



Sistema de Optimización de Paradas Suburbanas

Trabajo final de carrera - **Máster en Ciencia de Datos**

Ana Araujo y Pablo Maurente

Tutor: **César Reyes**

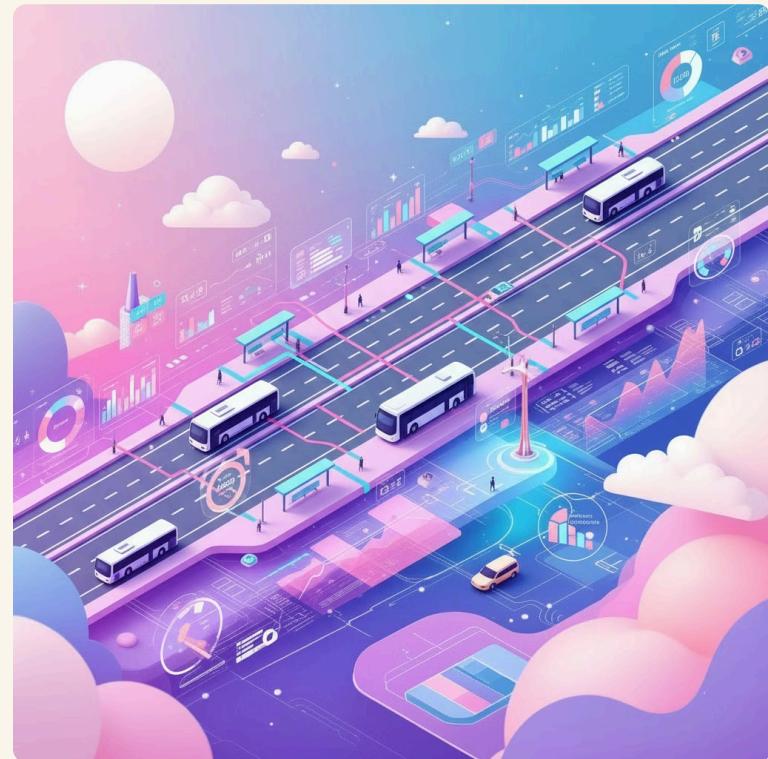
Universidad de Montevideo, Uruguay 2025

Desafío: Gestionar la infraestructura de transporte interdepartamental

Contexto del problema

El transporte público interurbano en Uruguay cumple un rol esencial en la conectividad territorial. Sin embargo, la información sobre paradas en rutas nacionales es fragmentaria, heterogénea y desactualizada.

En 2023, ANII y MTOP convocaron soluciones innovadoras para relevar, georreferenciar y diagnosticar el estado de las paradas existentes.



Nuestra propuesta: Visión por computadora + análisis territorial

Detección automática



Modelos de Computer Vision

Priorización multicriterio



Sistema AHP

Análisis geoespacial



Integración de datos demográficos, red vial y centros educativos.

Objetivo: **construir un prototipo operativo reproducible y escalable** que optimice el registro y gestión de paradas oficiales en rutas nacionales.



Metodología: Fuentes de datos integradas

01

Datos demográficos



02

Red vial nacional



Ministerio
de Transporte
y Obras Públicas

03

Centros educativos (ANEP)



04

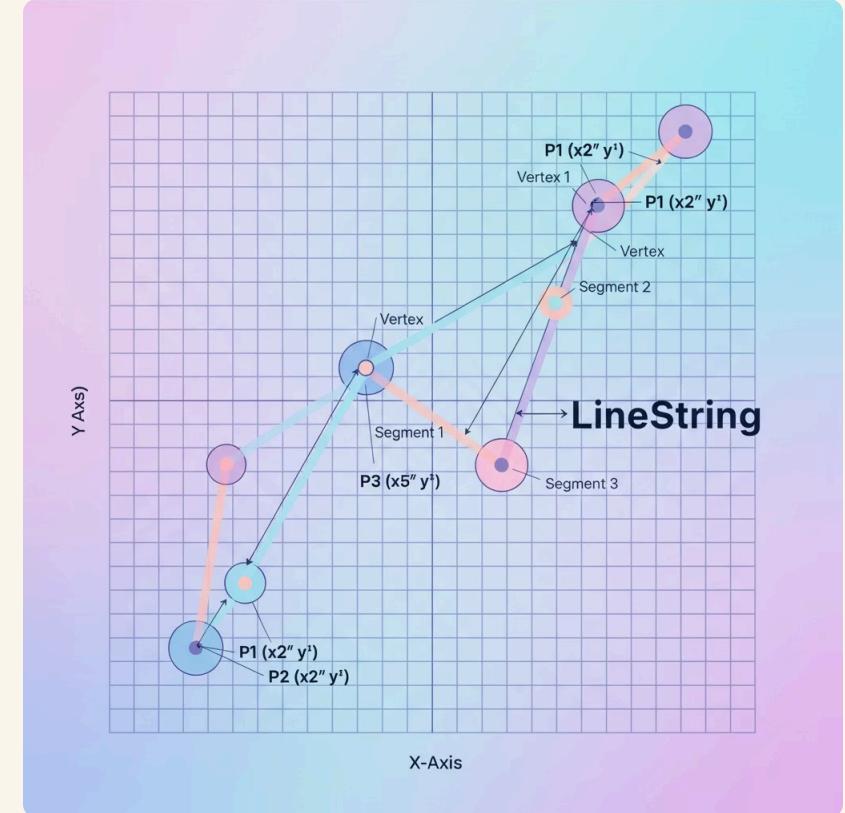
Imágenes satelitales Google Maps



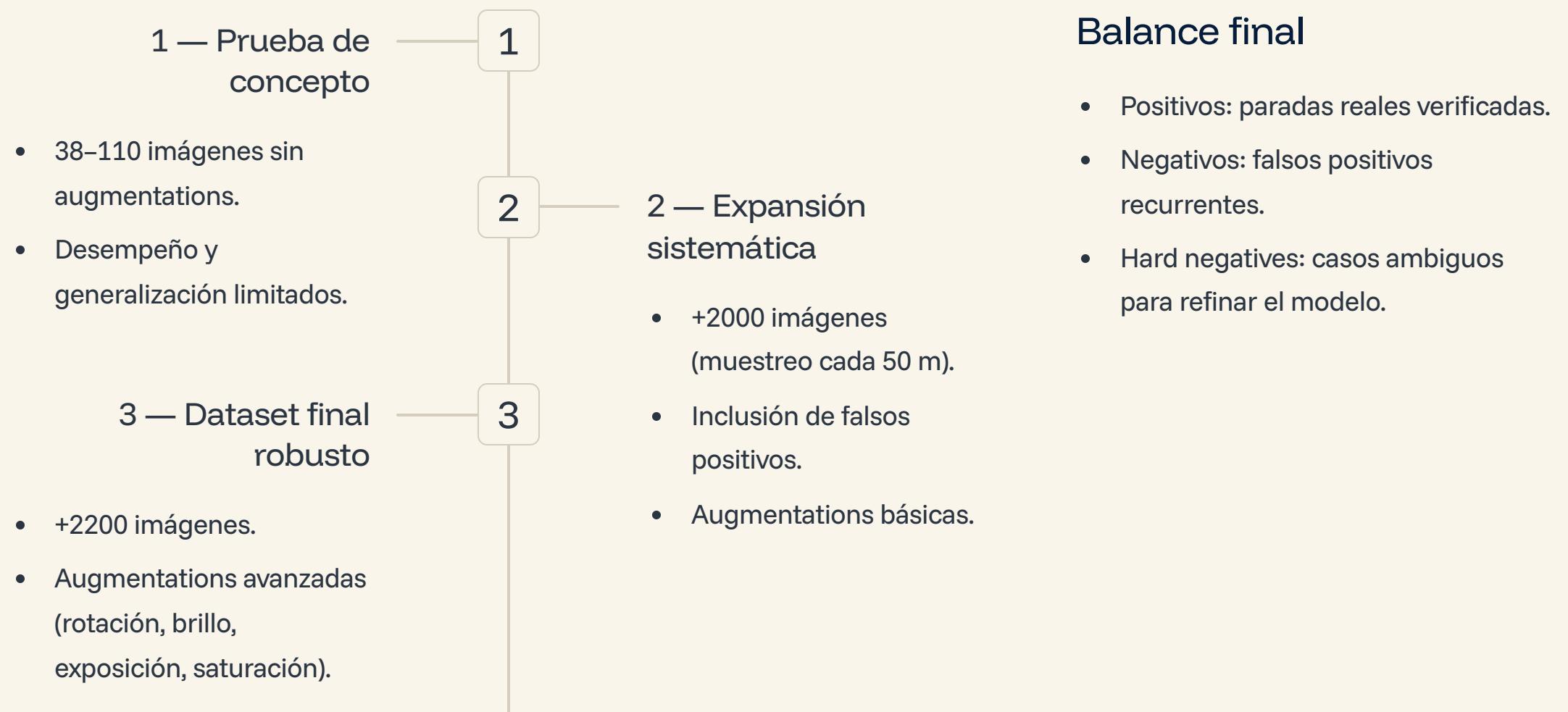
Google Maps

Datos geoespaciales: ¿Qué es un LineString?

- Un LineString es un tipo de geometría utilizada en SIG (Sistemas de Información Geográfica).
- Representa una línea formada por una secuencia ordenada de puntos (coordenadas).
- Se utiliza para modelar objetos lineales del mundo real, como:
 - Rutas y carreteras
 - Límites lineales
 - Ríos, vías férreas, etc.



Evolución del dataset de entrenamiento



Modelos probados en Roboflow

YOLOv11 (Fast)

- ❑ mAP50: 87.1% · Precisión: 86.5% · Recall: 79.9%

- Rápido y liviano.
- Buen desempeño general, menor recall en zonas rurales.

RF-DETR (Nano)

- ❑ mAP50: 88.6% · Precisión: 90.5% · Recall: 90.0%

- Más estable para objetos pequeños.
- Mejor equilibrio entre precisión y recall.

Modelo seleccionado: RF-DETR (Nano)

- Mejor desempeño global.
- Más robusto entre corredores.
- Menos falsos positivos (sombras, techos, camiones).



Segmentación de rutas: Filtrado Geométrico

El filtrado geométrico distingue pavimento vs. áreas válidas para detenerse, reduciendo falsos positivos de detección.

Modelo utilizado: RF-DETR-Seg

- Segmentación precisa de calzada y banquinas en imágenes satelitales.

1 - Rutas Nacionales

 mAP50: 91.6%

- Filtrado efectivo de falsos positivos en la calzada.

2 - Caminos Secundarios

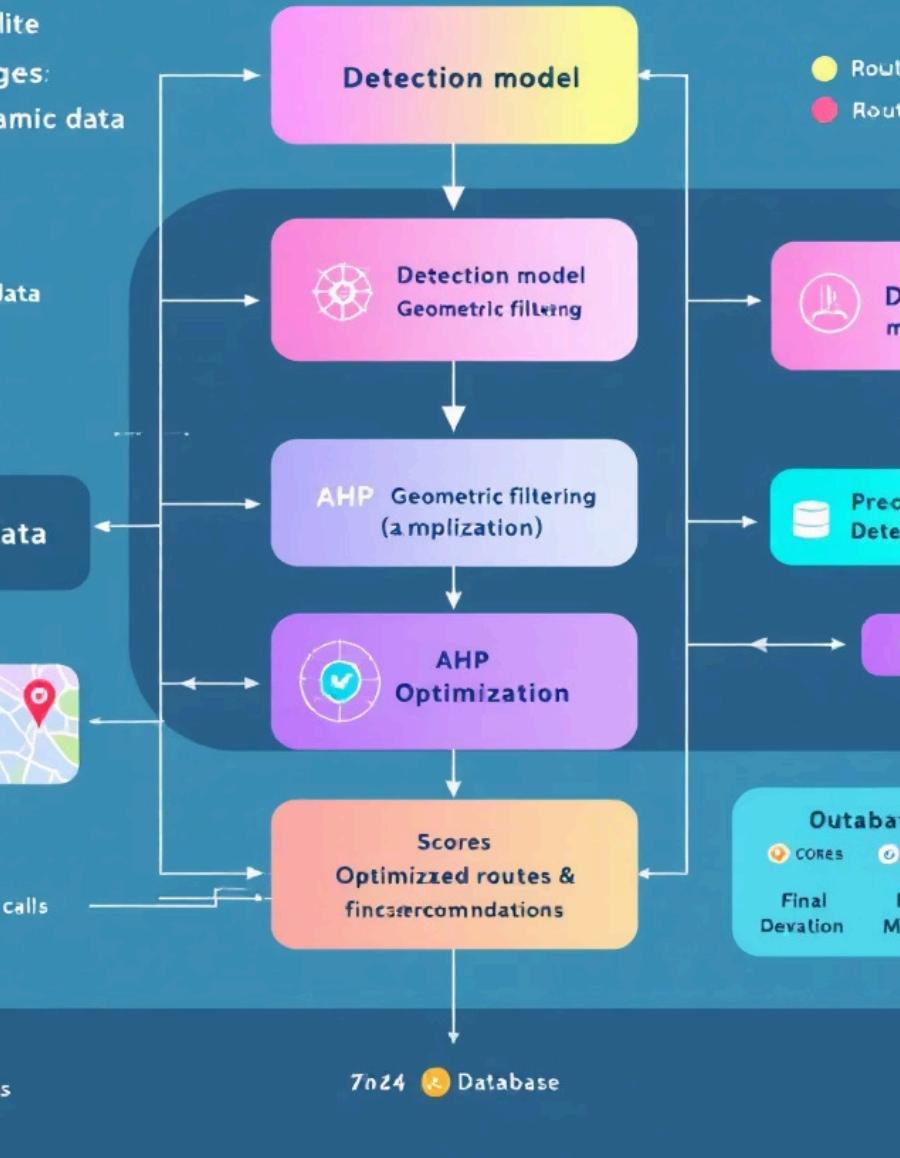
 mAP50: 89.9%

- Adaptación para evitar descartar paradas válidas en caminos vecinales.



Bus stop detections system

Input flow and a system data flow and data flow detections



Pipeline de detección: De imágenes a paradas validadas



Entrenamiento modelo

mAP50: 88.6% · Precisión: 90.5% · Recall: 90.0%

Segmentación de rutas

RF-DETR-Seg para filtrado geométrico: descarte automático de detecciones sobre calzada

Geolocalización

Asignación de la coordenada de la imagen a la parada

Ejemplos de Imágenes Satelitales



Ejemplos de Falsos Positivos



Ejemplos de Detecciones correctas



Metodología: Optimización de AHP

01

Hotspots urbanos

- Datos de movilidad → detección de zonas de alta actividad (K-Means).

02

Paradas candidatas

- Generación de puntos sobre la red vial (ej.: cada 100 m).

03

Distancia de Camino Ponderada (WPDM)

- Cálculo de distancias reales por la red vial entre hotspots y paradas.
- Pesos por cercanía y densidad de cada hotspot.

04

Evaluación con AHP

- Comparación entre paradas actuales y nuevas según:
 - POIs servidos
 - Distancia entre paradas
 - Distancia promedio parada-POIs
- AHP → score final de calidad del sistema.

Fuente: Yu et al., Optimization of Bus Stop Location (Inner Mongolia University)

Made with GAMMA

Modelo de priorización: AHP adaptado al contexto uruguayo

Tres criterios fundamentales

1. **C₁: Demanda potencial**

Población localidad + escuelas rurales + intersecciones viales (peso: 0.52)

2. **C₂: Espaciado entre paradas**

Distancia mínima 3000m entre paradas adyacentes (peso: 0.33)

3. **C₃ Distancia a POIs:**

Distancia parada-centroide poblacional (peso: 0.15)



Proceso AHP:

Matriz de comparación y pesos

Siguiendo escala de Saaty (1-9) para los tres criterios C_1, C_2, C_3 :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 1/2 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

Fórmula del puntaje final por parada:

$$P_i = 0.52 \cdot x_{1i} + 0.33 \cdot x_{2i} + 0.15 \cdot x_{3i}$$

Índice de consistencia

$$CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) = 0.07 < 0.1 \checkmark$$

CI < 0.1 confirma coherencia interna de los juicios.

Evaluación y Optimización del Sistema de Paradas

1 — Evaluación del sistema actual

- Se detectan paradas existentes en imágenes satelitales.
- Cada parada recibe un score AHP según:
 - Demanda potencial
 - Espaciado entre paradas
 - Cercanía a intersecciones
- Esto permite medir la calidad del sistema actual.

2 — Generación del sistema optimizado

- Se aplica AHP a todos los puntos candidatos del corredor.
- Objetivo: encontrar el sistema óptimo, no limitado a las paradas actuales.

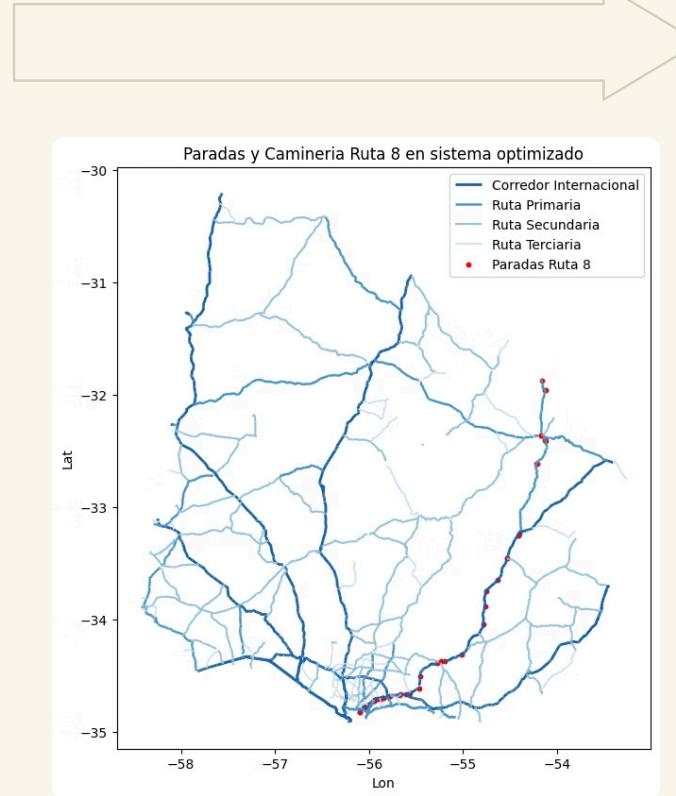
3 — Integración final

- Agregar paradas nuevas: puntos candidatos con alto score y sin parada oficial cercana.
- Eliminar paradas débiles: paradas actuales con bajo score AHP.

Resultado esperado

Un sistema más eficiente, alineado a la demanda real y sin vacíos de cobertura.

Iteraciones del Sistema de Paradas

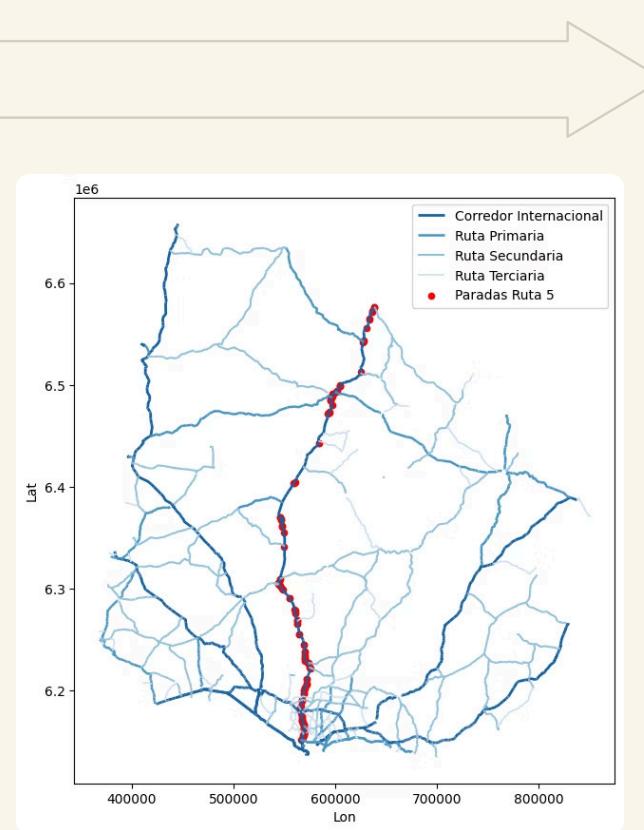


Ruta 8 - Enfoque inicial

Demand: solo localidades

Insumos: paradas detectadas + modelo de lenguaje

Objetivo: validar pipeline básico de detección + AHP

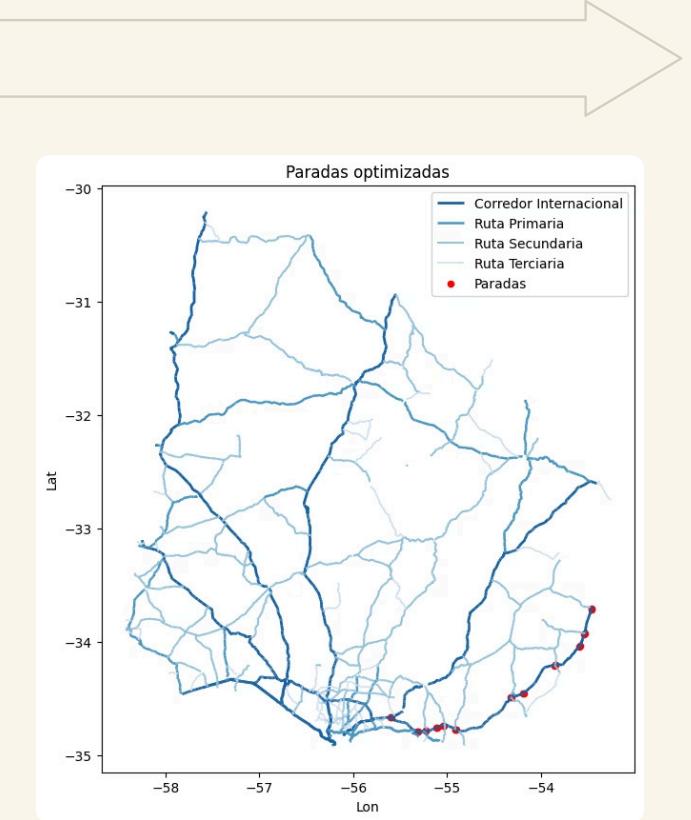


Ruta 5 - Mejoras incorporadas

Demand: localidades

Insumos: paradas detectadas + segmentación geométrica de la ruta

Objetivo: reducir falsos positivos y mejorar la validez de cada parada

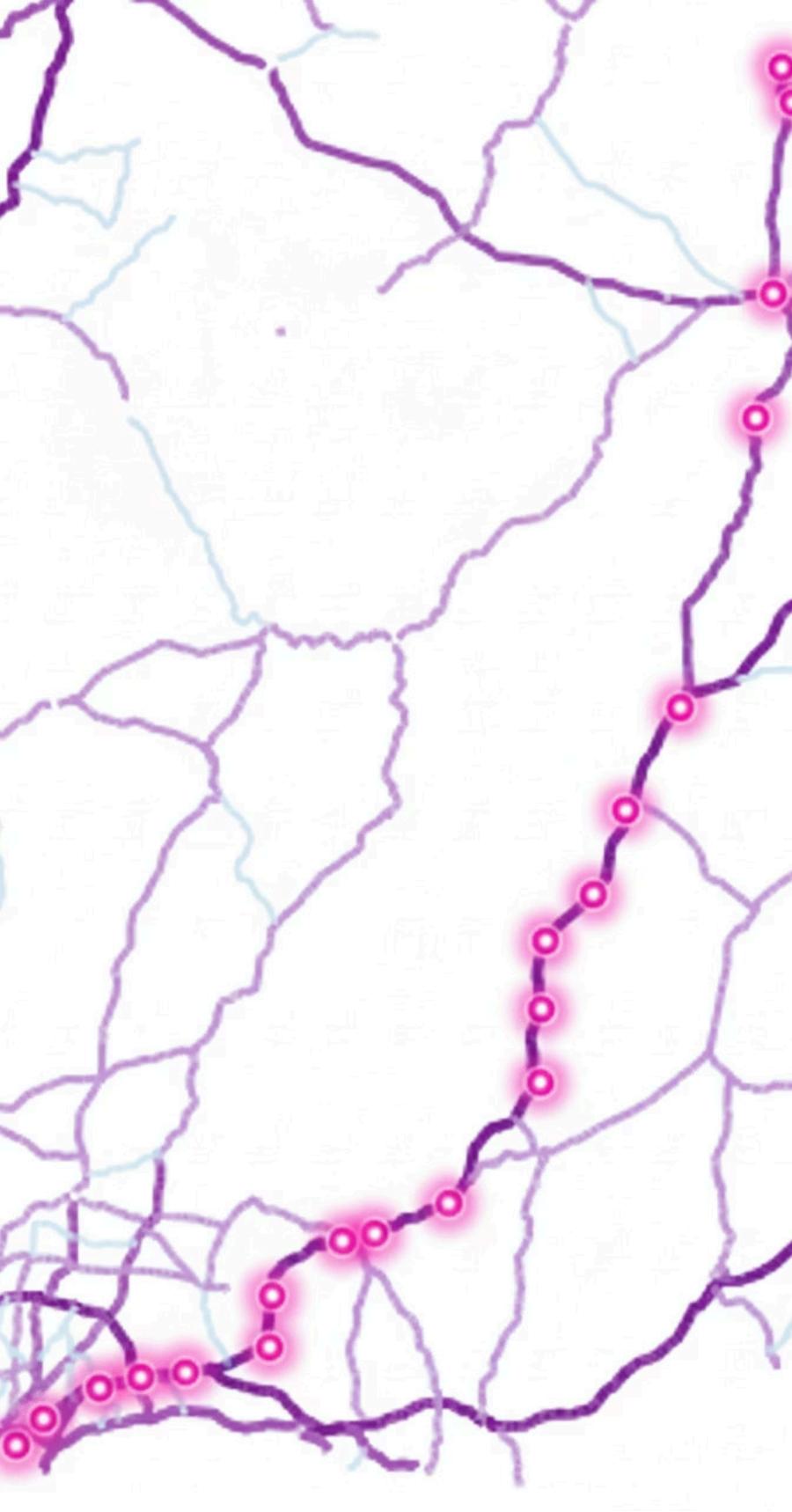


Ruta 9 - Versión completa

Demand: localidades + intersecciones + escuelas

Insumos: paradas detectadas + segmentación de rutas

Objetivo: sistema final más realista, alineado con puntos de generación de viajes



Resultados: Comparación entre sistemas (Ruta 8)

134

Paradas identificadas
Sistema actual Sid8 detectado por el modelo

0.774

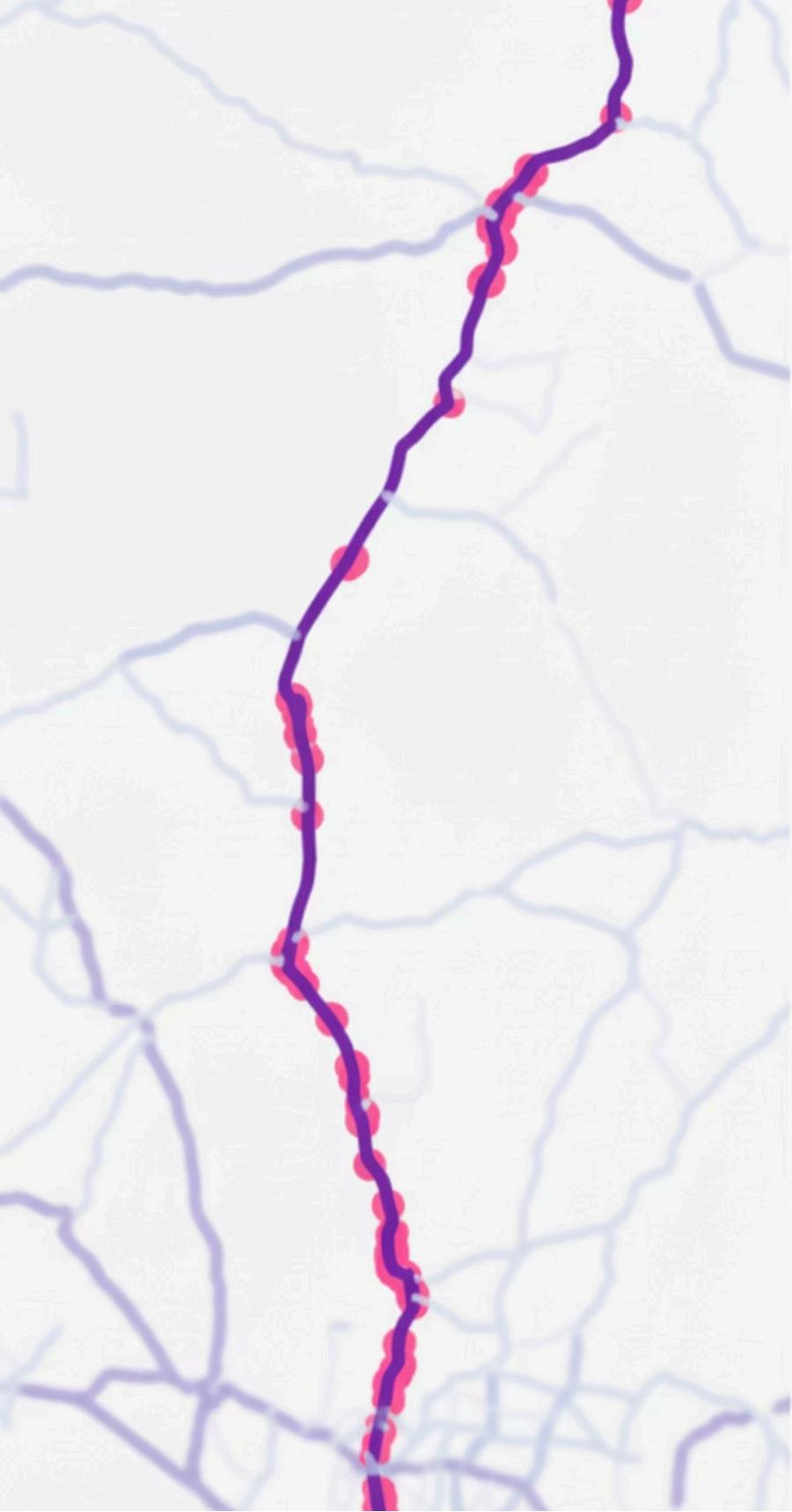
Puntaje P(Sid8)
Evaluación multicriterio del sistema existente

0.843

Puntaje P(Sopt8)
Sistema optimizado con criterios AHP

0.801

Sistema combinado
Eliminación de 5 paradas de bajo score + incorporación de 6 nuevas ubicaciones prioritarias



Resultados: Comparación entre sistemas (Ruta 5)

167

Paradas identificadas
Sistema actual Sid5 detectado por el modelo

0.797

Puntaje P(Sid5)
Evaluación multicriterio del sistema existente

0.850

Puntaje P(Sopt5)
Sistema optimizado con criterios AHP

0.809

Sistema combinado
Eliminación de 4 paradas de bajo score + incorporación de 4 nuevas ubicaciones prioritarias



Resultados: Comparación entre sistemas (Ruta 9)

151

Paradas identificadas
Sistema actual Sid9 detectado por el modelo

0.783

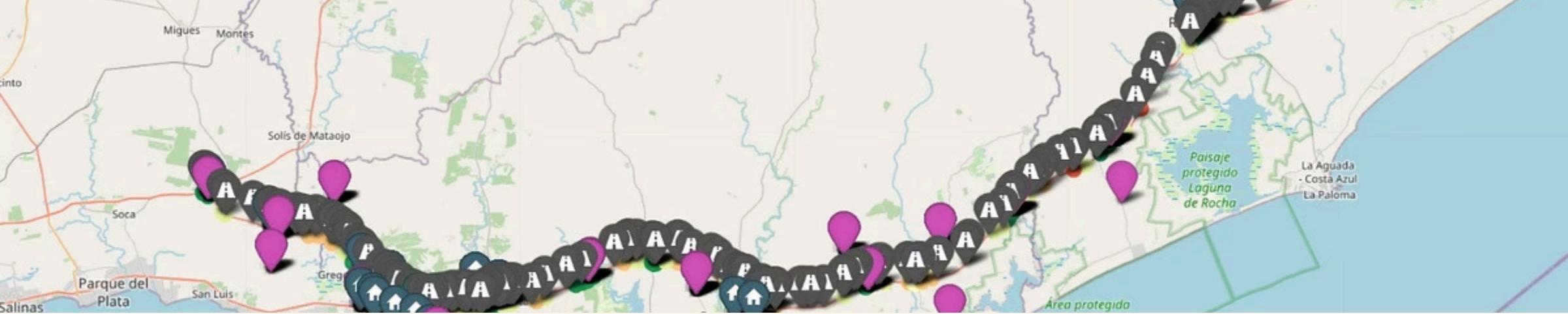
Puntaje P(Sid9)
Evaluación multicriterio del sistema existente

0.846

Puntaje P(Sopt9)
Sistema optimizado con criterios AHP

0.807

Sistema combinado
Eliminación de 3 paradas de bajo score + incorporación de 3 nuevas ubicaciones prioritarias



Mapa interactivo completo

Explora todos los resultados de optimización en un único mapa interactivo integrado.

Conclusiones y líneas futuras

Logros principales

- Pipeline reproducible y escalable para detección automática de paradas.
- Integración sólida de fuentes oficiales (INE, MTOP, ANEP).
- Sistema de priorización basado en evidencia territorial (AHP).
- Validación empírica en Rutas 5, 8 y 9.

Líneas futuras

- Incorporar modelos transformer para mejorar detección en zonas rurales.
- Ampliar POIs considerados (servicios esenciales, actividad productiva).
- Refinar la métrica de priorización con costo calibrado por parada.
- Escalar el sistema a todos los corredores nacionales.
- Actualización continua mediante nuevas imágenes satelitales.



¡Muchas gracias!

Sistema de Optimización de Paradas Suburbanas

Visión por computadora + Optimización

Ana Araújo - Pablo Maurente

Para consultas y más información:

✉️ anaraujodornel@gmail.com

✉️ pablo.maurente.1999@gmail.com

🌐 GitHub:

https://github.com/pablo005t/Bus_stop_system_UY

