Micromovilidad Inteligente Centrada en los Humanos

Diego Daniel Pedroza-Perez[1,2], Gabriel Luque[1,3], and Jamal Tououh[1,3]

[1] Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación (Universidad de Málaga)
[2] Doctorando: pedroza@uma.es
[3] Directores: {gluque, jamal}@uma.es
Fecha Inicio: 29 de octubre del 2022

Resumen La movilidad urbana está experimentando una transición hacia enfoques más sostenibles y centrados en las personas, en los que la movilidad activa y la micromovilidad desempeñan un papel clave. Sin embargo, gran parte de la literatura en movilidad inteligente sigue priorizando criterios tradicionales como tiempo de viaje, eficiencia o capacidad, prestando una menor atención a factores humanos como la seguridad, el confort, la accesibilidad o la influencia del clima. Esta tesis parte de la hipótesis de que la integración de técnicas de optimización multiobjetivo sobre datos abiertos urbanos permite modelar y mejorar soluciones de movilidad activa y micromovilidad de forma más realista, transparente y útil para la planificación urbana. El objetivo principal es desarrollar modelos y herramientas de inteligencia artificial para analizar, diseñar y evaluar soluciones de micromovilidad centradas en las personas. Para ello, se plantea: (i) revisar el estado del arte en movilidad inteligente con perspectiva humana; (ii) construir un repositorio de datos abiertos urbanos para experimentación reproducible; (iii) diseñar modelos que integren seguridad, confort, accesibilidad y clima; y (iv) formular problemas de optimización multiobjetivo aplicados al diseño y mejora de infraestructuras ciclistas y otros servicios de micromovilidad. Como aportación original, la tesis propone combinar datos abiertos realistas, modelado urbano y optimización multiobjetivo para incorporar explícitamente factores humanos poco considerados en la literatura actual.

Keywords: micromovilidad · movilidad activa · optimización multiobjetivo · datos abiertos · ciudades inteligentes

1. Introducción

En 2050, se estima que más del 65 % de la población mundial residirá en áreas urbanas, lo que intensificará problemas de congestión, sostenibilidad y calidad de vida [36]. En este contexto, el paradigma de las *smart cities* ha promovido el uso de tecnologías digitales para mejorar la gestión urbana y la provisión de servicios [4]. Sin embargo, muchas de las soluciones propuestas han priorizado la eficiencia operativa frente a otros factores relevantes para los ciudadanos.

Dentro de este marco, la *smart mobility* aborda problemas relacionados con el transporte y la logística urbana mediante técnicas avanzadas de análisis de datos y aprendizaje automático [6,11,2]. No obstante, gran parte de estas soluciones presentan un enfoque "auto-centrista" [35], centrado en la optimización del tráfico motorizado. Este enfoque ignora, en gran medida, factores humanos como la seguridad percibida, el confort, la accesibilidad o la calidad del entorno urbano, los cuales son fundamentales para promover formas de movilidad más sostenibles y saludables [17].

En paralelo, la creciente disponibilidad de datos abiertos urbanos, impulsada por iniciativas como la Directiva (UE) 2019/1024 [26], ofrece nuevas oportunidades para el desarrollo de modelos más realistas y contextualizados. Plataformas institucionales y repositorios abiertos permiten integrar información heterogénea sobre movilidad, infraestructuras y comportamiento ciudadano, facilitando el análisis y la simulación de escenarios urbanos complejos.

En este contexto, la movilidad activa y la micromovilidad (bicicletas, bicicletas eléctricas o patinetes eléctricos) han emergido como alternativas clave para avanzar hacia ciudades más sostenibles [19,21]. A pesar de su creciente adopción, persisten desafíos relacionados con la seguridad, el diseño de infraestructuras y la aceptación social [42,32,18]. Estos desafíos evidencian la necesidad de enfoques de modelado que integren explícitamente múltiples criterios, a menudo en conflicto, incluyendo tanto métricas tradicionales (tiempo, coste, emisiones) como factores humanos.

Esta tesis parte de la hipótesis de que el diseño de sistemas de micromovilidad puede beneficiarse significativamente de la formulación de modelos de optimización multiobjetivo que incorporen factores humanos de manera explícita. En particular, se plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿cómo pueden combinarse datos abiertos urbanos y técnicas de optimización multiobjetivo para diseñar soluciones de movilidad activa y micromovilidad que equilibren eficiencia, sostenibilidad y experiencia del usuario?*

Para abordar esta cuestión, se propone el desarrollo de modelos de optimización basados en datos abiertos, junto con el uso de algoritmos evolutivos multiobjetivo, con el objetivo de analizar, diseñar y evaluar soluciones de movilidad urbana realistas. Este trabajo busca contribuir tanto a nivel metodológico, mediante la incorporación de nuevos criterios en problemas de optimización, como a nivel aplicado, proporcionando herramientas para la planificación de infraestructuras de micromovilidad.

El resto del documento se organiza como sigue. La Sección 2 presenta el estado del arte, la Sección 3 describe la hipótesis y los objetivos, la Sección 4 detalla la metodología y el plan de trabajo, la Sección 5 discute la relevancia de la investigación, la Sección 6 presenta resultados preliminares. Finalmente, la Sección 7 realiza un pequeño resumen del documento.

2. Estado del Arte

La transición hacia *smart cities* centradas en el ciudadano exige comprender el papel de la micromovilidad (bicicletas, bicicletas eléctricas y patinetes eléctricos) como alternativa al transporte motorizado privado. Estudios empíricos recientes han analizado su adopción y los factores que la condicionan, destacando la relevancia de la distancia del viaje, la hora del día y las características del entorno urbano en la elección modal y en la intensidad de uso [31]. En este contexto, se ha identificado un "efecto meseta", según el cual el incremento de la densidad de la flota favorece inicialmente el uso al mejorar la disponibilidad, pero presenta rendimientos marginales decrecientes hasta llegar a un punto en el que añadir más vehículos no aporta mejoras sustanciales en la utilización de la micromovilidad compartida [31].

La literatura también distingue entre micromovilidad compartida y de propiedad privada. Por un lado, se ha observado que los servicios compartidos tienden a sustituir desplazamientos que anteriormente se realizaban caminando o en transporte público, favoreciendo patrones de viaje más diversos y multimodales [33]. Por otro lado, los vehículos de propiedad privada se asocian a viajes más largos y frecuentes, con un mayor potencial para sustituir el uso del automóvil, especialmente hacia áreas periféricas [1]. En contextos como Washington D.C., los usuarios de patinetes eléctricos (*e-scooters*) compartidos presentan comportamientos similares a los usuarios no abonados de sistemas de bicicletas compartidas, mostrando además una menor sensibilidad a condiciones climáticas adversas gracias a la flexibilidad de finalizar el viaje directamente en el destino [37].

A pesar de sus beneficios potenciales en términos de congestión y emisiones, la sostenibilidad ambiental de la micromovilidad compartida depende críticamente de su ciclo de vida completo. Los análisis de ciclo de vida (LCA) han puesto de manifiesto que las cargas ambientales asociadas a la fabricación, los materiales y, especialmente, a la logística diaria de recolección y recarga pueden llegar a superar las de los modos de transporte que sustituyen, si no se optimizan estos procesos [20]. En consecuencia, el diseño de la infraestructura física y de los procesos operativos (e.g., ubicación de estaciones, rutas de recolección y recarga) es un factor clave para garantizar que la micromovilidad actúe como un sustituto efectivo y seguro de los vehículos de combustión interna [42,32,18].

La planificación y gestión de sistemas de transporte urbano son problemas altamente complejos que involucran múltiples criterios en conflicto (e.g., costo económico, tiempo de viaje, seguridad vial, conectividad, impacto ambiental y equidad). En este contexto, la optimización multiobjetivo permite modelar explícitamente los compromisos entre estos criterios mediante el concepto de optimalidad de Pareto [13,39]. Gracias a su naturaleza poblacional, los Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo (MOEAs) se han consolidado como una de las principales familias de técnicas para aproximar el frente de Pareto en una única ejecución, especialmente en problemas combinatorios de gran escala [13,39].

La literatura actual distingue varias familias de MOEAs: algoritmos basados en dominancia de Pareto (como *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) y SPEA2), algoritmos basados en indicadores de rendimiento (como IBEA y SMS-EMOA) y enfoques basados en descomposición (como MOEA/D) [12,41,38,40]. Más recientemente, los problemas con muchos objetivos (*many-objective*) han motivado variantes como NSGA-III que incorporan puntos de referencia y técnicas de reducción de dimensionalidad para mantener la diversidad y la presión de selección en espacios de alta dimensión [14,25]. Paralelamente, se han propuesto métodos específicos para tratar frentes de Pareto irregulares y distribuciones complejas de soluciones, así como enfoques de diseño automático de MOEAs que utilizan configuradores de algoritmos para combinar y ajustar heurísticas de forma sistemática [23,7].

En el ámbito de la movilidad activa y los sistemas de bicicletas compartidas (BSS), el diseño de la capacidad de las estaciones constituye un problema combinatorio de naturaleza NP-hard [5]. Otro desafío operativo crítico en los sistemas BSS es el desbalance espacial entre la oferta de bicicletas y la demanda de los usuarios en estaciones de base fija [34]. Este problema, comúnmente modelado como una variante del Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP), ha sido abordado mediante formulaciones de optimización robusta multiobjetivo que consideran la incertidumbre en la demanda [22,15]. Sin embargo, estos estudios comparten limitaciones en términos de escalabilidad, ya que suelen considerar un número reducido de estaciones.

Finalmente, la comunidad de optimización evolutiva ha enfatizado la necesidad de adoptar buenas prácticas de benchmarking y evaluación experimental, incluyendo el uso de indicadores de rendimiento como el hipervolumen o el *Inverted Generational Distance* (IGD), así como procedimientos estadísticos rigurosos para comparar algoritmos [9,10]. Estos desarrollos metodológicos son especialmente relevantes para la evaluación de algoritmos en aplicaciones urbanas complejas, donde la variabilidad de los datos y la heterogeneidad de los escenarios exigen análisis robustos y comparaciones significativas.

La literatura reciente destaca la integración de múltiples fuentes de datos abiertos y heterogéneos para alimentar modelos de movilidad y algoritmos bioinspirados, superando el uso de instancias sintéticas tradicionales en entornos urbanos complejos. En este sentido, la reconstrucción de redes viales detalladas a partir de *OpenStreetMap* (OSM) mediante herramientas como *OSMnx* [8] permite modelar con precisión la morfología urbana y la elección de rutas de transporte activo [3]. Al combinar estos grafos con datos sociodemográficos institucionales, puntos de interés (POIs) y nodos de transporte masivo, es posible identificar centros de demanda y generar matrices Origen-Destino (OD) realistas que capturen el comportamiento multimodal de los usuarios [24]. No obstante, la integración sistemática de este ecosistema de datos abiertos dentro de marcos de optimización evolutiva multiobjetivo que consideren de manera concurrente la eficiencia de la red y factores subjetivos humanos sigue siendo limitada. Esta brecha metodológica y aplicada es la que esta tesis doctoral busca resolver a través de

las propuestas de optimización y diseño de infraestructura que se detallan a continuación.

En conjunto, estos trabajos muestran que la combinación de datos abiertos urbanos y algoritmos de optimización ofrece un marco potente para el análisis y diseño de soluciones de movilidad activa. No obstante, persisten oportunidades de investigación relacionadas con la incorporación explícita de factores humanos (seguridad percibida, confort, calidad del entorno urbano) en las funciones objetivo de los algoritmos evolutivos multiobjetivo, así como con el desarrollo de modelos robustos frente a la incertidumbre y la variabilidad temporal en los patrones de movilidad.

3. Propuesta/Objetivo Principal

La investigación parte de la hipótesis (H) de que la integración de técnicas de optimización multiobjetivo sobre datos abiertos urbanos permite modelar y mejorar soluciones de movilidad activa y micromovilidad incorporando factores humanos —como seguridad, confort, accesibilidad y clima— de forma más realista, interpretable y útil para la toma de decisiones urbanas. En este contexto, el objetivo principal de la tesis es desarrollar modelos y herramientas de inteligencia artificial y optimización para el análisis, diseño y evaluación de soluciones de micromovilidad centradas en las personas, utilizando datos abiertos realistas. Este propósito se desglosa en los siguientes subobjetivos:

O1. Revisar y estructurar el estado del arte sobre movilidad inteligente centrada en las personas, con especial atención a seguridad, confort, accesibilidad, clima y salud.

O2. Construir un repositorio de datos abiertos urbanos orientado a la experimentación reproducible en movilidad activa y micromovilidad.

O3. Diseñar modelos de movilidad que integren factores humanos relevantes y permitan representar escenarios urbanos realistas.

O4. Formular y resolver problemas de optimización multiobjetivo aplicados al diseño y mejora de infraestructuras y servicios de movilidad activa.

O5. Validar experimentalmente las propuestas desarrolladas y facilitar su difusión y transferencia mediante publicaciones, software y recursos reproducibles.

La aportación original de este trabajo frente a propuestas publicadas radica en la incorporación explícita de factores humanos poco tratados en la literatura técnica, el uso de datos abiertos para construir modelos reproducibles, y la formulación de problemas de optimización específicos para infraestructuras ciclistas y sistemas de micromovilidad, generando herramientas directamente transferibles a la planificación urbana y apoyo a la toma de decisiones.

4. Metodología y Plan de Trabajo

Las fases de esta tesis se basan en las establecidas por el Método Científico [16] para garantizar una metodología de trabajo rigurosa y bien definida. A continuación, se detallan las fases y actividades que realizar en cada una de ellas:

Observación:

T1 **Aplicaciones:** Se buscarán aplicaciones de movilidad inteligente enfocadas en el ciudadano que cubran servicios de los dominios identificados.

T2 **Estudio Datos Abiertos:** Se estudiarán los datos abiertos proporcionados en diferentes ciudades sobre los problemas identificados en el paso anterior.

Inducción:

T3 **Análisis y Evaluación:** Análisis y evaluación de las propuestas ya existentes sobre las aplicaciones que implementen servicios de la movilidad inteligente.

Hipótesis:

T4 **Diseño Algorítmico:** Diseño e implementación de algoritmos, para resolver los problemas seleccionados de movilidad inteligente.

Experimentación

T5 **Estudio Experimental:** Se estudiarán los algoritmos de forma experimental (simulaciones, aplicaciones, etc.).

T6 **Interpretación de Datos:** Se interpretarán los datos para plantear conclusiones preliminares encaminando el proceso de investigación hacia su finalización satisfactoria contrastando los resultados con los del estado del arte.

Conclusiones

T7 **Publicación:** Publicación de los resultados como artículos científicos en conferencias y revistas internacionales de alto impacto.

T8 **Divulgación:** Divulgación a la sociedad en forma de material multimedia. Realización de una web para la presentación de los resultados, documentos y software desarrollado, facilitando las instancias de los problemas, para su reproducción y validación por parte de la comunidad científica.

T9 **Transferencia:** Análisis y posible establecimiento de relaciones con empresas, ayuntamientos o grupos con objeto de posibles contratos de colaboración y transferencia.

Este proyecto de tesis se plantea para que tenga una duración de cuatro años repartidos en semestres. Durante este período, se espera cumplir con las tareas propuestas. En la Figura 1 se puede observar un diagrama de Gantt con las actividades. Los colores representa los años anteriores, y el verde indica el año en

curso. Los procesos experimentales intensivos en recursos computacionales, junto a otros factores externos como dificultades administrativas, tiempo invertido en colaboraciones y las demoras en la evaluación editorial, han provocado un retraso con lo cabría esperar en progreso común en una tesis doctoral.

		Primer Año 1° semestre	Primer Año 2° semestre	Segundo Año 1° semestre	Segundo Año 2° semestre	Tercer Año 1° semestre	Tercer Año 2° semestre	Cuarto Año 1° semestre	Cuarto Año 2º semestre
T1	**Aplicaciones**	1							
T2	**Estudio Datos Abiertos**	1	1	2					
T3	**Análisis y Evaluación**		1	2					
T4	**Diseño Algorítmico**		1	2	2	3			
T6	**Estudio Experimental**		1	2	2	3		4	
T7	**Interpretación. Datos**		1	2	2	3		4	
T8	**Publicación**		1	2	2	3	3	4	4
T9	**Divulgación**			2	2	3	3	4	4
T10	**Transferencia**					3			

Figura 1. Plan de trabajo actualizado representado mediante diagrama de Gantt.

5. Relevancia

Esta tesis contribuye al avance de la movilidad inteligente al proponer un enfoque centrado en las personas, incorporando de forma explícita factores como seguridad y confort en modelos de movilidad activa y micromovilidad. Desde el punto de vista metodológico, la combinación de datos abiertos urbanos, modelado computacional y optimización multiobjetivo puede aportar nuevas herramientas para abordar problemas complejos de diseño y evaluación de infraestructuras urbanas.

La investigación tiene un claro potencial de transferencia, ya que sus resultados pueden apoyar a administraciones públicas, planificadores urbanos y entidades interesadas en promover formas de movilidad más seguras, sostenibles e inclusivas. En particular, el diseño y mejora de infraestructuras ciclistas, la evaluación de escenarios urbanos y el uso de herramientas reproducibles pueden facilitar decisiones mejor fundamentadas para fomentar la movilidad activa, reducir impactos ambientales y mejorar la calidad de vida de la ciudadanía.

Además, la publicación de software, documentación y recursos experimentales contribuirá a la reproducibilidad científica y permitirá reutilizar los resultados en contextos reales o en futuras investigaciones.

6. Primeros Resultados

Los trabajos preliminares realizados hasta la fecha confirman la viabilidad de la línea de investigación y han permitido construir una base metodológica y experimental sólida. En primer lugar, se analizó el potencial de la micromovilidad compartida en Málaga a partir de datos abiertos, observando que el uso de patinetes eléctricos podría reducir de forma significativa el tiempo de viaje, aunque condicionado por la infraestructura disponible en áreas periféricas [28].

Posteriormente, se formuló un problema de optimización de infraestructuras ciclistas orientado a maximizar la cobertura con respecto al coste, cuya resolución se abordó mediante algoritmos evolutivos [29]. Los resultados de este trabajo mostraron la eficacia de NSGA-II para explorar soluciones diversas ante objetivos en conflicto, permitiendo identificar distintos compromisos en función del nivel de inversión. Esta línea evolucionó hacia una formulación más rica, que incorporó la continuidad de los carriles y la conectividad multimodal con el transporte público [30]. En esta segunda versión se compararon dos algoritmos evolutivos multiobjetivo, y los resultados evidenciaron que las modificaciones propuestas en la infraestructura generan mejoras significativas en términos de conectividad y funcionalidad urbana.

Más recientemente, se desarrolló un modelo robusto para el rebalanceo de flotas de bicicletas bajo incertidumbre de demanda, utilizando un operador de mutación específico para mejorar el comportamiento de búsqueda en escenarios críticos [27]. Este modelo busca minimizar la distancia total recorrida por los camiones de rebalanceo, minimizar la demanda insatisfecha esperada y minimizar una métrica de robustez orientada a mitigar la degradación del servicio en escenarios de demanda pico. La incorporación de operadores de mutación específicos del dominio (como operadores de reubicación sesgados) dentro de esquemas NSGA-II ha demostrado ser eficaz para resolver instancias reales a gran escala, como el sistema *Bicing* de Barcelona, mostrando el potencial de los MOEAs híbridos y los operadores con conocimiento del dominio en problemas de movilidad urbana.

En conjunto, estos avances muestran una trayectoria coherente hacia una tesis centrada en el diseño, análisis y optimización de soluciones de movilidad urbana con impacto científico y aplicado.

7. Conclusiones

Esta tesis propone una línea de investigación orientada al diseño de soluciones de micromovilidad inteligente centradas en las personas, integrando factores humanos y contextuales mediante técnicas de optimización multiobjetivo sobre datos abiertos urbanos. La hipótesis de partida sostiene que este enfoque permite modelar de forma más realista y útil problemas de movilidad activa y micromovilidad en entornos urbanos complejos.

Los resultados preliminares obtenidos hasta la fecha muestran la viabilidad científica y metodológica de la propuesta, así como su coherencia con una trayectoria de investigación ya consolidada en optimización evolutiva aplicada a problemas de movilidad urbana. En particular, los trabajos desarrollados sobre en el análisis de la ciudad, en el diseño de infraestructuras y en el rebalanceo robusto de sistemas de bicicletas compartidas constituyen una base sólida para la constitución de la tesis.

En las siguientes etapas, la investigación se orientará a consolidar los modelos propuestos, ampliar su validación experimental y fortalecer su transferencia a escenarios reales de planificación urbana. El objetivo final es ofrecer herramientas reproducibles que contribuyan tanto al avance científico en optimización multiobjetivo como a la mejora de la movilidad urbana sostenible.

Acknowledgments. Esta investigación es parte de la ayuda PRE2021-100645 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

Disclosure of Interests. Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Referencias

1. Adorean, E.C., Nofre, J., García-Juan, L., Moura, F.: Mobility patterns of shared and own e-bikes and e-scooters in iberian cities. International Journal of Sustainable Transportation **20**(4), 335–361 (2026). https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15568318.2025.2573743, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1556831825000747
2. Ahmed, D.B., Diaz, E.M.: Survey of machine learning methods applied to urban mobility. IEEE Access **10**, 30349–30366 (2022). https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3159668
3. Alattar, M.A., Cottrill, C., Beecroft, M.: Modelling cyclists' route choice using strava and osmnx: A case study of the city of glasgow. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives **9**, 100301 (2021). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100301, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590198221000051
4. Andreani, S., Kalchschmidt, M., Pinto, R., Sayegh, A.: Reframing technologically enhanced urban scenarios: A design research model towards human centered smart cities. Technological Forecasting and Social Change **142**, 15–25 (2019). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.09.028, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162518300052, understanding Smart Cities: Innovation ecosystems, technological advancements, and societal challenges
5. Aranda-Corral, G.A., Rodríguez, M.A., Fernández de Viana, I., Arenas, M.I.G.: Genetic hybrid optimization of a real bike sharing system. Mathematics **9**(18) (2021). https://doi.org/10.3390/math9182227, https://www.mdpi.com/2227-7390/9/18/2227
6. Bahamid, A., Mohd Ibrahim, A.: A review on crowd analysis of evacuation and abnormality detection based on machine learning systems. NEURAL COMPUTING & APPLICATIONS **34**(24, SI), 21641–21655 (DEC 2022). https://doi.org/10.1007/s00521-022-07758-5

7. Bezerra, L.C.T., López-Ibáñez, M., Stützle, T.: Automatically designing state-of-the-art multi- and many-objective evolutionary algorithms. Evolutionary Computation **28**(2), 195–226 (06 2020). https://doi.org/10.1162/evco_a_00263, https://doi.org/10.1162/evco_a_00263
8. Boeing, G.: OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks (Sep 2017). https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004
9. Bringmann, K., Friedrich, T.: Approximating the least hypervolume contributor: Np-hard in general, but fast in practice. In: Proceedings of the 5th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. p. 6–20. EMO '09, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2009). https://doi.org/10.1007/978-3-642-01020-0_6, https://doi.org/10.1007/978-3-642-01020-0_6
10. Brockhoff, D., Tušar, T.: Gecco 2023 tutorial on benchmarking multiobjective optimizers 2.0. In: Proceedings of the Companion Conference on Genetic and Evolutionary Computation. p. 1183–1212. GECCO '23 Companion, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (2023). https://doi.org/10.1145/3583133.3595060, https://doi.org/10.1145/3583133.3595060
11. Calafiore, A., Palmer, G., Comber, S., Arribas-Bel, D., Singleton, A.: A geographic data science framework for the functional and contextual analysis of human dynamics within global cities. COMPUTERS ENVIRONMENT AND URBAN SYSTEMS **85** (JAN 2021). https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101539
12. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. Trans. Evol. Comp **6**(2), 182–197 (Apr 2002). https://doi.org/10.1109/4235.996017, https://doi.org/10.1109/4235.996017
13. Deb, K.: Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. John Wiley & Sons (2001)
14. Deb, K., Jain, H.: An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part i: Solving problems with box constraints. IEEE Transactions on Evolutionary Computation **18**(4), 577–601 (Aug 2014). https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535
15. Dell'Amico, M., Iori, M., Novellani, S., Subramanian, A.: The bike sharing rebalancing problem with stochastic demands. Transportation Research Part B: Methodological **118**, 362–380 (2018). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.10.015, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261518301711
16. Dodig-Crnkovic, G.: Scientific methods in computer science. In: PROMOTE IT 2002, 2nd Conference for the Promotion of Research in IT at New Universities and at University Colleges. pp. 22–24 (2002)
17. European Commission, D.G.f.E.: Reclaiming city streets for people : chaos or quality of life ? Tech. rep., European Commission, Directorate-General for Environment (2004), https://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/streets_people.pdf
18. Forum, I.T.: Safer micromobility. Tech. rep., International Transport Forum (2024). https://doi.org/10.1787/0d2e0dd5-en
19. Gall, T., Vallet, F., Reyes Madrigal, L.M., Hörl, S., Abdin, A., Chouaki, T., Puchinger, J.: Sustainable Urban Mobility Futures. Sustainable Urban Futures, Palgrave Macmillan (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-45795-1, https://hal.science/hal-04328609
20. Hollingsworth, J., Copeland, B., Johnson, J.X.: Are e-scooters polluters? the environmental impacts of shared dockless electric scooters. Environmental Research Letters **14**(8), 084031 (aug 2019). https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2da8, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2da8

21. Hossein Sabbaghian, M., Llopis-Castelló, D., García, A.: A safe infrastructure for micromobility: The current state of knowledge. Sustainability **15**(13) (2023). https://doi.org/10.3390/su151310140, https://www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10140
22. Hu, R., Zhang, Z., Ma, X., Jin, Y.: Dynamic rebalancing optimization for bike-sharing system using priority-based moea/d algorithm. IEEE Access **9**, 27067–27084 (2021). https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3058013
23. Hua, Y., Liu, Q., Hao, K., Jin, Y.: A survey of evolutionary algorithms for multi-objective optimization problems with irregular pareto fronts. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica **8**(2), 303–318 (2021). https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1003817, https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1003817
24. Klinkhardt, C., Kühnel, F., Heilig, M., Lautenbach, S., Wörle, T., Vortisch, P., Kuhnimhof, T.: Quality assessment of openstreetmap's points of interest with large-scale real data. Transportation Research Record **2677**(12), 661–674 (2023). https://doi.org/10.1177/03611981231169280, https://doi.org/10.1177/03611981231169280
25. Li, B., Li, J., Tang, K., Yao, X.: Many-objective evolutionary algorithms: A survey. ACM Comput. Surv. **48**(1) (Sep 2015). https://doi.org/10.1145/2792984, https://doi.org/10.1145/2792984
26. Parlamento Europeo: DIRECTIVA (UE) 2019/1024 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 20 de junio de 2019 relativa a los datos abiertos y la reutilización de la información del sector público (06 2019), https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1024&from=ES
27. Pedroza-Perez, D.D., Luque, G., Nesmachnow, S., Toutouh, J.: Robust multi-objective optimization for bicycle rebalancing in shared mobility systems, https://arxiv.org/abs/2604.08296
28. Pedroza-Perez, D.D., Toutouh, J., Luque, G.: E-scooters routes potential: Open data analysis in current infrastructure. malaga case. In: Optimization and Learning (OLA 2023), Communications in Computer and Information Science, vol. 1824, pp. 380–392. Springer (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-34020-8_29
29. Pedroza-Perez, D.D., Toutouh, J., Luque, G.: Optimizing urban infrastructure for e-scooter mobility. In: Applications of Evolutionary Computation (EvoApplications 2024), Lecture Notes in Computer Science, vol. 14634, pp. 341–357. Springer (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-56852-7_22
30. Pedroza-Perez, D.D., Toutouh, J., Luque, G.: Redesigning road infrastructure to integrate e-scooter micromobility as part of multimodal transportation. In: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO '24) (2024). https://doi.org/10.1145/3638529.3654142
31. Reck, D.J., Haitao, H., Guidon, S., Axhausen, K.W.: Explaining shared micromobility usage, competition and mode choice by modelling empirical data from zurich, switzerland. Transportation Research Part C: Emerging Technologies **124**, 102947 (2021). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102947, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X20308445
32. Rinaldi, A., Lagrimino, J.: New light vehicles' solutions for active, sustainable, and inclusive urban mobility of older users. In: Di Bucchianico, P. (ed.) Design for Inclusion. AHFE Open Access, vol. 128, pp. 82–92. AHFE International, USA (2024). https://doi.org/10.54941/ahfe1004794, https://doi.org/10.54941/ahfe1004794
33. Roig-Costa, O., Marquet, O., Arranz-López, A., Miralles-Guasch, C., Van Acker, V.: Understanding multimodal mobility patterns of micromobility users in urban environments: insights from barcelona. Transportation **53**(3), 1335–1363 (Jun 2026). https://doi.org/10.1007/s11116-024-10531-3, https://doi.org/10.1007/s11116-024-10531-3

34. Shui, C., Szeto, W.: A review of bicycle-sharing service planning problems. Transportation Research Part C: Emerging Technologies **117**, 102648 (2020). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102648, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X20305635
35. Sperling, D., Gordon, D.: Advanced passenger transport technologies. Annual Review of Environment and Resources **33**(1), 63–84 (2008). https://doi.org/10.1146/annurev.environ.33.032806.134935, https://doi.org/10.1146/annurev.environ.33.032806.134935
36. (ST/ESA/SER.A/420), P.D..W.U.P.T..R.: Population division (2019). world urbanization prospects: The 2018 revision (st/esa/ser.a/420). Tech. rep., United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2019), https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf
37. Younes, H., Zou, Z., Wu, J., Baiocchi, G.: Comparing the temporal determinants of dockless scooter-share and station-based bike-share in washington, d.c. Transportation Research Part A: Policy and Practice **134**, 308–320 (2020). https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.02.021, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856419311553
38. Zhang, Q., Li, H.: Moea/d: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. Trans. Evol. Comp **11**(6), 712–731 (Dec 2007). https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.892759, https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.892759
39. Zhou, A., Qu, B.Y., Li, H., Zhao, S.Z., Suganthan, P.N., Zhang, Q.: Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. Swarm and Evolutionary Computation **1**(1), 32–49 (2011). https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.03.001, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210650211000058
40. Zitzler, E., Künzli, S.: Indicator-based selection in multiobjective search. In: Yao, X., Burke, E.K., Lozano, J.A., Smith, J., Merelo-Guervós, J.J., Bullinaria, J.A., Rowe, J.E., Tiňo, P., Kabán, A., Schwefel, H.P. (eds.) Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII. pp. 832–842. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2004). https://doi.org/10.1007/978-3-540-30217-9_84
41. Zitzler, E., Laumanns, M., Thiele, L.: SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm. TIK Report pp. 95–100 (2001). https://doi.org/10.3929/ethz-a-004284029
42. Şengül, B., Mostofi, H.: Impacts of e-micromobility on the sustainability of urban transportation—a systematic review. Applied Sciences **11**(13) (2021). https://doi.org/10.3390/app11135851, https://www.mdpi.com/2076-3417/11/13/5851