High-Low”.

Já com relação à segunda análise, o valor do Índice de Moran Global ($I = -0,217$) também indica que existe uma dependência espacial de moderada a fraca entre as variáveis de análise, contudo, negativa. Em se tratando dos indicadores locais, *clusters* “High-High” são observados majoritariamente na região nordeste da área de estudo, os quais consistem em unidades de análise onde a acessibilidade TOPODATA é subestimada, próximas de células com grandes altitudes médias do MDE. *Clusters* “Low-Low”, para os quais a acessibilidade TOPODATA é superestimada, são identificados na região central de Bariri-SP, caracterizada pelas menores altitudes locais (sugere-se ao leitor rever a Figura 1). Ao todo, 144 *outliers* desta segunda análise bivariada foram identificados, sendo 83 agrupados como “Low-High” e 61 como “High-Low”, neste último caso, também predominantes na região central, sinalizando para células da grade em que a acessibilidade GNSS supera a TOPODATA próximas a regiões menos elevadas.

Figura 6 – Análises bivariadas entre as diferenças de acessibilidades homólogas e (a) declividades médias TOPODATA e (b) altitudes médias TOPODATA das unidades de análise.



Fonte: Os Autores (2022).

4.4 Acessibilidade geral da população a PGVs por bicicleta

A Tabela 4 apresenta valores referentes à acessibilidade geral de diferentes grupos populacionais aos PGVs por bicicleta em Bariri-SP, isto é, ponderações da acessibilidade das unidades de análise pelas

respectivas populações residentes nas mesmas pertencentes a distintas faixas etárias ou de renda mensal.

Tabela 4 – Acessibilidade geral de diferentes grupos populacionais aos PGVs por bicicleta em Bariri-SP.

Faixa etária ou de renda	Acessibilidade TOPODATA	Acessibilidade GNSS
10 a 29 anos	0,853	0,855
30 a 49 anos	0,858	0,860
50 a 69 anos	0,868	0,870
70 anos ou mais	0,883	0,885
≤ 2 salários mínimos	0,856	0,857
2 a 5 salários mínimos	0,874	0,877
>5 salários mínimos	0,894	0,898

Fonte: Os Autores (2022).

De forma pragmática, os valores correspondentes de acessibilidades TOPODATA e GNSS são bastante semelhantes entre si e, para todos os grupos populacionais avaliados, foram verificadas acessibilidades gerais a PGVs por bicicleta superiores a 85%, a despeito da fonte de informações altimétricas utilizada. Especificamente com relação à idade dos ciclistas, de acordo com Sousa (2012), a demanda cicloviária brasileira é majoritariamente composta por indivíduos em idade economicamente ativa. Neste contexto, nota-se que a faixa etária contemplada com a maior facilidade de acesso aos PGVs, em Bariri-SP, é justamente a que remete a indivíduos com menor potencial de utilização da bicicleta, isto é, com 70 anos ou mais.

Resultados semelhantes também foram encontrados com relação à renda. Nas cidades brasileiras de pequeno porte, isto é, cidades cuja população é limitada a 100 mil habitantes (IBGE, 2016), como no caso de Bariri-SP, estima-se que dois terços de todos os ciclistas possuam renda mensal de até 2 salários mínimos (SOARES; GUTH, 2018). Em contrapartida, nota-se que, no local de estudo, a acessibilidade geral (TOPODATA ou GNSS) deste grupo populacional é precisamente a menor dentre todas as faixas de renda avaliadas. A maior, por sua vez, é observada para indivíduos mais economicamente favorecidos, cuja renda mensal é superior a 5 salários mínimos, os quais possuem maior poder aquisitivo para desfrutar do transporte motorizado individual e, conseqüentemente, menor potencial de utilização da bicicleta em viagens cotidianas.

É importante destacar que estes resultados, ao sugerirem certa desigualdade de acesso a PGVs por bicicleta no local estudado, são passíveis de incertezas, uma vez que a utilização de uma mesma função de decaimento da medida de acessibilidade gravitacional indistintamente a toda a população pode sub ou superestimar a predisposição de algum grupo populacional ao ciclismo, geralmente valorizando a acessibilidade geral de indivíduos mais abastados que tendem a residir na região central (GIANNOTTI; TOMASIELLO; BITTENCOURT, 2022), justamente aquela com maior concentração de PGVs.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou avaliar a usabilidade do MDE TOPODATA para mensurar a acessibilidade de ciclistas a PGVs por bicicleta, com o intuito de discutir a eventual inclusão destes dados abertos como subsídio técnico para elaboração de projetos cicloviários e planos de mobilidade. Um estudo de caso foi conduzido em uma pequena cidade do interior paulista, Bariri-SP, para qual se dispunha de levantamentos topográficos prévios, sendo possível comparar os resultados obtidos por meio de ambas as fontes de informação.

Os resultados do estudo de caso sugerem rotas mínimas correlatas similares entre si, apesar de as amostras pareadas de acessibilidades TOPODATA e GNSS diferirem estatisticamente. Uma forte autocorrelação espacial desta diferença foi observada. Já análises bivariadas sinalizam para uma dependência espacial positiva de moderada a fraca entre esta variável e as declividades TOPODATA; e negativa de moderada a fraca com relação às altitudes do modelo. A acessibilidade geral a PGVs por bicicleta, em Bariri-SP, inobstante ao grupo populacional avaliado, é semelhante para ambos os dados altimétricos utilizados.

Com relação às limitações da pesquisa, destaca-se que os dados censitários utilizados referem-se ao contexto de mais de uma década atrás, visto que o Censo Demográfico de 2020 teve que ser adiado em função da pandemia do Coronavírus então vigente. No que se refere a trabalhos futuros, sugere-se a reprodução do método com a utilização de outros MDEs mais atuais, relevantes e com maior resolução espacial, assim como

em municípios maiores ou caracterizados por terrenos mais acidentados.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES, Processo 88887.475432/2020-00) – Código de Financiamento 001.

Contribuição dos Autores

O primeiro autor, Marcelo Monari, foi responsável por desenvolver a metodologia da pesquisa, analisar formalmente os resultados, escrever e editar o artigo. Ambos os segundo e terceiro autores, nesta ordem, Paulo Cesar Lima Segantine e Irineu da Silva, também foram responsáveis pelo desenvolvimento da metodologia, além de supervisionarem e revisarem o texto do artigo.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

- AASHTO. **Guide for the Development of Bicycle Facilities**. 3 ed. Washington D. C: Association of State Highway and Transportation Officials, 1999. 86 p.
- ALDRED, R.; JUNGnickel, K. Why culture matters for transport policy: the case of cycling in the UK. **Journal of Transport Geography**, v. 34, p. 78-87, 2014. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2013.11.004.
- ALIANÇA BIKE. **Bicicletas continuam em alta no Brasil: Primeiro semestre de 2021 teve aumento de 34% nas vendas em comparação a 2020**. Associação Brasileira do Setor de Bicicletas, 2021. Disponível em: <<https://aliancabike.org.br/aumento-nas-vendas-em-2021/>>. Acesso em: 22 dez. 2021.
- ALLEN, D.; ROUPHAIL, N.; HUMMER, J.; MILAZZO II, J. Operational Analysis of Uninterrupted Bicycle Facilities. **Transportation Research Record**, n. 1636, p. 29-36. Washington, D.C., 1998.
- ANDRADE, V.; RODRIGUES, J.; MARINO, F.; LOBO, Z. **Mobilidade por Bicicleta no Brasil. Prefácio**. 1 ed. Rio de Janeiro: PROURB/UFRJ, 2016. 290 p.
- ANSELIN, L. Local Indicators of spatial Association - LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995.
- ARAÚJO, V. O. H. **Usabilidade de Geoportais: O Caso do Visualizador da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE)**. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Defesa). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.
- AULTMAN-HALL, L.; HALL, F. L.; BAETZ, B. B. Analysis of Bicycle Commuter Routes Using Geographic Information Systems: Implications for Bicycle Planning. **Transportation Research Record**, n. 1578, p. 102-110, 1997. DOI: 10.3141/1578-13.
- AUSTROADS. **Cycling Aspects of Austroads Guides**. 2. ed. Sydney: Austroads Ltd., 2014. 177 p.
- BLACK, W. R. Network autocorrelation in transport network and flow systems. **Geographical Analysis**, v. 24, n. 3, p. 207-22, 1992.
- BROACH, J.; DILL, J.; GLIEBE, J. Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data. **Transportation Research Part A**, n. 46, p. 1730-1740, 2012. DOI: 10.1016/j.tra.2012.07.005.
- CARRERA-HERNÁNDEZ, J. J. Not all DEMs are equal: An evaluation of six globally available 30m resolution DEMs with geodetic benchmarks and LiDAR in Mexico. **Remote Sensing of Environment**, v. 261, 2021. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112474.

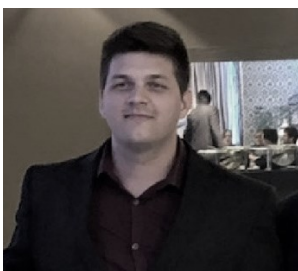
- CENCI, L.; GALLI, M.; PALUMBO, G.; SAPIA, L.; SANTELLA, C.; ALBINET, C. Describing the Quality Assessment Workflow Designed for DEM Products Distributed Via the Copernicus Programme. Case Study: The Absolute Vertical Accuracy of the Copernicus DEM Dataset in Spain. In: **2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS**, p. 6143-6146, 2021. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554393.
- CHIPS - Cycle Highways Innovation for Smarter People Transport and Spatial Planning. **Cycle Highway Manual**. 2021. Disponível em: <<https://cyclehighways.eu/>>. Acesso em: 8 abr. 2021.
- CHUDYK, A. M.; WINTERS, M.; MONIRUZZAMAN, M.; ASHE, M. C.; GOULD, J. S.; MCKAY, H. Destinations matter: The association between where older adults live and their travel behavior. **Journal of Transport and Health**, v. 2, n. 1, p. 50-57, 2015. DOI: 10.1016/j.jth.2014.09.008.
- DIJKSTRA, E. W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. **Numerische Mathematik**, v. 1, p. 269-271, 1959.
- DILL, J.; GLIEBE, J. **Understanding and Measuring Bicycling Behavior: A Focus on Travel Time and Route Choice**. Report No. OTRECRR-08-03. Oregon Transportation Research and Education Consortium. Portland, 2008.
- DONG, Y.; ZHANG, L.; JIANG, H.; BALZ, T.; LIAO, M. Cascaded multi-baseline interferometry with bistatic TerraSAR-X/ TanDEM-X observations for DEM generation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 171, p. 224-237, 2021. DOI: 10.1016/j.isprs.2020.11.012.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: **Reunião Técnica de Levantamento de Solos**, n. 10. Rio de Janeiro, 1979. 83p.
- FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, 2007. DOI: 10.1029/2005RG000183.
- FHWA. **A bikeway criteria digest: The ABCD's of bikeways**. Offices of Research and Development: Federal Highway Administration - US Department of Transportation. Washington D. C., 1977. 99 p. (Publicação FHWA-TS-77-201).
- FHWA. **National Household Travel Survey**. Federal Highway Administration - U.S. Department of Transportation. Washington D. C., 2009.
- FIELD, A. **Descobrimo a Estatística Usando o SPSS**. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.
- FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Florida Bicycle Facilities Planning and Design Handbook**. Tallahassee: Florida Department of Transportation, 2000.
- GEHRKE, S. R.; AKHAVAN, A.; FURTH, P. G.; WANG, Q.; REARDON, T. G. A cycling-focused accessibility tool to support regional bike network connectivity. **Transportation Research Part D**, v. 85, 2020. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102388.
- GIANNOTTI, M.; TOMASIELLO, D. B.; BITTENCOURT, T. A. The bias in estimating accessibility inequalities using gravity-based metrics. **Journal of Transport Geography**, v. 101, 2022. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2022.103337.
- GRIGORE, E.; GARRICK, N.; FUHRER, R.; AXHAUSEN, I. K. W. Bikeability in Basel. **Transportation Research Record**, v. 2673, n. 6, p. 607-617, 2019. DOI: 10.1177/0361198119839982.
- HAMIDI, Z.; CAMPOREALE, R.; CAGGIANI, L. Inequalities in access to bike-and-ride opportunities: Findings for the city of Malmö. **Transportation Research Part A**, v. 130, p. 673-688, 2019. DOI: 10.1016/j.tra.2019.09.062.
- HANSEN, W. How accessibility shapes land use. **Journal of the American Institute of Planners**, v. 25, n. 1, p 73-76, 1959.
- HAWKER, L.; UHE, P.; PAULO, L.; SOSA, J.; SAVAGE, J.; SAMPSON, C.; NEAL, J. A 30 m global map

- of elevation with forests and buildings removed. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 2, 2022. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
- HOOD, J.; SALL, E.; CHARLTON, B. A GPS-based bicycle route choice model for San Francisco, California. **Transportation Letters**, n. 3, p. 63-75, 2011. DOI: 10.3328/TL.2011.03.01.63-75.
- HOSFORD, K.; BEAIRSTO, J.; WINTERS, M. Is the 15-minute city within reach? Evaluating walking and cycling accessibility to grocery stores in Vancouver. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 14, 2022. DOI: 10.1016/j.trip.2022.100602.
- IACONO, M.; KRIZEK, K. J.; EL-GENEIDY, A. Measuring non-motorized accessibility: issues, alternatives, and execution. **Journal of Transport Geography**, n. 18, p. 133-140, 2010. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2009.02.002.
- IBGE. **Arranjos Populacionais e Concentrações Urbanas do Brasil**. 2 ed. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro, 2016. 167 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv99700.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2020.
- IBGE. **Avaliação da Qualidade de Dados Geoespaciais**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coordenação de Cartografia, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101152>>. Acesso: 13 set. 2021.
- IBGE. **Estimativas da População**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coordenação de População e Indicadores Sociais. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/bariri/panorama>>. Acesso: 22 fev. 2022.
- INGRAM, D. R. The concept of accessibility: a search for an operational form. **Regional Studies**, v. 5, p. 101–107, 1971.
- KRENN, P. J.; OJA, P.; TITZE, S. Development of a Bikeability Index to Assess the Bicycle-Friendliness of Urban Environments. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 5, p. 451-459, 2015. DOI: 10.4236/ojce.2015.54045.
- KRIZEK, K.; FORSYTH, A.; BAUM, L. **Walking and Cycling International Literature Review**. Victorian Department of Transport. Melbourne, 2009.
- LANDIS, B. W.; PETRISCH, T. A.; HUANG, H. F. **Characteristics of Emerging Road and Trail Users and Their Safety**. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 2004. (Publicação FHWA-HRT-04-104).
- LIN, S.; HE, M.; TAN, Y.; HE, M. Comparison Study on Operating Speeds of Electric Bicycles and Bicycles: Experience from Field Investigation in Kunming, China. **Transportation Research Record**, n. 2048, p. 52-59. Washington, D.C., 2008. DOI: 10.3141/2048-07.
- LIN, J. J.; WEI, Y. H. Assessing area-wide bikeability: A grey analytic network process. **Transportation Research Part A**, v. 113, p. 381-396, 2018. DOI: 10.1016/j.tra.2018.04.022.
- LOURENÇO, G. H.; BOSCO JÚNIOR, A. D.; BERNARDINIS, M. A. P. Respostas à política nacional de mobilidade urbana: comparativo entre capitais dos incentivos ao transporte público e à bicicleta. **TRANSPORTES**, v. 27, n. 2, 2019. DOI: 10.14295/transportes.v27i2.1413.
- LOWRY, M.; FURTH, P.; HADDEN-LOH, T. Prioritizing new bicycle facilities to improve low-stress network connectivity. **Transportation research Part A**, v. 86, p. 124-140, 2016. DOI: 10.1016/j.tra.2016.02.003.
- LUZARDO, A. J. R.; CASTAÑEDA FILHO, R. M.; RUBIM, I. B. Análise Espacial Exploratória com o Emprego do Índice de Moran. **GEOgraphia**, v. 19, n. 40, p. 162-179, 2017. DOI: 10.22409/GEOgraphia2017.v19i40.a13807.
- MA, L.; DILL, J. Do people’s perceptions of neighborhood bikeability match “reality”? **The Journal of Transport and Land Use**, v. 10, n. 1, p. 291-308, 2017. DOI: 10.5198/jtlu.2015.796.
- MAGALHÃES, J. R. L.; CAMPOS, V. B. G.; BANDEIRA, R. A. M. Metodologia para identificação de redes

- de rotas cicláveis em áreas urbanas. **The Journal of Transport Literature**, v. 9, n. 3, p. 35-39, 2015. DOI: 10.1590/2238-1031.jtl.v9n3a7.
- MASRI, O. E.; BIGAZZI, A. Y. Road Grade Estimate for Bicycle Travel Analysis on a Street Network. **Transportation Research Part C**, v. 104, p. 158-171, 2019. DOI: 10.1016/j.trc.2019.05.004.
- MCCA HILL, C. Non-work accessibility and related outcomes. **Research in Transportation Business & Management**, v. 29, p. 26-36, 2018. DOI: 10.1016/j.rtbm.2018.07.002.
- MCNEIL, N. Bikeability and the 20-min Neighborhood: How Infrastructure and Destinations Influence Bicycle Accessibility. **Transportation Research Record**, n. 2247, p. 53-63, 2011. DOI: 10.3141/2247-07.
- MENGHINI, G.; CARRASCO, N.; SCHÜSSLER, N.; AXHAUSEN, K. W. Route choice of cyclists in Zurich. **Transportation Research Part A**, v. 44, n. 9, p. 754-765, 2010. DOI: 10.1016/j.tra.2010.07.008.
- MERLIN, L. A. Measuring community completeness: Jobs-housing balance, accessibility, and convenient local access to nonwork destinations. **Environment and Planning B: Planning and Design**, 41, n. 4, p. 736-756, 2014. DOI: 10.1068/b120010p.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Coleção Bicicleta Brasil: Programa Brasileiro de Mobilidade por Bicicleta**. Ministério das Cidades: Brasília (DF), 2007. 232 p.
- MONARI, M. **Método para definição de rede de rotas cicláveis em áreas urbanas de cidades de pequeno porte: um estudo de caso para a cidade de Bariri-SP**. 2018. 206 p. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- MONARI, M.; MORAES, F. R.; SEGANTINE, P. C. L.; SILVA, I. Análise comparativa entre modelos de avaliação do nível de estresse relacionado aos ciclistas no processo de identificação de rotas cicláveis: um estudo de caso para a cidade de Bariri-SP. In: **Anais do 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, p. 3022-3032. Gramado, 2018. Disponível em: <http://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Planejamento%20Territorial%20do%20Transporte/Mobilidade%20Sustentavel/3_202_AC.pdf>. Acesso: 2 ago. 2022.
- MONARI, M.; SEGANTINE, P. C. L.; SILVA, I. Avaliação do Modelo Digital De Elevação Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) como Ferramenta no Processo de Identificação de Rotas Cicláveis: Um Estudo de Caso para a Cidade de Bariri-SP. In: **Anais do 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**. Balneário Camboriú, 2019. Disponível em: <http://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Planejamento%20Territorial%20do%20Transporte/Mobilidade%20Urbana%20Sustentavel%20C3%A1vel:%20Transporte%20Ativo%20I/2_119_AC.pdf>. Acesso: 2 ago. 2022.
- MORAN, P. A. P. The interpretation of statistical maps. In: **Proceedings of the Cambridge Philosophy Society**, v. 44, p. 342-344, 1947.
- NASA JPL. **NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001** [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2020. DOI:10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001.
- NERI, T. B. **Proposta Metodológica para definição de Rede Cicloviária: um estudo de caso de Maringá**. 2012. 169 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.
- RUBIM, B.; LEITÃO, S. O plano de mobilidade urbana e o futuro das cidades. **Estudos avançados**, v. 27, n. 79, p. 55-66, 2013. DOI: 10.1590/S0103-40142013000300005.
- SEGADILHA, A. B. P. **Identificação dos fatores que influenciam na escolha da rota pelos ciclistas: estudo de caso da cidade de São Carlos**. 2014. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.
- SENER, I. N.; ELURU, N.; BHAT, C. R. An Analysis of Bicycle Route Choice Preferences in Texas, US. **Transportation**, v. 36, n. 5, p. 511-539, 2009. DOI: 10.1007/s11116-009-9201-4.

- SILVA, I.; SEGANTINE, P. C. L. **Topografia para Engenharia - Teoria e Prática de Geomática**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2015. 412 p.
- SILVA, E. J. R.; RANGEL, M. P.; CAMPOS, P. C. O. Análise altimétrica de baixo custo para projeto básico em levantamento geométrico de rodovia existente. In: **Anais do 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, p. 2684-2691. Evento 100% Online, 2020.
- SIMEÃO, J. V. P.; MANZATO, G. G.; VIVIANI, E. Recursos de Geoprocessamento Aplicados à Análise da Declividade da Malha Ciclovária da Cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 1, p. 253-273, 2019. DOI: 10.14393/rbcv71n1-2208.
- SOARES, A; GUTH, D. **O Brasil que pedala: a cultura da bicicleta nas cidades pequenas**. 1 ed. Rio de Janeiro: Ed. Jaguatirica, 2018. 258 p.
- SOUSA, P. B. **Análise de Fatores que influenciam no uso da bicicleta para fins de Planejamento Ciclovário**. 2012. 190 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- STINSON, M. A.; BHAT, C. R. An Analysis of Commuter Bicyclist Route Choice Using a Stated Preference Survey. **Transportation Research Record**, n. 1828, p. 107-115, 2003.
- TOOLE, J. **Revising the AASHTO Guide for the Development of Bicycle Facilities**. The National Cooperative Highway Research Program. Hyattsville, 2010. 248 p.
- VALE, D. S.; PEREIRA, M. The influence of the impedance function on gravity-based pedestrian accessibility measures: A comparative analysis. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, v. 44, n. 4, p. 740-763, 2017. DOI: 10.1177/0265813516641685.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian Full Coverage Refinement of SRTM Data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300-309, 2012. DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.05.004.
- WINTERS, M.; TESCHKE, K.; GRANT, M.; SETTON, E. M.; BRAUER, M. How far out the way will we travel? Built environmental influences on route selection for bicycle and car travel. **Transportation Research Record**, n. 2190, p. 1-10, 2010. DOI: 10.3141/2190-01.
- WINTERS, M.; BRAUER, M.; SETOON, E. M.; TESCHKE, K. Mapping bikeability: a spatial tool to support sustainable travel. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 40, p. 865-883, 2013. DOI: 10.1068/b38185.
- ZIEMKE, D.; METZLER, S.; NAGEL, K. Modeling Bicycle Traffic in an Agent-Based Transport Simulation. **Procedia Computer Science**, v. 109, p. 923-928, 2017. DOI: 10.1016/j.procs.2017.05.424.

Biografia do autor principal



Marcelo Monari nasceu em Bariri-SP, Brasil, em 1993. Ele possui graduação em Engenharia Civil e é doutor em Infraestrutura de Transportes pela Escola de Engenharia de São Carlos-SP (EESC/USP). Atualmente desenvolve trabalhos na área do Planejamento Territorial do Transporte auxiliado por SIG, com ênfase no modo de transporte ciclovário. Ele é o vencedor do Prêmio ANPET de Produção Científica 2018 nesta área.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.