



I SIMPÓSIO DE GEOMÁTICA E CIÊNCIAS GEOESPACIAIS DA UFU

20 a 24 de julho de 2026

Universidade Federal de Uberlândia - Campus Santa Mônica



**Universidade
Federal de
Uberlândia**



Uberlândia (MG), 2026



I SIMPÓSIO DE GEOMÁTICA E CIÊNCIAS GEOESPACIAIS DA UFU

INFORMAÇÕES INSTITUCIONAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Universidade Federal de Uberlândia - UFU

UNIDADE ACADÊMICA

Faculdade de Engenharia Civil - FECIV/UFU

EVENTO

I Simpósio de Geomática e Ciências Geoespaciais da UFU - I SIMGEOC

PERÍODO E LOCAL

20 a 24 de julho de 2026 | Campus Santa Mônica | Uberlândia, Minas Gerais

COORDENAÇÃO GERAL

Profa. Dra. Maria Lígia Chuerubim (FECIV/UFU)

Organização editorial dos Anais: Coordenação Geral do I SIMGEOC

Uberlândia (MG), 2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S612 a Simpósio de Geomática e Ciências Geoespaciais da UFU (1.: 2026: Uberlândia, MG)
Anais do I Simpósio de Geomática e Ciências Geoespaciais da UFU
[recurso eletrônico] / Coordenação Maria Lígia Chuerubim -- Uberlândia: FECIV /UFU, 2026.
85 p. : il. color.

ISBN: 978-65-6172-022-9
Livro digital (e-book)
Disponível em: <https://feciv.ufu.br/>
Vários autores.

1. Geomática. 2. Ciências Geoespaciais. 3. Geodésia I. Chuerubim, Maria Lígia (coord.). II. Título.

CDU:528

Bruna dos Santos Pinheiro
Bibliotecária- Documentalista - CRB-6/3805



COORDENAÇÃO E COMISSÃO CIENTÍFICA

COORDENAÇÃO GERAL

Profa. Dra. Maria Lígia Chuerubim (FECIV/UFU)

COMISSÃO CIENTÍFICA

Profa. Dra. Elisa Pinheiro de Freitas (DEGEO/UFTM)
Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães (FECIV/UFU)
Prof. Dr. Hélio Carlos Miranda de Oliveira (IGESC/UFU)
Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia (FECIV/UFU)
Profa. Dra. Letícia Cristina Ribeiro (FECIV/UFU)
Profa. Dra. Maria Cristina Vidigal (FECIV/UFU)
Profa. Dra. Maria Lígia Chuerubim (FECIV/UFU)
Prof. Dr. Michael Andrade Maedo (FECIV/UFU)
Prof. Dr. Ricardo Vicente Ferreira (DEGEO/UFTM)
Prof. Dr. Rodrigo Argenton Freire (FAuED/UFU)
Prof. Dr. Rogério Lemos Ribeiro (FECIV/UFU)
Prof. Dr. Wagner Carrupt Machado (IGESC/UFU)

Organização editorial: Profa. Dra. Maria Lígia Chuerubim

Contato: marialigia@ufu.br

Uberlândia (MG), 2026



APRESENTAÇÃO

O I Simpósio de Geomática e Ciências Geoespaciais da Universidade Federal de Uberlândia - I SIMGEOC foi realizado de 20 a 24 de julho de 2026, no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, em Uberlândia, Minas Gerais. O evento constituiu um espaço acadêmico-científico de integração entre ensino, pesquisa, extensão e atuação profissional, reunindo estudantes, docentes, pesquisadores e profissionais interessados nas diferentes interfaces da Geomática e das Ciências Geoespaciais.

Esta publicação reúne exclusivamente os trabalhos apresentados nas Sessões Técnicas do I SIMGEOC. Os estudos contemplam aplicações de geotecnologias, análise espacial, transportes, mobilidade urbana, geodésia, sensoriamento remoto, hidrologia, geotecnia e temas interdisciplinares relacionados à aquisição, ao processamento, à modelagem e à interpretação de informações espaciais.

Os trabalhos foram submetidos à avaliação da Comissão Científica do evento. A responsabilidade pelo conteúdo, pelos dados, pelas análises, pelas referências e pelas conclusões apresentadas permanece integralmente atribuída aos respectivos autores.

Com estes Anais, o I SIMGEOC busca ampliar a difusão do conhecimento produzido, fortalecer redes de cooperação acadêmica e contribuir para a consolidação da Geomática e das Ciências Geoespaciais como áreas estratégicas para a compreensão, o planejamento e a transformação do território.

Uberlândia, 2026.

Coordenação Geral do I SIMGEOC

Uberlândia (MG), 2026

SUMÁRIO

INFLUÊNCIA DA ESTRATIGRAFIA DO PERFIL LATERÍTICO NA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS ESCAVADAS: COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE DÉCOURT E QUARESMA (1978) E PROVAS DE CARGA ESTÁTICAS

Alisson Filmiano Andrade Lopes; Marcos Rodrigo Lopes Campos; Jean Rodrigo Garcia **7**

MAPEAMENTO DE INDICADORES DE ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE URBANA DO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS NO MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA/MG

Sophia Ladir Pereira Vieira de Moraes; Maria Lígia Chuerubim **17**

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE ALTIMETRIA, VOLUME ARMAZENADO E PRECIPITAÇÃO NO RESERVATÓRIO DA ITAIPU BINACIONAL A PARTIR DE DADOS E INFORMAÇÕES GEOESPACIAIS

Giovana de Almeida Mendes; Gabriel do Nascimento Guimarães **27**

CIDADES INTELIGENTES, RESILIENTES E SUSTENTÁVEIS: ABORDAGEM INTEGRADA DA MOBILIDADE URBANA EM CIDADES GRANDES

Julia Jacob Favoreto; Tulio Campanati de Oliveira; Maria Lígia Chuerubim **38**

ESTIMATIVA DAS TAXAS DE MODIFICAÇÃO DA FAIXA DE AREIA EM UMA PRAIA DO LITORAL SUL DE SERGIPE

José Eduardo Alamy Filho; Tomás Marcondes de Melo Alamy; Nágela Aparecida de Melo **52**

IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS DE SINISTROS DE TRÂNSITO COM O USO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E ÍNDICES DE SEVERIDADE

Analice Silva Evangelista; Cássio Leandro do Carmo **61**

TÉCNICAS MULTIVARIADAS NO ESTUDO DA CAMINHABILIDADE EM CONTEXTO UNIVERSITÁRIO

Tulio Campanati de Oliveira; Julia Jacob Favoreto; Maria Lígia Chuerubim **71**



INFLUÊNCIA DA ESTRATIGRAFIA DO PERFIL LATERÍTICO NA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS ESCAVADAS: COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE DÉCOURT E QUARESMA (1978) E PROVAS DE CARGA ESTÁTICAS

Alisson Filmiano Andrade Lopes¹

Marcos Rodrigo Lopes Campos²

Jean Rodrigo Garcia³

^{1,2,3} Universidade Federal de Uberlândia (alisson.lopes@ufu.br; marcos.lopes@ufu.br; jean.garcia@ufu.br)

RESUMO

O método de Décourt e Quaresma (1978), posteriormente atualizado por Décourt (2016), é amplamente utilizado no Brasil para a previsão da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de ensaios SPT. Entretanto, solos lateríticos estratificados apresentam características geomecânicas particulares, associadas à estruturação e à cimentação natural decorrente da presença de óxidos de ferro e alumínio, que podem não ser adequadamente representadas apenas pelos valores de NSPT. Nesse contexto, o presente trabalho avalia o desempenho do método na previsão da capacidade de carga de estacas escavadas a trado com 4 e 5 m de comprimento, executadas em solo laterítico estratificado do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade Federal de Uberlândia. O perfil geotécnico é constituído por uma camada de areia siltosa (NSPT = 2 a 3) sobrejacente a uma camada de areia siltosa com pedregulhos (NSPT = 8). Lopes e Garcia (2025) e Oliveira (2022), a partir de provas de carga instrumentadas, constataram que as estacas de 4 e 5 m mobilizaram sua capacidade de carga principalmente por meio do atrito lateral, enquanto a contribuição da resistência de ponta mostrou-se praticamente desprezível. O método superestimou a parcela de resistência de ponta e subestimou a resistência lateral em ambas as estacas. Para a estaca de 4 m, a previsão da capacidade total apresentou boa concordância com o resultado experimental devido à compensação entre erros das parcelas resistentes. Já para a estaca de 5 m, a subestimativa do atrito lateral na camada mais resistente resultou em uma subestimativa de 37,4% da capacidade de carga total. Observou-se ainda que o acréscimo de apenas 1 m de comprimento, posicionando parte do fuste na camada mais resistente, promoveu um aumento de 171% na capacidade de carga da estaca. Os resultados evidenciam a forte influência da estratigrafia e da posição relativa da ponta da estaca em relação às interfaces geotécnicas, bem como limitações do método na representação dos mecanismos de transferência de carga em solos lateríticos estratificados.

Palavras-chave: estacas escavadas; solo laterítico; capacidade de carga; prova de carga; SPT; estratigrafia do solo.

ABSTRACT

The Décourt and Quaresma (1978) method, later updated by Décourt (2016), is widely used in Brazil for predicting pile bearing capacity based on Standard Penetration Test (SPT) results. However, stratified lateritic soils exhibit particular geomechanical characteristics related to soil structure and natural cementation caused by iron and aluminum oxides, which may not be adequately represented solely by NSPT values. This study evaluates the performance of the method in predicting the bearing capacity of auger-cast bored piles with lengths of 4 and 5 m installed in a stratified lateritic soil at the Experimental Site of Soil Mechanics and Foundations of the Federal University of Uberlândia. The geotechnical profile consists of a silty sand layer (NSPT = 2–3) overlying a silty sand with gravel layer (NSPT = 8). Instrumented load tests reported by Lopes and Garcia (2025) and Oliveira (2022) indicated that both piles mobilized their bearing capacity predominantly through shaft resistance, while the contribution of tip resistance was practically negligible. The method overestimated tip resistance and underestimated shaft resistance for both piles. For the 4 m pile, the predicted total bearing capacity was in good agreement with the experimental result due to compensation between errors in the resistant components. In contrast, for the 5 m pile, the underestimation of shaft resistance within the stronger layer resulted in a 37.4% underestimation of the total bearing capacity. Furthermore, increasing the pile length by only 1 m, positioning part of the shaft within the stronger layer, led to a 171% increase in bearing capacity. The results highlight the strong influence of soil stratigraphy and pile tip position relative to geotechnical interfaces, as well as limitations of the method in representing load-transfer mechanisms in stratified lateritic soils.

Keywords: bored piles; lateritic soil; bearing capacity; load test; SPT; soil stratigraphy.

1. INTRODUÇÃO

A previsão da capacidade de carga de estacas a partir de ensaios de campo constitui uma das principais demandas da prática geotécnica brasileira. Nesse contexto, o método de Décourt e Quaresma (1978), posteriormente atualizado por Décourt (2016) com a revisão dos coeficientes para diferentes tipos de estacas e solos, é amplamente empregado no dimensionamento de fundações profundas devido à sua simplicidade e à ampla disponibilidade de resultados de ensaios Standard Penetration Test (SPT). O método estabelece correlações empíricas entre o número de golpes do SPT, o tipo de solo e o tipo de estaca para estimar as parcelas de atrito lateral e resistência de ponta, cuja soma fornece a capacidade de carga última do elemento de fundação.

O método de Décourt e Quaresma (1978) foi desenvolvido a partir da análise de correlações empíricas entre resultados de provas de carga e valores de NSPT obtidos em



diferentes regiões do Brasil. Embora apresente bom desempenho em diversas condições geotécnicas, sua aplicação em solos lateríticos pode apresentar limitações, uma vez que as características geomecânicas desses materiais nem sempre são adequadamente representadas apenas pelos índices de resistência à penetração.

Os solos lateríticos apresentam estruturação decorrente da presença de ligações entre partículas formadas durante os processos de intemperismo e cimentação por óxidos de ferro e alumínio. Essas ligações conferem maior rigidez, resistência e estabilidade estrutural ao material quando comparado a um solo reconstituído de mesma composição granulométrica (Futai et al., 2004). Segundo Leroueil e Vaughan (1990), a estruturação natural pode proporcionar resistência e rigidez adicionais em função da presença de ligações entre partículas e da organização interna do material. Dessa forma, mecanismos importantes para o comportamento de fundações profundas podem não ser integralmente capturados por correlações baseadas exclusivamente nos valores de NSPT.

Além dos efeitos associados à estruturação, a presença de interfaces abruptas entre camadas com diferentes resistências pode modificar significativamente os mecanismos de transferência de carga ao longo do fuste das estacas. Em perfis lateríticos estratificados, pequenas variações no comprimento da estaca podem resultar na interceptação de camadas com características geotécnicas distintas, alterando substancialmente a contribuição relativa das parcelas de atrito lateral e resistência de ponta.

Embora o método de Décourt e Quaresma seja amplamente empregado na prática profissional, ainda são limitados os estudos que avaliam seu desempenho em solos lateríticos estratificados utilizando resultados de provas de carga instrumentadas. Nesses materiais, a interação entre estruturação, cimentação natural e variações estratigráficas pode alterar significativamente os mecanismos de transferência de carga, produzindo comportamentos distintos daqueles assumidos pelas correlações empíricas baseadas exclusivamente em valores de NSPT.

Pesquisas realizadas no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações (CEMSF) da Universidade Federal de Uberlândia documentaram o comportamento de estacas escavadas em solo laterítico estratificado (Oliveira, 2022; Saraiva Júnior, 2024; Lopes e Garcia, 2025). Em particular, Lopes e Garcia (2025) e Oliveira (2022) observaram que a resistência de ponta das estacas escavada com 4 e 5 m de comprimento foi praticamente nula, sendo a capacidade de carga mobilizada predominantemente pelo atrito lateral.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do método de Décourt e Quaresma (1978), utilizando os coeficientes atualizados por Décourt (2016), na previsão da capacidade de carga e na representação dos mecanismos de transferência de carga de estacas escavadas executadas em solo laterítico estratificado. Para isso, as previsões analíticas são comparadas com resultados de provas de carga estática instrumentadas, realizadas em estacas escavadas a trado, com 4 m e 5 m de comprimento e 25 cm de diâmetro, executadas no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade Federal de Uberlândia

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Localização do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações

Os ensaios de investigação geotécnica in situ e as provas de carga estática (PCE) foram realizados no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade Federal de Uberlândia (CEMSF/UFU), em Uberlândia, MG (Figura 01).

Figura 01 - Localização do campo experimental da faculdade de engenharia civil

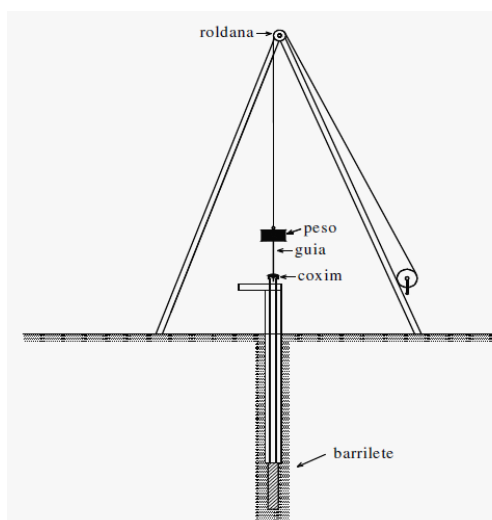


Fonte: Lopes (2023).

2.2 Ensaios de Campo

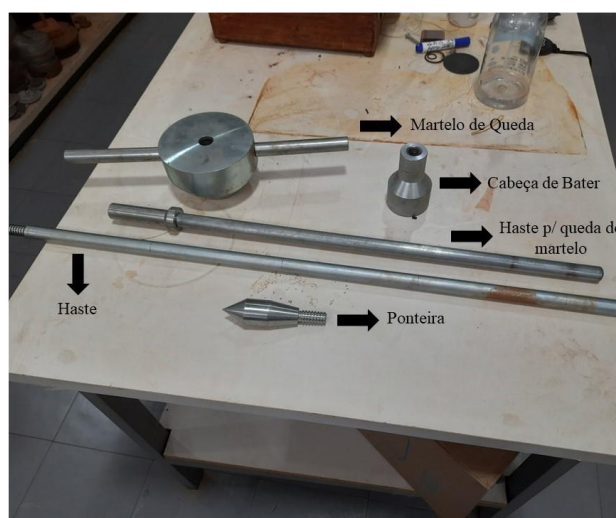
Para a caracterização do perfil estratigráfico, foram realizados ensaios de Standard Penetration Test (SPT) e Dynamic Penetrometer Light (DPL). A Figura 2 apresenta os equipamentos utilizados na execução dos ensaios.

Figura 02 – Equipamentos SPT (a) e DPL (b) respectivamente utilizados nas sondagens do CEMS/UFU.



(a)

Fonte: Marques (2014).



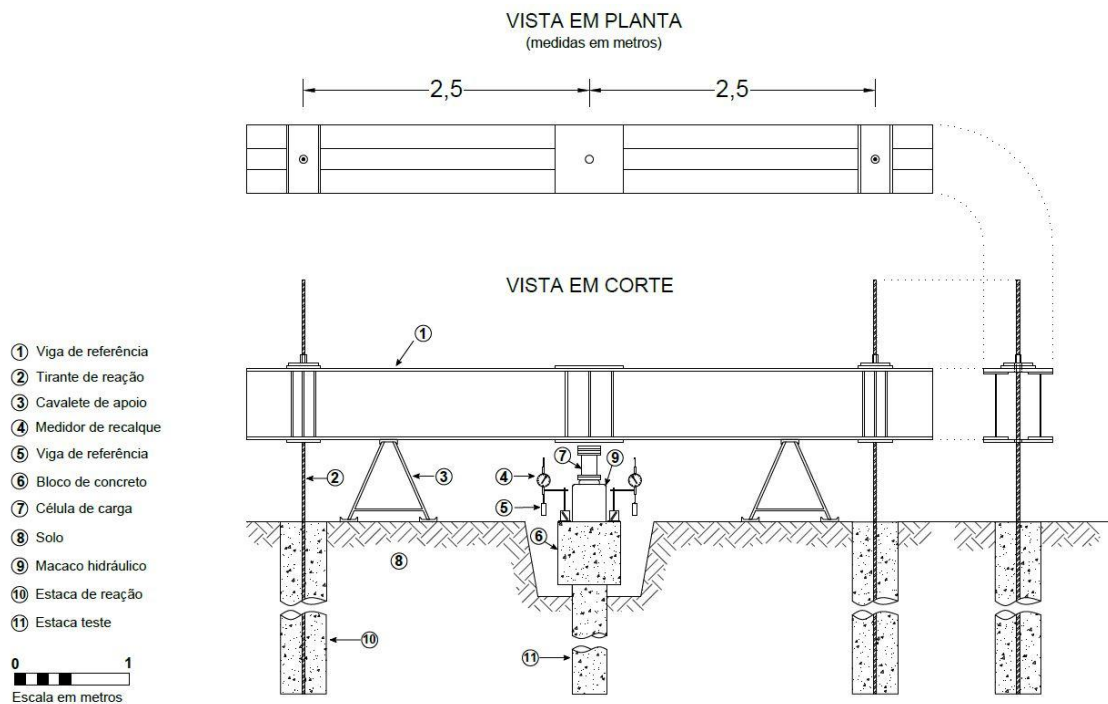
(b)

Fonte: Saraiva Júnior (2024).

O SPT avalia a resistência do solo à penetração por meio do número de golpes necessários para a cravação de um amostrador padrão. O DPL, por sua vez, determina a resistência à penetração dinâmica de uma ponteira cônica de 35,7 mm de diâmetro, cravada pela energia de impacto de um martelo de 10 kg em queda livre de 50 cm de altura, transmitida por hastes de 1,0 m graduadas a cada 10 cm. O índice de resistência (N10) corresponde ao número de golpes necessário para o avanço de 10 cm da ponteira no solo. Os resultados obtidos foram utilizados para a definição do perfil geotécnico e para a estimativa da capacidade de carga das estacas pelo método de Décourt e Quaresma (1978).

Já a prova de carga estática constitui, na prática da engenharia de fundações, a principal ferramenta para verificação da capacidade de carga, da rigidez e do comportamento carga-recalque de elementos de fundação, permitindo a validação de critérios de projeto e a avaliação da segurança e da capacidade de serviço. No Brasil, o método de execução desse ensaio é normatizado pela ABNT NBR 16903:2020, que especifica os procedimentos de montagem, instrumentação e execução da prova de carga estática em fundações profundas. As partes integrantes necessárias à realização de provas de carga podem ser verificadas na Figura 03.

Figura 03 - Sistema de prova de carga à compressão com estacas e tirantes de reação.



Fonte: Garcia (2021).

2.3 Método de Décourt e Quaresma (1978)

O método de Décourt e Quaresma (1978) atualizado por Décourt (2016), estima a capacidade última de estacas pela soma das parcelas de atrito lateral e resistência de ponta, conforme a Equação 1:

$$Q_{ult} = \beta * U * L * \left(10 * \left(\frac{\bar{N}_{SPT}}{3} + 1\right)\right) + \alpha * C * \bar{N}_p * A_p \quad (1)$$

em que:

β é o fator de atrito (Tabela 1);

N_{spt} é o valor médio do SPT obtido ao longo do comprimento do fuste da estaca;

α é o fator de reação de ponta (Tabela 1);

C é um fator que depende do tipo de solo no qual a estaca está inserida (Tabela 2);

$\bar{N}_p$ é o valor médio do N_{spt} anteriormente e posteriormente ao nível da ponta.

Tabela 1 - Valores de β e α para estacas escavadas em geral.

Solo	α	β
<i>Areias</i>	0,50	0,50
Solos intermediários	0,60	0,65
Argilas	0,85	0,80

Fonte: Décourt (2016).

Tabela 2 - Valores do fator C .

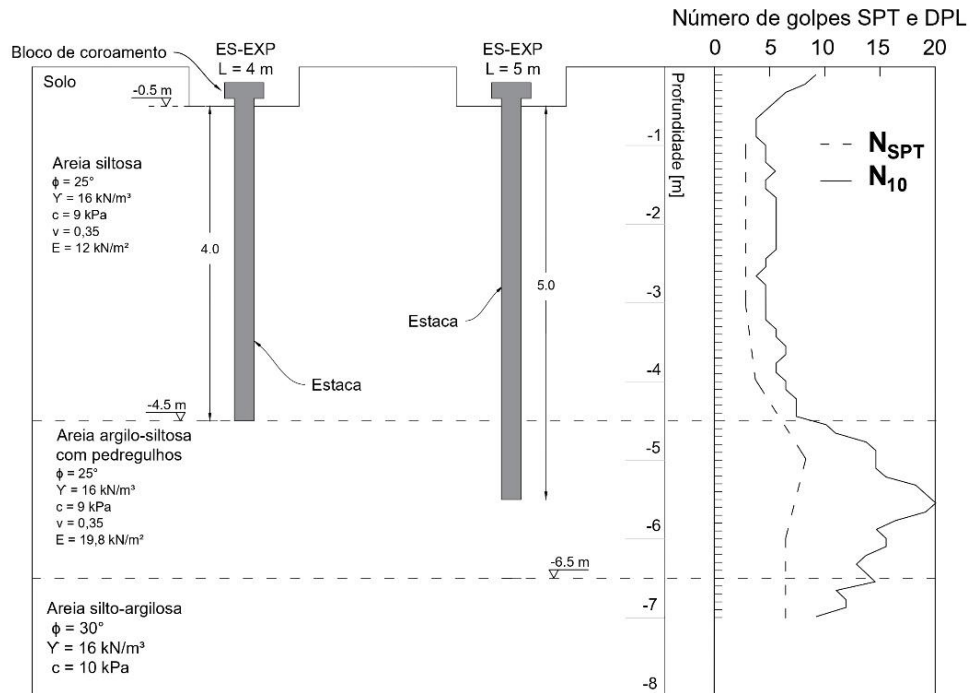
Solo	C (kPa)
<i>Argilas</i>	120
Siltes argilosos	200
Siltes arenosos	250
Areias	400

Fonte: Décourt (2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estratigrafia caracteriza um perfil laterítico típico da região de Uberlândia/MG, com interface abrupta entre camada superficial de baixa resistência e camada intermediária de resistência moderada. A estaca de 4 metros de Oliveira (2022), tem ponta posicionada na camada de areia siltosa de baixa resistência ($NSPT = 3$), estando inteiramente inserida nessa camada. A estaca de 5 metros de Lopes e Garcia (2025), tem o trecho da ponta com cerca de 1 metro posicionada na camada de areia siltosa com pedregulhos ($NSPT = 8$) (figura 04).

Figura 04 - Perfil geotécnico do campo experimental e fundações ensaiadas.

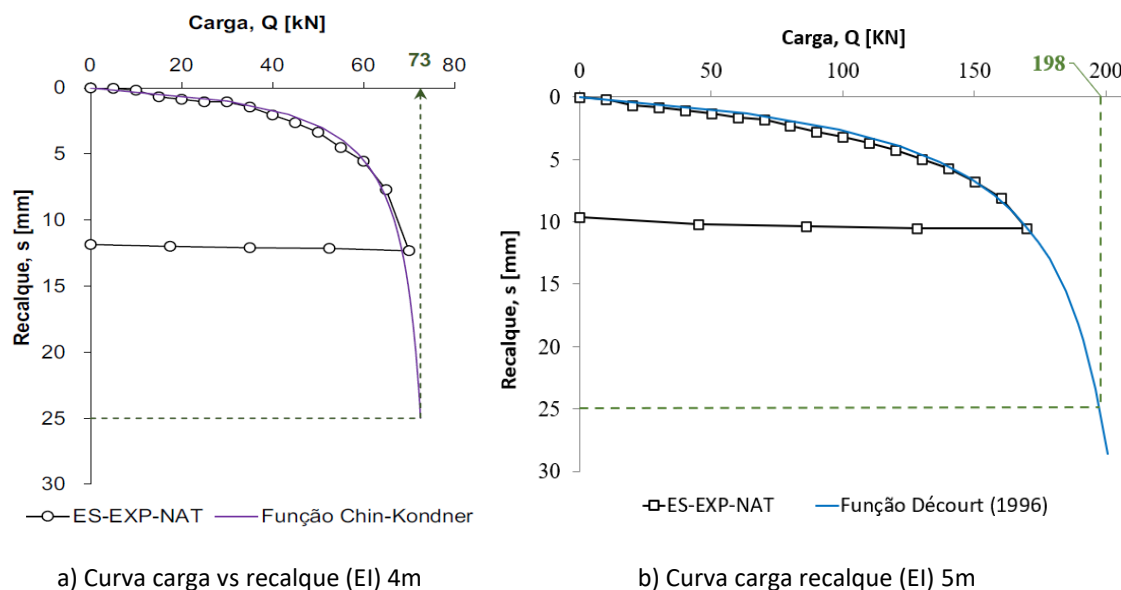


Fonte: Adaptada de Saraiva Júnior, 2024.

3.1 Comparação com os Resultados Experimentais

A capacidade de carga foi extrapolada pelo método de Chin-Kondner, resultando em 73 kN para a estaca de 4 metros conforme Figura 4a e 198 kN extrapolada pelo método de Décourt para a de 5 metros conforme Figura 4b.

Figura 05 – Curvas carga vs recalque das estacas isoladas de 4 e 5 metros de comprimento com extrapolação pelos métodos de Chin-Kondner e Décourt.



A comparação entre as previsões do método e os resultados experimentais é apresentada nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Comparação da capacidade de carga prevista pelo método de Décourt (2016) com os resultados das PCEs

Estaca	Método (kN)	Experimental (kN)	Erro (%)
4 m	78	73	+6,8
5 m	124	198	-37,4

Fonte: O Autor (2026).

O método previu uma resistência de ponta de 51,0 kN (65,0%) para a estaca de 4 m e de 66,8 kN (53,8%) para a estaca de 5 m (Tabela 4).

Tabela 4 - Distribuição da capacidade de carga prevista pelo método de Décourt (2016).

Estaca	Atrito lateral (kN)	(%)	Resistência de ponta (kN)	(%)	Capacidade Total (kN)
4 m	27,5	35,0	51,0	65,0	78,0
5 m	57,9	46,2	66,8	53,8	124,0

Fonte: O Autor (2026).

No entanto, conforme observado por Lopes e Garcia (2025) e Oliveira (2022), a análise dos resultados de instrumentação revelou que o método não representou adequadamente a distribuição das parcelas resistentes, independentemente da precisão obtida na estimativa da capacidade de carga total. A instrumentação confirmou que as estacas de 4 e 5 m mobilizaram sua capacidade de carga predominantemente por atrito lateral, sendo a contribuição da resistência de ponta praticamente nula em todos os estágios de carregamento. Dessa forma, o método superestimou sistematicamente a parcela de carga transferida pela ponta e subestimou a resistência lateral em ambos os casos.

Para a estaca de 4 metros, o método acertou a capacidade total (+6,8%) apenas por compensação de erros entre as parcelas: a superestimativa da ponta (51,0 kN previstos vs 1 kN real) foi compensada pela subestimativa do atrito lateral (27,5 kN previstos vs 72 kN real). Para a estaca de 5 metros, essa compensação não ocorreu. A subestimativa do atrito na camada mais resistente foi tão expressiva que superou a subestimativa da ponta, resultando em subestimativa total de 37,4%. Isso demonstra que o método erra sistematicamente a distribuição das parcelas em solos lateríticos, e que a precisão eventual na capacidade total é resultado de compensação acidental de erros, não de previsão correta do mecanismo de resistência.

Os resultados evidenciam ainda uma importante implicação prática: o posicionamento de apenas 1 metro do fuste da estaca na camada mais resistente resultou em ganho de 171% na capacidade de carga (de 73 para 198 kN). Esse resultado demonstra que a inserção da ponta em camada laterítica mais resistente representa incremento expressivo de capacidade com



pequeno acréscimo de comprimento. Recomenda-se que os projetistas avaliem criteriosamente as interfaces estratigráficas e o posicionamento da ponta, pois pequenas variações de comprimento inseridas em camada mais resistentes podem resultar em ganhos expressivos de capacidade de carga.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de Décourt e Quaresma (1978), aplicado com os coeficientes atualizados por Décourt (2016), apresentou erros sistemáticos na distribuição das parcelas resistentes das estacas analisadas. Em ambas as situações, observou-se superestimativa da resistência de ponta e subestimativa do atrito lateral. Os resultados das provas de carga instrumentadas indicaram que a resistência de ponta foi praticamente nula em ambos os casos, sendo a capacidade de carga mobilizada predominantemente pelo atrito lateral, conforme os resultados reportados por Lopes e Garcia (2025) e Oliveira (2022).

Para a estaca de 4 m, integralmente inserida na camada menos resistente, o método apresentou boa aproximação da capacidade de carga total, com erro de apenas 6,8%. Entretanto, essa concordância decorreu da compensação entre erros das parcelas resistentes, uma vez que a superestimativa da resistência de ponta compensou a subestimativa do atrito lateral. Para a estaca de 5 m, cujo trecho final foi executado na camada mais resistente, a subestimativa do atrito lateral superou a superestimativa da ponta, resultando em erro total de 37,4%.

Os resultados evidenciaram a forte influência da estratigrafia no comportamento das estacas. O posicionamento de apenas 1 m do fuste na camada laterítica mais resistente promoveu um aumento de 171% na capacidade de carga, demonstrando que pequenas variações de comprimento podem produzir alterações significativas na resposta da fundação quando há interfaces geotécnicas bem definidas.

De modo geral, os resultados indicam que correlações baseadas exclusivamente em valores de NSPT podem não representar adequadamente os mecanismos de transferência de carga em solos lateríticos estratificados. Nesse contexto, a consideração explícita das características estratigráficas e estruturais do perfil geotécnico mostra-se fundamental para a interpretação do comportamento de fundações profundas e para o aprimoramento de métodos semiempíricos de previsão de capacidade de carga.

DECLARAÇÃO SOBRE O USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Os autores utilizaram ferramentas de Inteligência Artificial Generativa exclusivamente para auxílio na revisão gramatical e aprimoramento da redação do manuscrito. Todo o conteúdo científico, análises, interpretações e conclusões são de responsabilidade dos autores.



REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. J. R.; GARCIA, J. R. Engenharia de fundações. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16903: Solo – Prova de carga estática em fundação profunda. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

DÉCOURT, L. Análise e projetos de fundações profundas. In: FALCONI, F. F. et al. (org.). Fundações: teoria e prática. 3. ed. São Paulo: PINI, 2016.

DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 6., 1978, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABMS, 1978.

FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. S. S.; LACERDA, W. A. Yield, strength and critical state conditions of a tropical saturated soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 130, n. 11, p. 1169-1179, 2004.

GARCIA, J. R. Projeto de pesquisa (Processo APQ00335-21) - Otimização de fundações em construções populares em solo da região de Uberlândia - MG. Uberlândia: [s. n.], 2021.

LEROUEIL, S.; VAUGHAN, P. R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. Géotechnique, v. 40, n. 3, p. 467-488, 1990.

LOPES, A. F. A.; GARCIA, J. R. Experimental and numerical analysis of single piled raft unit in unconventional soil. Geomechanics and Geoengineering, v. 20, n. 2, p. 345-356, 2025.

MARQUES, Abel Galindo; MARQUES, Juliane Andréia F.; MARQUES, Ricardo Figueiredo. Métodos de Investigação do Subsolo. 3. ed. rev. e ampl. Maceió: Edufal, 2014.

OLIVEIRA, E. A. S. Análise experimental e numérica do comportamento de sapata estaqueada em solo tropical. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

SARAIVA JÚNIOR, R. Análise experimental e numérica do comportamento de estacas curtas instrumentadas em solo de Uberlândia (MG). 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.



MAPEAMENTO DE INDICADORES DE ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE URBANA DO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS NO MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA/MG

Sophia Ladir Pereira Vieira de Moraes¹

Maria Lígia Chuerubim²

¹ Faculdade de Computação - Universidade Federal de Uberlândia (sophialadirmoraes@gmail.com)

² Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Federal de Uberlândia (marialigia@ufu.br)

RESUMO

Este artigo propõe e aplica o Índice de Acessibilidade e Mobilidade por Ônibus (IAMO) ao conjunto de bairros do município de Uberlândia/MG, com base na primeira versão do modelo construída a partir de indicadores técnicos da literatura nacional e internacional. O IAMO integra 18 indicadores agrupados em três eixos – Oferta e Operação, Acessibilidade Territorial e Confiabilidade, Segurança e Contexto Social – normalizados pelo método *min-max* e ponderados pelo Método da Entropia, que prioriza indicadores com maior variabilidade espacial. Os valores foram estimados parametricamente para 20 bairros representativos distribuídos pelos cinco setores territoriais oficiais do município. Os resultados revelam que bairros centrais como Fundinho (0,90), Martins (0,86) e Nossa Senhora Aparecida (0,82) concentram os maiores valores do índice, enquanto bairros periféricos como Pequis (0,49), Portal do Vale (0,52) e Shopping Park (0,54) apresentam acessibilidade média, evidenciando desigualdades territoriais no acesso ao transporte público. O *CorridorScore* recebeu o maior peso entrópico (0,187), seguido de acesso a empregos em 60 minutos (0,112) e densidade populacional (0,094). O IAMO constitui ferramenta replicável para diagnóstico de mobilidade urbana e subsídio a políticas públicas equitativas.

Palavras-chave: Acessibilidade. Mobilidade urbana. Transporte coletivo. Índice composto. Entropia.

ABSTRACT

This paper proposes and applies the Bus Accessibility and Mobility Index (IAMO) to the neighborhoods of Uberlândia/MG, Brazil, based on the first version of the model developed from national and international literature. The IAMO integrates 18 indicators grouped into three axes – Supply and Operation, Territorial Accessibility and Reliability, Safety and Social Context – normalized using the *min-max* method and weighted through the Entropy method, which prioritizes indicators with greater spatial variability. Values were parametrically estimated for 20 representative neighborhoods distributed across the five official territorial sectors of the municipality. Results show that central neighborhoods such as Fundinho (0.90), Martins (0.86) and Nossa Senhora Aparecida (0.82) concentrate the highest index values, while peripheral neighborhoods such as Pequis (0.49), Portal do Vale (0.52) and Shopping Park (0.54) present medium accessibility, evidencing territorial inequalities in public transport access. The *CorridorScore* received the highest entropic weight (0.187), followed by job access within 60



minutes (0.112) and population density (0.094). The IAMO constitutes a replicable tool for urban mobility diagnosis and equitable public policy support.

Keywords: Accessibility. Urban mobility. Public transport. Composite index. Entropy.

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana constitui um dos principais desafios das cidades contemporâneas, especialmente nos países em desenvolvimento. O crescimento da frota de veículos privados, a expansão urbana desordenada e o uso ineficiente do solo produzem congestionamentos, poluição, exclusão social e queda na qualidade de vida (Vasconcellos, 2014). Nesse contexto, o transporte coletivo por ônibus permanece como eixo estruturador da mobilidade em cidades médias e grandes brasileiras, exigindo metodologias de avaliação que considerem tanto a eficiência operacional quanto a capacidade de garantir acessibilidade equitativa (ANTP, 2018).

A acessibilidade é um conceito multidimensional, definido não apenas pela infraestrutura de transporte, mas sobretudo pela capacidade das pessoas acessarem atividades e oportunidades urbanas (Geurs e Wee, 2004). Esses autores sistematizam a acessibilidade em quatro componentes: disponibilidade de infraestrutura, características do uso do solo, tempo e custo de deslocamento, e aspectos individuais. Estudos posteriores reforçam a integração de indicadores de tempo, qualidade de viagem e equidade social (Pereira, Schwanen e Banister, 2017).

No contexto nacional, pesquisas do IPEA (2011) indicam que a população de baixa renda é a mais dependente do transporte coletivo, porém enfrenta maiores tempos de viagem, transferências excessivas e menor confiabilidade. Vasconcellos (2014) reforça que o transporte urbano brasileiro foi historicamente excludente, refletindo padrões de segregação socioespacial. A avaliação da acessibilidade deve incorporar dimensões sociais para identificar áreas onde a mobilidade é mais limitada.

Uberlândia (MG), com mais de 700 mil habitantes (IBGE, 2022) e rede de transporte baseada em corredores exclusivos e terminais integrados, enfrenta o desafio de equilibrar eficiência operacional e equidade territorial. O município conta com dois corredores estruturais – João Naves de Ávila e Segismundo Pereira – totalizando 13,5 km de faixa exclusiva (PMU/SETTRAN, 2018), mas a cobertura espacial apresenta disparidades significativas, especialmente em bairros periféricos, evidenciando a necessidade de métricas compostas para avaliar as múltiplas dimensões da acessibilidade.

Diante desse contexto, este artigo apresenta uma formulação original ao propor e aplicar a versão 1.0 do IAMO – Índice de Acessibilidade e Mobilidade por Ônibus – ao conjunto de bairros da cidade de Uberlândia. O índice foi desenvolvido metodologicamente pelos autores a partir da integração e adaptação de indicadores consagrados na literatura técnica nacional e internacional. A escala espacial de análise adotada é o bairro, por ser mais inteligível para planejamento urbano e formulação de políticas públicas, conforme recomendado pela literatura (Pereira, Schwanen e Banister, 2017).

2. METODOLOGIA

A construção e aplicação da versão 1.0 do IAMO segue quatro etapas sequenciais: (1) seleção e organização dos indicadores; (2) normalização *min-max*; (3) ponderação pelo Método da Entropia; e (4) cálculo e classificação do índice por bairro.

2.1. Seleção de Indicadores

Foram selecionados 18 indicadores agrupados em três eixos temáticos: Eixo 1 - Oferta e Operação; Eixo 2 - Acessibilidade Territorial; e Eixo 3 - Confiabilidade, Segurança e Contexto Social. Os valores de referência foram estabelecidos a partir de parâmetros calibrados pela literatura nacional e internacional, adaptados para cidades médias brasileiras, extraídos de fontes oficiais (IBGE, 2022; PMU/SETTRAN, 2018; IPEA, 2015). O indicador *Corridor Score* captura a presença e extensão de corredores exclusivos por bairro, dado seu papel estruturante.

Quadro 1 – Matriz de Indicadores do IAMO: Definições, Valores de Referência e Fontes

Código/Eixo	Definição/Referência	Fonte de dados
<i>CorridorScore</i> (Oferta/Operação)	Pontuação composta de desempenho do corredor. Ref.: 0,55-0,85	Fontes: ITDP (2024); OECD (2008).
<i>Hpico</i> (Oferta/Operação)	<i>Headway</i> pico – Intervalo médio entre viagens no pico (min). Ref.: 10 min.	Fontes: ANTP (2018); ITDP Brasil (2019).
<i>Hoff</i> (Oferta/Operação)	<i>Headway</i> entrepico – Intervalo médio entre viagens fora do pico (min). Ref.: 18 min.	Fontes: ANTP (2018); PMU/SETTRAN (2018).
<i>IR</i> (Oferta/Operação)	Índice de regularidade (0-1). Ref.: 0,80 (Parâmetro calibrado).	Fonte: ITDP Brasil (2019).
<i>EDF</i> (Oferta/Operação)	Frequência porta-a-porta - ônibus/hora $\leq$ 400 m. Ref.: 14 ônibus/h.	Fonte: IPEA (2011).
<i>Cap_h</i> (Oferta/Operação)	Capacidade horária - assentos/hora no raio de 400 m. Ref.: 700 assentos/h.	Fontes: ANTP (2018); TRB (2013).
<i>Cov400</i> (Acessib. Territorial)	Percentual da população $\leq$ 400m de uma parada (%). Ref.: 85%.	Fonte: ITDP Brasil (2019).
<i>Dist_{stop}</i> (Acessib. Territorial)	Distância ao ponto – Caminhada média à parada mais próxima (m). Ref.: 350 m.	Fontes: ANTP (2018); Daniels e Mulley (2013).
<i>Transf</i> (Acessib. Territorial)	Transferências – Número médio de trocas por viagem. Ref.: 1,1.	Fonte: PMU/SETTRAN (2018).
<i>A30</i> (Acessib. Territorial)	Acesso 30 min – Empregos acessíveis em até 30 min (%). Ref.: 33%.	Fontes: IPEA (2011); Geurs e Wee (2004).
<i>A60</i> (Acessib. Territorial)	Acesso 60 min – Empregos acessíveis em até 60 min (%). Ref.: 68%.	Fontes: IPEA (2011); World Bank (2016).
<i>A_{grav}</i> (Acessib. Territorial)	Acessibilidade gravitacional – Empregos ponderados por impedância (0-1). Ref.: 0,58 (Parâmetro calibrado).	Fonte: Geurs e Wee (2004).
<i>GC_{med}</i> (Acessib. Territorial)	Custo generalizado tempo porta-a-porta (min). Ref.: 40 min.	Fontes: ITDP (2019); ANTP (2018).
<i>Dens</i> (Consf., Seg. e Social)	Densidade populacional – Habitantes por km ² (setor censitário). Ref.: 5.500 hab/km ² (Dado real).	Fonte: IBGE (2022).
<i>Renda</i> (Consf., Seg. e Social)	Renda domiciliar – Renda mediana mensal por domicílio (R\$). Ref.: R\$ 2.100,00 (Dado real).	Fonte: IBGE (2022).
<i>IVS</i> (Consf., Seg. e Social)	Vulnerabilidade social – Índice composto de vulnerabilidade social (0-1). Ref.: 0,45 (Dado real).	Fonte: IPEA (2015).

$Crash_{pt}$ (Consf., Seg. e Social)	Taxa de sinistros de trânsito com ônibus (por 10 mil hab./ano). Ref.: 3,8.	Fonte: ANTP (2018).
$Conf_{temp}$ (Consf., Seg. e Social)	Confiabilidade - diferença percentis P95- P50 (min). Ref.: \$pm\$ 7 min.	Fonte: ITDP Brasil (2019).

2.2. Normalização Min-Max

Para integrar variáveis com diferentes escalas e unidades, aplicou-se a normalização *min-max*, transformando todos os indicadores para o intervalo [0, 1]. Indicadores de benefício (maior valor = melhor desempenho) seguem a Equação 1; indicadores de custo (maior valor = pior desempenho) seguem a Equação 2:

$$x_{bk}' = \frac{x_{bk} - \min(x_k)}{\max(x_k) - \min(x_k)}, k \in \text{benefício} \quad (1)$$

$$x_{bk}' = \frac{\max(x_k) - x_{bk}}{\max(x_k) - \min(x_k)}, k \in \text{custo} \quad (2)$$

Em que: x_{bk} é o valor bruto do indicador k (Quadro 1) no bairro b ; x_{bk}' é o valor normalizado (0–1) e x_k representa o conjunto dos valores observados do indicador k em todos os bairros analisados, isto é, $x_k = \{x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{N,k}\}$, com N representa o total de bairros analisados. São indicadores de custo: *headway*, IVS (Índice de Vulnerabilidade Social), distância ao ponto, custo generalizado, transferências e confiabilidade temporal. Os demais são indicadores de benefício.

2.3. Ponderação pelo Método da Entropia

A ponderação objetiva foi realizada pelo Método da Entropia (Zou et al., 2006), que atribui maior peso aos indicadores com maior variabilidade espacial entre os bairros. O método segue três passos: (i) cálculo das proporções suavizadas; (ii) cálculo da entropia (E_k); e (iii) determinação do grau de utilidade (d_k) e do peso final (w_k).

As proporções suavizadas de cada indicador (p_{bk}) são dadas pela Equação 3, adotando-se $\varepsilon = 10^{-6}$ para evitar logaritmo de zero:

$$p_{bk} = \frac{x_{bk}' + \varepsilon}{\sum_b (x_{bk}' + \varepsilon)}, \varepsilon = 10^{-6} \quad (3)$$

A entropia do indicador k é calculada pela Equação 4, em que N representa o total de bairros analisados e p_{bk} é a proporção suavizada:

:

$$E_k = \frac{-1}{\ln N} \sum_b (p_{bk} \ln p_{bk}) \quad (4)$$

O grau de utilidade (d_k), que reflete o nível de variabilidade da informação, é calculado separadamente pela Equação 5:

$$d_k = 1 - E_k \quad (5)$$

Em seguida, o peso final de cada indicador (w_k) na composição do índice é determinado pela Equação 6, normalizando o grau de utilidade em relação ao somatório total:

$$w_k = \frac{d_k}{\sum_k d_k} \quad (6)$$

Quanto maior a variabilidade espacial de um indicador entre os bairros, menor sua entropia E_k , maior seu grau de utilidade d_k e, consequentemente, maior seu peso w_k no índice composto.

2.4. Cálculo do IAMO por Bairro

O IAMO de cada bairro b é calculado como a soma ponderada dos indicadores normalizados, conforme a Equação 6:

$$IAMO_b = \sum_k w_k \cdot x_{bk}' \quad (7)$$

O índice tem variação restrita ao intervalo de 0 a 1, em que valores próximos a 1 indicam os cenários mais favoráveis de oferta, acesso e qualidade. A classificação foi estruturada em quatro faixas metodológicas para facilitar o diagnóstico territorial: Muito alta ($IAMO > 0,80$); Alta (0,60 a 0,80); Média (0,40 a 0,60); e Baixa ($IAMO < 0,40$). Os limites dessas faixas foram estabelecidos de forma a refletir a distribuição em quartis do desempenho da infraestrutura urbana e de transporte na realidade do município."

O modelo foi aplicado a 20 bairros representativos dos cinco setores territoriais oficiais de Uberlândia, com valores estimados parametricamente com base nos pesos e parâmetros técnicos definidos. Embora o cálculo empírico definitivo exija cruzamento geoespacial real (SIG – Sistemas de Informações Geográficas) da rede de ônibus com os limites cartográficos dos bairros, a estimativa paramétrica adotada é coerente com a estrutura urbana do município e com as referências técnicas disponíveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Pesos por Entropia

A Tabela 2 apresenta os pesos calculados pelo Método da Entropia para os 18 indicadores do IAMO versão 1.0. O $CorridorScore_n$ obteve o maior peso (0,187), refletindo elevada variabilidade espacial entre bairros com e sem acesso a corredores exclusivos de ônibus. Em seguida, destacaram-se $A60_n$ (0,112) e $Dens_n$ (0,094), reforçando a centralidade da dimensão territorial e demográfica. Os indicadores com menores pesos foram $Crash_n$ (0,007) e IVS_n (0,016), com menor discriminação entre bairros nas condições estimadas. Esses resultados evidenciam que, em Uberlândia, a presença de infraestrutura exclusiva e o acesso a oportunidades de emprego são os principais fatores de diferenciação da acessibilidade por ônibus entre bairros.

Tabela 2 - Pesos por Entropia dos 18 indicadores do IAMO.

Indicador	Peso (Entropia)
$CorridorScore_n$	0,187
$A60_n$	0,112

$Dens_n$	0,094
$Cov400_n$	0,069
$A30_n$	0,063
$Dist_{stop_n}$	0,057
A_{grav_n}	0,054
EDF_n	0,053
GC_{med_n}	0,051
H_{off_n}	0,050
Cap_{h_n}	0,048
H_{pico_n}	0,046
$Transf_n$	0,030
$Renda_n$	0,026
IR_n	0,019
$Conf_n$	0,019
IVS_n	0,016
$Crash_n$	0,007

Fonte: Autores (2026).

3.2. IAMO por Bairros de Uberlândia

A Tabela 3 apresenta os resultados do IAMO para os 20 bairros analisados. Os bairros do Setor Central concentram os maiores valores: Fundinho (0,90), Martins (0,86) e Nossa Senhora Aparecida (0,82) situam-se na classe de muito alta acessibilidade, refletindo maior densidade de linhas, menor distância aos pontos de ônibus, alta frequência e proximidade aos corredores estruturais. No Setor Leste, Tibery (0,80) e Santa Mônica (0,79) apresentam alta acessibilidade, favorecidos pela inserção nos eixos estruturais da cidade.

Os bairros periféricos dos Setores Oeste e Sul concentram os menores valores: Pequis (0,49), Portal do Vale (0,52), Residencial Integração (0,53), Shopping Park (0,54) e Jardim das Palmeiras (0,55) situam-se na faixa de média acessibilidade, resultado da menor cobertura da rede, maiores tempos de deslocamento e maior vulnerabilidade socioespacial. Bairros periféricos não incluídos na amostra tendem a apresentar valores ainda menores, na faixa baixa (IAMO < 0,40), segundo as estimativas paramétricas do modelo.

Tabela 3 – Estimativa do IAMO por bairros representativos de Uberlândia/MG.

Bairro	Setor Territorial	IAMO	Classificação
Fundinho	Central	0,90	Muito alta
Martins	Central	0,86	Muito alta
Nossa Senhora Aparecida	Central	0,82	Muito alta
Tibery	Leste	0,80	Alta
Santa Mônica	Leste	0,79	Alta
Segismundo Pereira	Leste	0,77	Alta
Brasil	Norte	0,75	Alta
Presidente Roosevelt	Norte	0,68	Alta
Umuarama	Leste	0,67	Alta
Patrimônio	Sul	0,66	Alta
Luizote de Freitas	Oeste	0,65	Alta
São Jorge	Sul	0,60	Alta
Morumbi	Leste	0,58	Média



Pacaembu	Norte	0,57	Média
Taiaman	Oeste	0,56	Média
Jardim das Palmeiras	Oeste	0,55	Média
Shopping Park	Sul	0,54	Média
Residencial Integração	Leste	0,53	Média
Portal do Vale	Leste	0,52	Média
Pequis	Oeste	0,49	Média

Fonte: Autores (2026).

A Figura 1 apresenta a distribuição espacial dos resultados do IAMO nos bairros analisados, a partir do processamento e da classificação cartográfica realizada no software QGIS 4.0 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2026). A representação utiliza uma escala cromática em que as cores quentes indicam os bairros com maiores valores do IAMO, ou seja, áreas com melhor desempenho relativo em termos de oferta, acessibilidade territorial, confiabilidade, segurança e condições socioespaciais. Por outro lado, as cores frias representam bairros com menores valores do IAMO, sinalizando áreas com maior fragilidade relativa, menor nível de atendimento pelo transporte coletivo ou maior presença de barreiras socioespaciais à mobilidade.

Como os indicadores de custo, tais como *headway*, distância ao ponto, transferências, custo generalizado, IVS, acidentes e confiabilidade temporal, foram previamente normalizados de forma invertida, os valores mais elevados do IAMO indicam sempre uma condição mais favorável de mobilidade. Dessa forma, a leitura do mapa permite identificar visualmente os contrastes territoriais entre bairros mais bem servidos pelo sistema de transporte público e aqueles que apresentam maior necessidade de intervenção. A presença de áreas com cores frias evidencia possíveis lacunas na cobertura, na frequência, na acessibilidade ou na confiabilidade do serviço, enquanto os setores representados por cores quentes indicam maior integração entre oferta operacional e acesso às oportunidades urbanas.

Em relação aos resultados apresentados na Figura 1, observa-se que o IAMO permite evidenciar desigualdades espaciais no desempenho do transporte coletivo, destacando bairros com diferentes níveis de acessibilidade e mobilidade por ônibus. As áreas com maiores valores do índice tendem a corresponder a regiões com melhor oferta de linhas, menores tempos de espera, maior proximidade às paradas, maior acesso a empregos e melhores condições de regularidade operacional. Em contrapartida, os bairros com menores valores do IAMO indicam territórios potencialmente mais vulneráveis do ponto de vista da mobilidade urbana, nos quais a combinação entre menor oferta, maiores distâncias de caminhada, maior custo generalizado ou piores condições socioespaciais pode limitar o acesso da população às oportunidades urbanas.

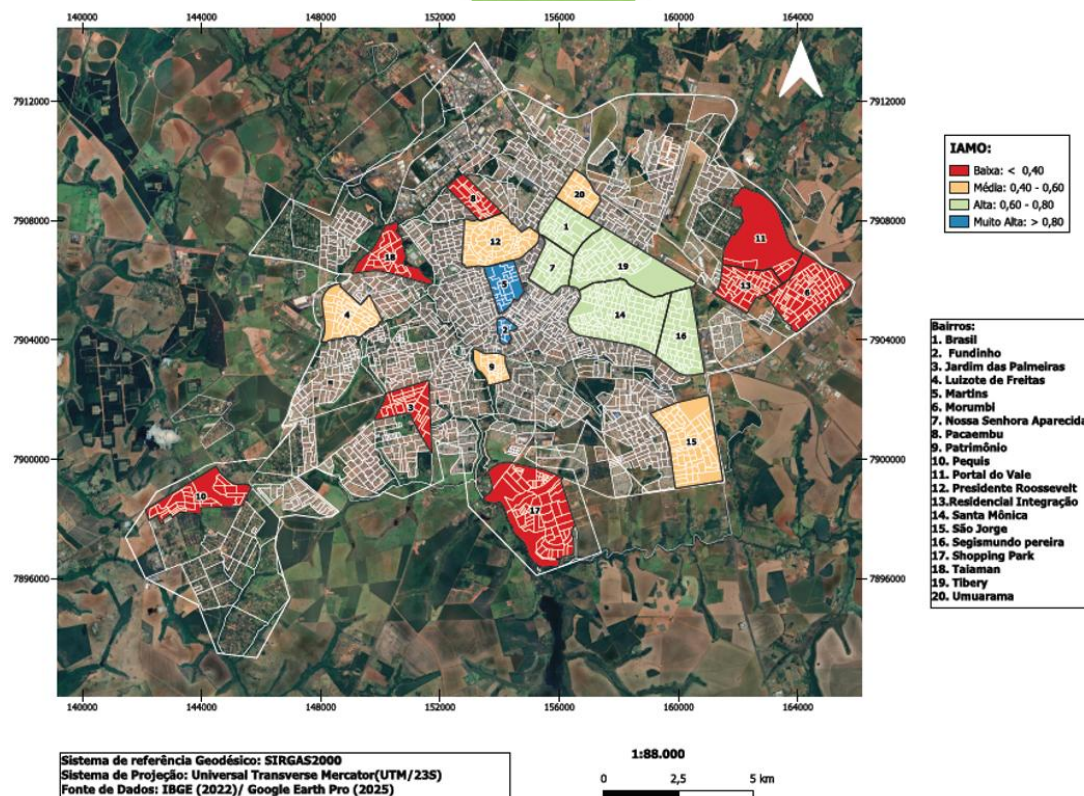


Figura 1 – Distribuição espacial do Índice de Acessibilidade e Mobilidade por Ônibus (IAMO) por bairro.
Fonte: Autores (2026).

3.3. IAMO por Setor Territorial Oficial

A Tabela 4 apresenta os resultados agregados por setor territorial oficial do município. O Setor Central lidera com IAMO médio de 0,84 (muito alta acessibilidade), refletindo concentração dos corredores estruturais e maior oferta de serviços de transporte. O Setor Leste (0,73) e o Setor Sul (0,68) situam-se na classe alta, com boa integração ao sistema de corredores. Os Setores Norte (0,63) e Oeste (0,60) ficam no limiar inferior da faixa alta, sinalizando maior heterogeneidade interna e presença de bairros periféricos com oferta precária de transporte.

Tabela 4 - IAMO estimado por setor territorial oficial de Uberlândia/MG.

Setor Territorial	IAMO	Classificação
Central	0,84	Muito alta
Leste	0,73	Alta
Sul	0,68	Alta
Norte	0,63	Alta
Oeste	0,60	Alta

Nota: Setores territoriais definidos com base no Mapa de Setores de Uberlândia, conforme a divisão administrativa da PMU/SEPLAN. (2025). Fonte: Autores (2026).

3.4. Análise de Equidade Territorial

A sobreposição entre baixa acessibilidade por ônibus e elevada vulnerabilidade social (IVS elevado, renda baixa) evidencia uma situação de injustiça espacial em Uberlândia: os grupos com menor capacidade de mobilidade privada – justamente os mais dependentes do transporte coletivo – são os mais prejudicados pela oferta deficiente de serviços. Esse padrão é consistente com os achados de Vasconcellos (2014) e IPEA (2011) para cidades brasileiras de porte médio.



O *CorridorScore*, indicador de maior peso no modelo (0,187), reflete com precisão essa desigualdade: bairros ao longo dos corredores João Naves de Ávila e Segismundo Pereira concentram os maiores valores de IAMO, enquanto bairros sem acesso a corredores exclusivos dependem de linhas convencionais com *headways* maiores, menor regularidade e maior custo generalizado. Pereira, Schwanen e Banister (2017) defendem a inclusão explícita de critérios distributivos na mensuração da acessibilidade urbana, perspectiva que o IAMO atende ao incorporar IVS e renda no Eixo 3, permitindo identificar bairros prioritários para investimento em transporte público.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou a proposição e a aplicação do IAMO – Índice de Acessibilidade e Mobilidade por Ônibus – ao conjunto de bairros do município de Uberlândia/MG, com base na primeira versão do modelo. O índice integra 18 indicadores em três eixos temáticos, ponderados pelo Método da Entropia, e foi estimado para 20 bairros representativos distribuídos pelos cinco setores territoriais oficiais do município.

Os resultados confirmam acentuada discrepância centro-periferia na acessibilidade por ônibus em Uberlândia: bairros centrais como Fundinho, Martins e Nossa Senhora Aparecida concentram as melhores condições de mobilidade (IAMO > 0,80), enquanto bairros como Pequis, Portal do Vale e Shopping Park situam-se na faixa de média acessibilidade (0,49–0,54), sinalizando carências na oferta de transporte. O *CorridorScore* revelou-se o indicador de maior peso no modelo (0,187), reforçando o papel estruturante dos corredores exclusivos na mobilidade urbana.

Como contribuições metodológicas, o IAMO: (i) integra dimensões operacionais, territoriais e sociais em uma métrica única e comparável; (ii) utiliza ponderação objetiva por Entropia, reduzindo subjetividade; e (iii) é replicável para qualquer município com dados de rede de transporte, cartografia de bairros e informações socioeconômicas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Como limitações, destaca-se que os valores foram estimados parametricamente, sem cruzamento geoespacial real entre a rede de ônibus e os limites cartográficos dos bairros. A validação com dados oficiais da Especificação Geral de Feed de Trânsito (GTFS) e da Secretaria de Trânsito e Transportes (SETTRAN), combinada com análise espacial em SIG, constitui o próximo passo da pesquisa. Recomenda-se também investigar a sensibilidade dos resultados a diferentes métodos de ponderação e à variação na escala de análise espacial.

Em perspectiva futura, o IAMO pode ser expandido para incorporar indicadores de acessibilidade universal (infraestrutura para pessoas com mobilidade reduzida), qualidade percebida pelo usuário, emissões de carbono e integração modal, ampliando sua abrangência como instrumento de planejamento de mobilidade urbana sustentável e equitativa.

5. CONSIDERAÇÃO SOBRE O USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram formalmente que não foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial Generativa em nenhuma etapa de concepção metodológica, análise de dados, processamento cartográfico ou redação original do conteúdo deste trabalho.



REFERÊNCIAS

- ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana**. São Paulo: ANTP, p. 1-56, 2018.
- GEURS, K. T.; WEE, B. V. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. **Journal of Transport Geography**, v. 12, n. 2, p. 127–140, 2004.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022: Resultados preliminares**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Sistema de Indicadores de Percepção Social – Mobilidade Urbana**. Brasília: IPEA, 2011.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Atlas da Vulnerabilidade Social nos Municípios Brasileiros**. Brasília: IPEA, 2015.
- ITDP BRASIL – Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento. **Indicadores de Acessibilidade no Transporte Coletivo Urbano**. Rio de Janeiro: ITDP, 2019.OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development. **Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide**. Paris: OECD Publishing, 2008.
- PEREIRA, R. H. M.; SCHWANEN, T.; BANISTER, D. **Distributive justice and equity in transportation**. *Transport Reviews*, v. 37, n. 2, p. 1–21, 2017.
- PMU/SETTRAN – Prefeitura Municipal de Uberlândia. Secretaria de Trânsito e Transportes. **Relatórios do Sistema Integrado de Transporte (SIT)**. Uberlândia: PMU/SETTRAN, 2018.
- PMU/ SEPLAN. Prefeitura Municipal de Uberlândia. Secretaria Municipal de Planejamento Urbano. **Mapa de Setores de Uberlândia 2025**. Uberlândia: PMU, 2025. TRB. Transportation Research Board. **TCRP Report 165. Transit Capacity and Quality of Service Manual. 3. ed**. Washington, DC: TRB, 2013. VASCONCELLOS, E. A. **Políticas de transporte no Brasil: a construção da mobilidade excludente**. 3. ed. São Paulo: Annablume, 2014.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Versão 4.0. [S.l.]: Open Source Geospatial Foundation Project, 2026. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 22 maio 2026.
- WORLD BANK. **Urban transport and mobility in medium-sized Brazilian cities**. Washington, DC: The World Bank, 2016.
- ZOU, N.; ZHANG, J.; SONG, L. **Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation**. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, v. 17, n. 2, p. 430–434, 2006.



ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE ALTIMETRIA, VOLUME ARMAZENADO E PRECIPITAÇÃO NO RESERVATÓRIO DA ITAIPU BINACIONAL A PARTIR DE DADOS E INFORMAÇÕES GEOESPACIAIS

Giovana de Almeida Mendes¹

Gabriel do Nascimento Guimarães²

^{1,2}Universidade Federal de Uberlândia (giovana.mendes@ufu.br; gabriel@ufu.br)

RESUMO

Modelagens cota-área-volume descrevem a relação geométrica entre o nível da água, a área inundada e o volume armazenado em reservatórios, permitindo avaliar a sensibilidade do armazenamento hídrico frente a pequenas variações altimétricas. Associadas às altitudes obtidas por receptores GNSS e dados orbitais de altimetria, essas informações constituem ferramenta fundamental em aplicações hidrológicas e no monitoramento de reservatórios hidrelétricos. Este trabalho tem como objetivo analisar a relação entre altimetria, volume armazenado e precipitação no reservatório da Itaipu Binacional, utilizando dados hidrológicos provenientes de sensoriamento remoto e estações pluviométricas. Para isso, foram empregados dados de nível da água e variação de volume disponibilizados pela plataforma DAHITI, além de informações pluviométricas obtidas no sistema HIDROWEB para o período de 2015 a 2025. A validação foi conduzida por meio da modelagem cota-área-volume, considerando diferentes cenários de variação altimétrica próximos à cota operacional do reservatório, e pela análise estatística das séries temporais de precipitação, nível d'água e volume armazenado. Os resultados demonstraram que variações reduzidas da ordem de centímetros podem produzir alterações significativas nas estimativas de armazenamento hídrico, evidenciando a importância da determinação precisa das altitudes físicas em aplicações hidrológicas. A análise de correlação de Pearson indicou ausência de correlação linear significativa entre a precipitação mensal observada e as variações de altimetria e volume do reservatório, sugerindo que a dinâmica do armazenamento hídrico é influenciada não apenas pela precipitação local, mas também pela extensão da bacia contribuinte e pelas condições operacionais do sistema hidrelétrico. Espera-se que os resultados contribuam para aplicações voltadas ao planejamento e gestão de recursos hídricos, demonstrando o potencial da integração de dados altimétricos orbitais e informações hidrológicas para o monitoramento de grandes reservatórios.

Palavras-chave: Altimetria por satélite. Reservatórios hidrelétricos. Volume armazenado. Informações Geoespaciais.

ABSTRACT

Stage-area-volume modeling describes the geometric relationship between water level, inundated area, and stored volume in reservoirs, allowing the assessment of hydrological storage sensitivity to small altimetric variations. Combined with GNSS-derived altitudes and satellite altimetry data, these models are fundamental tools in



hydrological applications and reservoir monitoring. This study aims to analyze the relationship between water level, stored volume, and precipitation in the ITAIPU Binacional Reservoir, using hydrological datasets derived from remote sensing and rainfall monitoring networks. Water level and volume variation data were obtained from the DAHITI platform, while precipitation records were collected from the HIDROWEB database for the period between 2015 and 2025. Validation was conducted through stage-area-volume modeling, considering altimetric variations near the reservoir's operational water level, and through statistical analysis of precipitation, water level, and storage volume time series. The results showed that centimeter-scale changes in water level can produce significant differences in storage estimates, highlighting the importance of accurate physical height determination in hydrological applications. Pearson correlation analysis revealed no significant linear relationship between monthly precipitation and reservoir water level or storage volume, suggesting that reservoir dynamics are influenced not only by local rainfall but also by the extent of the contributing watershed and operational management strategies. These findings are expected to contribute to water resource planning and management applications, demonstrating the potential of integrating satellite altimetry and hydrological datasets for monitoring large hydropower reservoirs.

Keywords: Satellite altimetry. Hydropower reservoirs. Water storage. Geospatial information.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento preciso das altitudes físicas é fundamental em aplicações relacionadas à hidrologia, engenharia e monitoramento de reservatórios, especialmente em estudos que envolvem o comportamento do armazenamento hídrico e a variação do nível d'água. Nesse contexto, modelos geoidais e quase geoidais desempenham papel essencial, pois permitem relacionar as altitudes elipsoidais obtidas por receptores GNSS às altitudes físicas utilizadas em aplicações práticas (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006; Monico, 2008).

A determinação precisa das altitudes é particularmente importante na geração de curvas cota-área-volume, amplamente empregadas na análise operacional de reservatórios hidrelétricos. Essas curvas permitem estimar a relação entre o nível da água, a área inundada e o volume armazenado, constituindo ferramenta relevante para o planejamento e gestão de recursos hídricos (Tucci, 2005).

Com o avanço das técnicas de sensoriamento remoto e do uso de dados altimétricos orbitais, tornou-se possível obter séries temporais de nível d'água e volume de reservatórios com maior abrangência espacial e temporal. Plataformas como o DAHITI disponibilizam dados hidrológicos derivados de altimetria por satélite que contribuem significativamente para estudos voltados ao monitoramento hidrológico e à análise do comportamento de reservatórios (Schwatke et al., 2015). Da mesma forma, o sistema HIDROWEB, disponibilizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, fornece séries históricas hidrológicas e pluviométricas amplamente utilizadas em estudos hidrológicos no Brasil (ANA, 2024).

Entretanto, a precisão dos resultados obtidos depende diretamente da representação adequada do campo de gravidade terrestre na região de estudo. Dessa forma, a avaliação de modelos geoidais e quase geoidais torna-se necessária para identificar aqueles que melhor

representam as características altimétricas locais e possibilitam maior confiabilidade na determinação das curvas cota-área-volume.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar a relação entre altimetria, volume armazenado e precipitação no reservatório da Itaipu Binacional, utilizando dados orbitais e pluviométricos. A modelagem cota-área-volume foi empregada para avaliar a sensibilidade do armazenamento hídrico em função de pequenas variações altimétricas, complementada pela análise temporal e estatística das séries de precipitação, nível d'água e volume.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde ao reservatório da Itaipu Binacional, localizado no rio Paraná, na fronteira entre Brasil e Paraguai. O reservatório constitui um dos maiores sistemas hidrelétricos do mundo em geração de energia elétrica e desempenha papel estratégico na gestão dos recursos hídricos da região (Itaipu Binacional, 2025). A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo e o contexto regional do reservatório da Itaipu Binacional na fronteira entre Brasil e Paraguai.

Localização do Reservatório de Itaipu

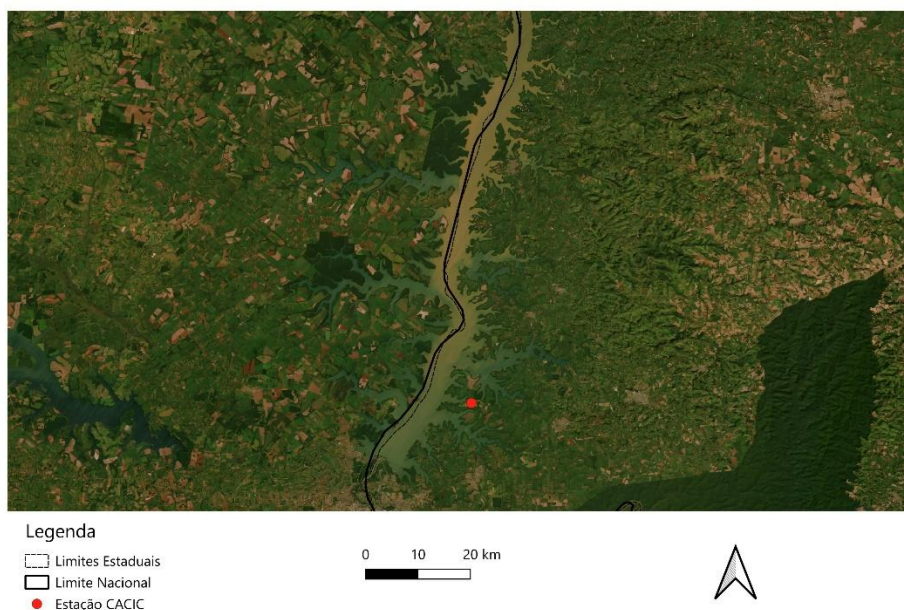


Figura 1 – Localização da área de estudo correspondente ao reservatório da Itaipu Binacional.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os dados utilizados no trabalho foram obtidos por meio da plataforma DAHITI – *Database for Hydrological Time Series of Inland Waters* (Schwatke et al., 2015), que disponibiliza séries temporais hidrológicas derivadas de sensoriamento remoto por satélite. Foram coletadas séries temporais referentes à altimetria do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu, bem como as variações de volume associadas ao nível da água.

Adicionalmente, foram utilizados dados pluviométricos obtidos na plataforma HIDROWEB, disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2024). Foram selecionados registros de precipitação de uma estação localizada próxima ao reservatório, abrangendo o período entre 2015 e 2025.

2.2 Modelagem cota-área-volume

A primeira análise desenvolvida neste trabalho consistiu na modelagem da relação entre cota, área inundada e volume armazenado do reservatório da Itaipu Binacional. O objetivo dessa etapa foi avaliar a sensibilidade do volume armazenado em função de pequenas variações altimétricas, permitindo quantificar o impacto de possíveis erros na determinação da cota do reservatório.

Os dados de altitude (cota) e volume foram organizados em tabelas para construção da curva cota-volume do reservatório. A modelagem foi realizada utilizando como referência a cota máxima de 220,3 m, área máxima de 1350 km² e volume máximo de 29 km³, conforme informações técnicas disponibilizadas pela Itaipu Binacional (ITAIPU BINACIONAL, 2026).

Para representar o comportamento geométrico do reservatório, foi inicialmente calculada uma variável adimensional x , correspondente à posição relativa da cota analisada em relação aos limites considerados no modelo. Essa variável foi obtida pela Equação (1):

$$x = \frac{h - h_{min}}{h_{max} - h_{min}}$$

Equação (1) – Variável adimensional utilizada na modelagem.

onde:

- h corresponde à cota analisada;
- h_{min} corresponde à cota mínima considerada;
- h_{max} corresponde à cota máxima considerada.

Neste estudo, foram adotados os valores de $h_{min} = 120m$ e $h_{max} = 220,3m$ para a normalização da variável adimensional utilizada na modelagem.

A área inundada associada a cada valor de cota foi estimada por meio de uma relação linear entre a variável adimensional e a área máxima do reservatório, conforme apresentado na Equação (2).

$$A(h) = A_{max} \cdot x$$

Equação (2) – Cálculo da área inundada.

onde:

- $A(h)$ representa a área correspondente à cota analisada;
- A_{max} representa a área máxima do reservatório.

Posteriormente, o volume armazenado foi estimado por meio de uma relação quadrática, considerando que o crescimento do volume ocorre de forma não linear em função da elevação do nível da água. O cálculo foi realizado conforme a Equação (3).

$$V(h) = V_{max} \cdot x^2$$

Equação (3) – Cálculo do volume armazenado.

onde:

- $V(h)$ representa o volume associado à cota analisada;
- V_{max} representa o volume máximo do reservatório.

Equação (4) – Cálculo do erro percentual.

$$E(\%) = \frac{V_{est} - V_{obs}}{V_{obs}} \times 100$$

onde:

- $E(\%)$ representa o erro percentual associado à estimativa;
- V_{est} e V_{obs} representam, respectivamente, o volume estimado e o volume observado;

As Equações utilizadas para estimar área inundada e volume armazenado foram definidas com base em princípios geométricos e hidrológicos que descrevem o comportamento típico de reservatórios artificiais. A área inundada foi modelada como função linear da variável adimensional x , pois, em reservatórios de grande porte e com margens relativamente regulares, o acréscimo de área tende a ocorrer de forma aproximadamente proporcional ao aumento da cota, especialmente próximo ao nível máximo operacional (Tucci, 2005). Essa simplificação é consistente com estudos hidrológicos que utilizam relações lineares para representar a expansão superficial em função da elevação da lâmina d'água.

O volume armazenado, por sua vez, foi modelado como função quadrática da variável x . Essa escolha decorre do fato de que o crescimento volumétrico não ocorre de forma linear, mas sim acelerada, à medida que o nível da água se eleva. Em termos geométricos, o volume corresponde à integral da área em função da altura, o que justifica a adoção de uma relação quadrática (Hofmann-Wellenhof; Moritz, 2006; Monico, 2008). Essa abordagem é amplamente utilizada em modelagens simplificadas de reservatórios, permitindo representar adequadamente a sensibilidade do armazenamento hídrico a pequenas variações altimétricas.

Após a aplicação das Equações (1), (2) e (3), foram obtidos os valores de área inundada e volume armazenado para diferentes níveis d'água. Em seguida, foi realizada uma análise de sensibilidade considerando cotas entre 220,0 m e 220,6 m, com incrementos de 0,01 m (1 cm). Para cada valor de cota foram estimados os respectivos valores de área e volume, permitindo avaliar a influência de pequenas variações altimétricas sobre a estimativa do armazenamento hídrico do reservatório.

2.3 Temporalidade do nível da água no reservatório

A segunda análise desenvolvida neste trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento temporal do nível da água e das variações de volume do reservatório da Itaipu Binacional ao longo do período analisado. Para isso, foram utilizados dados disponibilizados pela plataforma DAHITI – *Database for Hydrological Time Series of Inland Waters*, desenvolvida pelo Instituto Alemão de Geodésia (DGFI-TUM).

O DAHITI disponibiliza séries temporais hidrológicas derivadas de altimetria por satélite para lagos, rios e reservatórios em diferentes regiões do mundo. Os produtos são gerados a partir do processamento e integração de observações provenientes de múltiplas missões



altimétricas orbitais, permitindo o monitoramento contínuo da dinâmica de corpos hídricos continentais mesmo em locais com limitada disponibilidade de medições em campo.

Neste trabalho foram utilizados dois produtos disponibilizados para o reservatório da Itaipu Binacional: a série temporal de altimetria (*Water Level Altimetry*), que fornece a elevação da superfície da água ao longo do tempo, e a série temporal de variação de volume (*Volume Variation*), que apresenta as alterações no volume armazenado do reservatório em relação a uma condição de referência. Os dados foram obtidos diretamente na plataforma DAHITI por meio do download dos arquivos em formato CSV (*Comma-Separated Values*) e posteriormente convertidos para planilhas eletrônicas, possibilitando sua organização, tratamento e análise.

Os dados de altimetria e variação de volume foram organizados e submetidos a um processo de filtragem temporal, mantendo-se um registro representativo para cada mês do período analisado. A partir dessa base de dados foram construídos gráficos de séries temporais para a elevação da superfície da água e para a variação de volume do reservatório, permitindo visualizar a evolução dessas variáveis ao longo do tempo. Além dos valores observados, foram incorporadas aos gráficos as respectivas estimativas de incerteza fornecidas pelo DAHITI, permitindo avaliar a confiabilidade e a precisão das observações utilizadas.

Complementarmente, foram utilizados dados pluviométricos obtidos por meio da plataforma HIDROWEB, disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2026). Foram utilizados os registros da Estação CACIC (código 95104030), cuja série histórica abrange o período de 1995 a 2025. A escolha da estação pluviométrica CACIC foi motivada pela disponibilidade de dados compatíveis com o intervalo temporal analisado neste trabalho, uma vez que outras estações localizadas mais próximas à barragem apresentavam séries históricas incompletas ou restritas a períodos mais antigos. A estação CACIC encontra-se a aproximadamente 12 km da margem do reservatório, distância considerada adequada para representar as condições pluviométricas locais associadas à dinâmica do sistema hídrico. Ainda assim, sua representatividade espacial é limitada frente à grande extensão da bacia hidrográfica contribuinte.

Os dados pluviométricos foram obtidos por meio do download da série histórica em formato Excel e posteriormente organizados para análise. Os registros diários de precipitação foram convertidos em totais mensais, permitindo sua compatibilização temporal com as séries de altimetria e variação de volume obtidas no DAHITI.

Por fim, as séries temporais de precipitação, altimetria e volume foram comparadas por meio de gráficos e análises estatísticas, buscando avaliar possíveis relações entre a variabilidade da precipitação observada na região e o comportamento hidrológico do reservatório ao longo do período estudado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MODELAGEM COTA-ÁREA-VOLUME

A primeira análise teve como objetivo avaliar a sensibilidade das estimativas de área inundada e volume armazenado em função de pequenas variações na cota do reservatório. A aplicação das Equações (1), (2) e (3) permitiu calcular os valores correspondentes de área e volume para cotas compreendidas entre 220,0 m e 220,6 m.

A Tabela 1 apresenta uma amostra representativa dos resultados obtidos, considerando intervalos de 0,10 m entre as cotas analisadas. Observa-se que o aumento da cota resulta em crescimento progressivo tanto da área inundada quanto do volume armazenado, comportamento esperado para reservatórios hidrelétricos.

Tabela 1 – Valores estimados de área inundada e volume armazenado para diferentes cotas do reservatório da Itaipu Binacional.

Cota (m)	Área (km ²)	Volume (km ³)	Erro (%)
220	1345,96	28,8268	-0,597
220,1	1347,31	28,8845	-0,398
220,2	1348,65	28,9422	-0,199
220,3	1350	29	0
220,4	1351,35	29,0579	0,2
220,5	1352,69	29,1158	0,399
220,6	1354,04	29,1737	0,599

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Verifica-se que uma variação de apenas 0,30 m em relação à cota de referência de 220,3 m produz uma diferença aproximada de 0,174 km³ no volume estimado, correspondendo a um erro relativo próximo de 0,6%. De forma semelhante, a área inundada varia de aproximadamente 1346 km² para 1354 km² dentro do intervalo analisado.

Os resultados demonstram que pequenas incertezas na determinação da altitude da superfície da água podem produzir diferenças significativas nas estimativas de armazenamento hídrico. Esse comportamento evidencia a importância da obtenção de altitudes precisas

3.2 COMPORTAMENTO TEMPORAL DA ALTIMETRIA, VOLUME E PRECIPITAÇÃO

A segunda análise teve como objetivo avaliar o comportamento temporal da altimetria e da variação de volume do reservatório da Itaipu Binacional ao longo do período estudado, bem como investigar possíveis relações com a precipitação observada na região. Para isso, foram utilizados os dados de altimetria e variação de volume disponibilizados pela plataforma DAHITI (SCHWATKE et al., 2015) e os dados pluviométricos obtidos na plataforma HIDROWEB (ANA, 2026).

A Figura 2 apresenta a evolução temporal da elevação da superfície da água no reservatório. Observa-se que a altimetria apresentou oscilações relativamente pequenas ao longo do período analisado, mantendo-se próxima da faixa operacional do reservatório.

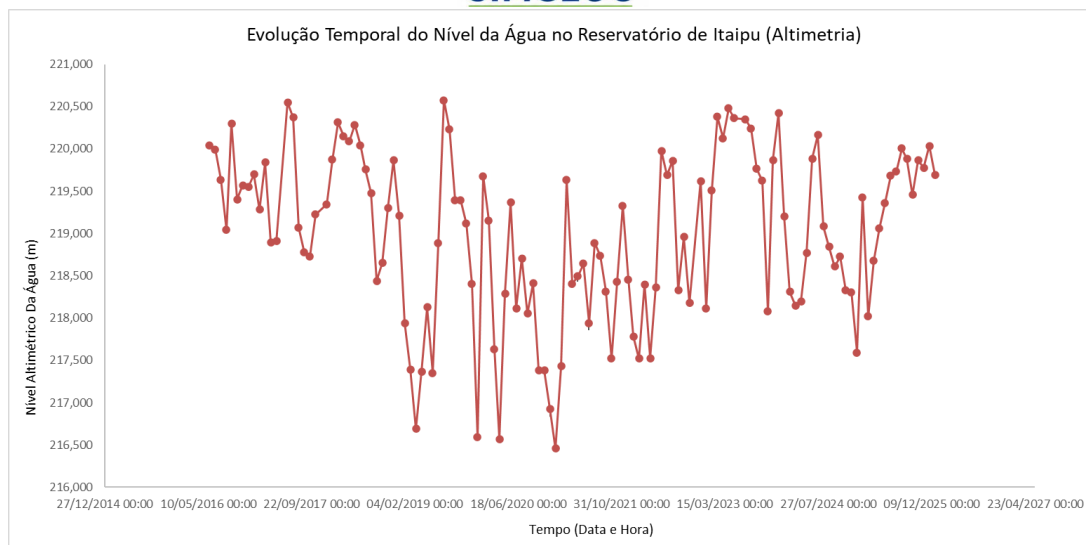


Figura 2 – Série temporal da altimetria do reservatório da Itaipu Binacional no período analisado.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As variações observadas na Figura 2 refletem a dinâmica hidrológica do reservatório, influenciada tanto pelas condições hidrometeorológicas da bacia quanto pelas estratégias operacionais adotadas para geração de energia e controle dos níveis de armazenamento.

A Figura 3 apresenta a evolução temporal das variações de volume armazenado no reservatório. De modo geral, observa-se comportamento compatível com as oscilações verificadas na altimetria, uma vez que o volume armazenado está diretamente relacionado ao nível da superfície da água. Os períodos de aumento ou redução do volume acompanham as alterações observadas na cota do reservatório, evidenciando a relação física existente entre essas variáveis.

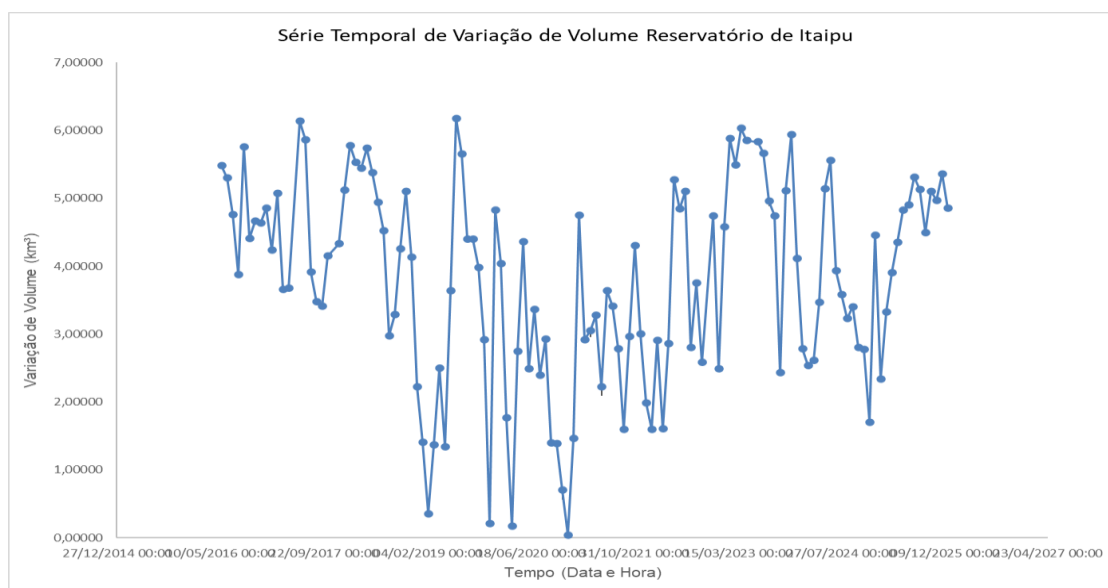




Figura 3 – Série temporal da variação de volume do reservatório da Itaipu Binacional no período analisado.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As oscilações observadas nas séries temporais demonstram que pequenas alterações altimétricas podem resultar em diferenças perceptíveis no armazenamento hídrico. Esse resultado é coerente com a análise apresentada na Seção 3.1, na qual foi demonstrado que variações reduzidas da cota produzem alterações mensuráveis no volume estimado do reservatório.

Com o objetivo de investigar possíveis relações entre a precipitação observada na região e as variáveis hidrológicas analisadas, foi realizada uma análise de correlação de Pearson entre os totais mensais de precipitação e os dados de volume e altimetria. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Correlação de Pearson entre as variáveis hidrológicas analisadas.

Variáveis analisadas	Correlação de Pearson
Chuva × Volume	0,0347
Chuva × Altimetria	0,0339

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os coeficientes de correlação obtidos apresentam valores muito próximos de zero, indicando ausência de correlação linear significativa entre a precipitação mensal registrada na estação CACIC e as variáveis hidrológicas analisadas. É importante destacar que os coeficientes foram calculados a partir dos dados da estação CACIC, localizada a aproximadamente 12 km da margem do reservatório. Embora sua proximidade justifique a escolha, a representatividade espacial é limitada frente à grande extensão da bacia hidrográfica contribuinte. Essa limitação ajuda a explicar os baixos valores de correlação encontrados, uma vez que a precipitação local registrada pela estação não reflete a variabilidade espacial das chuvas em toda a bacia do rio Paraná. O cálculo foi realizado para o período de maio de 2016 a dezembro de 2025, as séries de precipitação, altimetria e volume foram compatibilizadas em frequência mensal, sem aplicação de defasagem temporal. O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para avaliar a relação entre as variáveis hidrológicas, conforme metodologia descrita em Tucci (2005). As séries foram tratadas por meio da agregação dos valores diários de chuva em totais mensais e da filtragem dos dados altimétricos e volumétricos para manter apenas um valor representativo ao final de cada mês, sem aplicação de defasagem temporal. Esses resultados sugerem que as oscilações observadas no volume armazenado e na altimetria do reservatório não dependem exclusivamente da precipitação local medida na estação utilizada.

Esse comportamento pode estar associado à grande extensão da bacia hidrográfica contribuinte do reservatório, uma vez que o armazenamento hídrico resulta da integração dos aportes provenientes de diferentes regiões da bacia do rio Paraná. Além disso, fatores operacionais relacionados à gestão do reservatório, como o controle de vazões para geração de energia, também influenciam diretamente as variações observadas. Quando comparados aos resultados da modelagem cota-área-volume apresentada na Seção 3.1, verifica-se que pequenas variações na cota do reservatório podem produzir alterações perceptíveis no volume armazenado. Entretanto, as baixas correlações encontradas indicam que tais oscilações não



podem ser explicadas apenas pela precipitação registrada localmente, evidenciando a influência conjunta de fatores hidrológicos e operacionais sobre a dinâmica do reservatório.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a relação entre altimetria e volume armazenado no reservatório da Itaipu Binacional, utilizando dados hidrológicos e altimétricos obtidos por sensoriamento remoto e plataformas de monitoramento hidrológico. A partir da modelagem realizada, foi possível construir a curva cota-volume do reservatório e analisar a sensibilidade do volume armazenado em função de pequenas variações altimétricas.

Os resultados obtidos evidenciaram comportamento linear crescente entre cota e volume no intervalo analisado, demonstrando elevada sensibilidade do armazenamento hídrico às variações de altitude próximas à cota máxima operacional do reservatório. Além disso, a análise de correlação indicou baixa relação entre os dados de precipitação mensal local e as variações de volume e altimetria observadas, sugerindo influência de fatores hidrológicos e operacionais associados à dinâmica do reservatório e à abrangência espacial da bacia hidrográfica.

Como limitação do estudo, destaca-se a utilização de dados pluviométricos provenientes de uma única estação meteorológica, bem como a análise concentrada em um intervalo reduzido de cotas do reservatório. No caso da precipitação, a escolha da estação CACIC se justificou pela proximidade em relação ao reservatório (aproximadamente 12 km) e pela disponibilidade de dados contínuos no período analisado. Ainda assim, sua representatividade espacial é limitada frente à grande extensão da bacia hidrográfica contribuinte, o que deve ser considerado na interpretação dos resultados e na extrapolação das conclusões. Recomenda-se, em trabalhos futuros, a incorporação de dados de múltiplas estações pluviométricas e de séries batimétricas oficiais da Itaipu Binacional, de modo a ampliar a robustez das análises e reduzir as incertezas associadas à modelagem cota-área-volume.

Como continuidade da pesquisa, pretende-se ampliar a análise para incluir diferentes fontes de dados hidrológicos e explorar comparações com modelos geoidais em estudos futuros, mas este trabalho concentrou-se na modelagem cota-volume e na correlação hidrológica. Essa perspectiva abre caminho para estudos mais abrangentes, que poderão integrar dados da Rede Altimétrica de Alta Precisão da Itaipu Binacional (RAIB) e modelos geoidais/quase geoidais, conforme sugerido por Hofmann-Wellenhof e Moritz (2006) e Monico (2008).

Os autores declaram que utilizaram a ferramenta Microsoft Copilot, baseada em Inteligência Artificial Generativa, exclusivamente para apoio na construção e organização textual do manuscrito. O uso restringiu-se à etapa de redação, sem interferência na análise de dados ou nos resultados científicos apresentados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo suporte acadêmico ao desenvolvimento da pesquisa, à Itaipu Binacional pela disponibilização das informações utilizadas no estudo e às plataformas DAHITI e HIDROWEB pelo fornecimento dos dados hidrológicos empregados nas análises realizadas. A primeira autora agradece à bolsa de iniciação científica recebida pelo CNPq (Edital DIRPE Nº 1/2025).

REFERÊNCIAS



BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Hidroweb: sistema de informações hidrológicas. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 18 maio 2026.

DAHITI. Volume Variation. Disponível em: <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/10434/volume-variation/>. Acesso em: jan. 2026.

DAHITI. Water Level Altimetry. Disponível em: <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/10434/water-level-altimetry/>. Acesso em: jan. 2026.

HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard; MORITZ, Helmut. *Physical Geodesy*. 2. ed. Vienna: Springer, 2006.

ITAIPU BINACIONAL. Reservatório: características técnicas. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/energia/reservatorio>. Acesso em: 24 out. 2025.

MONICO, João Francisco Galera. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

SPIEGEL, Murray R.; STEPHENS, Larry J. *Estatística*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

TUCCI, Carlos E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2005.



CIDADES INTELIGENTES, RESILIENTES E SUSTENTÁVEIS: ABORDAGEM INTEGRADA DA MOBILIDADE URBANA EM CIDADES GRANDES

Julia Jacob Favoreto¹

Tulio Campanati de Oliveira²

Maria Lígia Chuerubim³

^{1,2,3}Universidade Federal de Uberlândia (tuliocampanati@gmail.com;
juliajacobfavoreto11@gmail.com; marialigia@ufu.br)

RESUMO

Este estudo aplica um modelo integrado de mobilidade urbana a seis bairros de Uberlândia-MG, combinando projeção demográfica, modelagem da demanda de viagens, análise da oferta viária e avaliação de impactos ambientais, econômicos e sociais. Com base no modelo de quatro etapas, estima-se que o crescimento populacional é cerca de 21% entre 2010 e 2026 com eleva a demanda para 231 mil viagens diárias. A incorporação da impedância tarifária reduz essa demanda em 24,3%, com elasticidade-preço inelástica ($E_d \approx -0,32$), evidenciando impacto significativo sobre o acesso ao transporte coletivo, especialmente para populações de baixa renda. Os resultados indicam migração modal do transporte público para modos individuais motorizados, aumento de externalidades e pressão sobre o sistema viário, com o Centro operando próximo à saturação. O resultado de simulações, estima que as emissões de CO₂ atingem aproximadamente 57 t/dia, e os custos externos somam cerca de R\$930 mil/dia, majoritariamente associados ao congestionamento. Os indicadores de equidade revelam desigualdades de mobilidade por gênero e forte relação entre densidade urbana, dependência automotiva e desempenho do sistema. Conclui-se que políticas tarifárias, priorização do transporte coletivo e incentivo à mobilidade sustentável são essenciais para melhorar a eficiência e a justiça espacial da mobilidade urbana.

Palavras-chave: Cidades Inteligentes. Elasticidade Tarifária. Emissões CO₂. Justiça Espacial.

ABSTRACT

This study applies an integrated urban mobility model to six neighborhoods with distinct socio-spatial profiles in Uberlândia, MG, Brazil, combining demographic projection, travel demand modeling, traffic supply analysis, and environmental, economic, and social impact assessments. Based on the classic four-step model, the results indicate that a population growth of approximately 21% between 2010 and 2026 increases total demand to about 231,000 trips per day. When fare impedance is considered, public transport demand decreases by 24.3%, with an inelastic price elasticity ($E_d \approx -0.32$), highlighting a significant economic barrier and a

spatial exclusion process that heavily impacts low-income populations. The traffic supply analysis using Greenshields' linear model reveals that the central area operates near its functional capacity limit during peak hours, with a critical saturation degree ($SX = 0.94S$) and an average operating speed of 18.4 km/h. CO₂ emissions reach approximately 57.2 tons per day, and external costs (congestion, accidents, and pollution) total around BRL 930,500 per day, mostly driven by spatial delays in central corridors. Gender equity metrics indicate substantial mobility disparities, reflecting constraints on care-related trips. Finally, the synthetic indices—Automobile Dependency Index (ADI), Spatial Justice of Mobility Index (SJMI), and Integrated Urban Mobility Index (IUMI)—reveal distinct functional patterns: high-income, low-density areas like Jardim Karaíba concentrate intense automobile dependency and low spatial justice ($SADI = 0.88S$, $SSJMI = 0.28S$), whereas the central area and consolidated peripheries present higher socioterritorial efficiency despite infrastructure pressure. The study concludes that data-driven urban planning, public transport prioritization, fare subsidies, and sustainable mobility strategies are essential to improve efficiency, environmental sustainability, and spatial justice in medium-sized cities.

Keywords: Smart Cities. Fare Elasticity. CO₂ Emissions. Spatial justice. Synthetic Mobility Indices.

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização acelerada nas grandes cidades brasileiras gera pressões crescentes sobre os sistemas de transporte, comprometendo a fluidez viária, a qualidade ambiental e a equidade no acesso à cidade (Vasconcellos, 2013; IPEA, 2011; Brasil, 2012). A política nacional de mobilidade urbana (Lei 12.587/2012) estabelece como princípio fundamental a priorização dos modos coletivos e não motorizados — objetivo que, na prática, colide com a expansão contínua da motorização individual, especialmente em cidades que não dispõem de sistemas de alta capacidade como metrô ou Veículo Leve sobre Trilhos (VLT).

O paradigma das cidades inteligentes propõe a integração de tecnologias da informação e comunicação ao planejamento urbano para aprimorar a eficiência dos sistemas de transporte (Batty, 2013; Albino et al., 2015). Nesse contexto, modelos quantitativos de mobilidade — capazes de integrar demanda, oferta, impactos ambientais e equidade em uma estrutura analítica coerente — tornam-se ferramentas essenciais para o planejamento orientado por dados.

No plano metodológico, o modelo clássico de quatro etapas (geração, distribuição, divisão modal e alocação) é fortemente utilizado para construir o padrão de referência para o planejamento de transportes em cidades, ainda que não captura o comportamento individual (Ortúzar e Willumsen, 2011; Domencich e McFadden, 1975). A configuração de indicadores de impacto ambiental (emissões de CO₂), custos externos (congestionamento, sinistros, poluição) e equidade de gênero (Peters, 2001; Gauvin et al., 2020) amplia o escopo analítico e alinha o trabalho às agendas da mobilidade sustentável e da justiça espacial (Martens, 2016; Schweitzer e Valenzuela Jr., 2004).

Este trabalho aplica esse modelo integrado a seis bairros de Uberlândia-MG, com os seguintes objetivos específicos: (i) projetar a estrutura demográfica e urbana para 2026; (ii) modelar a demanda viária com geração, distribuição gravitacional e divisão modal por logit multinomial; (iii) analisar a oferta viária pelo modelo de Greenshields e o nível de serviço; (iv) estimar o inventário de emissões de CO₂ e os custos externos do tráfego; (v) avaliar a equidade

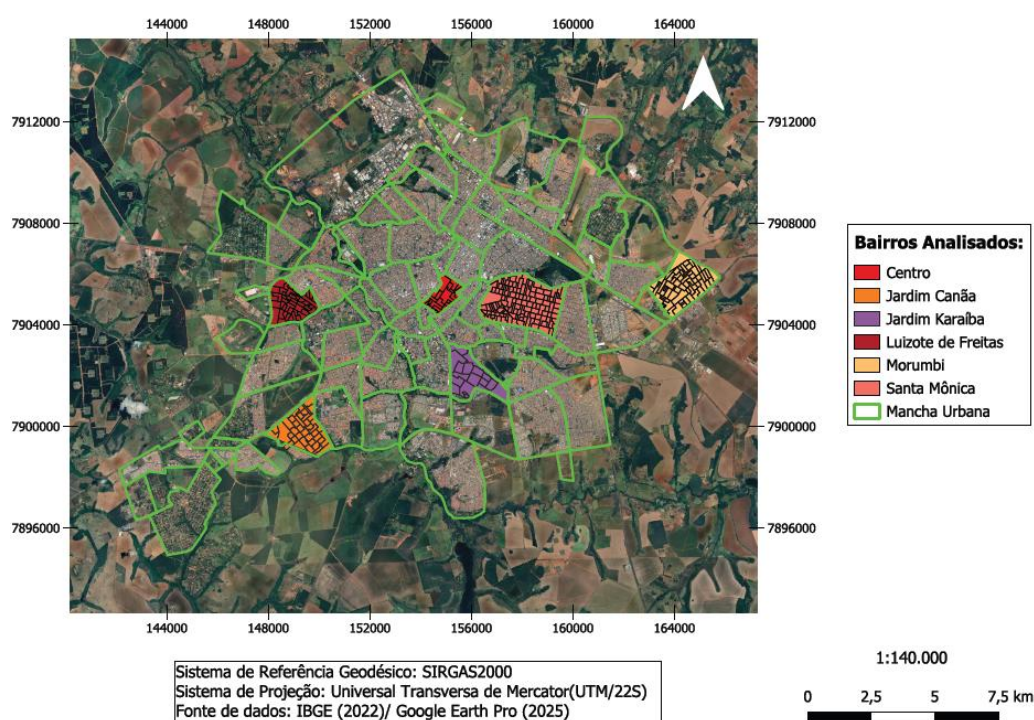
de mobilidade por gênero com Curva de Lorenz e Coeficiente de Gini; e (vi) construir índices compostos de dependência automotiva, justiça espacial e mobilidade urbana integrada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e dados

A área de estudo compreende seis bairros de Uberlândia-MG com perfis socioespaciais distintos: Centro (área central consolidada, densidade média), Santa Mônica (bairro universitário, alta atratividade e maior densidade populacional absoluta neste estudo), Luizote de Freitas (periferia consolidada, com expressiva densidade habitacional), Morumbi e Canaã (expansão periférica de renda média-baixa) e Jardim Karaíba (bairro de alta renda e baixa densidade urbana), conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1: Recorte Espacial da área de estudo.



Fonte: Autores (2026).

Os bancos de dados utilizados são provenientes de fontes oficiais: (i) Censo Demográfico do IBGE 2010, com informações detalhadas sobre população, área territorial e domicílios por bairro; (ii) Estimativas da população municipal do IBGE (2024), para calibração da taxa de crescimento anual; (iii) Frota de Veículos do SENATRAN/Ministério dos Transportes 2025, registrando 541.122 veículos para Uberlândia; (iv) Decretos municipais sobre tarifas de transporte público (R\$ 2,25 em 2010 e R\$ 5,70 a partir de 26/07/2025); e (v) parâmetros do modelo logit e dados estimados de renda por bairro, derivados de referências na literatura especializada (ANTP, 2020; Andrade e Portugal, 2019). Os tempos de deslocamento e as rotas do transporte público foram obtidos da plataforma UDI Bus (PMU/SETTRAN, 2025), correspondente ao Sistema Integrado de Transportes (SIT) de Uberlândia.

2.2. Projeção demográfica e estrutura urbana

A projeção para 2026 adota o método de crescimento geométrico composto com uma taxa média anual de $r = 1,2\%$ — valor intermediário entre o crescimento de longo prazo e a tendência recente — e um horizonte temporal de $t = 16$ anos (2010–2026), resultando em um fator acumulado de aproximadamente 1,211, determinado por:

$$P_{2026} = P_{2010} \cdot (1 + r)^t \quad (1)$$

Onde P_{2026} representa a população estimada para o ano de 2026 e P_{2010} é a população registrada no ano-base de 2010. A densidade urbana é obtida pela equação ($D_{2026} = P_{2026}/A$) e os domicílios projetados por ($D_{2026} = P_{2026} \cdot (D_{2010}/P_{2010})$), mantendo a relação habitante/domicílio de 2010 estável.

$$D_{2026} = P_{2026}/A \quad (2)$$

$$D_{2026} = P_{2026} \cdot (D_{2010}/P_{2010}) \quad (3)$$

Onde A é a área territorial do bairro e D_{2026} representa o número de domicílios estimados para 2026.

2.3. Enquadramento Metodológico e Uso de IA

Diante da ausência de bases de dados consolidadas por bairro para o ano de 2026, utilizou-se um procedimento estatístico de atualização fundamentado nos dados oficiais do IBGE (2022) e SENATRAN. Ferramentas de inteligência artificial generativa (ChatGPT; OpenAI, 2025) foram empregadas exclusivamente como suporte técnico na automação de rotinas matemáticas, organização tabular e formatação preliminar do texto. As premissas conceituais, calibração de parâmetros e validação dos resultados permaneceram sob inteira responsabilidade dos autores, garantindo a integridade científica conforme os princípios do CNPq (2024).

2.4. Geração de viagens e impedância tarifária

A geração de viagens diárias ($D = P \cdot r$) adota a taxa de $r = 2,0$ viagens/hab.dia, valor estimado para estudos preliminares de planejamento urbano, por ser muito próximo ao índice observado em diversas pesquisas OD de cidades brasileiras.

$$D = P \cdot r \quad (4)$$

Onde D representa a demanda potencial total por viagens diárias enquanto P população estimada ou projetada.

O efeito da variação tarifária na demanda por transporte coletivo é modelado pela função de impedância elástica ($D_C = D_0 \cdot (C_1/C_0)^{\varepsilon_D}$) e calculada por elasticidade-arco de dois pontos ($\varepsilon_D = [(Q_2 - Q_1)/(Q_2 + Q_1)]/[(P_2 - P_1)/(P_2 + P_1)]$):

$$D_C = D_0 \cdot (C_1/C_0)^{\varepsilon_D} \quad (5)$$

$$\varepsilon_D = [(Q_2 - Q_1)/(Q_2 + Q_1)]/[(P_2 - P_1)/(P_2 + P_1)] \quad (6)$$

Onde D_C é a demanda corrigida após o reajuste tarifário, C_1 e C_0 as tarifas final e inicial, e ε_D representa a elasticidade-preço da demanda.

2.5 Distribuição e Alocação em Rede

A modelagem de distribuição foi simulada com base nas rotas e acessibilidade operacional extraídas da plataforma UDI Bus para um dia útil típico. Centróides geográficos dos bairros foram definidos como origens e os terminais urbanos integrados do SIT como destinos. A impedância espacial obedece a uma função exponencial negativa com parâmetro de sensibilidade ao custo de deslocamento $\beta = 1,5$:

$$f(d_{i,j}) = \exp(-\beta \cdot d_{i,j}) \quad (7)$$

$$T_{i,j} = K \cdot O_i \cdot D_j \cdot f(d_{i,j}) \quad (8)$$

Onde $T_{i,j}$ representa o fluxo potencial estimado entre a origem i e o destino j , e $d_{i,j}$ denota o tempo de viagem obtido na rede.

2.6 Divisão Modal por Logit Multinomial

A escolha discreta de transporte foi representada por uma estrutura Logit Multinomial. A probabilidade de escolha do modo i é dada por:

$$P(\text{modo}_i) = \exp(V_i) / \sum \exp(V_j) \quad (9)$$

A utilidade sistemática V_i é calculada considerando o tempo (t_i), o custo monetário (c_i) e a renda média do bairro (Y_i):

$$V_i = \alpha_i + \beta_{\text{tempo}} \cdot t_i + \beta_{\text{custo}} \cdot (c_i / Y_i) \quad (10)$$

Os parâmetros de calibração utilizados foram: $\beta_{\text{tempo}} = -0,04/\text{min}$, $\beta_{\text{custo}} = -0,25$, com constantes específicas de modo $\alpha_{\text{carro}} = 0,5$, $\alpha_{\text{ônibus}} = -0,3$, $\alpha_{\text{moto}} = 0,2$ e $\alpha_{\text{ativo}} = -0,8$. A utilidade sistemática de cada modo foi especificada como função linear do tempo de viagem, do custo monetário relativo à renda média do bairro e de uma constante específica de modo, conforme a Equação (10). Os coeficientes utilizados foram $\beta_{\text{tempo}} = -0,04 \text{ min}^{-1}$ e $\beta_{\text{custo}} = -0,25$, valores compatíveis com a literatura para modelos agregados de demanda, refletindo a desutilidade crescente associada ao aumento do tempo de deslocamento e do custo relativo da viagem. As constantes específicas dos modos ($\alpha_{\text{carro}} = 0,5$; $\alpha_{\text{ônibus}} = -0,3$; $\alpha_{\text{moto}} = 0,2$; $\alpha_{\text{ativo}} = -0,8$) foram adotadas para representar preferências médias relativas entre os modos de transporte em um cenário-base, sendo utilizadas exclusivamente para fins de calibração exploratória do modelo, não constituindo estimativas obtidas a partir de pesquisa Origem-Destino local.

2.7 Fluxo Viário e Modelo de Greenshields

A relação fundamental do tráfego ($q = k \cdot v$) foi modelada linearmente pelo método de Greenshields, correlacionando o fluxo (q), a densidade (k) e a velocidade média (v):

$$v = v_f \cdot [1 - (k/k_j)] \quad (11)$$

Adotou-se velocidade de fluxo livre $v_f = 60 \text{ km/h}$ e densidade de congestionamento total $k_j = 140 \text{ veic./km}$, valores compatíveis com corredores arteriais urbanos brasileiros e

amplamente empregados em aplicações simplificadas do modelo de Greenshields. A capacidade teórica da via (q_{max}) é expressa por:

$$q_{max} = (v_f \cdot k_j) / 4 \quad (12)$$

2.8 Capacidade Viária e Nível de Serviço

A Demanda Horária de Projeto (DHV) e o grau de saturação (X) foram determinados com base nas diretrizes simplificadas do *Highway Capacity Manual* (HCM):

$$DHV = 0,10 \cdot V_{dia} \quad (13)$$

$$X = q/C \text{ onde } C = N \cdot S \quad (14)$$

Onde C representa a capacidade operacional do corredor, N o número de faixas e S o fluxo de saturação adotado por faixa de rolamento.

2.9 Equidade de Mobilidade por Gênero

A avaliação de equidade baseia-se em taxas médias de mobilidade diferenciadas por sexo ($r_h = 2,2$ e $r_m = 1,8$ viagens/hab.dia), esses valores representam parâmetros de referência compatíveis com resultados de pesquisas Origem–Destino realizadas em cidades brasileiras de médio porte e refletem diferenças observadas nos padrões de mobilidade associadas à divisão do trabalho, à renda, ao acesso aos modos de transporte e às viagens de cuidado (trip chaining), refletindo assimetrias na mobilidade de cuidado e restrições socioeconômicas. Define-se o Índice de Equidade de Mobilidade (IEM) e o *Gap* de Equidade por:

$$IEM = D_m/D_h \rightarrow IEM = (P_m \cdot r_m)/(P_h \cdot r_h) \quad (15)$$

$$Gap(\%) = (1 - IEM) \cdot 100 \quad (16)$$

2.10 Inventário de Emissões de CO₂

As emissões de CO₂ foram contabilizadas associando os volumes diários de viagens por modo (V_{modo}), distâncias médias e os fatores de emissão oficiais para a frota brasileira (Automóvel: 150 g/km; Ônibus: 30 g/pass.km; Motocicleta: 90 g/km; Ativo: 0 g/km):

$$E_{CO_2} = \sum (V_{modo} \cdot d_{média} \cdot ef_{modo}) \quad (17)$$

Os fatores de emissão utilizados correspondem a valores médios representativos da frota brasileira e são compatíveis com inventários nacionais de emissões veiculares. A adoção desses coeficientes é adequada para estudos de planejamento em escala macroscópica, cujo objetivo é comparar cenários e avaliar tendências relativas de emissões, não substituir inventários detalhados baseados na composição real da frota ou em medições de campo.

2.11 Valoração Econômica das Externalidades

Três dimensões foram monetizadas: congestionamento (C_{cong}), acidentes (C_{acid}) e poluição (C_{pol}), usando os seguintes custos sociais de referência: valor do tempo $VOT = R\$ 12,00/h$ (compatível com valores médios utilizados em avaliações nacionais); custo por acidente $C_{acid} = R\$ 250.000$ (valor compatível com estimativas utilizadas pelo IPEA e pela

Polícia Rodoviária Federal); e custo do carbono $p_{CO_2} = R\$ 0,052/kg$ (compatível com estimativas internacionais do custo social do carbono empregadas em avaliações ambientais e análises de políticas públicas):

$$C_{cong} = VDV \cdot \delta \cdot VOT \quad (18)$$

$$C_{acid} = (VKM/10^6) \cdot \tau \cdot cacid \quad (19)$$

$$C_{pol} = E_{CO_2} \cdot p_{CO_2} \quad (20)$$

Onde VDV Representa o fluxo diário total de viagens motorizadas afetadas por atrasos na rede em cada bairro analisado, δ é fator de atraso espacial, VKM representa os Veículos-Quilômetros Rodados, Cpol demonstra o custo econômico da poluição atmosférica, e Pco2, o preço social do carbono.

2.12 Índices Compostos: IDA, IJEM e IIMU

Para condensar os resultados, os indicadores foram normalizados de forma linear adensada entre 0 e 1 via método Min-Max (X_n), aplicando inversão de escala para variáveis negativas ($X_n = 1 - X_n$). Formulou-se o Índice de Dependência do Automóvel ($IDA = (TM_n + q_n + [1 - DU_n])/3$), o Índice de Justiça Espacial da Mobilidade ($IJEM = (A_n + DU_n + [1 - IDA])/3$) e o Índice Integrado de Mobilidade Urbana ($IIMU = (IDA + IJEM + E_n + C_n)/4$):

$$IDA = (TM_n + q_n + [1 - DU_n])/3 \quad (21)$$

Onde IDA representa a Nota final de dependência do automóvel, TM a taxa de motorização do bairro normalizada, qn o fluxo ou volume viário horário normalizado, DUn a densidade urbana normalizada,

$$IJEM = (A_n + DU_n + [1 - IDA])/3 \quad (22)$$

Onde IJEM é a nota de justiça espacial e An a acessibilidade operacional.

$$IIMU = (IDA + IJEM + E_n + C_n)/4 \quad (23)$$

Onde IIMU é o Índice global e sintético que reflete a qualidade e sustentabilidade integrada do sistema de mobilidade no bairro, e em o indicador de desempenho ambiental normalizado, e Cn o indicador de custos externos normalizado.

Os índices IDA, IJEM e IIMU foram construídos por meio da agregação aritmética simples de indicadores previamente normalizados pelo método Min-Max. Todos os componentes receberam pesos iguais ($1/n$), assumindo-se que cada dimensão representa contribuição equivalente para a avaliação da mobilidade urbana. Essa opção metodológica foi adotada em razão da inexistência de evidências empíricas ou consenso na literatura que justificassem pesos diferenciados para os indicadores considerados, além de favorecer a transparência, a reprodutibilidade e a comparabilidade entre os bairros analisados (OECD, 2008; Nardo et al., 2005).



Os índices variam entre 0 e 1, sendo que valores mais elevados indicam maior intensidade da característica representada. No caso do IDA, valores próximos de 1 indicam elevada dependência do transporte motorizado individual, enquanto valores próximos de 0 representam menor dependência. Para o IJEM, valores elevados refletem maior justiça espacial da mobilidade, caracterizada por melhor acessibilidade, maior adensamento urbano e menor dependência do automóvel. Já o IIMU sintetiza o desempenho global da mobilidade urbana, integrando dimensões operacionais, socioespaciais, ambientais e econômicas, de modo que valores mais elevados correspondem a melhores condições de sustentabilidade e eficiência do sistema.

2.13 Síntese das etapas metodológicas

A metodologia foi estruturada em oito etapas sequenciais e integradas, permitindo a avaliação da mobilidade urbana sob as perspectivas operacional, ambiental, econômica e socioespacial.

Na primeira etapa, foram reunidos os dados de entrada, compreendendo informações demográficas, frota veicular, renda média por bairro, rede viária, uso e ocupação do solo, infraestrutura de transporte e distâncias médias de viagem, obtidos a partir de bases oficiais e literatura especializada.

Na segunda etapa, realizou-se a projeção populacional para o horizonte de análise por meio do modelo geométrico de crescimento, estimando a população futura de cada bairro.

Na terceira etapa, foi aplicada a modelagem de demanda por transportes em quatro etapas, envolvendo geração de viagens, distribuição espacial, divisão modal por meio do modelo Logit Multinomial e alocação do fluxo na rede viária.

Na quarta etapa, avaliou-se a oferta operacional da infraestrutura viária, utilizando o modelo fundamental de Greenshields para estimar velocidade média, densidade, capacidade e nível de congestionamento das vias.

Na quinta etapa, foram estimadas as emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas aos diferentes modos de transporte, considerando os volumes de viagens, as distâncias percorridas e fatores médios de emissão da frota brasileira.

Na sexta etapa, procedeu-se à valoração econômica das externalidades, incorporando custos associados ao congestionamento, acidentes de trânsito e emissões de carbono, utilizando parâmetros monetários de referência disponíveis na literatura.

Na sétima etapa, foi realizada a avaliação da equidade da mobilidade, considerando indicadores de acessibilidade e diferenças nas taxas médias de mobilidade entre grupos populacionais, permitindo analisar aspectos de justiça espacial.

Por fim, na oitava etapa, todos os indicadores foram normalizados pelo método Min–Max e agregados na construção dos índices sintéticos Índice de Dependência do Automóvel (IDA), Índice de Justiça Espacial da Mobilidade (IJEM) e Índice Integrado de Mobilidade Urbana (IIMU). Os índices foram calculados por meio de média aritmética simples, adotando-se pesos iguais para todos os componentes, conforme recomendações para construção de indicadores compostos (OECD, 2008). Os resultados foram interpretados em escala contínua de 0 a 1, na qual valores mais elevados representam maior intensidade da característica avaliada, sendo

utilizada classificação qualitativa em cinco níveis (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto) para facilitar a comparação entre os bairros analisados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Estrutura demográfica projetada e impacto da impedância tarifária na demanda

A aplicação do fator geométrico indica que a população conjunta saltou de 98.129 habitantes para 118.764 em 2026, representando acréscimo de 21,03% (vide Tabela 1). O bairro Santa Mônica consolidou-se como o mais populoso (43.252 hab.), enquanto o Luizote de Freitas apresentou a maior densidade urbana (9.097,6 hab/km²), refletindo o adensamento típico de periferias consolidadas (Maricato, 2011). O Jardim Karaíba manteve o perfil de baixa densidade (1.368,9 hab/km²), associado a loteamentos de alta renda.

A elevação real da tarifa reduziu a demanda global de transporte público em 24,3%. A elasticidade-preço calculada foi de -0,32, caracterizando uma demanda inelástica, típica de serviços essenciais sem substitutos diretos acessíveis para as classes de menor renda. O volume diário do sistema encolheu de 231 mil viagens potenciais para 174,8 mil viagens corrigidas, agravando a exclusão socioespacial de passageiros da periferia (Canaã e Morumbi).

Tabela 1 - Estrutura urbana e demográfica projetada para os bairros avaliados (2026).

Bairro	Pop. 2010	Pop. 2026	Área (km ²)	Densidade (hab/km ²)	Domicílios 2026	Hab/Dom	Dom/km ²
Centro	7.262	8.789	1,38	6.368,9	3.663	2,40	2.654,3
Santa Mônica	35.737	43.252	5,74	7.535,2	14.456	2,99	2.518,5
Luizote de Freitas	19.168	23.199	2,55	9.097,6	6.411	3,62	2.514,1
Morumbi	18.004	21.790	3,83	5.689,3	5.677	3,84	1.482,2
Canaã	14.922	18.060	2,48	7.282,3	4.921	3,67	1.984,3
Jardim Karaíba	3.036	3.674	2,68	1.368,9	991	3,71	369,7

Fonte: Autores (2026).

3.2 Análise Operacional e Divisão Modal

A divisão modal aponta forte dependência automotiva no Jardim Karaíba (62% automóvel, 12% ônibus), enquanto bairros como Canaã e Luizote de Freitas retêm taxas mais elevadas de uso do ônibus (42% e 39%, respectivamente). O Centro atua como ponto crítico de convergência viária: a aplicação do modelo de Greenshields revela velocidade média de operação reduzida para 18,4 km/h nas horas de pico e grau de saturação (*X*) de 0,94, operando no limite da capacidade funcional das vias arteriais centrais.

3.3 Desempenho Ambiental, Externalidades e Índices Sintéticos

O inventário quantificou emissão total de 57,2 toneladas de CO₂ por dia, sendo Santa Mônica o principal polo emissor absoluto em razão do seu expressivo contingente populacional e da elevada taxa de motorização (Figuras 2a a 2c). Em termos de magnitude, o bairro responde

por 22,4 t de CO₂/dia e R\$ 340 mil em custos externos diários — valores que representam, respectivamente, 25 e 17 vezes os registrados em Jardim Karaíba, o bairro de menor impacto da amostra. Os custos externos totais alcançaram R\$ 930.500,00 por dia útil, impulsionados em 68% pelas perdas econômicas associadas ao congestionamento na área central e no eixo de ligação com a zona leste.

Merece atenção a desproporção entre volume de emissões e custo externo observada no Centro: com apenas 6,2 t de CO₂/dia — valor inferior ao de Luizote de Freitas e Morumbi —, o bairro registra custo externo de R\$ 185 mil, o segundo mais elevado do conjunto. Tal assimetria sugere que as condições de circulação no Centro — veículos em baixa velocidade, congestionamento recorrente e alta densidade de exposição populacional — produzem dano marginal por tonelada sensivelmente superior ao dos demais bairros. Canaã, por sua vez, apresenta o melhor equilíbrio relativo entre emissões e custo, com proporção próxima da linearidade.

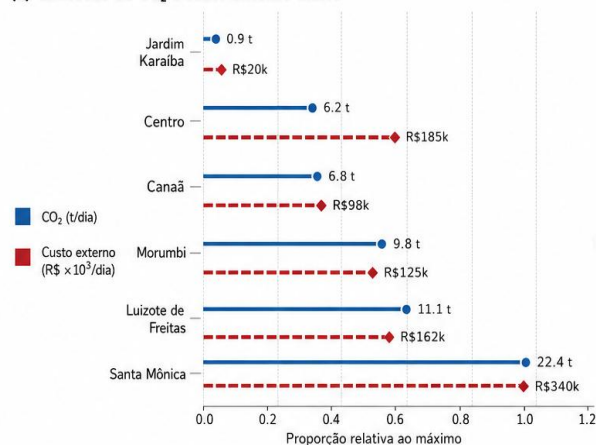
A análise dos índices compostos (Figura 2b) revela três perfis funcionais distintos. Jardim Karaíba destaca-se como o único bairro com IDA elevado (0,88), porém concentra os piores valores de IJEM (0,28) e IIMU (0,34), indicando que o bom desempenho de acesso individual não se traduz em equidade na distribuição dos benefícios de mobilidade — perfil característico de áreas com alta motorização e baixa densidade de uso do espaço público. O Centro constitui a exceção mais equilibrada da amostra: IDA de 0,48, IJEM de 0,72 — o maior valor observado — e IIMU de 0,62, sendo o único bairro com os três índices acima de 0,45, o que aponta para um sistema de mobilidade relativamente justo e integrado, mesmo diante de emissões e custos externos elevados. Luizote de Freitas apresenta o maior IIMU (0,69) combinado ao menor IDA (0,32), configuração que evidencia alto impacto da mobilidade motorizada sobre o tecido urbano sem contrapartida em acessibilidade para os residentes — padrão associado à vulnerabilidade socioterritorial. Morumbi e Canaã registram os piores desempenhos agregados, com os três índices abaixo de 0,55, caracterizando os territórios de maior deficiência sistêmica de mobilidade na amostra.

O gráfico de dispersão IDA × CO₂ (Figura 2c) evidencia relação inversamente proporcional e não linear entre acessibilidade e emissões. Jardim Karaíba ocupa o extremo de menor emissão e maior acesso (CO₂ = 0,9 t/dia; IDA = 0,88), resultado que, contudo, deve ser relativizado à luz dos baixos indicadores de justiça espacial identificados no painel b. Santa Mônica posiciona-se no extremo oposto, com acesso mediano (IDA = 0,55) e emissão muito acima da média (22,4 t/dia), sinalizando dependência intensa do transporte motorizado individual. Os quatro bairros restantes — Centro, Luizote de Freitas, Morumbi e Canaã — agrupam-se em um cluster intermediário, com CO₂ entre 6 e 12 t/dia e IDA entre 0,32 e 0,55, sem diferenciação expressiva nessa projeção bidimensional, o que reforça a necessidade dos índices complementares para discriminá-los analiticamente.

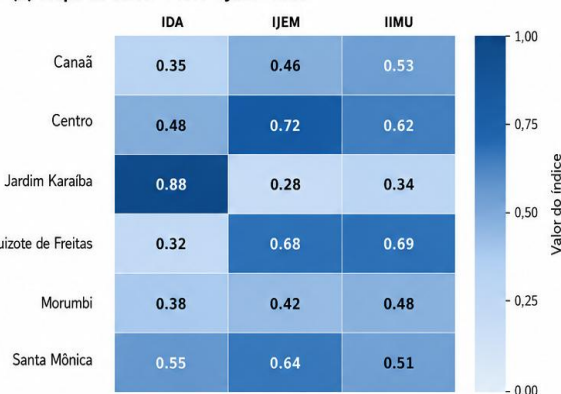
Em conjunto, os três painéis expõem uma tensão estrutural recorrente na mobilidade urbana dos bairros analisados: territórios com melhor desempenho de acesso não são necessariamente os mais equitativos nem os de menor impacto ambiental proporcional ao dano econômico gerado. Jardim Karaíba sintetiza esse paradoxo — bom acesso e baixa emissão convivem com as piores métricas de equidade e impacto urbano coletivo da amostra —, evidenciando que indicadores isolados são insuficientes para caracterizar a qualidade sistêmica da mobilidade urbana.

Figura 2 – Emissões, Custos e índices de mobilidade urbana por bairro.

(a) Emissões de CO₂ e custo externo diário



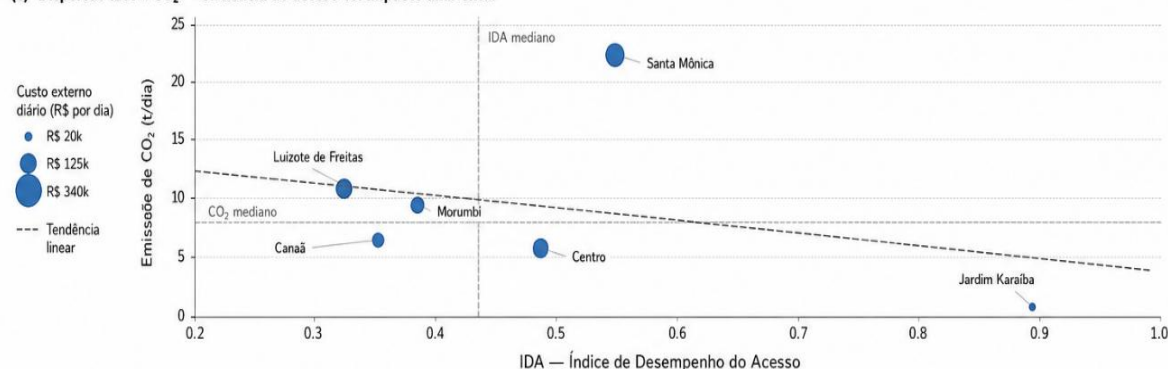
(b) Mapa de calor — IDA · IJEM · IIMU



Fonte: Autores (2026).

Figura 3 – Emissões, Custos e índices de mobilidade urbana por bairro.

(c) Dispersão IDA x CO₂ — eficiência de acesso vs. impacto ambiental



Nota: IDA = Índice de Desempenho do Acesso; IJEM = Índice de Justiça no Espaço de Mobilidade; IIMU = Índice de Impacto da Mobilidade Urbana. Custos externos em R\$/dia são estimados a partir das emissões e do fator de dano local. O tamanho dos pontos no painel (c) é proporcional ao custo externo diário.

Fonte: Autores (2026).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do modelo quantitativo integrado a este estudo evidenciou que o padrão de crescimento demográfico e de espraiamento urbano em Uberlândia-MG reproduz gargalos operacionais e desigualdades socioespaciais característicos de grandes cidades brasileiras em transição macrocefálica. A modelagem de transporte realizada permitiu correlacionar diretamente a dinâmica da oferta e da demanda viária com os reflexos socioeconômicos e ambientais imediatos na escala intraurbana.

Os achados revelam que a política de reajustes tarifários aplicados ao transporte coletivo atua de forma regressiva. A elasticidade-preço inelástica identificada ($\epsilon_{E_d} \approx -0,32$) quantifica o caráter de essencialidade do serviço para as classes de menor renda, mas também sinaliza um processo de exclusão econômica crônico: a redução de 24,3% na demanda potencial não implica necessariamente a substituição por modos mais eficientes, mas sim a perda de



mobilidade ou a migração forçada para os modos individuais motorizados. Esse fenômeno retroalimenta a saturação da malha viária, validada pelo grau de saturação crítico verificado na área central ($\$X = 0,94\$$).

Do ponto de vista sistêmico, a internalização de custos externos (R\$ 930,5 mil/dia) e a mensuração do inventário de carbono (57,2 t de $\text{\$}\text{CO}_2\text{\$}$ /dia) demonstram que a dependência automotiva — cujo ápice se manifesta em tecidos urbanos de baixa densidade e alta renda como o Jardim Karaíba — impõe um ônus coletivo desproporcional ao município. Paradoxalmente, a análise dos índices sintéticos demonstrou que o Centro e as periferias consolidadas (como o Luizote de Freitas) oferecem maior eficiência socioterritorial e justiça espacial na apropriação do solo do que novos loteamentos isolados, a despeito das pressões operacionais imediatas que sofrem em seus eixos de tráfego.

Como contribuição para a formulação de políticas públicas orientadas por dados (*data-driven urban planning*), as evidências coletadas subsidiam as seguintes recomendações:

- **Priorização do Espaço Viário:** Implantação imediata de faixas exclusivas e corredores preferenciais de ônibus nos eixos que interligam o Centro ao Santa Mônica, visando mitigar a perda de velocidade operacional capturada pelo modelo de Greenshields;
- **Reestruturação Tarifária:** Criação de fundos municipais baseados em subsídios cruzados — tributando, por exemplo, o uso de estacionamentos rotativos ou a circulação de automóveis em zonas centrais congestionadas — para desonerar a tarifa pública e reverter a exclusão espacial periférica;
- **Equidade Sociodemográfica:** Planejamento de rotas transversais periféricas que minimizem o *gap* de gênero identificado nas taxas de mobilidade de cuidado.

Por fim, reconhece-se como limitação deste trabalho o escopo geográfico restrito a seis bairros selecionados, o que impede a simulação completa de rotas de tráfego de passagem na escala macrometropolitana. Para pesquisas futuras, recomenda-se a expansão da modelagem de transporte para a totalidade das zonas de tráfego do município e a incorporação de dados de bilhetagem eletrônica em tempo real e matrizes de Origem-Destino via telefonia móvel. Tais incrementos consolidarão o planejamento urbano local rumo ao padrão de cidades inteligentes, ambientalmente sustentáveis e socialmente resilientes.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. P.; PORTUGAL, L. S. Modelagem da demanda por transportes em cidades médias. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2019.

ANTP. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana: Relatório Geral 2020**. São Paulo: ANTP, 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.587**, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União, Brasília, 2012.

DOMENCICH, T. A.; McFADDEN, D. **Urban travel demand: a behavioral analysis**. Amsterdam: North-Holland, 1975.

GAUVIN, L. et al. Gender gaps in urban mobility: a multi-city study using flexible data sources. **Royal Society Open Science**, v. 7, n. 10, 2020.



GREENSHIELDS, B. D. A study of traffic capacity. **Highway Research Board Proceedings**, v. 14, p. 448-477, 1935.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da População Residente para os Municípios Brasileiros 2024**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

MARICATO, E. O impasse da política urbana no Brasil. Petrópolis: **Vozes**, 2011.

MARTENS, K. **Transport justice: designing fair transportation systems**. New York: Routledge, 2016.

ORTÚZAR, J. de D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling transport**. 4. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

PMU. Prefeitura Municipal de Uberlândia. **População por bairros, área e domicílios — ano referencial 2010**. Uberlândia: PMU/IBGE, 2010.



SENATRAN/MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Frota de veículos 2025**. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes>. Acesso em: 7 abr. 2026.

SCHWEITZER, L.; VALENZUELA JR., A. Environmental justice and transportation: the claims and the evidence. **Journal of Planning Literature**, v. 18, n. 4, p. 383–398, 2004.

NARDO, M.; SAISANA, M.; SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; HOFFMAN, A.; GIOVANNINI, E. **Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide**. Paris: OECD Publishing; European Commission – Joint Research Centre (JRC), 2005.

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development. **Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide**. Paris: OECD Publishing, 2008.



ESTIMATIVA DAS TAXAS DE MODIFICAÇÃO DA FAIXA DE AREIA EM UMA PRAIA DO LITORAL SUL DE SERGIPE

José Eduardo Alamy Filho¹
Tomás Marcondes de Melo Alamy²
Nágela Aparecida de Melo³

^{1,3} Universidade Federal de Uberlândia-Faculdade de Engenharia Civil (jose.alamy@ufu.br; nagela@ufu.br)

² Colégio Nacional de Uberlândia, MG (tomas.alamy@nacionalnet.com.br)

RESUMO

Os recuos de praias, decorrentes da perda das faixas de areia, têm sido fenômenos notáveis no litoral do nordeste do Brasil. Nesse contexto, a praia do Saco, situada no litoral sul de Sergipe, é uma das que apresentam cenários mais críticos. Diante disso, o objetivo principal deste artigo foi obter as taxas de variação da faixa de areia, em m²/ano, identificando zonas de recuo e zonas de crescimento de praia. Para isto, foram mapeadas linhas de costa verificadas nos anos de 1971 e 2024. A partir das diferenças de traçados, as variações de área foram calculadas pelo Método de Gauss. Para esse interstício de 53 anos, os resultados indicaram recuo total de 83 ha, verificado principalmente na faixa voltada para o estuário dos rios Piauí/Real. Os cenários mais críticos de erosão costeira são verificados na zona estuarina. Todavia, para a faixa voltada para alto mar, quantificou-se acreção de 62 ha na faixa de areia, enquanto que, na zona estuarina, a acreção foi estimada e 11 ha. A tendência de elevação do nível médio dos mares amplifica os recuos e potencializa o fenômeno de erosão costeira. Isso aponta para a necessidade de ampliar a barreira de enrocamento de proteção na zona estuarina.

Palavras-chave: Recuo de praias. Erosão costeira. Linha de costa. Método de Gauss

ABSTRACT

Beach setbacks, resulting from the loss of sand strips, have been notable phenomena on the northeastern coast of Brazil. In this context, Saco beach, located on the southern coast of Sergipe, is one of those that present the most critical scenarios. The main objective of this paper was to obtain the rates of sand strip variation, in m²/year, identifying retreat zones and beach growth zones. For this, coastlines verified in the years 1971 and 2024 were mapped. From the differences in the outlines, area variations were calculated using the Gauss Method. Over this 53-year period, the results indicated a total retreat of 83 ha, observed mainly in the strip facing the estuary of the Piauí/Real rivers. The most critical coastal erosion scenarios are observed in the estuarine zone. However, for the area facing the open sea, an accretion of 62 hectares was estimated



on the sand strip. The accretion of 11 hectares was computed for the estuarine zone. The trend of rising mean sea levels amplifies shoreline retreat and increases the phenomenon of coastal erosion. This indicates the need to expand the protective riprap barrier in the estuarine zone.

Keywords: Beach retreat. Coastal erosion. Coastline. Gauss method.

1. INTRODUÇÃO

O processo de formação de praias arenosas depende de complexos fenômenos de transporte de sedimentos, os quais são carregados pela água e, principalmente no caso de dunas, pelo vento. Em zonas estuarinas, o transporte de sedimentos pelos rios ocorre no sentido mar, quando as marés estão baixas. Entretanto, quando há elevação das marés, o transporte preferencial de areia é no sentido continente. Essas inversões, que ocorrem diariamente, acrescentam dificuldade considerável na previsão de zonas de deposição e de erosão, nas estimativas de alterações de bancos de areia e das mudanças nos canais navegáveis que interligam o rio ao mar. Os processos de erosão e de deposição, quando balanceados, resultam na estabilização relativa das faixas de areia que compõem as praias. Todavia, a elevação do nível médio dos mares (NMM) tende a desequilibrar esse balanço. Como resultado disso, é notável a redução das faixas de areia e a erosão costeira em algumas praias do litoral brasileiro. Tanto que muitas cidades litorâneas, que têm o turismo como uma de suas principais atividades econômicas, vêm apelando para o alargamento de faixas de areia mediante aterros hidráulicos. No nordeste brasileiro, o caso mais notável é o alargamento artificial da praia de Ponta Negra, em Natal, RN.

Os processos de retração de praias e de erosão costeira têm se intensificado em todos os estados nordestinos, com destaques mais alarmantes para as praias do Icaraí (CE), Ponta Negra (RN), litoral de São Miguel do Gostoso (RN), Baía da Traição (PB), costa do Conde (PB), praias de Piedade e Candeias (PE) e a praia do Saco (SE). O avanço do mar e a erosão alteram o traçado das linhas costeiras, afetam a vegetação de restinga, inutilizam estradas, prejudicam o turismo local e, em casos mais críticos, produzem o desabamento de edificações, inundações frequentes e necessidade de realocar a população residente.

A praia do Saco (Figura 1), situada no litoral sul de Sergipe, na divisa com o estado da Bahia, consiste de um sistema estuarino, onde os rios Piauí e Real desagüam no oceano Atlântico. Sua linha de costa tem sofrido mudanças frequentes de traçado nos últimos anos, com destaque para erosão marinha e perda de faixa de areia na porção estuarina. Não obstante, na porção voltada para o alto mar, verifica-se a formação de extensos depósitos arenosos. Atualmente, os estudos Rodrigues (2008), Silva Santos (2019), Silva Santos et al. (2021) têm sido os mais completos sobre a modificação das linhas de costa nas praias do litoral sul de Sergipe. Em linhas gerais, esses trabalhos chamam a atenção para a aceleração dos recuos das faixas de areia nessa região.

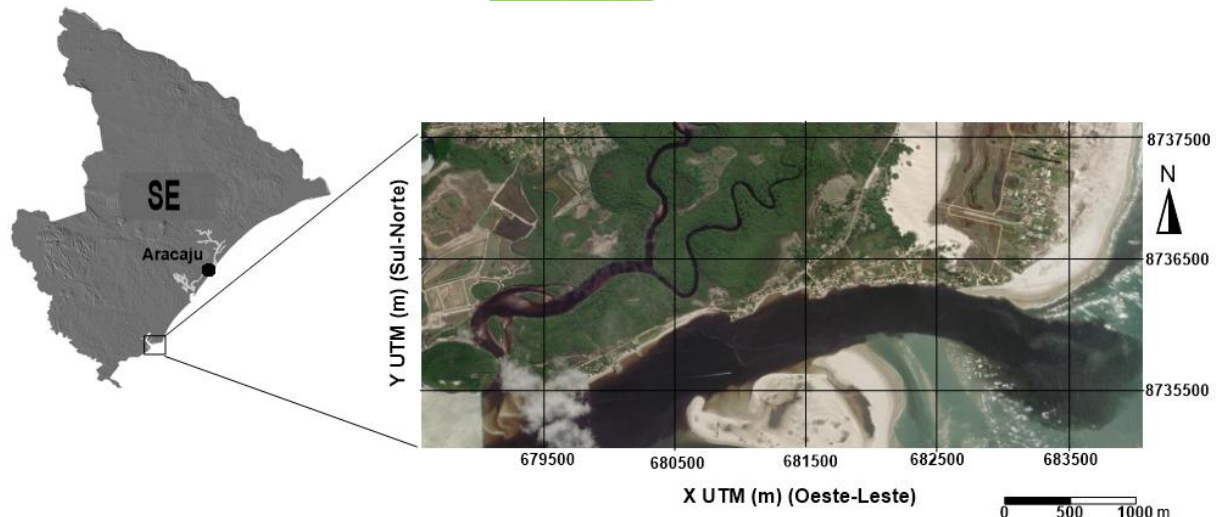


Figura 1 – Localização da Praia do Saco, com trecho no estuário dos rios Piauí/Real e trecho voltado para alto mar. Sistema de referência WGS84, zona 24L.

Diante disso, o objetivo principal deste artigo é quantificar as taxas de modificação das faixas de areia da linha costeira praia do Saco. O estudo também busca identificar as zonas mais sensíveis ao avanço do nível do mar e à erosão marinha, com tendência de redução da faixa de praia. Por outro lado, o estudo também visa identificar os setores mais propícios à formação de depósitos que ampliam as faixas de areia.

2. METODOLOGIA

Em linhas gerais, o trabalho baseou-se na delimitação de duas linhas de costa, verificadas em dois instantes distintos. A linha costeira do ano de 1971 foi tomada como condição inicial e foi extraída do trabalho de Silva Santos (2019). O traçado litorâneo do ano de 2024, extraído do *Google Earth*, foi considerado como linha de base. Essas duas linhas foram dispostas em mapa (Figura 2) com sistema de projeção UTM (*datum* WGS84). A projeção nesse sistema métrico cartesiano foi importante para a futura quantificação das distâncias entre pontos e cálculo de áreas. Nesse sistema, a distância entre dois pontos é diretamente medida em metros, assim como as áreas são calculadas diretamente em metros quadrados.

As linhas de costa inicial e de base foram digitalizadas no programa *Surfer*, resultando em dois alinhamentos com 245 pontos (para o ano de 1971) e 359 pontos (para o ano de 2024). Esses pontos foram posteriormente plotados sobre os mapas, para detecção e correção de eventuais erros de digitalização. Pelo traçado dessas duas linhas (Figura 2) é visível a identificação de zonas que foram incorporadas pela água, resultando em faixas de areia que foram reduzidas ao longo dos anos, e de zonas de acreção, onde a deposição de areia favoreceu o alargamento da praia. As principais zonas de redução de praia estão localizadas no trecho estuarino, enquanto que os setores de acreção estão voltados para o alto mar.

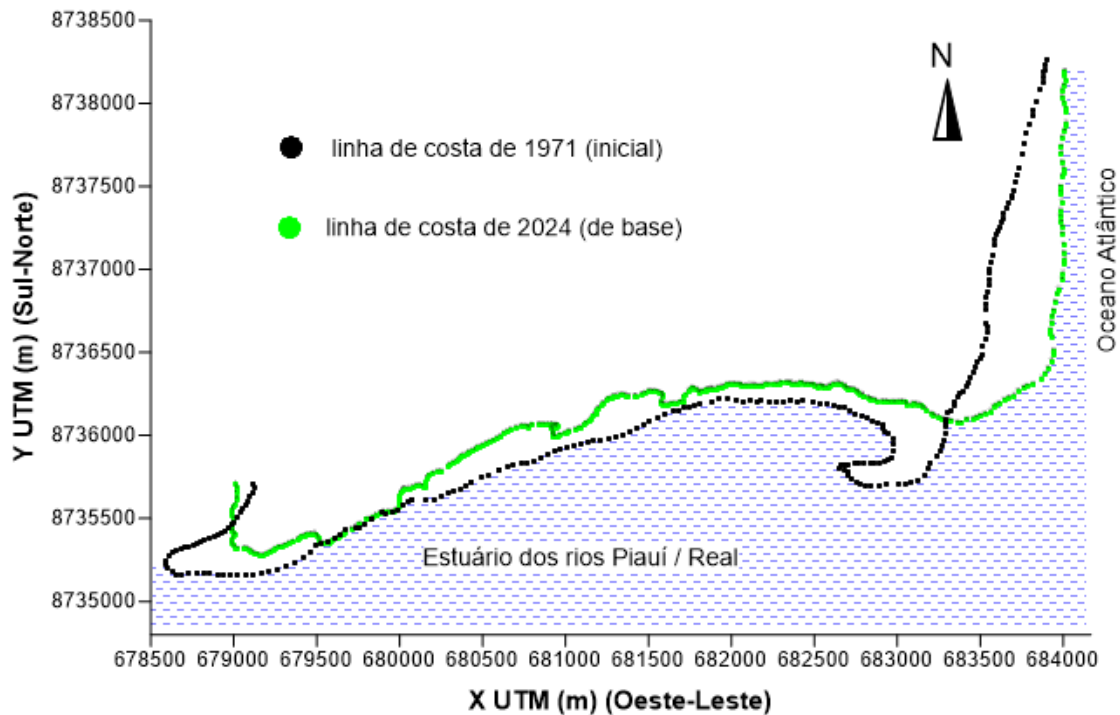


Figura 2 – Linhas de costa de referência: inicial e de base. Sistema de referência WGS84, zona 24L.

Computacionalmente, os pontos constituintes dos dois alinhamentos foram armazenados em vetores que guardam suas coordenadas cartesianas (X,Y). Assim, os pontos da linha de base foram alocados no vetor $\vec{X}_i = (X_i, Y_i)$, enquanto que os pontos da linha costeira inicial foram armazenados no vetor $\vec{X}_j = (X_j, Y_j)$. O algoritmo para quantificação das taxas de modificação da faixa de areia foi implementado em código *Visual Basic for Applications*, tirando proveito dos vetores de coordenadas armazenados em planilha do *Microsoft Excel*.

O processo de cálculo pode ser resumido em quatro etapas. Nesse contexto, realizando uma varredura no vetor $\vec{X}_i$ (linha de base), para cada ponto i , devem ser feitas:

- A identificação do ponto $\vec{X}_j^* = (X_j^*, Y_j^*)$ da linha inicial que está mais próximo do ponto $\vec{X}_i = (X_i, Y_i)$ da linha de base.
- A delimitação de um polígono de seis vértices (Figura 3) formado pelos pontos:

$$\begin{aligned}\vec{X}_{i-1/2} &= \left[\frac{1}{2} \cdot (X_i + X_{i-1}), \frac{1}{2} \cdot (Y_i + Y_{i-1}) \right] \\ \vec{X}_{j-1/2}^* &= \left[\frac{1}{2} \cdot (X_j^* + X_{j-1}^*), \frac{1}{2} \cdot (Y_j^* + Y_{j-1}^*) \right] \\ \vec{X}_j^* &= (X_j^*, Y_j^*)\end{aligned}$$

$$\vec{X}_{j+1/2}^* = \left[\frac{1}{2} \cdot (X_j^* + X_{j+1}^*), \frac{1}{2} \cdot (Y_j^* + Y_{j+1}^*) \right]$$

$$\vec{X}_{i+1/2} = \left[\frac{1}{2} \cdot (X_i + X_{i+1}), \frac{1}{2} \cdot (Y_i + Y_{i+1}) \right]$$

- Aplicação do Método de Gauss para quantificar a área (ΔA_i) desse polígono. Nesse caso, a área ΔA_i representa a superfície de areia acrescida ou permanentemente inundada, na zona de influência do ponto i .
- Cálculo da taxa de alteração da faixa de areia, em m^2/ano , considerando intervalo de tempo $(t_{LB} - t_{LI})$ em que t_{LB} e t_{LI} são, respectivamente, os instantes (em anos) da linha de base e da linha de costa inicial. Dessa forma, a taxa de alteração da faixa de areia, na vizinhança do ponto i pode ser calculada como:

$$TX_i = \frac{\Delta A_i}{(t_{LB} - t_{LI})} \quad (1)$$

A Figura 3 ilustra os elementos principais descritos nesses quatro passos, com destaque para as duas linhas costeiras de referência e a alteração de área na zona de influência de um ponto genérico $\vec{X}_i = (X_i, Y_i)$ da linha de base.

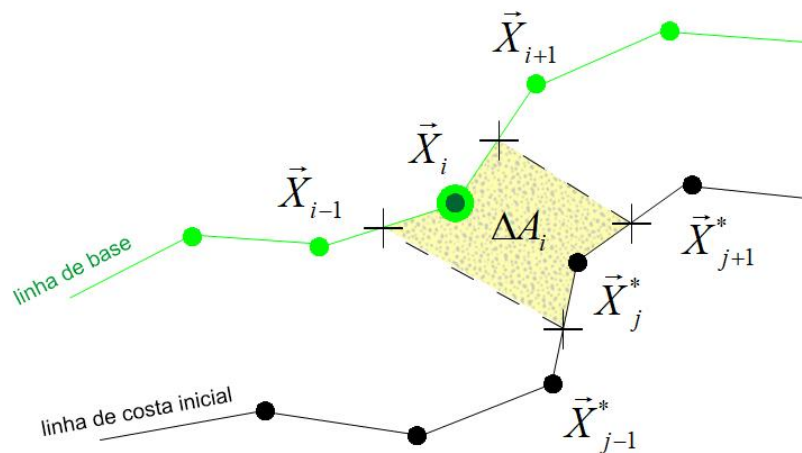


Figura 3 – Esquema para delimitação do polígono de seis vértices utilizado no cálculo da variação da área de praia na vizinhança de um ponto da linha costeira de base.

3. RESULTADOS

A aplicação da metodologia descrita no item anterior resultou na elaboração do mapa ilustrado pela Figura 4. Nesse mapa, as taxas de alteração das faixas de praia, em m^2/ano , foram plotadas sobre a linha costeira de base. Para facilitar a noção de localização, foi inserida, ao fundo, a imagem de satélite retirada do *Google Maps*.

Esses resultados permitem identificar que a zona estuarina está sujeita preferencialmente aos processos de redução de faixa de areia, o que a torna mais susceptível

ao processo de erosão costeira. Nessa região, considerando os pontos mais críticos da linha de costa, a taxa de perda da faixa de areia pode chegar a 153 m²/ano. Para efeito comparativo, nesses setores mais críticos, ao longo dos 53 anos de avaliação, foram computados recuos equivalentes a 1,13 campos de futebol. Considerando a linha costeira, como um todo, a perda da faixa de areia foi quantificada em aproximadamente 83 ha, equivalente a 116 campos de futebol, ao longo do interstício de 1971 a 2024. Esses quantitativos são alarmantes, considerando que a praia do Saco é um dos principais destinos turísticos do estado de Sergipe e que não há apenas casas de veraneio, mas também estabelecimentos comerciais e uma vila, cuja população residente depende economicamente de atividades vinculadas ao turismo.

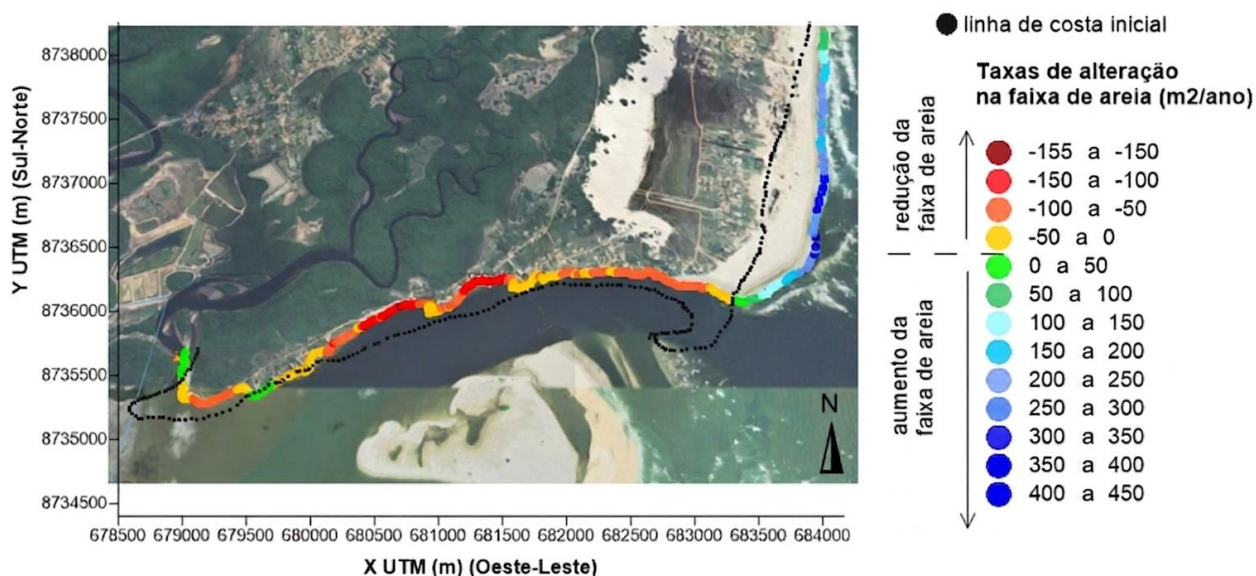


Figura 4 – Taxas de alteração na faixa de areia da praia do Saco. Sistema de referência WGS84, zona 24L.

A erosão da linha de costa tem sido um fenômeno recorrente na faixa de praia voltada para o estuário dos rios Piauí/Real. Atualmente, grandes extensões da linha costeira são protegidas por camadas de enrocamento (Figura 5) que constituem indicadores dos trechos onde a remoção de areia chegou ao nível de potencializar desmoronamentos de barrancos.

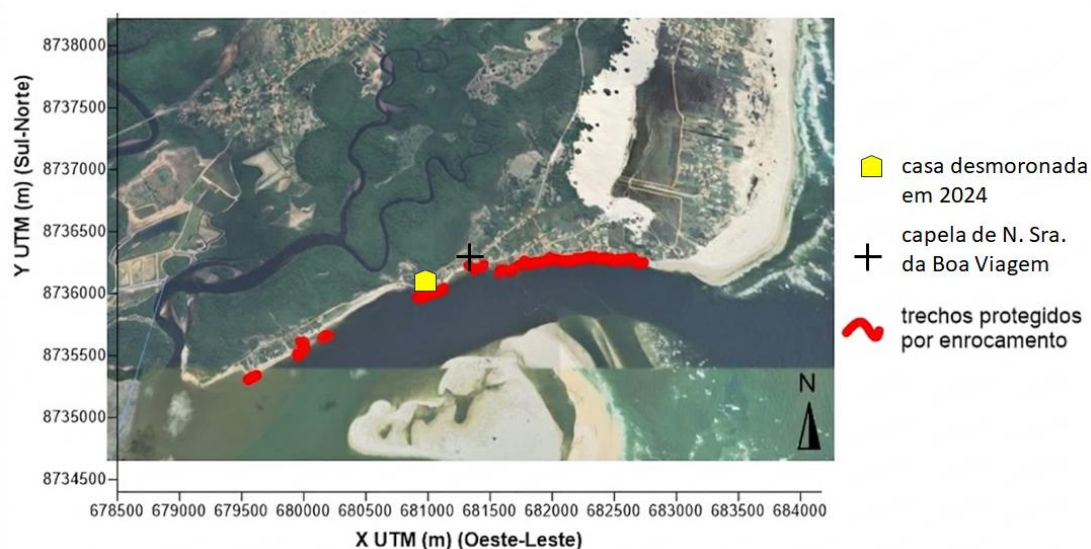


Figura 5 – Trechos protegidos por enrocamento. Sistema de referência WGS84, zona 24L.

Atualmente, o comprimento total do enrocamento é de aproximadamente 1795 m, o que equivale a 34% da extensão da linha de costa no setor estuarino. Nesse contexto, a Figura 6 ilustra duas imagens didáticas e marcantes, registradas em instantes diferentes, onde é possível sentir a gravidade do processo erosivo. Trata-se da vizinhança da capela de Nossa Senhora da Boa Viagem, situada em plena zona propícia à erosão, voltada para o estuário dos rios Piauí/Real. Nesse setor, a taxa de perda de praia foi estimada em até 150 m²/ano.



Figura 6 – Imediações da capela de Nossa Senhora da Boa Viagem. Destaque para a praia existente em 2012 e sua supressão por erosão costeira evidenciada na imagem de 2024. Outro destaque para a camada de enrocamento que protege o talude erodido.

Fonte: *Google Maps*

Outro fato marcante, bastante difundido no noticiário local e até nacional (G1, 2024; Metrôpoles, 2024), foi o desmoronamento de um sobrado (Figura 7), ocorrido no ano de 2024. Nesse local, as taxas de perda de praia foram estimadas em até 50 m²/ano.



Figura 7 – Desabamento de sobrado em decorrência da erosão na porção estuarina da praia do Saco.

Fonte: Metrôpoles (2024); G1 (2024)

Na zona estuarina, embora a tendência geral seja de redução da faixa de areia, também foram identificados alguns setores de acreção que somaram 11 ha ao longo do interstício estudado. Mas é na porção voltada para alto mar onde o incremento de praia tem sido mais destacado ao longo dos anos. Nesses setores, o acréscimo da área de areia foi estimado em 62 ha, equivalente a 87 campos de futebol, entre os anos de 1971 e 2024.

Em resumo, a perda de área de praia, estimada no interstício de 53 anos, foi de 83 ha, enquanto que a acreção total da faixa de areia, foi de cerca de 73 ha. É curioso notar a proximidade desses números! Seriam os sedimentos removidos da zona estuarina os mesmos depositados em extensos bancos de areia presentes no estuário e também na faixa de acreção voltada para alto mar? É tentador pensar que sim, diante da proximidade entre os números. Todavia, em face da complexidade do escoamento na região estuarina e litorânea, qualquer conclusão mais assertiva nesse sentido é meramente especulação. Para isso seria preciso, ao menos, modelar os campos de velocidade do sistema estuário/mar, levando em conta o efeito das marés, e mapear os caminhos seguidos pelos sedimentos erodidos na região.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, o mapeamento das linhas de costa, registradas em dois momentos distintos, possibilitou a quantificação de modificações nas faixas de areia da praia do Saco e das taxas de alteração de área em m^2/ano . Os resultados revelaram que a perda de faixas de praia está preferencialmente localizada na porção voltada para o estuário dos rios Piauí/Real e que as faixas de acreção estão voltadas para alto mar. As taxas de perda chamam atenção para redução de até $153 m^2/ano$, verificada nos setores mais críticos da linha costeira (equivalente a 20% da área de um campo de futebol, por década). Em termos globais, a perda de faixa de areia foi estimada em 83 ha, no interstício de 1971 a 2024. Esse fenômeno reproduz, em setores mais vulneráveis, erosões costeiras que têm afetado progressivamente a região, incluindo desmoronamento de barrancos e de edificações, exigindo barreiras de enrocamento para proteção dos taludes. A despeito disso, na porção voltada para alto mar, a tendência é de acreção da faixa de areia. Nesses setores, foi computado um incremento de 62 ha na faixa de praia, ao longo dos 53 anos utilizados na análise.

O relatório AR6 do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2023) aponta que, no horizonte de pelo menos 130 anos, haverá tendência de elevação do nível médio do mar (NMM), em todo o litoral brasileiro. No caso específico da praia do Saco, esse prognóstico é mais



preocupante, uma vez que os processos erosivos já têm causado danos atuais severos, principalmente no setor de estuário. Isso sugere que, no decorrer dos anos, haverá necessidade de aumentar a extensão da barreira protetora de enrocamento, o que tornará as praias de areia cada vez mais exíguas.

Declaração

Os autores declaram que, ao longo de todas as etapas da elaboração do presente artigo, não foi utilizada Inteligência Artificial.

Referências

G1. **Portal G1 Globo**. Casas destruídas e avanço do rio e do mar: os reflexos da erosão que atinge 68 km do litoral de Sergipe. 2024.

Disponível em: <https://g1.globo.com/se/sergipe/noticia/2024/12/21/casas-destruidas-e-avanco-do-rio-e-do-mar-os-reflexos-da-erosao-que-atinge-68-km-da-costa-de-sergipe.ghtml>. Acesso em: 22 mai. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Relatório de Síntese AR6**. 2023.

Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/longer-report>. Acesso em: 02 jun. 2025.

METRÓPOLES. Mar avança e derruba casa de praia em Sergipe. 2024. 1 vídeo (3 min.). Publicado pelo canal Metrôpoles. 2024.

Disponível em: <https://www.metropoles.com/brasil/video-mar-derruba-casa-praia-se>. Acesso em: 22 mai. 2026.

RODRIGUES, Tais Kalil. Análise das mudanças da linha de costa das principais desembocaduras do estado de Sergipe, com ênfase no rio Sergipe. 2008. **Dissertação (Mestrado)** – Curso de Pós graduação em Geologia, Área de Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008. Disponível em:

<https://www.repositorio.ufba.br/bitstream/ri/16316/1/TAIS%20KALIL%20RODRIGUES.pdf>
Acesso em: 15 mai. 2026.

SILVA SANTOS, João Paulo da. Linha de costa e faixa de proteção à erosão costeira: estudo de caso nas praias do Saco, do Abaís e da Caueira, sul de Sergipe. 2019. **Dissertação (Mestrado)** – Programa de Pós graduação em Geociências e Análise de Bacias. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019. Disponível em:

https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/8168/2/JOAO_PAULO_SANTOS_SILVA.pdf. Acesso em: 15 mai. 2026.

SILVA SANTOS, João Paulo da; ANDRADE, Ana Cláudia da Silva; NASCIMENTO, Paulo Sérgio de Rezende; RAMOS, Laísa Peixoto. Erosão costeira e faixas de recuo em praias arenosas do sul de Sergipe, Brasil. **Revista Geociências**, UNESP São Paulo, v. 40, n. 4, p. 1047-1061, 2021.



IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS DE SINISTROS DE TRÂNSITO COM O USO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E ÍNDICES DE SEVERIDADE

Analice Silva Evangelista¹

Cássio Leandro do Carmo²

^{1,2} Universidade Federal do Triângulo Mineiro (d202110488@uftm.edu.br; cassio.carmo@uftm.edu.br)

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo identificar pontos críticos (*black spots*) de sinistros de trânsito por meio de métodos alinhados aos princípios da abordagem Visão Zero para Sistemas Seguros de Transporte. Para isso, foram coletados e geoprocessados dados de sinistros de trânsito ocorridos no município de Uberaba/MG, nos anos de 2022 e 2023, disponibilizados pela Polícia Civil do Estado de Minas Gerais. O processamento espacial dos dados foi realizado no *software* QGIS, utilizando ferramentas de geoprocessamento, índices de severidade e o Estimador de Intensidade de Kernel para a elaboração de mapas de calor. Além disso, foram produzidos mapas categorizados e mapas de agrupamento para análise da distribuição espacial dos sinistros. Os resultados permitiram identificar zonas críticas de ocorrência e evidenciar padrões espaciais da sinistralidade urbana, demonstrando o potencial das ferramentas SIG como suporte à gestão da segurança viária e ao planejamento de intervenções voltadas à mitigação dos sinistros de trânsito.

Palavras-chave: Sinistros de trânsito 1. *Black spots* 2. Sistemas de Informações Geográficas 3. Segurança Viária 4.

ABSTRACT

This study aimed to identify traffic accident black spots using methods aligned with the principles of the Vision Zero and Safe System approaches. Traffic accident data from the municipality of Uberaba, corresponding to the years 2022 and 2023, were collected and geoprocessed using information provided by the Polícia Civil do Estado de Minas Gerais. Spatial data processing was performed in the QGIS software through geoprocessing tools, severity indexes, and the Kernel Density Estimator for heat map generation. In addition, categorized maps and cluster maps were produced to analyze the spatial distribution of traffic accidents. The results allowed the identification of critical zones and spatial patterns of urban traffic accidents, demonstrating the potential of Geographic Information Systems as a support tool for road safety management and urban planning interventions aimed at mitigating traffic accidents.

Keywords: Traffic crashes 1. Black spots 2. Geographic Information Systems 3. Road safety 4.

1. INTRODUÇÃO

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2020) define sinistro de trânsito como “todo evento que resulte em dano ao veículo ou à sua carga e/ou em lesões a pessoas e animais, e que possa trazer dano material ou prejuízos ao trânsito, à via ou ao meio ambiente, em que pelo menos uma das partes está em movimento nas vias terrestres ou em áreas abertas ao público”. Dessa forma, observa-se uma tendência de evitar o uso do termo “acidente” para se referir às ocorrências de trânsito, uma vez que grande parte de suas causas é conhecida e, portanto, passível de prevenção.

Pontos ou áreas com elevada concentração de sinistros devem ser identificados para subsidiar estudos voltados à mitigação da sinistralidade. Esses locais críticos são denominados *black spots* (Dereli; Erdogan, 2017). Na análise da distribuição espacial dos sinistros, uma questão fundamental refere-se aos critérios utilizados para a identificação e classificação dessas áreas. Entre os parâmetros empregados destacam-se o número de ocorrências, o índice de severidade, os custos associados aos sinistros e as taxas de sinistralidade e severidade, entre outros (Ferraz *et al.*, 2023).

Moura *et al.* (2021) identificaram cruzamentos com aumento da severidade da sinistralidade no município de Porto Alegre, no período de 2015 a 2020, por meio das abordagens de evolução temporal, variação acumulada e taxa composta de crescimento (*Compound Growth Rate* - CGR). De modo semelhante, Teodoro, Alcântara e Barbosa (2014) analisaram a identificação de pontos críticos utilizando ferramentas de Sistema de Informações Geográficas (SIG) associadas à técnica de Estatística Espacial denominada Estimador de Intensidade de Kernel. Os autores também compararam os resultados obtidos com aqueles provenientes da metodologia tradicional empregada pelo Ministério dos Transportes, denominada “PARE”.

Índices absolutos e relativos, quando determinados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e manipulados por ferramentas de análise espacial, podem ser utilizados na identificação de locais críticos, considerando relações topológicas e medidas específicas de exposição dos diferentes usuários das vias (Queiroz, Loureiro e Yamashita, 2004). Além disso, ferramentas de visualização baseadas em SIG, em arquivos *shapefile*, facilitam a representação geográfica dos sinistros de trânsito no sistema viário urbano (Abdullah; Sipos, 2023). Nesse contexto, o uso de programas SIG na gestão do trânsito, especialmente no campo da segurança viária, possibilita diferentes aplicações em análises espaciais e representações gráficas, contribuindo para interpretações mais abrangentes dos resultados (Rodrigues, Ribeiro e Nogueira, 2015).

Entre os recursos disponíveis no QGIS (2024), de código aberto e gratuito, para a visualização de *black spots*, está o Método de Kernel, uma estimativa de densidade não paramétrica. Para Flahaut *et al.* (2003), o Método de Kernel é uma abordagem alternativa para identificar áreas críticas e analisar como o nível de periculosidade está distribuído no espaço.

Yadav, Ghodmare e Naveen (2022) propuseram contramedidas de engenharia e gestão de tráfego, fundamentadas na abordagem *Safe System*, para a mitigação da sinistralidade em *black spots* de rodovias indianas. Os locais críticos foram identificados por meio do índice de severidade de acidentes (*Accident Severity Index* - ASI).

A Visão Zero, fundamentada na abordagem de Sistemas Seguros de Transporte (*Safe System*), consiste em um programa europeu de segurança viária implementado nas últimas décadas em diversos países. No Brasil, o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (Pnatrans), instituído pela Resolução CONTRAN nº 870 (Brasil, 2021), está alinhado aos



princípios da Visão Zero e do Sistema Seguro. O plano é estruturado em seis pilares: Gestão da Segurança no Trânsito; Vias Seguras; Segurança Veicular; Educação para o Trânsito; Atendimento às Vítimas; e Normatização e Fiscalização.

Nesse cenário, destaca-se a importância da identificação de pontos críticos de sinistros de trânsito como ferramenta de apoio ao planejamento urbano e à segurança viária. A análise espacial dessas ocorrências possibilita compreender padrões de concentração da sinistralidade e subsidiar intervenções voltadas à redução de mortes e lesões no trânsito.

Assim, este trabalho teve como objetivo identificar os pontos críticos (*black spots*) de sinistros de trânsito na cidade de Uberaba/MG, considerando os anos de 2022 e 2023. Para isso, buscou-se verificar os registros de sinistros; realizar o georreferenciamento das ocorrências; estudar métodos de identificação de pontos críticos presentes na literatura de Transportes; aplicar metodologias como mapas de calor elaborados no *software* QGIS e índices de severidade; e comparar os resultados obtidos pelos diferentes métodos empregados.

2. METODOLOGIA

O material utilizado nesta pesquisa consistiu em uma base de dados fornecida pela Polícia Civil do Estado de Minas Gerais, contendo registros detalhados dos sinistros de trânsito ocorridos nos anos de 2022 e 2023. A base, que foi disponibilizada institucionalmente para fins de pesquisa e possui caráter público, incluiu informações referentes à localização geográfica das ocorrências, data e horário, gravidade do sinistro, tipo de veículo envolvido, descrição da ocorrência, logradouro e provável causa do evento. Ressalta-se que a base não contém informações que permitam a identificação direta dos indivíduos envolvidos, estando sua utilização em conformidade com a Lei nº 13.709/2018 (Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais - LGPD).

A partir dessa base, os dados foram preparados e processados no *software* QGIS para o desenvolvimento das etapas de geoprocessamento e elaboração dos produtos cartográficos. Inicialmente, realizou-se a organização e padronização das informações em planilhas eletrônicas, seguida da conversão dos arquivos para o formato “.txt”, compatível com o ambiente SIG. Nessa etapa, também foram efetuadas correções nas coordenadas geográficas, incluindo a substituição de vírgulas por pontos decimais, a fim de garantir a adequada leitura dos dados pelo *software*.

Posteriormente, os arquivos foram inseridos no QGIS por meio da ferramenta de adição de camadas de texto delimitado, permitindo o georreferenciamento das ocorrências de sinistros a partir das coordenadas de latitude e longitude. Para as análises espaciais, adotou-se o sistema de referência SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S, visando maior precisão métrica nos procedimentos de geoprocessamento.

Além disso, foi incorporada ao projeto a base cartográfica do município de Uberaba, juntamente com imagens de satélite obtidas por meio do complemento *QuickMapServices*, utilizando a ferramenta *Google Earth* como suporte para a visualização e validação espacial das ocorrências georreferenciadas.

Na sequência, foram realizadas etapas de manipulação e associação de dados espaciais e alfanuméricos por meio das tabelas de atributos do QGIS, possibilitando a organização das

informações necessárias às análises espaciais. Também foram aplicadas ferramentas de seleção e categorização das feições, permitindo a identificação de padrões espaciais relacionados aos diferentes tipos de veículos envolvidos nos sinistros.

Para a identificação das áreas críticas de sinistralidade, elaboraram-se mapas de calor (*heat maps*), configurados a partir de gradientes de cores e valores mínimos e máximos de densidade, com o objetivo de evidenciar espacialmente as regiões com maior concentração de ocorrências. Adicionalmente, foram produzidos mapas categorizados conforme o tipo de veículo envolvido nos sinistros, permitindo análises comparativas entre os diferentes padrões de distribuição espacial.

Por fim, foi elaborado um mapa de agrupamento (*cluster map*) por meio da ferramenta *Clustering* de pontos do QGIS, adotando-se um raio de vizinhança de 100 metros. Esse procedimento possibilitou identificar agrupamentos espaciais de ocorrências e delimitar zonas críticas de sinistros no sistema viário urbano do município.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A princípio, foi realizado o geoprocessamento do mapa da Figura 1, o qual possibilitou uma visão acerca dos sinistros de trânsito graves e fatais nos anos de 2022 e 2023 na cidade de Uberaba/MG. Nele estão contidos todos os sinistros ocorridos no período descrito e o local exato de sua ocorrência, permitindo a visualização espacial dos 573 sinistros graves ou fatais registrados, dos quais 266 ocorreram em 2022 e 307 em 2023.

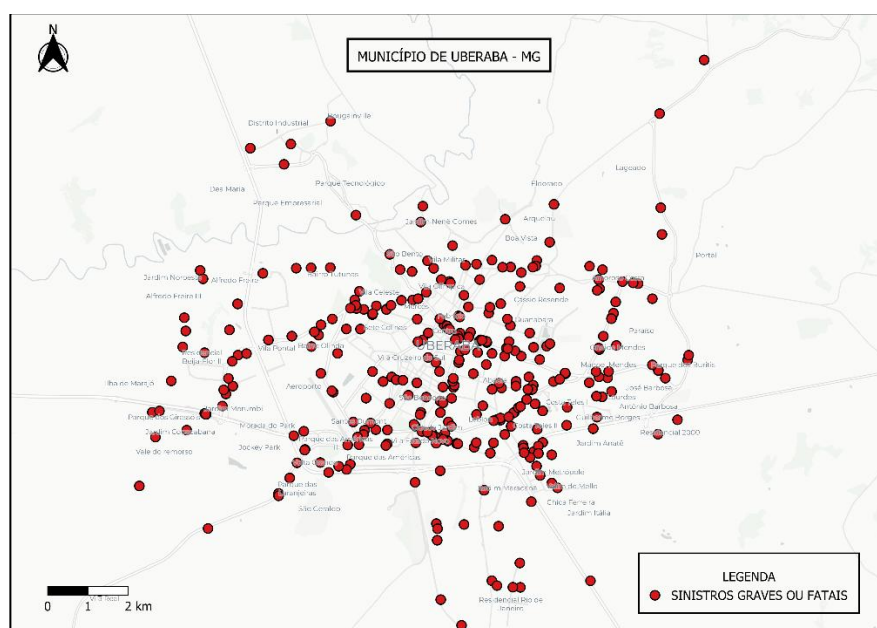


Figura 1 - Mapa do município de Uberaba/MG contendo os sinistros de trânsito graves ou fatais nos anos de 2022 e 2023.

Fonte: Autores (2025).

Na Figura 2, apresenta-se o mapa categorizado por tipo de veículo, o qual classifica o veículo envolvido em cada ponto de sinistro. Essa representação permite verificar quais categorias de veículos apresentam maior concentração em determinadas áreas do sistema viário, contribuindo para análises mais específicas da sinistralidade urbana e auxiliando na

formulação de estratégias de segurança viária direcionadas aos usuários mais vulneráveis ou mais recorrentes nas ocorrências.

Verificou-se, dessa forma, a predominância de sinistros envolvendo motocicletas, que corresponderam a 268 registros, seguidas por automóveis (220), bicicletas (27), caminhões (25) e ônibus (20), sendo 13 ocorrências de sinistros sem registros do modal envolvido.

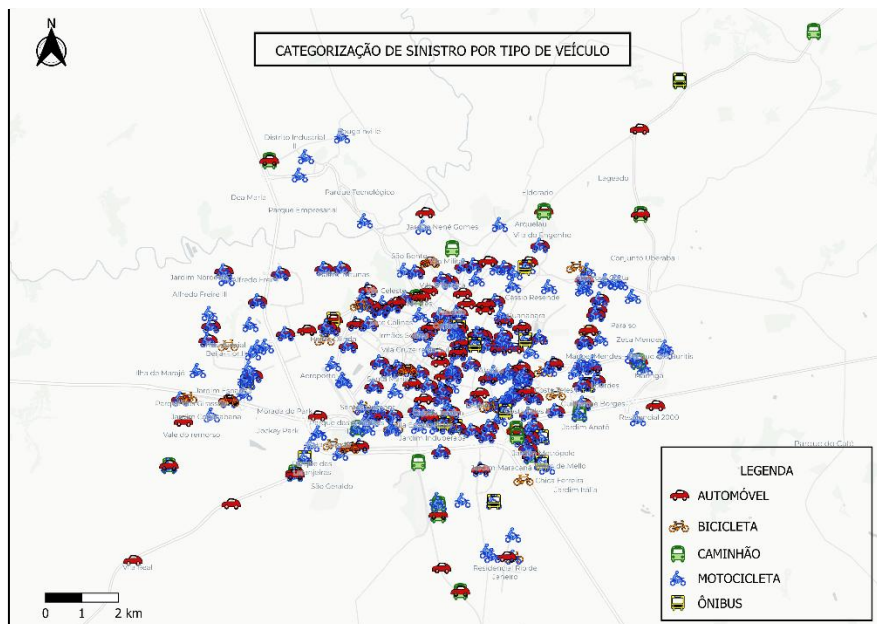


Figura 2 - Mapa categorizado por tipo de veículo envolvido.

Fonte: Autores (2025).

As proporções correspondentes aos diferentes modais envolvidos nos sinistros de trânsito encontram-se representadas no gráfico da Figura 3, possibilitando análise comparativa entre as categorias de veículos registradas.

Distribuição percentual de sinistros por modal envolvido

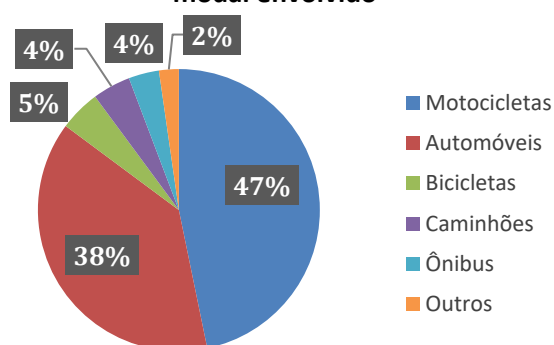


Figura 3 - Gráfico da distribuição percentual por tipo de veículo.

Fonte: Autores (2025).

Observa-se, a partir do gráfico da Figura 3, que a motocicleta é o tipo de veículo mais envolvido em sinistros de trânsito graves ou fatais nos de 2022 e 2023 em Uberaba - MG. Segundo Haider et al. (2022), os sinistros envolvendo motocicletas apresentam elevada severidade devido à

maior vulnerabilidade física dos motociclistas e à reduzida proteção estrutural oferecida pelo veículo. Além disso, fatores como excesso de velocidade, condução sob efeito de substâncias psicoativas, colisões com objetos fixos e manobras inadequadas contribuem significativamente para o aumento das fatalidades envolvendo motociclistas.

Além da identificação e categorização dos sinistros, foi realizada a análise da intensidade espacial das ocorrências por meio da Estimativa de Densidade Kernel, técnica amplamente utilizada em estudos de análise espacial para a identificação de concentrações de eventos geograficamente distribuídos. A metodologia possibilita estimar a densidade de ocorrências em uma superfície contínua, permitindo evidenciar áreas de maior concentração de sinistros e padrões espaciais associados à sinistralidade urbana.

A Figura 5 apresenta o mapa de calor gerado a partir dessa técnica, no qual as cores mais quentes representam regiões com maior densidade de ocorrências, enquanto as cores frias indicam áreas de menor concentração. Os resultados obtidos permitiram identificar zonas críticas de sinistros no município de Uberaba, áreas prioritárias para intervenções relacionadas à segurança viária.

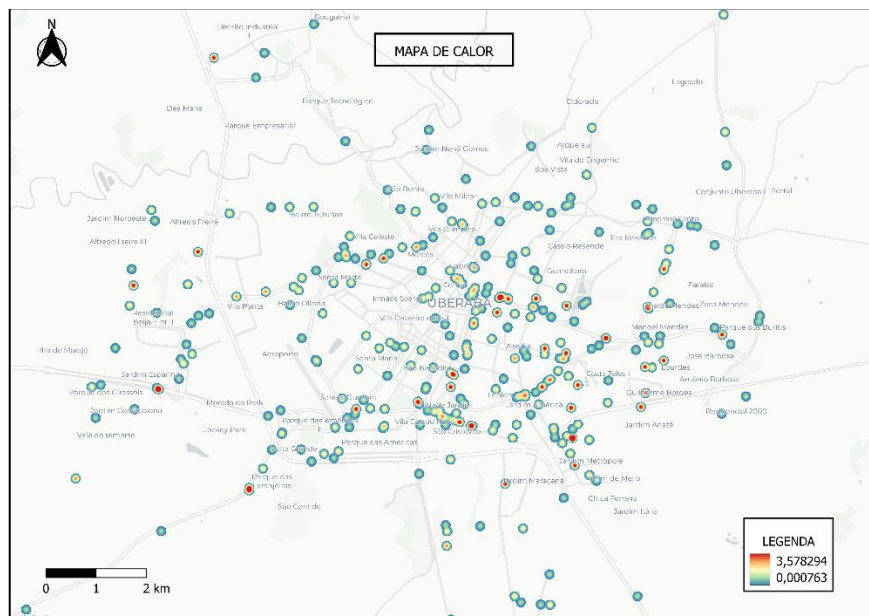


Figura 5 - Mapa de calor.
Fonte: Autores (2025).

Foi geoprocessado, também, o mapa de agrupamento (Figura 6) por meio da ferramenta *Clustering* de pontos, o qual identificou regiões com maior concentração de sinistros de trânsito considerando um raio de vizinhança de 100 metros e um número mínimo de ocorrências para formar cada agrupamento, e delimitou zonas críticas, evidenciando padrões espaciais de risco que não são percebidos apenas pelos pontos isolados. Este mapa foi gerado como método alternativo e comparativo ao mapa de calor, assim, ambos identificaram zonas críticas semelhantes, evidenciando coincidência nos padrões espaciais de maior risco.

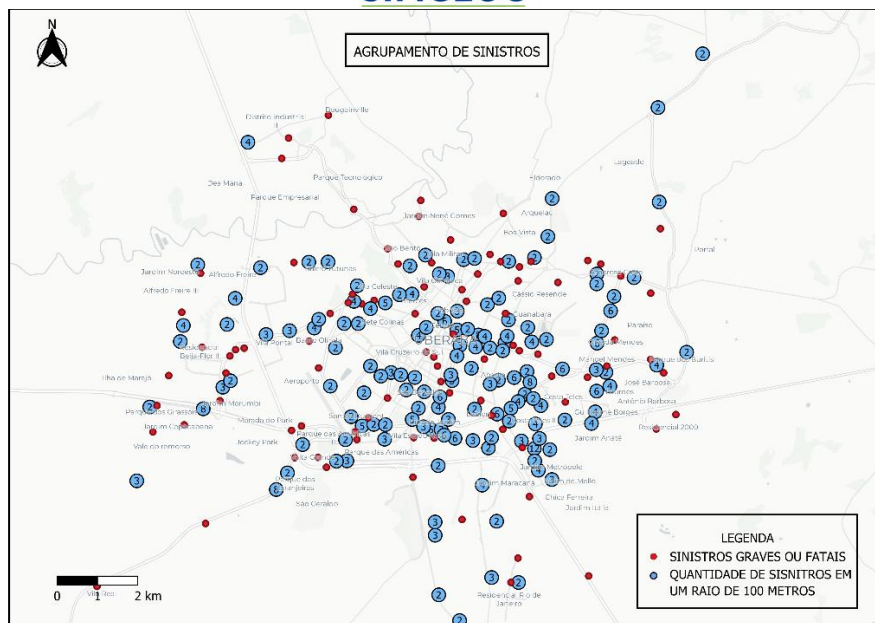


Figura 6 - Mapa de agrupamento.

Fonte: Autores (2025).

As Figuras 7 e 8 são recortes ampliados dos mapas de calor e agrupamento apresentados acima, respectivamente, que evidenciam a correspondência entre os padrões identificados pelos dois métodos, além de permitirem analisar suas diferentes aplicabilidades na identificação de áreas críticas de sinistralidade. O trecho analisado localiza-se na Avenida Deputado José Marcus Cherem, próximo ao encontro com a Avenida Guilherme Ferreira.

No mapa obtido pela Estimativa de Densidade Kernel (Figura 7), observa-se a continuidade das manchas de densidade representadas por tonalidades mais quentes, indicando elevada intensidade e concentração espacial de sinistros.



Figura 7 - Av. Dep. José Marcus Cherem pelo mapa de calor.

Fonte: Autores (2025).

Já o mapa obtido pelo método de agrupamento (Figura 8) apresenta, no mesmo trecho, uma continuidade dos agrupamentos representados pelos valores numéricos, indicando a recorrência espacial dos sinistros e evidenciando a formação de *clusters* significativos ao longo da via.



Figura 8 - Av. Dep. José Marcus Cherem pelo mapa de agrupamento.

Fonte: Autores (2025).

Embora a Estimativa de Densidade Kernel e o método de agrupamento sejam complementares na análise espacial da sinistralidade, apresentam diferenças quanto à sua aplicação. O método de Kernel produz uma superfície contínua de densidade, sendo mais adequado para visualizar a intensidade espacial dos sinistros e identificar áreas de maior concentração por meio de mapas de calor. Já o método de *clustering*, permite delimitar agrupamentos espacialmente significativos com maior precisão, possibilitando a identificação mais objetiva de pontos ou trechos críticos (*black spots*).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo identificar pontos críticos (*black spots*) de sinistros de trânsito no município de Uberaba/MG, utilizando ferramentas de geoprocessamento e análise espacial no software QGIS. A partir do georreferenciamento dos registros de sinistros graves e fatais ocorridos nos anos de 2022 e 2023, foi possível analisar a distribuição espacial das ocorrências e identificar padrões de concentração da sinistralidade urbana.

Os resultados evidenciaram um total de 573 sinistros graves ou fatais no período analisado, sendo 266 ocorridos em 2022 e 307 em 2023. Verificou-se predominância de ocorrências envolvendo motocicletas, que corresponderam a 47% dos registros, indicando a elevada vulnerabilidade desse grupo no contexto da segurança viária urbana.

Por meio da aplicação da Estimativa de Densidade Kernel e do método de agrupamento (*clustering*), foram identificadas áreas críticas de sinistralidade distribuídas ao longo do sistema viário do município. Ambos os métodos apresentaram resultados semelhantes quanto à localização das regiões de maior concentração de ocorrências, destacando vias e trechos críticos, como a Avenida Deputado José Marcus Cherem, próxima ao encontro com a Avenida Guilherme Ferreira. Enquanto o método de Kernel permitiu visualizar a intensidade contínua das ocorrências por meio das manchas de densidade, o método de agrupamento possibilitou delimitar de forma mais precisa os *clusters* de sinistros.



Dessa forma, conclui-se que as ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) apresentaram elevada eficiência na identificação e análise espacial dos pontos críticos de sinistralidade, constituindo importante instrumento de apoio ao planejamento urbano e à gestão da segurança viária.

Como limitações da pesquisa, destacam-se possíveis inconsistências na base de dados utilizada e a restrição temporal da análise aos anos de 2022 e 2023. Para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação da série histórica e a incorporação de variáveis como volume de tráfego, características geométricas das vias e índices de exposição dos diferentes usuários, possibilitando análises mais abrangentes da sinistralidade urbana.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Polícia Estadual do Estado de Minas Gerais pelo fornecimento dos dados de sinistros utilizados nesta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

Referências

ABDULLAH, P.; SIPOS, T. Traffic accidents analysis using QGIS and binary decision tree. *Transportation Research Procedia*, v. 72, p. 1677–1684, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.640>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10697: pesquisa de sinistros de trânsito – terminologia*. Rio de Janeiro, 2020.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução CONTRAN nº 870, de 13 de setembro de 2021. Institui o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (Pnatrans). Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-contran-n-870-de-13-de-setembro-de-2021-345797892>. Acesso em: 7 jun. 2024.

DERELI, M. A.; ERDOGAN, S. A new model for determining the traffic accident black spots using GIS-aided spatial statistical methods. *Transportation Research Part A*, v. 103, p. 106–117, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2017.05.031>.

FERRAZ, A. C. P. et al. *Segurança no trânsito*. 3. ed. Curitiba: Editora dos Autores, 2023. Disponível em: <https://eesc.usp.br/comunicacao-admin/wp-content/uploads/2024/04/Livro-Seguranca-no-Transito.pdf>. Acesso em: 15 março 2025.

FLAHAUT, B. et al. The local spatial autocorrelation and the kernel method for identifying black zones: a comparative approach. *Accident Analysis and Prevention*, v. 35, p. 991–1004, 2003.

HAIDER, M.; YASIN, M.; SHAHZAD, M.; et al. Factors affecting injury severity of single-vehicle motorcycle crashes: evidence from Pakistan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 19, n. 10, p. 5813, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19105813>

MOURA, F. S. et al. Identificação de pontos críticos de sinistros utilizando a taxa de crescimento composto: uma alternativa ao uso de variação anual. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 35., 2021, Virtual. *Anais [...]* Rio de Janeiro: Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes, 2021. p. 2209–2216.



QGIS. Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation, 2024. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/. Acesso em: 12 março 2025.

QUEIROZ, M. P.; LOUREIRO, C. F. G.; YAMASHITA, Y. Metodologia de análise espacial para identificação de locais críticos considerando a severidade dos acidentes de trânsito. *Transportes*, v. 12, n. 2, 2004. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v12i2.135>.

RODRIGUES, D. S.; RIBEIRO, P. J. G.; NOGUEIRA, I. C. S. Safety classification using GIS in decision-making process to define priority road interventions. *Journal of Transport Geography*, v. 43, p. 101–110, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.01.007>.

TEODORO, A. B.; ALCÂNTARA, F. A.; BARBOSA, H. M. Comparação entre dois métodos para identificação de locais críticos de acidentes de trânsito. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 28., 2014, Curitiba. *Anais [...]* Rio de Janeiro: Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes, 2014. p. 2209 - 2216.

YADAV, D. K.; GHODMARE, S. D.; KUMAR, N. N. Mitigation of blackspots on highways by the application of safe system approach. *Materials Today: Proceedings*, v. 52, p. 1228–1235, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.042>.



TÉCNICAS MULTIVARIADAS NO ESTUDO DA CAMINHABILIDADE EM CONTEXTO UNIVERSITÁRIO

Tulio Campanati de Oliveira¹

Julia Jacob Favoreto²

Maria Lígia Chuerubim³

^{1,2,3} Universidade Federal de Uberlândia ((tuliocampanati@gmail.com;
juliajacobfavoreto11@gmail.com; marialigia@ufu.br)

RESUMO

Este artigo propõe e testa, por meio de dados simulados, um Índice de Caminhabilidade (IC) para campus universitários, integrando Análise de Componentes Principais (PCA) e Regressão Linear Múltipla por Mínimos Quadrados Ordinários (OLS). O IC foi estruturado em duas versões, com 12 e 13 indicadores, sendo esta última com a inclusão do comportamento pedonal como aproximação da vitalidade urbana. A definição dos indicadores, os procedimentos de auditoria em ambiente SIG e os parâmetros estatísticos adotados na simulação foram baseados em Barroso et al. (2025), estudo correlato sobre mapeamento da caminhabilidade em campus universitário brasileiro. A partir desses parâmetros, foram geradas amostras simuladas e espacialmente balanceadas, com $n = 50$, 100 e 200 , para avaliar a robustez e a estabilidade dos modelos PCA-OLS em diferentes tamanhos amostrais. Nas simulações com $n = 200$, observaram-se valores de R^2 superiores a $0,98$ e coeficientes estáveis, indicando desempenho adequado do modelo para a estrutura simulada. Contudo, tais resultados não devem ser interpretados como evidência empírica direta do comportamento real de pedestres. Em geral, Calçada, Salubridade e Ambiente apresentaram maior contribuição ao índice, enquanto o indicador Pedestre ampliou a sensibilidade do IC à vitalidade urbana e ao planejamento da mobilidade ativa.

Palavras-chave: Caminhabilidade. Análise de Componentes Principais. Regressão OLS. Mobilidade Ativa. Simulação Estatística.

ABSTRACT

This article proposes and tests, using simulated data, a Walkability Index (WI) for university campuses, integrating Principal Component Analysis (PCA) and Multiple Linear Regression by Ordinary Least Squares (OLS). The WI was structured in two versions, with 12 and 13 indicators, the latter including pedestrian behavior as a proxy for urban vitality. The definition of indicators, GIS-based auditing procedures, and the statistical parameters adopted in the simulation were based on Barroso et al. (2025), a related study on walkability mapping in a Brazilian university campus. Based on these parameters, spatially balanced simulated samples were generated with $n = 50$, 100 , and 200 to evaluate the robustness and stability of the PCA-OLS models under different sample sizes. In the simulations with $n = 200$, R^2 values above 0.98 and stable coefficients were observed, indicating adequate model performance for the simulated structure. However, these results should not be interpreted as direct empirical evidence of real pedestrian behavior. Overall, Sidewalk, Salubrity, and Environment showed the greatest contribution to the index, while the Pedestrian indicator increased the WI's sensitivity to urban vitality and active mobility planning.

Keywords: Walkability Index. Principal Component Analysis. OLS Regression. Active Mobility. Statistical Simulation.

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade ativa — entendida como o conjunto de deslocamentos cotidianos realizados por meios não motorizados e propulsão humana, como caminhar e pedalar — ocupa posição central nas agendas urbana, ambiental e de saúde pública contemporâneas. No Brasil, a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), instituída pela Lei Federal n.º 12.587/2012, prioriza modos não motorizados e o transporte coletivo, orientando projetos que qualifiquem calçadas, travessias e redes seguras para o pedestre (Brasil, 2012). Essa diretriz articula-se com a ABNT NBR 9050:2020, que estabelece parâmetros técnicos de acessibilidade universal, e com o guia Ruas Completas no Brasil (WRI Brasil, 2021), que difunde princípios de desenho urbano inclusivo e seguro. Juntos, esses instrumentos normativos evidenciam a centralidade da infraestrutura pedonal nas políticas públicas brasileiras, alinhando-se ao debate internacional sobre os atributos urbanos que favorecem o caminhar, tratado a seguir.

Internacionalmente, o conceito de *walkability* — ou caminhabilidade, termo aqui adotado como equivalente — descreve em que medida a forma urbana incentiva ou inibe o caminhar, conjugando quatro atributos centrais: densidade (concentração de pessoas e atividades em uma área), conectividade (facilidade de deslocamento entre pontos pela malha viária), mistura de usos (diversidade de funções urbanas — residencial, comercial, institucional — em proximidade) e qualidade do espaço público (conforto, segurança e atratividade das vias e calçadas). Metanálises consolidaram o arcabouço dos "5 Ds" — densidade, diversidade de usos do solo, desenho urbano (configuração física das vias e quadras), distância ao transporte coletivo e acessibilidade de destinos (facilidade de alcançar pontos de interesse) — como variáveis-chave do comportamento de viagem a pé (Ewing e Cervero, 2010). Southworth (2005) e Gehl (2013) complementam esses princípios ao detalhar critérios para redes pedonais seguras, confortáveis e estimulantes.

Operacionalizar esses atributos exige instrumentos de medição capazes de traduzi-los em indicadores espaciais. Nesse sentido, a mensuração objetiva avançou com SIG e índices compostos aplicados em múltiplas escalas (Leslie et al., 2007). Ferramentas como o *Walk Score* apresentam validade externa em contextos metropolitanos distintos (Duncan et al., 2011; Carr, Dunsiger e Marcus, 2011). Indicadores compostos de caminhabilidade em escala microespacial, construídos a partir de auditorias sistemáticas de segmentos de via, têm sido propostos e validados em estudos recentes como instrumento alternativo aos índices baseados unicamente em dados secundários de uso do solo (Bartzokas-Tsiompras, Bakogiannis e Nikitas, 2023). No plano metodológico, diretrizes internacionais recomendam boas práticas de normalização, ponderação e agregação para índices compostos, destacando técnicas multivariadas (OECD; European Union; EC-JRC, 2008).

A consolidação de índices compostos como o descrito acima depende, por sua vez, de métodos estatísticos capazes de sintetizar múltiplos indicadores em uma medida única e de testar sua consistência. A Análise de Componentes Principais (PCA) é referência clássica para síntese de variáveis correlacionadas (Jolliffe, 2002), enquanto a Regressão Linear Múltipla por Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) permite testar significância e estabilidade dos coeficientes. A combinação PCA-OLS constitui estratégia robusta, desde que diagnósticos de

multicolinearidade via VIF (*Variance Inflation Factor*) sejam conduzidos rigorosamente (O'Brien, 2007; Shrestha, 2020; Wooldridge, 2019). A regra prática de 10 a 20 observações por parâmetro (Hair et al., 2019) orienta o dimensionamento amostral.

Apesar do avanço metodológico consolidado nessas referências internacionais, sua aplicação em contextos universitários brasileiros ainda é incipiente. No contexto nacional, campi universitários permanecem subexplorados como laboratórios de caminhabilidade, apesar de sua relevância como ambientes de alta demanda pedonal e usos diversificados, nos quais condições de infraestrutura desigual podem inclusive penalizar de forma assimétrica diferentes perfis de usuários (Sun, Guo e Yin, 2023). Estudos recentes indicam a pertinência de indicadores específicos e abordagens multimétodo nesses ambientes (Marangão et al., 2022; Pires e Magagnin, 2025; Barroso et al., 2025). Campi universitários brasileiros de médio e grande porte, que reúnem em um único território a diversidade de usos (ensino, pesquisa, serviços, convivência) e a alta densidade de deslocamentos a pé, caracterizam o desafio da caminhabilidade em ambientes universitários e constituem ambiente adequado para testar e calibrar, em escala controlada, metodologias de avaliação da mobilidade a pé.

Este artigo tem por objetivo modelar e testar, por meio de dados simulados, um IC para campus universitários, com estrutura de indicadores e parâmetros estatísticos baseados em estudo correlato de mapeamento da caminhabilidade em campus universitário brasileiro (Barroso et al., 2025), combinando PCA e OLS, e avaliar a robustez dos modelos sob diferentes tamanhos amostrais simulados ($n = 50, 100$ e 200), discutindo implicações metodológicas e práticas para o diagnóstico e o planejamento da mobilidade ativa em ambientes universitários.

2. METODOLOGIA

2.1. Base paramétrica e estrutura da simulação

Este artigo não constitui levantamento de campo próprio: trata-se de um experimento estatístico baseado em dados integralmente simulados, cuja estrutura de indicadores, procedimentos de auditoria e parâmetros estatísticos (médias e variâncias por indicador) foram parametrizados a partir de estudo correlato de mapeamento da caminhabilidade em campus universitário brasileiro, conduzido em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) com apoio de imagens de satélite (Barroso et al., 2025). Esse estudo correlato caracteriza um campus universitário de médio porte, com edifícios acadêmico-administrativos, vias internas pavimentadas, calçadas de variada qualidade, áreas verdes e espaços de convivência, e elevado volume de deslocamentos a pé entre blocos — perfil compatível com o de campi universitários brasileiros de porte similar, e que serve de referência para a calibração dos parâmetros da simulação aqui apresentada.

O estudo correlato de referência (Barroso et al., 2025) reporta um levantamento de 72 segmentos de calçada e via de circulação, auditados em campo e georreferenciados em ambiente SIG, com registro de indicadores físicos, psicossociais e ambientais sobre base cartográfica construída a partir de imagem de satélite de alta resolução do campus estudado. Os 13 eixos temáticos descritos na seção 2.2 e as respectivas médias e variâncias observadas nesse levantamento correlato foram adotados como parâmetros de referência para a geração das amostras simuladas utilizadas neste artigo ($n = 50, 100$ e 200), preservando a ordem de grandeza e a estrutura de correlação entre indicadores reportadas no estudo original. Este artigo não reproduz nem reanalisa os dados primários daquele levantamento; utiliza apenas seus parâmetros estatísticos agregados como insumo para a simulação descrita na seção 2.3. A Figura

1 ilustra, de forma esquemática e genérica, a lógica de distribuição espacial de segmentos auditados em um campus universitário, sem corresponder a um levantamento georreferenciado específico realizado neste artigo.

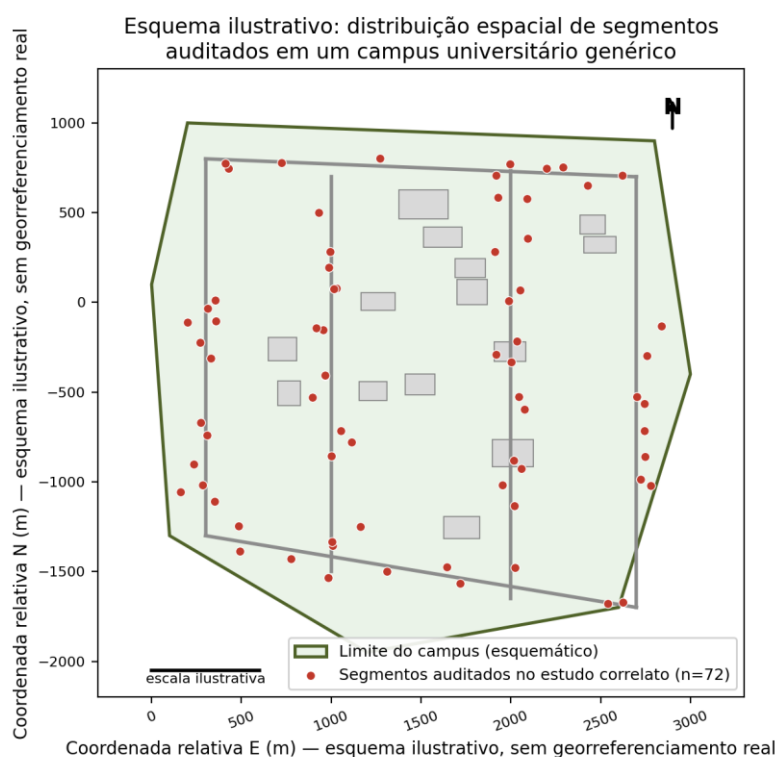


Figura 1 – Esquema ilustrativo da distribuição espacial de segmentos de calçada e via de circulação auditados em um campus universitário genérico, com base na lógica de levantamento reportada pelo estudo correlato de referência (Barroso et al., 2025).

Fonte: Autores (2026).

2.2. Estrutura dos indicadores e pontuação

Com base em protocolos da literatura nacional e internacional (Carvalho, 2016; Freitas, 2023; Pires e Magagnin, 2025; Marangão et al., 2022) e calibrado à morfologia do campus, estruturaram-se 13 eixos temáticos, avaliados por auditoria visual direta em cada segmento e pontuados em escala discreta de 0 (ausente/inadequado) a 2 (presente/adequado), conforme protocolo de observação sistemática adaptado de Leslie et al. (2007) e Marangão et al. (2022): Piso (P) — qualidade do material e da regularidade do pavimento; Calçada (C) — largura livre e continuidade do passeio; Travessias (T) — existência e qualidade de faixas de pedestre e rebaixamentos; Fatores Psicossociais (PS) — percepção de segurança pública e conforto subjetivo do trajeto; Equipamentos Públicos (EP) — presença de bancos, lixeiras, abrigos e mobiliário urbano; Poluição Sonora (PL) — nível de ruído percebido proveniente de tráfego veicular e obras; Salubridade (S) — condições de limpeza, drenagem e ausência de focos de insalubridade; Ambiente (A) — presença de vegetação, sombreamento e conforto térmico; Animação Urbana (AU) — intensidade de usos ativos (comércio, convivência) ao longo do segmento; Iluminação (I) — adequação da iluminação pública noturna; Meio-fio (MF) — estado de conservação e altura do meio-fio; Sinalização Vertical (SI) — presença e legibilidade de placas e sinalização para o pedestre; e Comportamento do Pedestre (Pedestre) — intensidade do fluxo

de caminhantes observado em campo. Conectividade e uso do solo foram excluídos por serem condicionados à escala da cidade, e não à escala do segmento avaliado.

O IC foi modelado, inicialmente, com os 12 primeiros eixos e, posteriormente, com 13 indicadores com a adição da variável Pedestre — com base em contagem expedita do fluxo de caminhantes em horário de pico — com proximidade de vitalidade urbana (Gehl, 2013; Speck, 2018). Essa distinção permite separar a caminhabilidade potencial (infraestrutura) da caminhabilidade realizada (uso efetivo).

2.3. Métodos de estimação: PCA e OLS

A PCA (não supervisionada) foi aplicada para reduzir dimensionalidade, extrair a estrutura de variância latente e derivar pesos relativos a partir das cargas da primeira componente principal (Jolliffe, 2002). A OLS (supervisionada) teve por objetivo testar a estabilidade dos pesos atribuídos a cada eixo temático sob diferentes condições amostrais, e não estimar relações causais sobre comportamento real de pedestres. Para viabilizar esse teste, o IC calculado pela Equação 2 (pesos simulados) foi tratado como variável dependente simulada, regredida sobre os 12 ou 13 indicadores originais; dessa forma, coeficientes próximos aos pesos de origem e R^2 elevado indicam apenas que o modelo OLS recupera de forma consistente a estrutura de ponderação definida a priori, funcionando como verificação de coerência interna e de sensibilidade ao tamanho amostral — não como prova de que a infraestrutura explica estatisticamente o comportamento de caminhada observado no campus. A combinação segue recomendação de O'Brien (2007) e as diretrizes da OECD (2008) para índices compostos.

Os 72 segmentos reportados pelo estudo correlato de referência (Barroso et al., 2025) constituem a amostra empírica original daquele levantamento, descrita como suficiente para a aplicação da PCA, mas insuficiente, à luz da regra de 10 a 20 observações por parâmetro (Hair et al., 2019), para a estimação estável de modelos OLS com 12 ou 13 preditores. Por essa razão, e exclusivamente para fins de teste de robustez estatística, geraram-se neste artigo amostras simuladas espacialmente balanceadas a partir dos parâmetros estatísticos daquele levantamento: com 50 e 100 observações (aplicadas tanto à PCA quanto à OLS, como teste de sensibilidade da estrutura de pesos a diferentes tamanhos amostrais) e com 200 observações (exclusivamente para OLS, especificamente para verificar se a multicolinearidade observada nos modelos com $n = 50$ e $n = 100$ decorre de tamanho amostral insuficiente). Cada ponto simulado recebeu valores de indicador sorteados a partir das distribuições estatísticas (média e variância) reportadas para os 72 segmentos do estudo correlato, preservando a ordem de grandeza e a estrutura de correlação entre indicadores descritas naquele estudo. Os resultados obtidos com essas amostras simuladas devem, portanto, ser interpretados como evidência da estabilidade matemática dos modelos PCA-OLS frente ao tamanho amostral, e não como validação empírica adicional do comportamento real de pedestres em qualquer campus. Os modelos foram comparados pelos critérios R^2 , VIF e estabilidade de sinal dos coeficientes.

2.4. Declaração de uso de Inteligência Artificial Generativa

Os autores declaram que ferramentas de Inteligência Artificial Generativa foram utilizadas como apoio na etapa de revisão textual deste manuscrito, especificamente para verificação de coesão e coerência entre parágrafos, correção de inconsistências de formatação e padronização de fontes em figuras e tabelas, a partir das recomendações apontadas pelos pareceres ad hoc da Comissão Científica do SIMGEOC. A concepção da pesquisa, a coleta e o

tratamento dos dados de campo, a modelagem estatística (PCA e OLS), a interpretação dos resultados e as conclusões são de inteira responsabilidade dos autores, que assumem integralmente a autoria e a exatidão do conteúdo científico apresentado. Esta declaração observa o disposto no art. 9º, inciso I, alíneas "c" e "d", da Portaria CNPq nº 2.664, de 6 de março de 2026, que institui a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq e estabelece a obrigatoriedade de declarar o uso de ferramentas de Inteligência Artificial Generativa em qualquer fase da pesquisa, especificando a ferramenta e a finalidade, sem que tal uso configure autoria não humana do conteúdo científico, do qual os autores permanecem integralmente responsáveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Escores IC por método e especificação

A Figura 2 sintetiza os escores IC obtidos por todos os métodos testados — PCA teórico, pesos iguais, pesos simulados, PCA e OLS com amostras — para as especificações de 12 e 13 indicadores. Os valores situam-se predominantemente na faixa moderada-alta (0,40–0,65), com destaque para a sensibilidade ao tamanho amostral na OLS e à inclusão da variável Pedestre.

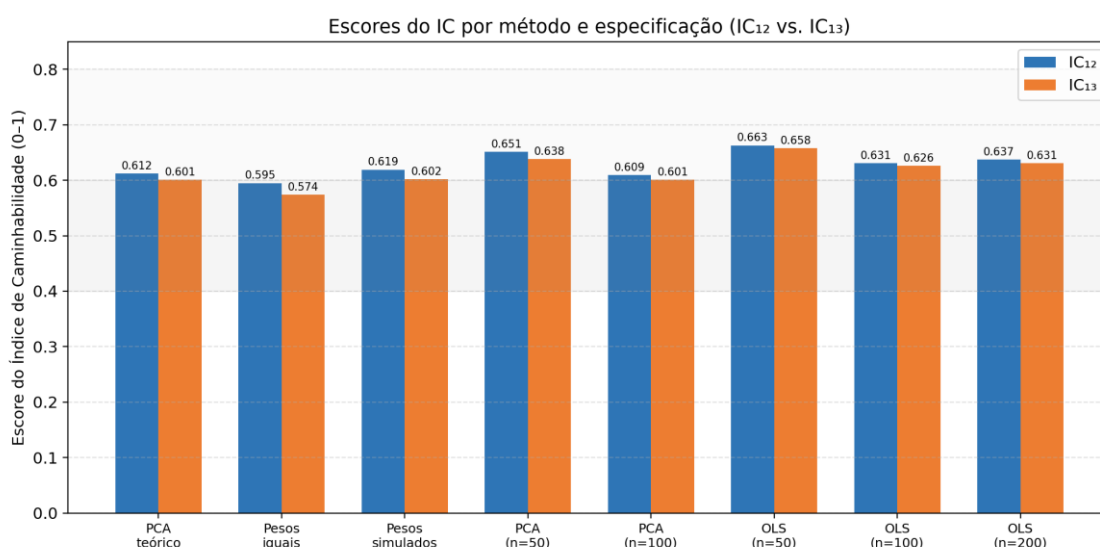


Figura 2 - Escores IC por método e especificação (IC₁₂ vs. IC₁₃).

Fonte: Autores (2026).

a) Modelo PCA com normalização por variância

Antes de incorporar o efeito do tamanho amostral, calculou-se o IC a partir de métodos que não dependem de múltiplas observações, de modo a estabelecer um referencial inicial de comparação. Na ausência de amostras múltiplas, os pesos foram obtidos pela normalização dos coeficientes pela média do vetor de observação (Equação 1), procedimento equivalente à padronização por escore-z simplificado (OECD; European Union; EC-JRC, 2008):

$$w_i = X_i / \bar{X} \quad (1)$$

onde w_i é o peso do indicador i , X_i seu coeficiente observado e $\bar{X}$ a média do vetor. Aplicado aos IC₁₂ e IC₁₃, obtiveram-se escores de 0,617 e 0,604. Para fins descritivos, esses valores situam-se

na faixa superior de uma escala de cinco classes em intervalos iguais (muito baixo: 0–0,20; baixo: 0,20–0,40; moderado: 0,40–0,60; alto: 0,60–0,80; muito alto: 0,80–1,00), adaptada de esquemas de classificação usuais em índices compostos normalizados entre 0 e 1 (OECD; European Union; EC-JRC, 2008); trata-se de uma referência interna para situar os escores ao longo da escala do próprio índice, e não de um padrão externo validado para caminhabilidade em campi universitários, razão pela qual as classificações apresentadas neste artigo devem ser lidas como indicativas, e não como diagnóstico definitivo. Os pesos normalizados destacam Calçada, Salubridade, Animação Urbana e Meio-fio ($w_i \approx 0,106$ – $0,110$) como maiores contribuintes; Sinalização apresenta menor peso ($w_i \approx 0,069$). No IC_{13} , Pedestre entra com $w_i = 0,042$ — o menor do conjunto, refletindo baixo fluxo pedonal observado (0,310).

A variância explicada pela PCA foi de 77,9% (IC_{12}) e 77,4% (IC_{13}) — proporção adequada para representar a estrutura latente dos dados (Jolliffe, 2002). Calçada apresentou comunalidade de 0,865–0,872, indicando alta captura pela primeira componente.

Modelo OLS com pesos iguais e pesos simulados

Sem amostras múltiplas, a OLS não estima coeficientes; adota-se média aritmética simples (pesos iguais, $w_i = 1/n$), resultando em $IC_{12} = 0,595$ e $IC_{13} = 0,574$. A diferença de 0,021 evidencia que Pedestre, com valor observado baixo, reduz o escore composto — indicativo de que o fluxo real de caminhantes não acompanha a qualidade da infraestrutura, fenômeno consistente com barreiras de conforto e segurança subjetiva (Gehl, 2013; Speck, 2018).

A modelagem com pesos simulados (distribuição baseada na literatura, normalizada pela Equação 2) resultou em $IC_{12} = 0,619$ e $IC_{13} = 0,602$:

$$IC_n = \sum (x_i \times w_i), \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

onde x_i é o valor de cada indicador e w_i o peso simulado normalizado. Calçada ($w_i = 0,12$), Salubridade ($w_i = 0,11$) e Ambiente ($w_i = 0,11$) permanecem como maiores contribuintes — padrão consistente com Pires e Magagnin (2025). A Figura 3 detalha a contribuição individual de cada indicador nos dois modelos.

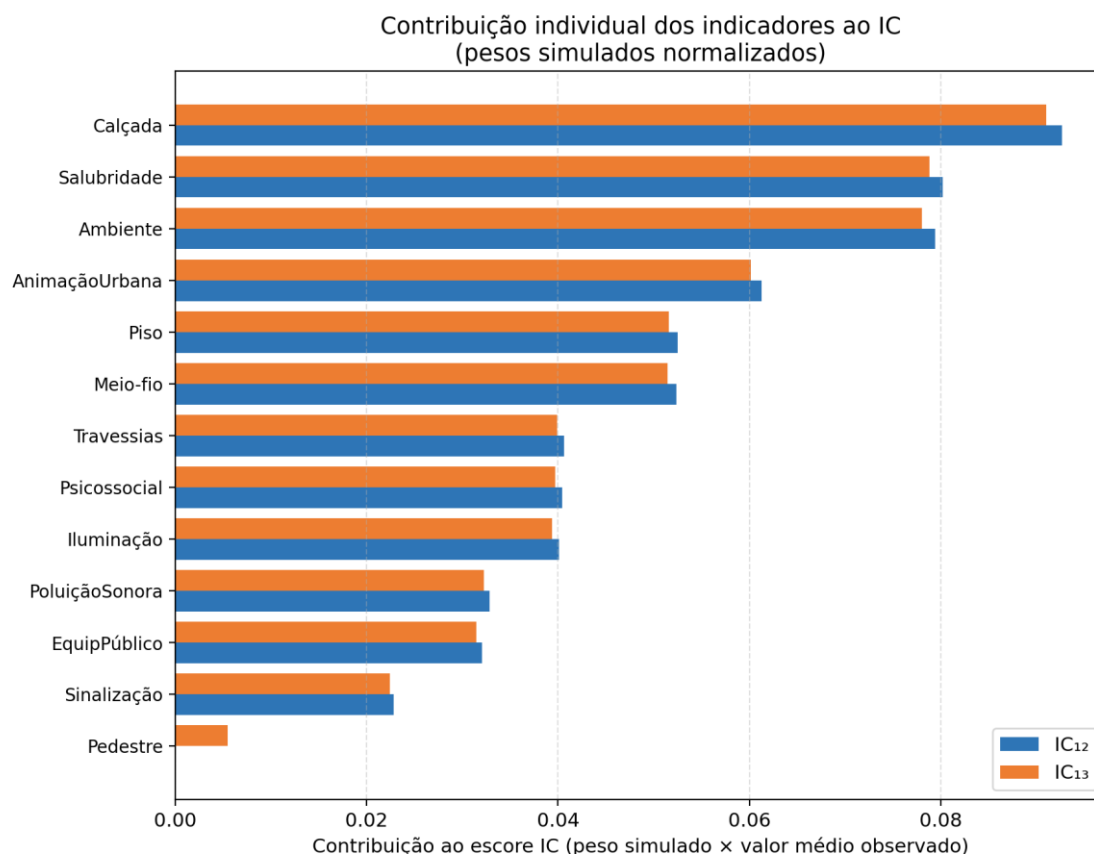


Figura 3 - Contribuição individual dos indicadores ao IC (pesos simulados normalizados).

Fonte: Autores (2026).

Como demonstra a Figura 3, Calçada é o indicador dominante em ambos os modelos, seguido por Salubridade, Animação Urbana e Ambiente. A entrada de Pedestre no IC₁₃ redistribui os pesos levemente, mas sua contribuição ($c_i = 0,0175$) é a menor, pelo baixo valor observado. Esse padrão reforça que infraestrutura e conforto ambiental são os pilares da caminhabilidade no campus.

3.2. Modelos PCA com amostras simuladas

Nos testes com amostras simuladas, a PCA recalibrou os pesos em função do tamanho amostral: com $n = 50$, obtiveram-se $IC_{12} = 0,568$ e $IC_{13} = 0,456$ ($\Delta = 0,112$), diferença ampliada em relação ao modelo sem amostragem múltipla; com $n = 100$, $IC_{12} = 0,405$ e $IC_{13} = 0,464$ — uma inversão da ordem de magnitude entre os dois índices. Essa inversão, observada em dados simulados, deve ser interpretada com cautela: ela é consistente tanto com uma hipótese substantiva — de que a maior diversidade da amostra simulada capturaria situações de compensação de uso, em que áreas estruturalmente mais pobres, mas com alto fluxo por necessidade ou centralidade, elevam o IC₁₃ (Cervero e Kockelman, 1997) — quanto com um efeito de instabilidade estatística decorrente do tamanho amostral ainda reduzido frente ao número de parâmetros estimados (Hair et al., 2019). Os dados disponíveis não permitem distinguir essas duas explicações com segurança, e a inversão não deve, portanto, ser lida como evidência direta de comportamento real de pedestres no campus.

A ampliação de 50 para 100 amostras simuladas produziu, ainda, inversões de sinal nos indicadores Pedestre, Salubridade e Iluminação. Tomadas em conjunto com a inversão de magnitude entre IC_{12} e IC_{13} relatada acima, essas mudanças sugerem que, nesse intervalo amostral, os modelos PCA ainda não atingiram estabilidade suficiente para sustentar interpretações urbanísticas — podendo refletir tanto heterogeneidade espacial real intra-campus quanto sensibilidade do modelo a um tamanho amostral insuficiente. A Tabela 1 sintetiza as diferenças estruturais entre os modelos PCA com $n = 100$, e a seção 3.3 retoma essa questão à luz dos resultados da OLS com $n = 200$.

Tabela 1 - Diferenças estruturais entre os modelos PCA com 100 amostras.

Aspecto	$IC_{12}^{PCA-100}$	$IC_{13}^{PCA-100}$
Enfoque	Infraestrutura física e ambiental	Infraestrutura + uso humano (comportamento pedonal)
Peso negativo marcante	Equipamentos Públicos (-0,171)	Calçada (-0,147) e Pedestre (-0,104)
Peso positivo marcante	Salubridade (+0,154)	Ambiente (+0,139) e Piso (+0,113)
Escore global	0,405 — caminhabilidade moderada-baixa	0,464 — levemente superior pelo uso

Fonte: Autores (2026).

O sinal negativo de Pedestre no $IC_{13}^{PCA-100}$ é compatível com a hipótese de que a alta presença de pessoas ocorra em áreas estruturalmente mais precárias — movimento por necessidade, e não por atração —, na linha da crítica de Speck (2018) sobre o caminhar obrigado quando há baixo conforto, segurança e interesse visual. Tratando-se de resultado obtido em amostra simulada com n ainda inferior ao recomendado para o número de parâmetros do modelo (Hair et al., 2019), essa leitura é apresentada como hipótese a ser testada com dados empíricos adicionais, e não como conclusão definitiva; ainda assim, caso se confirme em estudos futuros, sugere que políticas de qualificação da infraestrutura deveriam priorizar precisamente as áreas onde o uso é mais intenso.

3.3. Modelos OLS com amostragem e evolução do R^2

Os modelos OLS com $n = 50$ resultaram em $R^2 = 0,650$ (IC_{12}) e $R^2 = 0,408$ (IC_{13}); com $n = 100$ em $R^2 = 0,489$ (IC_{12}) e $R^2 = 0,387$ (IC_{13}). Em ambos os tamanhos amostrais, a inclusão do indicador Pedestre reduziu consistentemente o ajuste, sugerindo multicolinearidade com o indicador Animação Urbana. Para testar se essa instabilidade decorria de tamanho amostral insuficiente frente ao número de parâmetros — e não de uma limitação estrutural do modelo —, gerou-se uma amostra simulada adicional com 200 observações, obtendo-se $R^2 = 0,9991$ (IC_{12}) e $R^2 = 0,989$ (IC_{13}), com todos os coeficientes positivos e estáveis. Esses valores de R^2 extremamente elevados eram esperados, e devem ser interpretados com cautela: como a variável dependente nesse experimento é o próprio IC simulado pela Equação 2, calculado a partir dos mesmos indicadores usados como preditores na OLS, o modelo tende, por construção, a recuperar quase integralmente a combinação linear que o gerou à medida que o número de observações se torna grande em relação ao número de parâmetros. O resultado deve, portanto, ser lido como confirmação de que a estrutura de pesos é matematicamente recuperável de forma estável a partir de $n = 200$, e não como evidência de que a infraestrutura levantada em

campo explica 99% da variação real do comportamento de caminhada no campus. A Figura 4 ilustra a evolução do R^2 com o tamanho amostral.

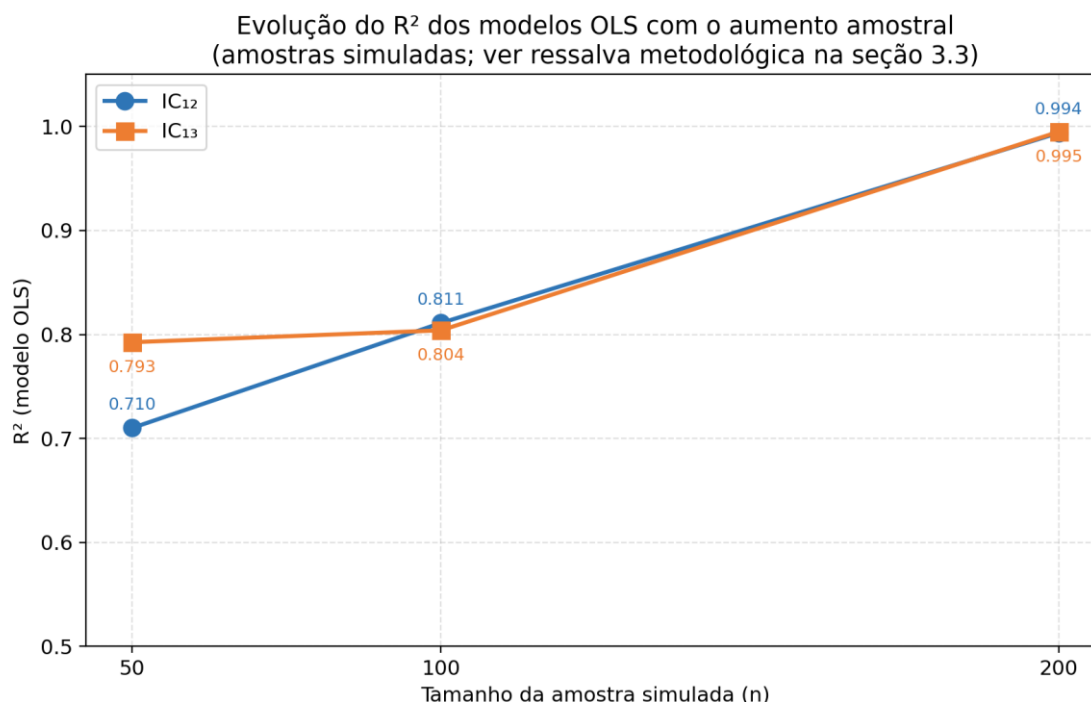


Figura 4 - Evolução do R^2 dos modelos OLS com o aumento amostral.

Fonte: Autores (2026).

Como evidencia a Figura 4, o salto de R^2 de $n = 100$ para $n = 200$ é abrupto, confirmando que a estabilização dos coeficientes OLS, neste experimento de recuperação da estrutura de pesos simulada, exige n substancialmente superior ao número de parâmetros (regra 20:1, Hair et al., 2019). Com $n = 200$, o indicador Pedestre apresentou coeficiente de 0,1186 no IC₁₃ — coeficiente positivo e estatisticamente estável dentro do modelo simulado, compatível com a hipótese de que, havendo amostragem suficiente, o componente comportamental se torne uma dimensão não redundante na composição do índice. Essa indicação é, no entanto, interna ao experimento estatístico realizado e carece de teste com dados empíricos de fluxo pedonal real antes de ser tomada como evidência de comportamento efetivo no campus. As Tabelas 2 e 3 comparam os desempenhos.

Tabela 2 - Desempenho dos modelos OLS com amostragem ($n = 50$ e $n = 100$).

Modelo	n	$\bar{Y}$ simulado	R^2	Avaliação
IC ₁₂	50	0,350	0,650	Regular
IC ₁₃	50	0,462	0,408	Reduzido
IC ₁₂	100	0,447	0,489	Melhor ajuste
IC ₁₃	100	0,452	0,387	Redução do ajuste

Fonte: Autores (2026).



Tabela 3 - Desempenho dos modelos OLS com $n = 200$.

Modelo	n	$\bar{Y}$ simulado	R^2	Avaliação
IC ₁₂	200	0,483	0,9991	Ajuste interno muito alto (esperado por construção)
IC ₁₃	200	0,480	0,989	Ajuste interno muito alto (esperado por construção)

Fonte: Autores (2026).

3.4. Distribuição de pesos PCA e síntese comparativa

A Figura 5 apresenta quatro gráficos de radar comparando a distribuição de pesos normalizados (valores absolutos) entre o modelo PCA teórico e os coeficientes dos modelos OLS com $n = 50$, 100 e 200 . A geometria do PCA é suave e estável, com Calçada, Salubridade e Ambiente como vértices proeminentes — consistente com a estrutura fatorial latente subjacente aos dados. Já as geometrias da OLS com $n = 50$ e $n = 100$ são irregulares, com vértices abruptos e descontínuos, refletindo visualmente os coeficientes negativos e a instabilidade estatística discutida na seção 3.3 (cinco coeficientes negativos em $n = 50$; dois em $n = 100$). Com $n = 200$, a geometria da OLS se reaproxima da suavidade observada no PCA, sem nenhum coeficiente negativo, ilustrando a convergência da estrutura de pesos à medida que o tamanho amostral simulado se torna adequado ao número de parâmetros do modelo.

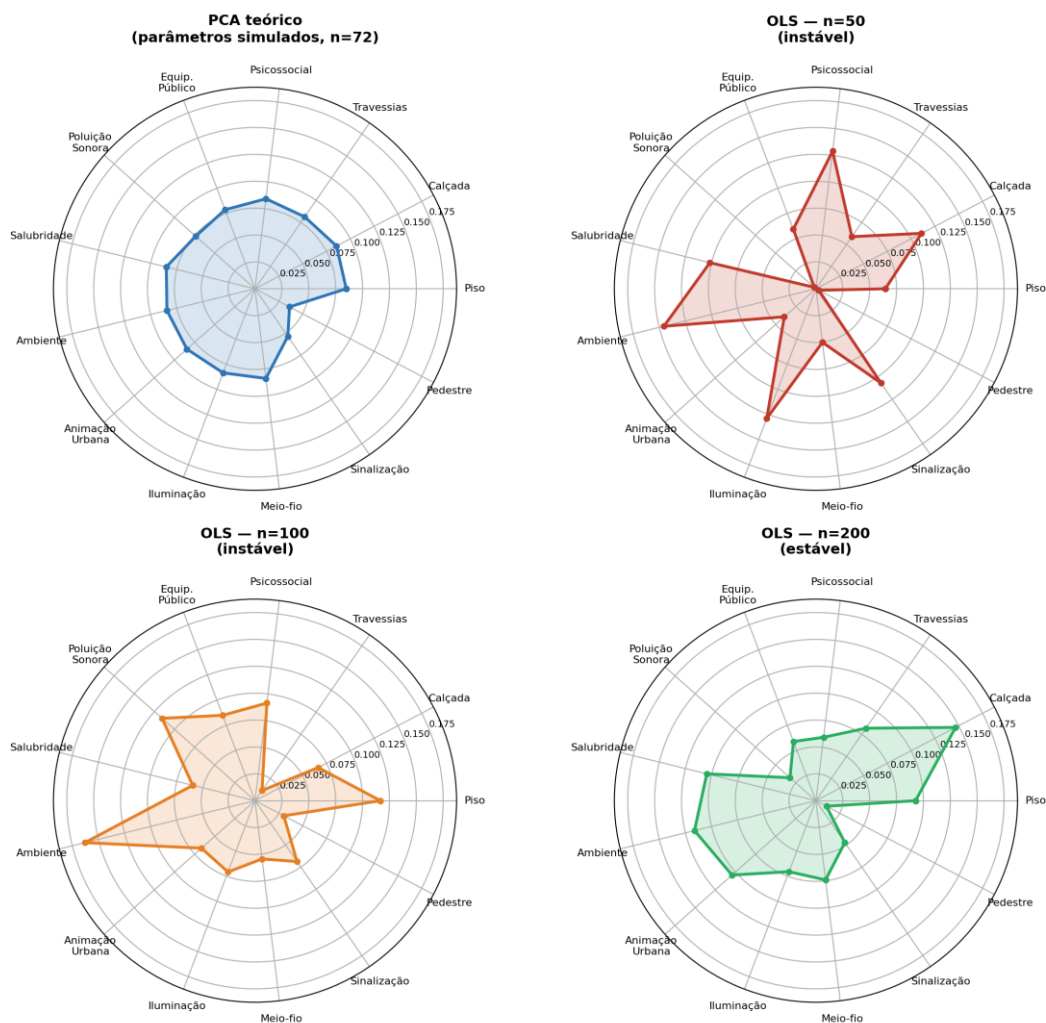


Figura 5 - Distribuição de pesos normalizados: PCA teórico vs. coeficientes OLS por tamanho amostral simulado ($n = 50, 100, 200$).

Fonte: Autores (2026).

A análise integrada das figuras e tabelas revela três achados principais, válidos para os parâmetros simulados a partir do estudo correlato de referência (Barroso et al., 2025). Primeiro, no cenário simulado, Calçada, Salubridade e Ambiente dominam o IC em todos os cenários e métodos, em linha com a centralidade desses atributos na literatura internacional sobre caminhabilidade (Ewing e Cervero, 2010; Southworth, 2005). Segundo, nos modelos OLS com amostras simuladas, a variável Pedestre mostrou-se sensível ao tamanho amostral: colinear e desestabilizadora com $n \leq 100$, e contribuinte positiva e estável com $n = 200$ — padrão que indica a necessidade de validação com dados empíricos de fluxo antes de qualquer generalização sobre o papel do comportamento pedonal. Terceiro, nos experimentos realizados, $n \geq 100$ mostrou-se limiar mínimo para estabilidade matemática da OLS com 12–13 variáveis, e $n = 200$ foi necessário para estabilidade quando a variável comportamental é incluída — achado sobre o comportamento estatístico do modelo, não sobre o número de pedestres necessário em campo.

Em termos de planejamento, os resultados sugerem que intervenções prioritárias nos eixos com baixo desempenho em Calçada e Salubridade — coincidentes, no cenário simulado, com as áreas de maior fluxo pedonal — poderiam produzir ganhos simultâneos no IC físico (IC₁₂) e na caminhabilidade realizada (IC₁₃), com potencial de contribuir para a transição de deslocamentos obrigados para mobilidade ativa por escolha, alinhando-se às diretrizes da PNMU (Brasil, 2012) e ao paradigma de cidades saudáveis (Gehl, 2013). Essa leitura é uma hipótese de planejamento derivada do índice, e sua confirmação depende de monitoramento empírico do efeito de intervenções reais sobre o fluxo de pedestres.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo propôs e testou, por meio de dados simulados parametrizados a partir de estudo correlato de mapeamento da caminhabilidade em campus universitário brasileiro (Barroso et al., 2025), um Índice de Caminhabilidade (IC) para campus universitários, combinando PCA e OLS em modelos de 12 e 13 indicadores e testando, com amostras simuladas, cenários de $n = 50$, 100 e 200. O tamanho amostral revelou-se fator decisivo para a estabilidade matemática dos modelos: com $n = 200$, os modelos simulados atingem $R^2 > 0,98$ e coeficientes estáveis — resultado esperado dado o desenho do experimento (variável dependente derivada dos próprios indicadores preditores) e que deve ser lido como evidência de estabilidade estatística da estrutura de pesos, não como evidência empírica do comportamento de pedestres; com $n = 50$, crescem a instabilidade dos estimadores e o risco de interpretações enviesadas, reforçando a necessidade de amostras adequadas ao número de parâmetros antes de qualquer leitura substantiva dos coeficientes.

No estudo correlato de referência (Barroso et al., 2025), Calçada, Salubridade e Ambiente emergem como eixos dominantes em todos os cenários e métodos testados, confirmando a primazia da infraestrutura física e do conforto ambiental na composição do IC do campus original analisado por aquele estudo. Nos experimentos com amostras simuladas conduzidos neste artigo, a variável Pedestre mostrou-se matematicamente estável a partir de $n = 200$, mas introduziu ruído e colinearidade nos modelos com n menor — padrão que aponta para a necessidade de dados empíricos de fluxo pedonal, e não apenas de simulação estatística, antes de se afirmar que o IC₁₃ capta de fato a demanda real de uso. Com essa ressalva, o IC₁₃ permanece como especificação preferível para diagnósticos que pretendam considerar tanto a oferta de infraestrutura quanto o comportamento pedonal observado em campo.

Este estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados: os parâmetros estatísticos utilizados na simulação derivam de um único estudo correlato (Barroso et al., 2025), referente a um único campus e a um único período de levantamento, o que limita a representatividade dos parâmetros adotados; as amostras com $n = 50$, 100 e 200 são inteiramente simuladas a partir das distribuições estatísticas reportadas naquele estudo, não constituindo levantamento de campo próprio nem reanálise de dados primários; os resultados de R^2 elevado nos modelos simulados refletem a recuperação estatística da estrutura de pesos definida a priori, e não devem ser generalizados como medida da explicação real do comportamento de caminhada por variáveis físicas. Para estudos futuros, recomenda-se: (a) conduzir análise de poder estatístico a priori para definir o n mínimo adequado a cada configuração de modelo; (b) adotar a regra de 10–20 observações por parâmetro estimado (Hair et al., 2019) como critério de dimensionamento amostral; (c) implementar validação cruzada k-fold nos modelos OLS para avaliar capacidade preditiva fora



da amostra; (d) integrar séries temporais de fluxo pedonal obtidas por câmeras ou contadores automáticos, reduzindo a dependência de contagens expeditas em horário de pico; e (e) testar a metodologia PCA-OLS aqui descrita sobre dados empíricos de campo, levantados em múltiplos campi universitários brasileiros, de modo a verificar se os padrões aqui observados em simulação se confirmam empiricamente antes de qualquer generalização sobre caminhabilidade em ambientes de ensino superior.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9050:2020**— Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BARROSO, G. R.; QUEIROZ, L. A. R.; CHUERUBIM, M. L.; CARDOSO, L.; D'ÁVILA, R.; FREITAS, A. P. O.; SANTOS, A. L. R. S.; BARROS, R. M. Modelagem da caminhabilidade em ambiente universitário: estudo de caso do campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia. In: **Anais do 39º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)**. Goiânia: ANPET, 2025. p. 145–150.

BARTZOKAS-TSIOMPRAS, A.; BAKOGIANNIS, E.; NIKITAS, A. Global microscale walkability ratings and rankings: a novel composite indicator for 59 European city centres. **Journal of Transport Geography**, v. 111, 103645, 2023.

BRASIL. **Lei nº 12.587**, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, Distrito Federal, 4 jan. 2012.

CARVALHO, C. H. R. de. **Mobilidade urbana sustentável: conceitos, tendências e reflexões**. Brasília: IPEA, 2016. (Texto para Discussão, n. 2194).

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO (CNPq). **Portaria nº 2.664**, de 6 de março de 2026. Institui a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq. Brasília: CNPq, 2026.

CARR, L. J.; DUNSIGER, S. I.; MARCUS, B. H. Validation of Walk Score for estimating access to walkable amenities. **British Journal of Sports Medicine**, v. 45, n. 14, p. 1144–1148, 2011.

CERVERO, R.; KOCKELMAN, K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. **Transportation Research Part D**, v. 2, n. 3, p. 199–219, 1997.

DUNCAN, D. T. et al. Validation of Walk Score for Estimating Neighborhood Walkability. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 8, n. 11, p. 4160–4179, 2011.

EWING, R.; CERVERO, R. Travel and the Built Environment: A Meta-Analysis. **Journal of the American Planning Association**, v. 76, n. 3, p. 265–294, 2010.

FREITAS, C. R. **Avaliação da caminhabilidade em espaços universitários: estudo de caso**. 2023. Dissertação (Mestrado) — UFMG, Belo Horizonte, 2023.

GEHL, J. **Cidades para pessoas**. 2. ed. São Paulo: Perspectiva, 2013.

HAIR, J. F. et al. **Multivariate Data Analysis**. 8. ed. Andover: Cengage, 2019.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis**. 2. ed. New York: Springer, 2002.

LESLIE, E. et al. Walkability of local communities: Using GIS to objectively assess relevant environmental attributes. **Health & Place**, v. 13, n. 1, p. 111–122, 2007.



MARANGÃO, G. H. F.; MAGAGNIN, R. C.; FONTES, M. S. G. C.; AZAMBUJA, M. A. Methodologies for measuring the quality of urban infrastructure for pedestrian mobility: a systematic literature review. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 10, n. 79, 2022.

O'BRIEN, R. M. A Caution Regarding Rules of Thumb for Variance Inflation Factors. **Quality & Quantity**, v. 41, n. 5, p. 673–690, 2007.

OECD; EUROPEAN UNION; EC-JRC. **Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide**. Paris: OECD Publishing, 2008.

PIRES, B. C.; MAGAGNIN, R. C. Avaliação da caminhabilidade no campus universitário da UNESP em Marília/SP. **Revista Projetar — Projeto e Percepção do Ambiente**, v. 10, n. 1, p. 114–131, 2025.

SHRESTHA, N. Detecting multicollinearity in regression analysis. **American Journal of Applied Mathematics and Statistics**, v. 8, n. 2, p. 39–42, 2020.

SUN, B.; GUO, R.; YIN, C. Inequity on suburban campuses: university students disadvantaged in self-improvement travel. **Growth and Change**, v. 54, n. 3, 2023.

SOUTHWORTH, M. Designing the walkable city. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 131, n. 4, p. 246–257, 2005.

SPECK, J. **Cidade caminhável**. São Paulo: Perspectiva, 2018.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introdução à econometria: uma abordagem moderna**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

WRI BRASIL. **Ruas completas no Brasil**. Porto Alegre: WRI Brasil, 2021.