



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Rediseño de infraestructura urbana para la **integración** de **micromovilidad** eléctrica como parte de un sistema de transporte **multimodal** en ciudades inteligentes

Dr. Jamal Toutouh

Workshop Internacional Ciudades inteligentes
integradas, eficientes y sostenibles

Motivación

- Conceptualizar la transición hacia la **Movilidad Activa**, la **Micromovilidad Eléctrica** y la **Multimodalidad** como pilares de la Ciudad Inteligente.
- Demostrar cómo la **Inteligencia Artificial** es una herramienta esencial para el rediseño de infraestructura.



El Desafío de la Congestión y la Huella Urbana

Las ciudades contemporáneas pensadas para el **uso del vehículo privado** se enfrentan a un **paradigma obsoleto** de movilidad:

- **Congestión** sistémica, elevada **contaminación** y una ocupación ineficiente del **espacio** público.
- Este modelo degrada la **calidad de vida**.

Nuestro imperativo es impulsar la **transición modal** hacia sistemas que prioricen el **desplazamiento de personas y el bienestar ciudadano**.

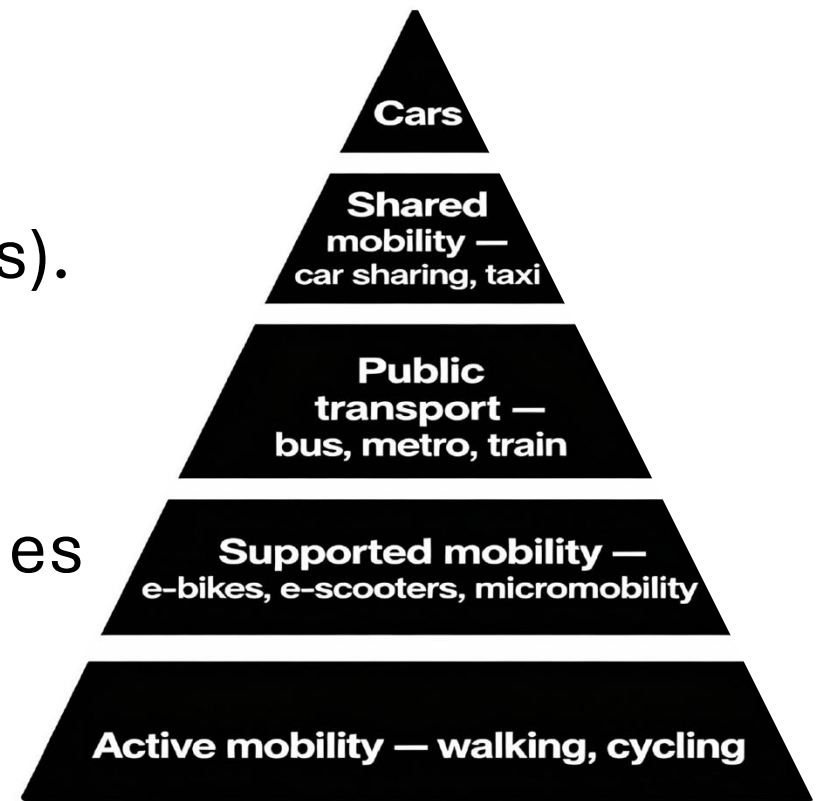


La Transición Modal: Micromovilidad, Activa y Multimodalidad

La **movilidad sostenible** se articula sobre una triada fundamental:

- **Movilidad Activa** (caminar, pedalear).
- **Micromovilidad Eléctrica Individual** (e-bikes).
- **Multimodalidad** (integración fluida de múltiples medios).

El reto de la **Planificación Urbana Inteligente** es asegurar la continuidad, seguridad y eficiencia de esta red.



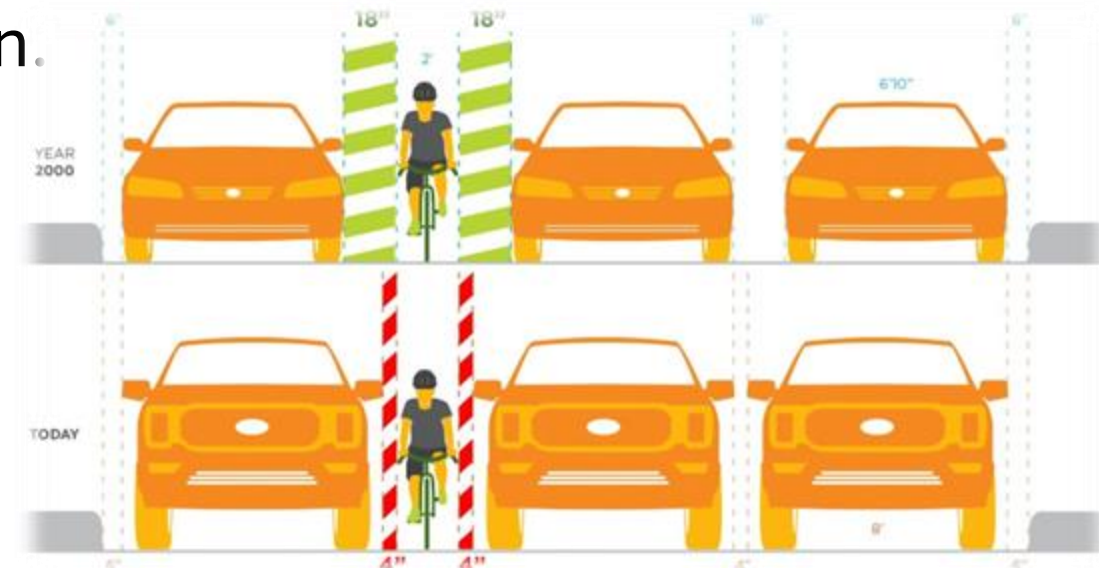
Movilidad Activa: Fomento de la Salud y Disminución de Externalidades

- La **movilidad a pie y en bicicleta** genera **beneficios en salud pública** y promueve la cohesión social.
- Reduce las emisiones a cero.
- **Requisito:** Su adopción depende de la calidad del entorno:
 - una **red ciclista** segregada y bien conectada.
 - **aceras** amplias



Requisitos Clave: Continuidad, Seguridad y Accesibilidad Universal

- La ineficiencia en las redes se debe a las **discontinuidades** y las **intersecciones peligrosas**.
- Esta falta de **coherencia de red** desincentiva el uso.
- **Clave:** Debemos **Cuantificar y Modelar** estas características (conectividad, seguridad percibida) sobre el grafo urbano para identificar prioridades de intervención.



Micromovilidad Eléctrica: El Eslabón Perdido del Transporte Urbano

- Su **proliferación ha sido exponencial**.
- Se posiciona como una **solución ideal de última milla** para trayectos de distancia media.
- Se **integra de forma natural** con los sistemas de metro y autobús, extendiendo el **radio de captación de las estaciones**.



Disrupciones Urbanas: Conflictos e Inseguridad de Red

El despliegue no planificado ha generado:

- **Conflictos Peatón-Usuario**
invasión de aceras.
- **Inseguridad Vial**
carriles incompletos o inexistentes.
- **Desorden**
falta de zonas de aparcamiento reguladas.

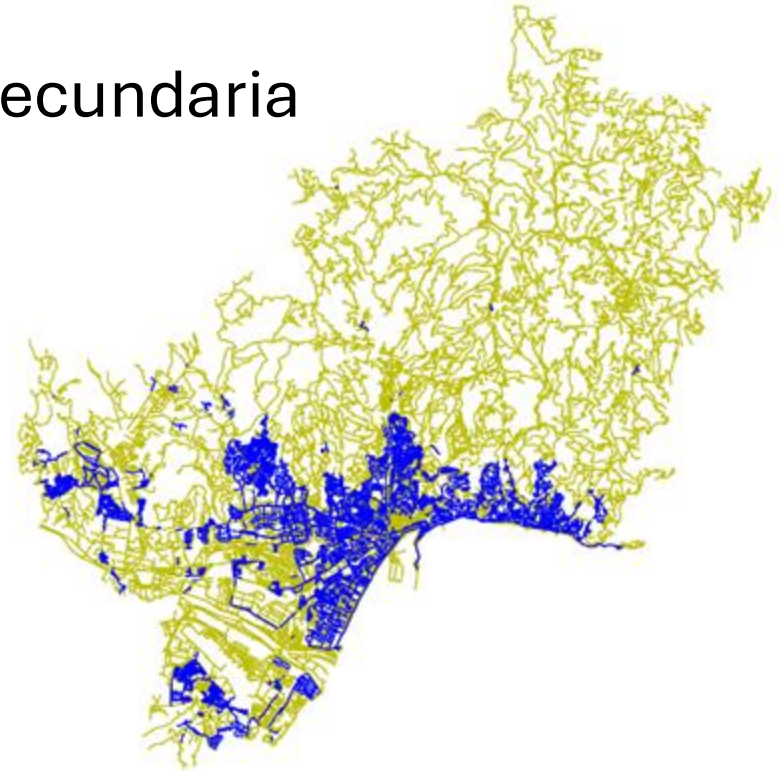


Solución: Se requiere una **Planificación Basada en Datos** mediante un riguroso **Análisis Multicriterio**.

Análisis de Potencial: El Caso de Málaga

Nuestro análisis empírico en **Málaga** [PTL23]:

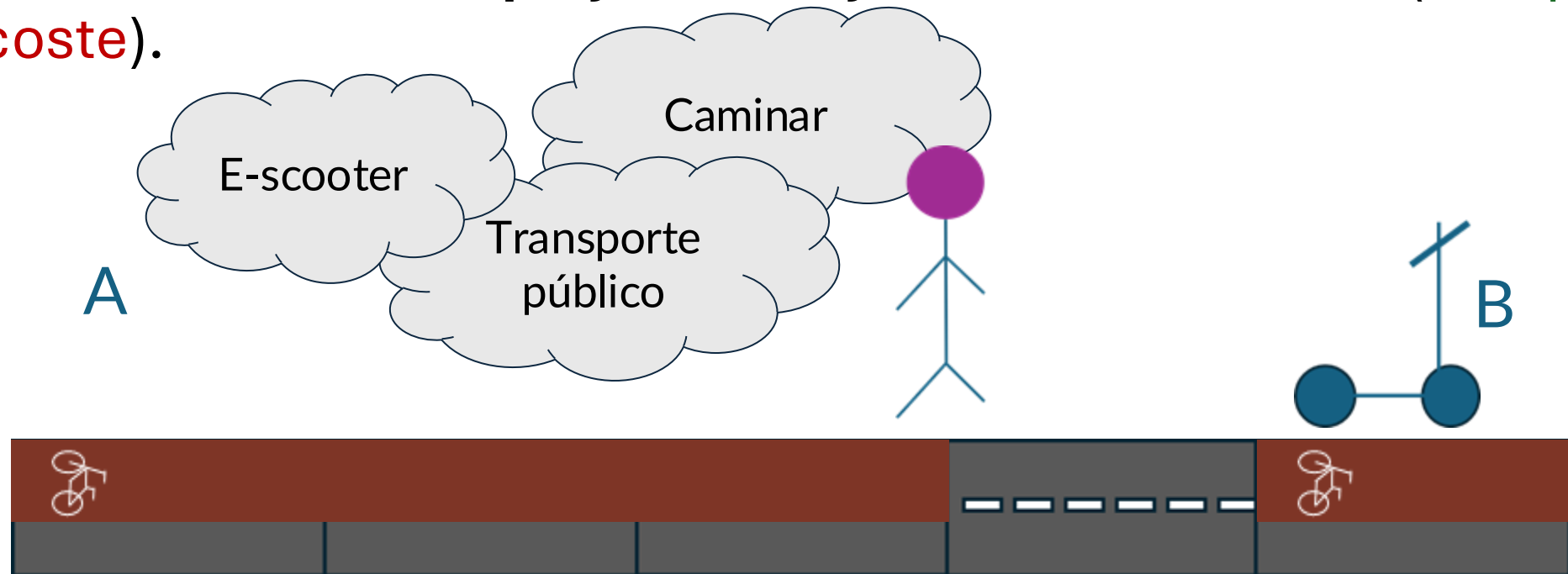
- más de 500 rutas, 441 distritos, 101 escuelas de secundaria
 - Los e-scooters reducen en promedio hasta un **40% el tiempo de desplazamiento**.
 - Identificamos alta **carencia de infraestructura** en zonas periféricas.
 - Se observa un alto índice de **cambios de modo** caminar/patinete por discontinuidad de la red.



Los resultados confirman el **potencial**, pero también la necesidad urgente de un **rediseño optimizado**.

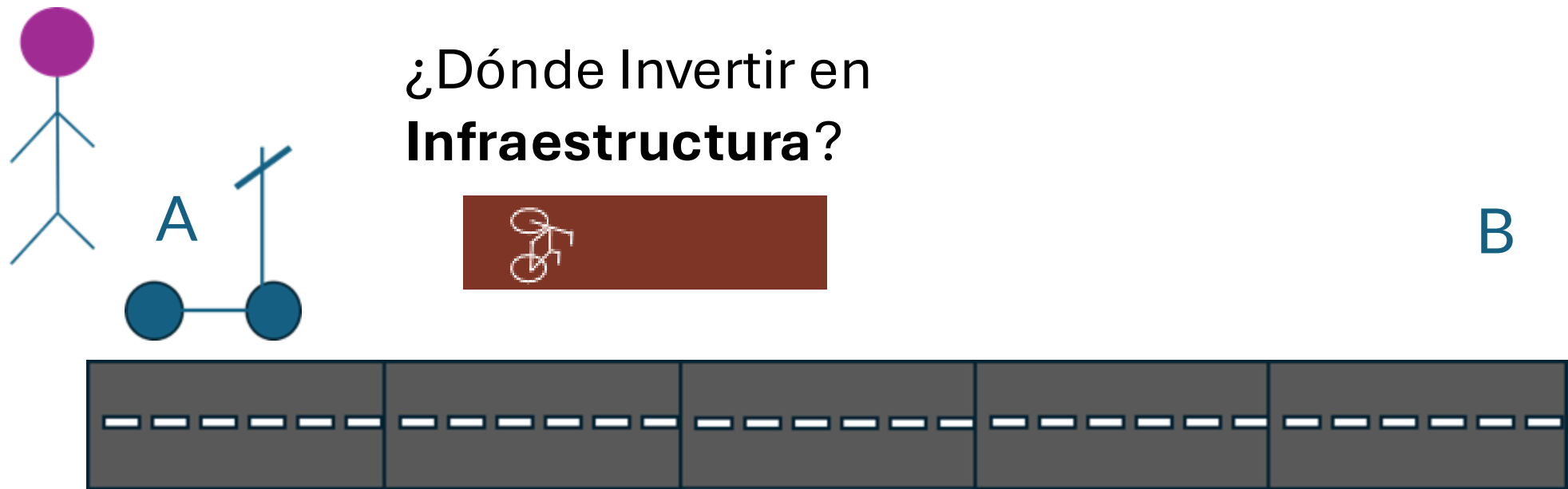
Diseño de **Redes Multimodales**: Minimizando la Dependencia del Coche

- La combinación de caminar, e-scooter y transporte público construye una **Red Urbana Eficiente**.
- **Desafío:** El diseño óptimo de esta red es un **problema intrínsecamente complejo con objetivos en conflicto** (tiempo vs. **coste**).



El Desafío de Optimización: ¿Dónde Invertir en Infraestructura?

La pregunta clave es un problema de **Optimización Discreta de Alta Dimensión** (ej. 48.000 carreteras candidatas) [PTL24a, PTL24b].



El Desafío de Optimización: ¿Dónde Invertir en Infraestructura?

La pregunta clave es un problema de **Optimización Discreta de Alta Dimensión** (ej. 48.000 carreteras candidatas).

- **Objetivos de la Optimización Multiobjetivo:**

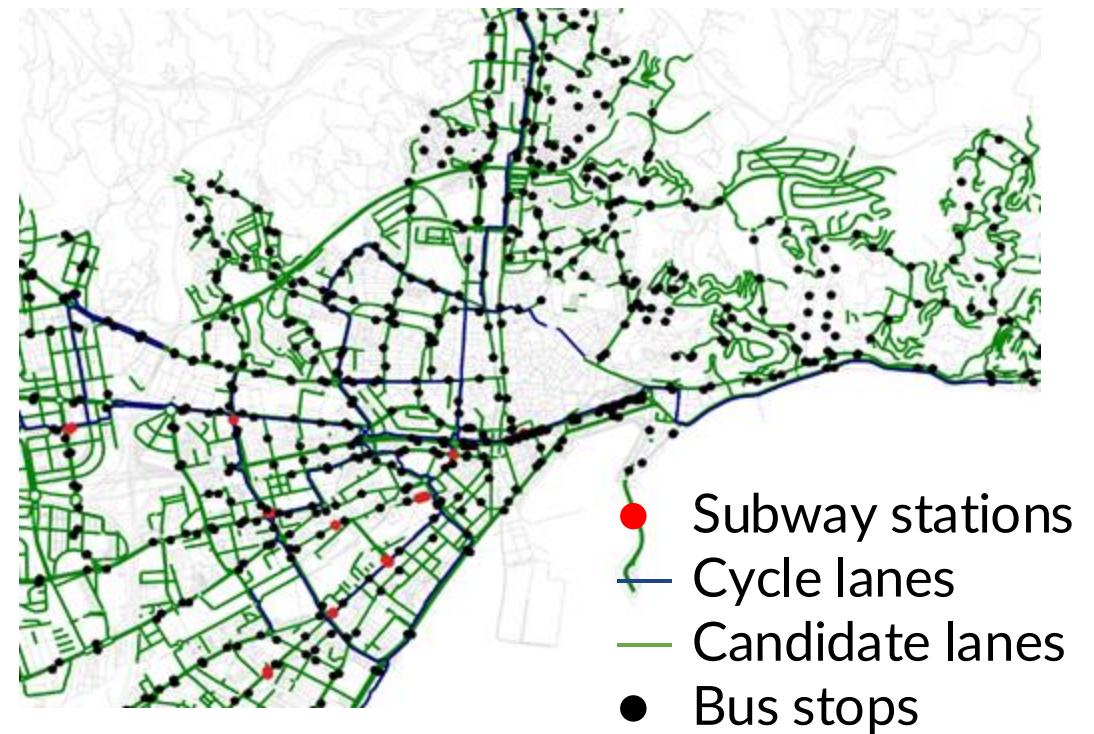
1. Minimizar el **Tiempo** Total de Viaje (Maximizar QoS).
2. Minimizar los **Costes** de Instalación (ej. 480.000 €/km).
3. Maximizar la **Conectividad/Continuidad**.

Instancia de Málaga:

- 558 rutas, 11 distritos
- Coste de instalación: 480.000 €/km
- Segmentos de carretera: 48.391

Modelado Urbano y Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo (MOEA)

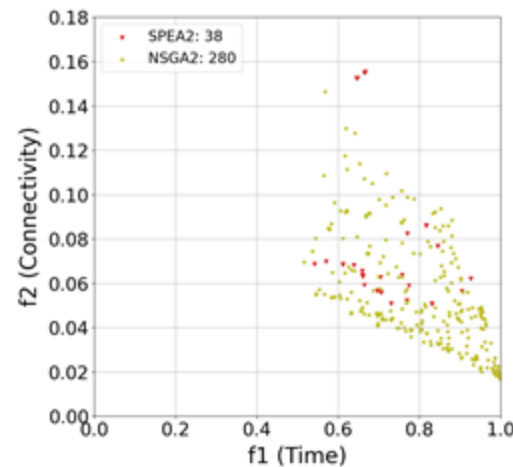
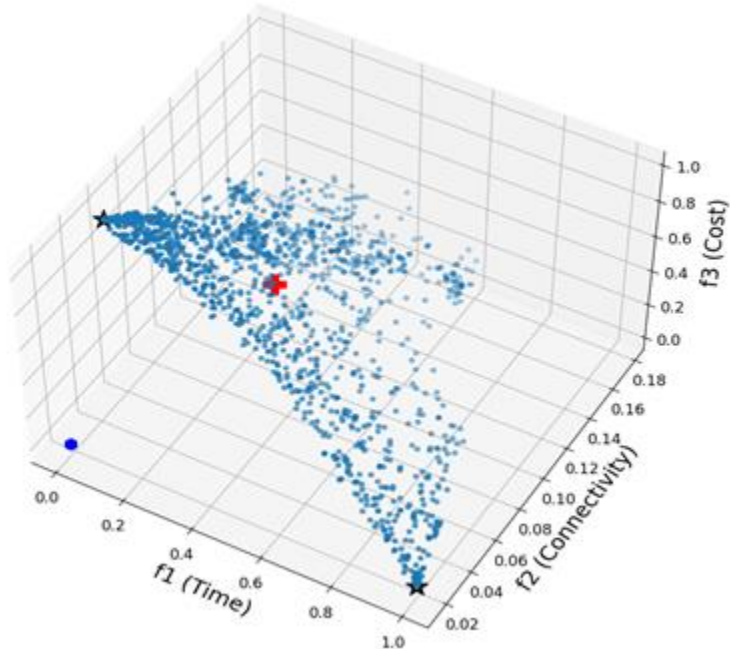
- Se modela la ciudad como un **Grafo Multimodal Complejo**.
- Utilizamos **IA, Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo:**
NSGA-II y SPEA2.
- Estos algoritmos convergen hacia el **Frente de Pareto**, que define el conjunto de **compromisos óptimos** (soluciones no-dominadas).
- Esto permite **comparar escenarios** antes de realizar inversiones.



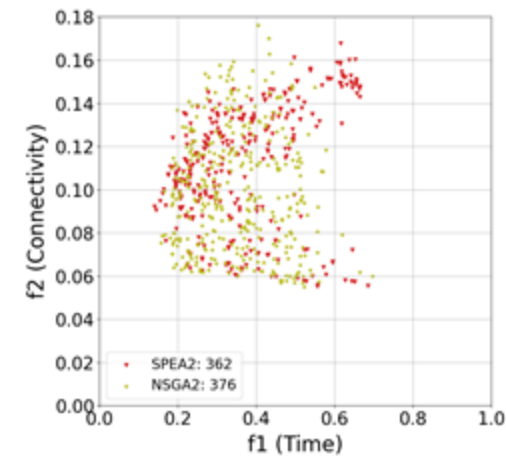
Conclusiones Científicas: Convergencia, Continuidad y Eficiencia

Resultados Clave:

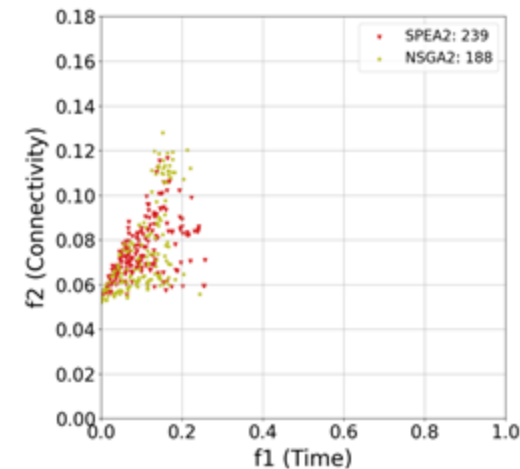
- El Frente de Pareto es un catálogo de soluciones para la toma de decisiones.
- **Superioridad Algorítmica: NSGA-II superior a SPEA2.**



Cost (Million of €)
0 to 18.10



Cost (Million of €)
18.10 to 42.23



Cost (Million of €)
42.23 to 60.51

Conclusiones Científicas: Convergencia, Continuidad y Eficiencia

Resultados Clave:

- **Continuidad:** Aumentar la continuidad de carriles reduce significativamente el *mode switching*.
- **Eficiencia Multimodal:** Las soluciones de bajo coste pueden lograr mejoras notables y alterar el equilibrio modal.



La IA como Pilar de las Políticas Basadas en Evidencia

La IA rediseña la **topología** de la infraestructura futura:

- **Optimización de la Inversión:** Maximizar el retorno social por coste.
- **Equidad Urbana:** Aumentar la accesibilidad y reducir la desigualdad entre barrios.
- **Transparencia:** Dotar a la toma de decisiones de una base objetiva.



Trabajo Futuro: Seguridad, Resiliencia y Transferibilidad

La evolución natural de esta línea incluye:

- **Optimización Cuatridimensional:** Incluir la **Seguridad Vial** como un 4º objetivo.
- Modelar **diferentes tipos de carriles** y niveles de protección.
- Aplicar **modelos generativos y Machine Learning** para simular el comportamiento.

Equipo de trabajo y resultados



- **[PTL24a]** Pedroza-Perez, D., Toutouh, J., & Luque, G. (2024). **Redesigning road infrastructure to integrate e-scooter micromobility as part of multimodal transportation.** *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 1336-1344.
- **[PTL24b]** Pedroza-Perez, D. D., Toutouh, J., & Luque, G. (2024). **Optimizing urban infrastructure for e-scooter mobility.** En *International Conference on the Applications of Evolutionary Computation*.
- **[PTL23]** Pedroza-Perez, D. D., Toutouh, J., & Luque, G. (2023). **E-scooters routes potential: open data analysis in current infrastructure. malaga case.** En *International Conference on Optimization and Learning* (pp. 380-392).

Rediseño de infraestructura urbana para la
integración de **micromovilidad** eléctrica como
parte de un sistema de transporte **multimodal** en
ciudades inteligentes

