

# Análise de um Sistema de Roteamento Personalizado Multimodal e Multicritério com Ênfase em Plataformas de Redes Sociais Baseadas em Localização

Camilo Santos<sup>1</sup>, Matheus Brito<sup>1</sup>, Eduardo Cerqueira<sup>1</sup> e Denis Rosário<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará (UFPA) – Belém – Pará – Brazil

camilo.santos@icen.ufpa.br, matheus.moraes.brito@itec.ufpa.br,  
cerqueira@ufpa.br, denis@ufpa.br

**Abstract.** *The growth in the availability of route recommendation services results from the increased need for transportation. However, most of these services are based mainly on route time and distance, disregarding individual user preferences. This work proposes a multi-criteria and multimodal route selection model, highlighting route customization by considering user preference, travel cost, and vehicle emissions. This system promotes the determination of more economical, faster, and cheaper routes, benefiting users and drivers.*

**Resumo.** *O crescimento da disponibilidade de serviços de recomendação de rotas é uma consequência do aumento da necessidade de locomoção. Porém, tais serviços, em sua maioria, baseiam-se principalmente no tempo e distância das rotas, desconsiderando preferências individuais dos usuários. Este trabalho propõe um modelo de seleção de rotas multicritério e multimodal, destacando a personalização da rota ao considerar a preferência do usuário, custo de locomoção e emissões de veículos. Este sistema promove a determinação de rotas mais econômicas, rápidas e baratas, beneficiando usuários e condutores.*

## 1. Introdução

O contexto urbano enfrenta desafios significativos no setor de transporte, evidenciados pelo aumento do congestionamento e o potencial colapso do sistema devido ao uso intensivo de veículos privados e serviços de transporte por aplicativo [Afrin and Yodo 2020]. Esse fenômeno resulta na predominância de carros particulares nas ruas das grandes cidades, o que, por sua vez, contribui para a elevação das emissões de gases de efeito estufa, principalmente devido à dependência desses veículos em motores de combustão interna. Notavelmente, o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) representa 75% das emissões veiculares, causando problemas de saúde para os moradores urbanos devido à exposição a poluentes como dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ) e partículas finas, todos subprodutos da combustão de combustíveis fósseis.

A disparidade nos meios de transporte urbanos, com predominância de veículos particulares sobre modos alternativos menos poluentes, exige um equilíbrio para maximizar a eficiência da infraestrutura urbana, reduzir congestionamentos e promover opções de deslocamento econômicas, rápidas e sustentáveis [Hörcher and Tirachini 2021]. As iniciativas de cidades inteligentes surgem como soluções promissoras, oferecendo tecnologias que facilitam a escolha de rotas com menor impacto ambiental. Estas incluem o uso de sensores para monitorar emissões e redes sociais baseadas em localização para otimizar a mobilidade urbana, contribuindo significativamente para a melhoria da qualidade de vida nas cidades ao proporcionar acesso a alternativas de transporte mais eficientes e menos poluentes.

As Redes Sociais baseadas em Localização (LBSN) desempenham um papel crucial na obtenção de dados confiáveis sobre a mobilidade dos usuários, permitindo a sugestão de rotas que beneficiam múltiplos usuários. Através do compartilhamento de localização nas redes sociais, é possível coletar informações precisas sobre o deslocamento urbano dos usuários, facilitando a recomendação de rotas eficientes. O *Twitter* e o *Foursquare* são exemplos de redes sociais que utilizam esse rastreamento.

Este trabalho apresenta a avaliação de um serviço de roteamento multimodal (rotas híbridas) que oferece aos usuários rotas econômicas e sustentáveis, utilizando dados geolocalizados para definir origens e destinos reais. O método de seleção baseado no Processo Analítico Hierárquico (AHP) é aplicado para analisar os parâmetros das rotas através de perfis de preferência dos usuários com seus respectivos pesos (preferências) 3.3, oferecendo alternativas de transporte como carros, ônibus e bicicletas. A análise revela que a implementação dessas soluções pode resultar em uma melhoria de 20% a 40% na seleção de rotas balanceadas, além de reduzir em 30% a 40% a duração, o custo e as emissões dos transportes urbanos, comparativamente às rotas focadas em critérios únicos.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados, destacando suas vantagens e desvantagens. A Seção 3 descreve o serviço de roteamento multimodal proposto. A Seção 4 apresenta os resultados obtidos pela solução. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

Esta seção resume os conceitos e estudos relacionados a escolha de rotas, abordagens multimodais para deslocamento urbano e análise da poluição de transportes, destacando as lacunas no conhecimento existente. A análise de mobilidade urbana utilizando LBSN e diferentes frameworks mostra o potencial de melhoria na experiência de viagem, porém muitas dessas abordagens se concentram em aspectos isolados, como padrões de deslocamento, não integrando considerações sobre poluição ou preferências do usuário. Soluções como o SMAFramework e propostas de roteamento multimodal focam na eficiência de deslocamento, mas negligenciam impactos ambientais e a personalização de rotas. Similarmente, alternativas para previsão de poluição atmosférica dependem de infraestrutura específica e não abordam a mobilidade de forma integrada.

Por conta disso, a pesquisa atual sublinha a importância de combinar dados de mobilidade, preferências do usuário e informações sobre emissões em uma abordagem holística para selecionar rotas menos poluentes e melhorar a qualidade de vida nas cidades. Todas essas condições e limitações das abordagens existentes são documentadas e comparadas nas referências apresentadas na Tabela 1, destacando a necessidade de uma solução integrada que considere todos esses fatores simultaneamente.

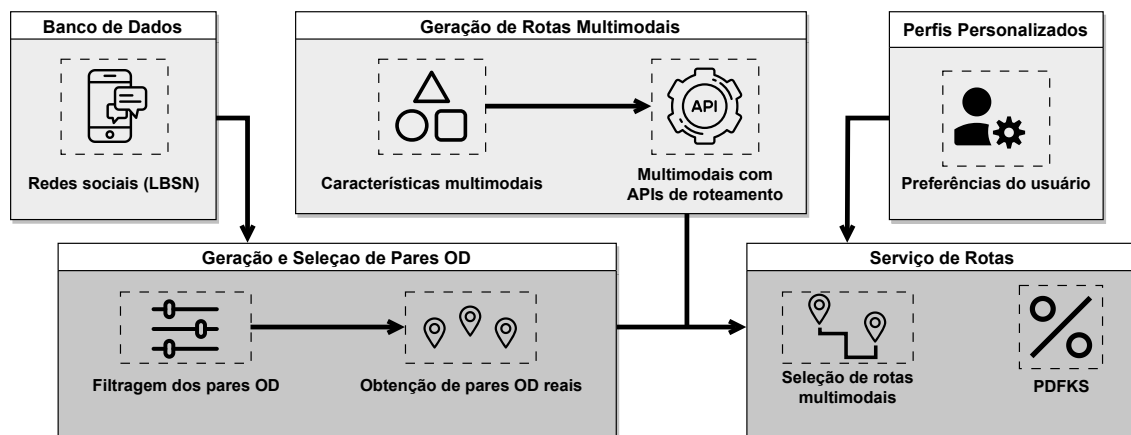
**Tabela 1. Comparação das Características de Trabalhos Relacionados**

Artigo	Uso de Dados LBSN	Roteamento Multimodal	Seleção Multicritério	Parâmetro de Emissão
[Ferreira et al. 2020]	✓			
[Rodrigues et al. 2018b]	✓	✓		
[Rodrigues et al. 2018a]	✓			
[Kalajdjieski et al. 2020]				✓
[Zou et al. 2020]				✓
[Brito et al. 2023]		✓	✓	✓
Metodologia Proposta	✓	✓	✓	✓

## 3. Serviço de Roteamento Multimodal Personalizado

Esta seção apresenta a abordagem utilizada integrada nas rotas urbanas multimodais existentes. A incorporação da metodologia de emissões proposta pode gerar novos resul-

tados para a análise de emissões em determinadas áreas, onde os dados de localização do usuário são coletados e as emissões de CO<sub>2</sub> para modos selecionados de rotas de geração integrada são calculadas e quantificadas. A Figura 1 apresenta as diversas etapas do método de geração de rotas urbanas multimodais e a relação com o cálculo das principais emissões de gases de efeito estufa proposto neste trabalho.



**Figura 1. Visão geral do serviço de roteamento multimodal personalizado**

As etapas correspondentes a metodologia de roteamento multimodal urbano proposto são descritas ao longo desta seção. A etapa de “Redes sociais (LBSN)” está descrita na Subseção 3.1, descrevendo a coleta e o processamento de dados provenientes de LBSNs. As etapas de “Filtragem dos pares OD” e “Obtenção de pares OD reais” também estão descritas na Subseção 3.1, onde a metodologia de filtragem e obtenção de pares origem e destino (OD) são apresentadas. As etapas de “Características multimodais” e “Multimodais com APIs de roteamento”, ambas descritas na Subseção 3.2, especificam a relação entre a abordagem de emissões e precificação das rotas com a metodologia de roteamento urbano híbrido, assim como a utilização de APIs de roteamento para geração de rotas reais.

As etapas de “Preferências do usuário” e “Seleção de rotas multimodais”, ambas apresentadas na Subseção 3.3, descrevem os pesos de cada perfil atribuído aos diferentes parâmetros das rotas e a utilização do método AHP para seleção de rotas por perfil. Por fim, a etapa de “PDFKS”, apresentada na Seção 4, descreve a utilização do Desvio Percentual de um Padrão Conhecido (PDFKS) para a avaliação das rotas selecionadas.

### 3.1. Geração de Pares OD

A escolha dos dados geolocalizados utilizados como entrada no método é arbitrária, pois em qualquer cenário urbano é possível aplicar o serviço, com foco na usabilidade de usuários e planejadores urbanos. A limitação da utilização dos dados está para o formato de *timestamp* utilizado e a maneira que foram registrados as coordenadas de origem e destino. Todo registro geolocalizado contém identificação de usuário anônimo, mantendo a segurança dos dados. O correto estabelecimento da relação espaço-temporal com o usuário define viagens urbanas válidas.

Definimos a utilização de LBSN com *check-ins* do serviço *Foursquare* com as coordenadas e informação de data/hora, junto com o registro anônimo dos usuários. Tal ferramenta conta com os elementos necessários para uma análise prática do tráfego urbano [Rodrigues et al. 2019]. Considerando a cobertura limitada registrada no conjunto

de dados, optou-se por utilizar apenas a área urbana de Chicago, do estado Illinois nos Estados Unidos, para a análise completa.

Realizamos mineração nos dados selecionados para determinação e análise dos padrões de viagem dos usuários, para posterior classificação. Os dados brutos de viagem obtidos da API do *Foursquare* são classificados e filtrados combinando com registros de viagens válidas de dias iguais, contendo também informações sobre distância da viagem, mudanças de horário e velocidade para validar corretamente de viagens urbanas. Vale ressaltar que, os dados são coletados de forma anônima, a fim de garantir a privacidade dos usuários por trás dos dados, não apresentam nomes e textos escritos pelos usuários. A manipulação de dados executada neste trabalho leva em conta a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD).

### 3.2. Geração de Rotas Multimodais

Para construção da tupla para cada opção de modal a cada rota, definimos 4 fatores relacionados as rotas para a realização da seleção: duração, distância, emissão e preço. Com tais características definidas, os índices de pesos atribuídas para cada opção de modal é combinada a preferência do usuário para a obtenção da melhor rota.

Os índices de duração ( $p_d$ ), distância ( $p_l$ ), emissão de  $CO_2$ , e preço são elementos cruciais na seleção do modal de transporte, refletindo diretamente no tempo de viagem, consumo de combustível e custos associados, impacto ambiental das emissões de gases de efeito estufa (GEE), e o custo financeiro para o usuário [HERE 2023, IPCC and Houghton 1996]. A obtenção de informações sobre duração e distância pode ser feita por meio de APIs como a do HERE Maps, enquanto as emissões de  $CO_2$  são estimadas com base em diretrizes do IPCC e metodologias específicas, contribuindo para uma decisão informada que equilibra eficiência, custo e sustentabilidade ambiental na escolha entre diferentes opções de transporte público e privado.

A Equação 1 estima o consumo de energia em terajoules ( $TJ$ ) a partir do consumo de combustível em litros ( $l$ ), aplicando fatores de conversão e correção para determinar o conteúdo energético e as emissões de carbono. Já a Equação 2 calcula o conteúdo de carbono em gigagramas (GgC) usando o fator de emissão e o consumo de energia, convertendo para toneladas de carbono. Por fim, a Equação 3 determina as emissões de  $CO_2$  a partir do conteúdo de carbono calculado.

$$CC = CA \times F_{conv} \times 45,2 \times 10^{-3} \times F_{corr} \quad (1)$$

$$QC = CC \times F_{emiss} \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$ECO_2 = QC \times 44/12 \quad (3)$$

### 3.3. Método de Seleção

O método de seleção escolhido foi o AHP [Karimi et al. 2020], o qual combina através de cálculos reduzidos a melhor decisão dentre um grande número de critérios. Para a utilização dos valores obtidos nas características dos modais para a seleção de rotas, os valores brutos de cada fator foram normalizados em uma escala de zero a um.

O AHP é um método robusto para a seleção de rotas, empregando uma abordagem hierárquica dividida em objetivos, critérios e alternativas para auxiliar na tomada de

decisão. Neste contexto, o objetivo é a seleção eficiente de uma rota/modal, considerando os critérios como duração, distância, emissão e preço, e alternativas representadas pelas diversas rotas disponíveis. A definição de pesos para quatro perfis distintos (trabalhador, verde, seguro e turístico) permite uma análise detalhada, onde cada perfil enfatiza critérios diferentes — duração e segurança para trabalhador e seguro, menor impacto ambiental para verde e custo-benefício para turístico — refletindo as preferências específicas de cada usuário na escolha do modo de transporte.

Para estabelecer a relação entre critérios e alternativas, o AHP utiliza comparações em pares com uma escala de julgamento que varia de "igual importância" a "extrema importância". Esta metodologia permite a criação de uma matriz de decisão que simplifica a complexidade do problema, levando em consideração uma ampla gama de critérios. Desta forma, foi criada uma matriz para cada perfil, e assim os diferentes perfis de usuários gerados apresentam pesos variados aos critérios considerados, garantindo uma seleção personalizada da rota que melhor atende às suas necessidades específicas. A Tabela 2 demonstrada na análise reflete essas preferências, fundamentando a seleção de rotas baseada no perfil de cada usuário.

**Tabela 2. Índice de peso para cada característica atribuída aos 4 perfis de seleção**

Perfil AHP	Duração	Distância	Emissão	Preço
Trabalhador	<b>0.578</b>	0.266	0.038	0.118
Verde	0.083	0.181	<b>0.692</b>	0.044
Seguro	<b>0.509</b>	0.342	0.060	0.088
Turista	0.093	0.319	0.121	<b>0.466</b>

A eficácia do AHP não se limita apenas à seleção baseada em critérios múltiplos, mas também inclui a métrica de consistência e a geração de ranking para as alternativas, assegurando uma tomada de decisão informada e objetiva. Este método, portanto, não só destaca a importância dos critérios individuais na escolha do modal de transporte, mas também fornece uma abordagem sistemática e quantificável para otimizar a experiência de viagem, considerando eficiência, custo e impacto ambiental.

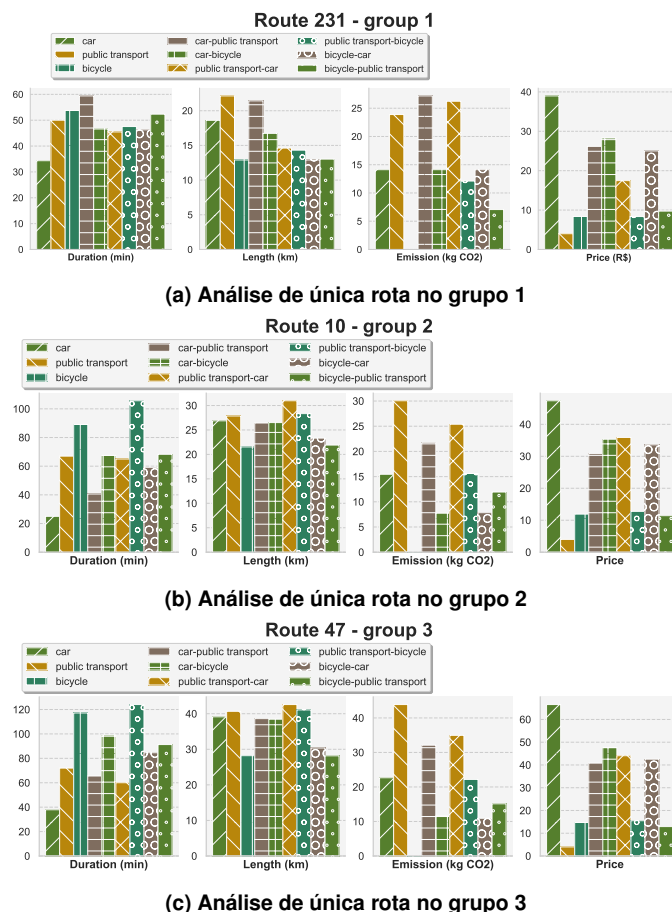
## 4. Avaliação

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela metodologia apresentada, no contexto da cidade de Chicago, pela comparação dos diferentes trajetos gerados e suas comodidades aos perfis de usuários [Rodrigues et al. 2019, Brito et al. 2022, Brito et al. 2023]. Para a implementação do trabalho proposto, a linguagem de programação Python 3.10.9 foi utilizada, juntamente com as bibliotecas pyDecision 4.3.9 para implementar o método AHP e matplotlib 3.7.1 para gerar gráficos e exibir análises comparativas entre os fluxos das rotas avaliadas.

### 4.1. Resultados

É importante destacar que, para uma análise mais precisa e direta das rotas geradas com diferentes valores de distância, o conjunto de dados foi separado em três categorias, baseando-se nas distâncias mínimas e máximas encontradas para criar faixas de intervalo uniformemente distribuídas. Tal separação se faz essencial, pois distâncias maiores tendem a resultar em maiores valores de tempo, emissão de poluentes e custo. As rotas do primeiro grupo variam de 5 a 23 km, as do segundo de 24 a 35 km, e as do terceiro grupo vão de 36 km até a distância máxima registrada no conjunto de dados.

A Figura 2 mostra a análise de rotas individuais para cada um dos três grupos de rotas gerados. A Figura 2a apresenta um exemplo de percurso mais curto, onde é possível observar o excelente desempenho da bicicleta quanto a emissão, ao contrário do transporte público. Já a Figura 2b demonstra como a duração torna-se um empecilho para a bicicleta em rotas mais longas, chegando ao máximo na combinação transporte público e bicicleta. Por fim, as rotas mais longas no grupo 3, ilustrado pela Figura 2c apresentam uma diferença positiva na duração entre o carro e os outros modais, ao custo de níveis elevados de emissão e preço.

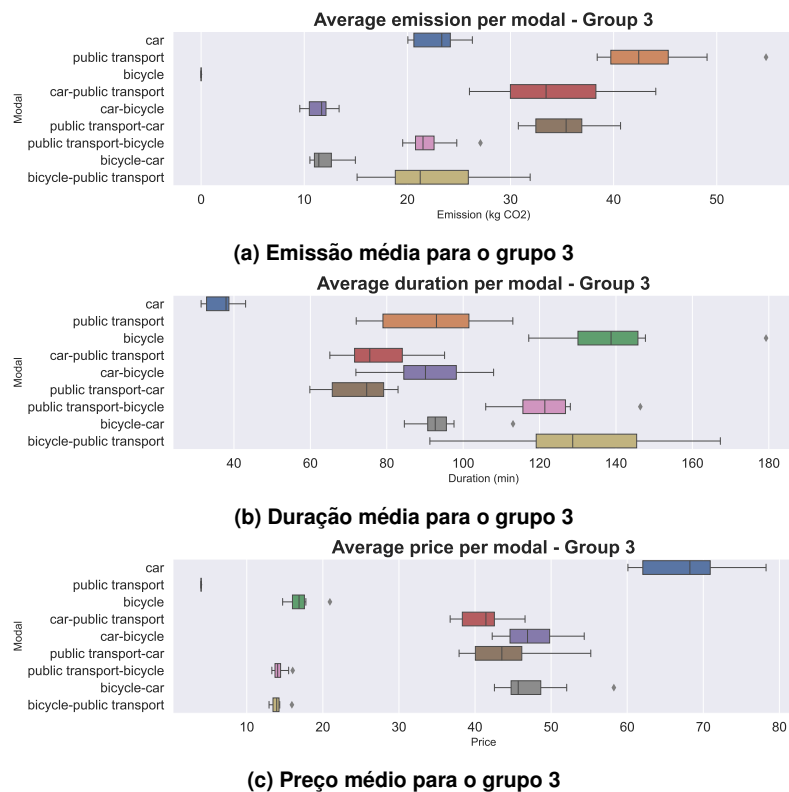


**Figura 2. Análise dos modos de transporte em uma rota de cada grupo**

Os pontos abordados na Figura 2 podem ser exemplificados pelas médias dos fatores encontrados nos diferentes grupos de rotas. A exemplo, tem-se a Figura 3 que apresenta um nível de emissão constante nas rotas com bicicletas, como mostra a Figura 3a, porém uma média elevada de duração nas mesmas rotas longas do grupo 3 na Figura 3b. Uma opção equilibrada entre a emissão e duração em rotas mais longas é a permutação entre o transporte particular (como o carro) e a bicicleta. Para a Figura 3c, é possível observar a disparidade entre o carro dos demais modais no custo de locomoção em rotas longas, apesar de sua excelente duração, apresentando uma redução no custo em combinações como carro-transporte público e bicicleta-transporte público.

## 5. Conclusão

O estudo apresentado ressaltou a eficiência de perfis de escolha de transporte equilibrados e a importância de métodos de seleção simples e robustos, e integração de modos de trans-



**Figura 3. Emissão, duração e preço médio para o grupo 3**

porte, utilizando dados provenientes de Redes Sociais Baseadas em Localização (LBSN). Este trabalho explorou combinações de transporte em ambientes urbanos complexos, indicando que enquanto veículos particulares podem oferecer eficiência, alternativas como ônibus, trens e bicicletas podem ser igualmente viáveis e contribuir significativamente para a redução do congestionamento urbano, graças à sua maior capacidade de transporte de passageiros.

Para futuras investigações, simulações de mobilidade urbana poderão explorar ajustes nos parâmetros de seleção para adaptar-se a variados contextos urbanos e comportamentais. A integração de APIs para acessar dados contextuais em tempo real poderá aprimorar a precisão e complexidade dos dados, atendendo melhor às necessidades dos usuários e auxiliando planejadores urbanos na evolução do planejamento e gestão urbana. A implementação de métodos de escolha baseados em aprendizado de máquina abrange a heterogeneidade dos cenários urbanos implantados e a aquisição de perfis de usuário automática, sendo limitação do método AHP.

## 6. Contexto do trabalho

As soluções apresentadas neste documento são fruto do trabalho de iniciação científica e trabalho de conclusão de curso desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa intitulado de "MobUrb-CIH: Arcabouço para Otimizar a Mobilidade Urbana em Cidades Inteligentes e Humanizadas" e financiado pela Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA). Este trabalho foi desenvolvido em colaboração com um aluno de mestrado e o trabalho foi publicado no Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC (Qualis A4) e submetido para a revista ad hoc network (qualis A1). O aluno colaborou na implementação da metodologia proposta, e para este

trabalho foi avaliado a metodologia proposta em no dataset de Chicago.

## Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e a Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA) sob concessão 054/2021.

## Referências

- Afrin, T. and Yodo, N. (2020). A survey of road traffic congestion measures towards a sustainable and resilient transportation system. *Sustainability*, 12(11):4660.
- Brito, M., Martins, B., Santos, C., Medeiros, I., Araújo, F., Seruffo, M., Oliveira, H., Cerqueira, E., and Rosário, D. (2023). Personalized experience-aware multi-criteria route selection for smart mobility. In *Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 504–517. SBC.
- Brito, M., Santos, C., Oliveira, H., Cerqueira, E., and Rosário, D. (2022). Air pollution calculation for location based social networks multimodal routing service. In *Proceedings of the 6th Urban Computing Workshop*, pages 280–293, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Ferreira, A. P., Silva, T. H., and Loureiro, A. A. (2020). Uncovering spatiotemporal and semantic aspects of tourists mobility using social sensing. *Computer Communications*, 160:240–252.
- HERE (2023). Build apps with here maps api and sdk platform access: Here developer.
- Hörcher, D. and Tirachini, A. (2021). A review of public transport economics. *Economics of transportation*, 25:100196.
- IPCC and Houghton, J. (1996). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Greenhouse Gas Inventory Workbook*. OECD.
- Kalajdjieski, J., Zdravevski, E., Corizzo, R., Lameski, P., Kalajdziski, S., Pires, I. M., Garcia, N. M., and Trajkovik, V. (2020). Air pollution prediction with multi-modal data and deep neural networks. *Remote Sensing*, 12(24):4142.
- Karimi, H., Sadeghi-Dastaki, M., and Javan, M. (2020). A fully fuzzy best–worst multi attribute decision making method with triangular fuzzy number: A case study of maintenance assessment in the hospitals. *Applied Soft Computing*, 86:105882.
- Rodrigues, D., Santos, F., Rocha Filho, G., Akabane, A., Cabral, R., Immich, R., L. Junior, W., Cunha, F., Guidoni, D., Silva, T., Rosário, D., Cerqueira, E., Loureiro, A., and Villas, L. (2019). Computação urbana da teoria à prática: Fundamentos, aplicações e desafios. In *Minicursos do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 51–91. SBC.
- Rodrigues, D. O., Boukerche, A., Silva, T. H., Loureiro, A. A., and Villas, L. A. (2018a). Combining taxi and social media data to explore urban mobility issues. *Computer Communications*, 132:111–125.
- Rodrigues, D. O., Fernandes, J. T., Curado, M., and Villas, L. A. (2018b). Hybrid context-aware multimodal routing. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 2250–2255. IEEE.
- Zou, B., Li, S., Zheng, Z., Zhan, B. F., Yang, Z., and Wan, N. (2020). Healthier routes planning: A new method and online implementation for minimizing air pollution exposure risk. *Computers, Environment and Urban Systems*, 80:101456.