



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA

# Evaluación de la planificación del transporte público en ciudades inteligentes

Informe de Proyecto de Grado presentado por

Andrés García

en cumplimiento parcial de los requerimientos para la graduación de la carrera  
de Ingeniería en Computación de Facultad de Ingeniería de la Universidad de  
la República

Supervisores

Sergio Nesmachnow  
Renzo Massobrio

Montevideo, 8 de diciembre de 2025



Evaluación de la planificación del transporte público en ciudades inteligentes por Andrés García tiene licencia [CC Atribución - No Comercial - Sin Derivadas 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

# Agradecimientos

En este camino largo y lleno de altibajos, agradezco a mi familia por haber estado siempre presente durante todo el transcurso de la carrera e impulsarme a completar esta etapa final. Su apoyo constante y la convicción de que valía la pena cerrar este capítulo fueron fundamentales para no dejarlo de lado.

A Ana, gracias también por su paciencia y soporte clave en todo este proceso, sin los cuales este tramo final habría sido mucho más difícil y cuesta arriba.

A mis amigos, por su motivación constante y por celebrar conmigo cada pequeño avance.

A mis tutores, Sergio y Renzo, les agradezco su apoyo y su disposición permanente a ayudarme, incluso en mis idas y vueltas durante todo este tiempo. A Renzo, un agradecimiento especial por su acompañamiento, motivación, seguimiento cercano y su preocupación constante que fueron decisivos para que este trabajo pudiera finalmente completarse.



# Resumen

La fiabilidad en los tiempos de viaje es un componente central del desempeño del transporte público y condiciona la experiencia cotidiana de sus usuarios. La creciente disponibilidad de datos de localización vehicular (AVL) permite analizar con precisión las discrepancias entre los tiempos planificados y los efectivamente experimentados. Este trabajo propone una metodología para procesar datos AVL, estimar duraciones reales de viaje y comparar el funcionamiento operativo con la planificación oficial. Además, se evalúa el impacto de esta variabilidad sobre la accesibilidad urbana (i.e., la facilidad con la que los ciudadanos pueden alcanzar un conjunto de destinos), contrastando la accesibilidad basada en horarios programados con aquella derivada de la operación real. Como caso de estudio se analiza el sistema de transporte público de Montevideo, Uruguay, cuantificando la puntualidad, los desvíos acumulados por viaje y las diferencias en los tiempos efectivos de desplazamiento. Además, se presenta una herramienta web que permite visualizar las disparidades entre la accesibilidad teórica y la real en diferentes zonas de la ciudad. Los principales resultados evidencian una desviación considerable en relación con los tiempos de viaje planificados, ya que más de la mitad de los viajes analizados registran al menos un desvío superior a cinco minutos en algún punto de su recorrido. Sin embargo, el impacto de esta variabilidad en la accesibilidad de los usuarios es limitado a ciertas zonas de la ciudad. Los resultados de este proyecto permiten identificar patrones operativos, revelar potenciales desigualdades territoriales y aportar evidencia para mejorar la gestión y la planificación del transporte público en la ciudad.

**Palabras clave:** Transporte Público, GPS, Puntualidad, Tiempos de Viaje, Accesibilidad Urbana, Montevideo



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Análisis de tiempos de viajes en sistemas de transporte</b>	<b>3</b>
2.1. Definición del problema	3
2.2. Caso de estudio: Sistema de Transporte Público de Montevideo	4
2.3. Trabajos relacionados	6
2.3.1. Puntualidad	6
2.3.2. Análisis de datos AVL	8
2.3.3. Accesibilidad	12
2.4. Conclusiones	14
<b>3. Metodología</b>	<b>15</b>
3.1. Recolección de datos	15
3.1.1. Posiciones GPS en tiempo real	15
3.1.1.1. Fuentes de datos GPS disponibles	16
3.1.1.2. Recolección de datos GPS	20
3.1.2. Datos estáticos del sistema de transporte	21
3.2. Procesamiento de datos	22
3.3. Aplicación a un modelo de accesibilidad	24
3.3.1. Entradas del modelo	25
3.3.2. Lógica del modelo	25
3.3.3. Resultado del modelo	26
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>29</b>
4.1. Aplicación de metodología	29
4.1.1. Recolección y limpieza de datos	29
4.1.2. Comparación entre la red observada y la red teórica de pares de paradas	31
4.2. Análisis comparativo entre horarios reales y horarios planificados	31
4.2.1. Distribución general de las diferencias entre tiempo acumulado real y planificado	31
4.2.2. Análisis de atrasos y adelantos	33
4.2.3. Puntualidad a nivel de pasada y desempeño por variante	35
4.2.4. Análisis por viaje: frecuencia de desvíos y desvíos máximos	37

4.2.5. Análisis por variante: atrasos, adelantos y desviaciones finales . . . . .	41
4.2.6. Análisis por parada: evolución del desvío a lo largo del recorrido . . . . .	43
4.2.7. Relación entre precisión y puntualidad: desempeño agregado por variante . . . . .	45
4.3. Análisis de tiempos promedio de viaje entre paradas . . . . .	47
4.4. Aplicación al modelo de accesibilidad . . . . .	50
4.4.1. Parámetros de ejecución y estadísticas generales . . . . .	50
4.4.2. Comparación de tiempos de viaje entre segmentos censales . . . . .	50
4.4.3. Análisis de casos extremos . . . . .	51
4.4.4. Accesibilidad: comparación según cantidad de destinos alcanzables . . . . .	53
4.4.5. Mapa interactivo de accesibilidad . . . . .	55
<b>5. Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>57</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	57
5.2. Trabajo futuro . . . . .	59
<b>Referencias</b>	<b>61</b>
<b>A. Anexo</b>	<b>63</b>

# Capítulo 1

## Introducción

La movilidad urbana representa un componente central para el funcionamiento cotidiano en las ciudades y para la calidad de vida de sus habitantes. En particular, el sistema de transporte público desempeña un rol fundamental en ciudades donde una proporción significativa de la población depende de él para sus desplazamientos diarios. El funcionamiento efectivo de este tipo de transporte requiere no solo una planificación adecuada, sino también una operación confiable y previsible. Un aspecto clave de este funcionamiento es la puntualidad y, en particular, la diferencia entre los tiempos de viaje planificados y los experimentados realmente por los usuarios del sistema.

La variación en el tiempo de viaje constituye un elemento determinante en la satisfacción de los usuarios del transporte público y en su percepción de fiabilidad del sistema. Tanto los atrasos como los adelantamientos resultan indeseables, los primeros generan demoras adicionales y pueden incluso impedir conexiones con otras líneas, mientras que los segundos pueden significar que un vehículo pase antes de lo esperado y obligue al pasajero a esperar un ciclo completo de la frecuencia hasta la siguiente pasada. Cuando estas situaciones se presentan con alta variabilidad, la experiencia de viaje se vuelve impredecible, lo que puede provocar pérdida de confianza en el servicio y, eventualmente, un cambio modal hacia opciones menos sostenibles como el automóvil particular.

Tradicionalmente, evaluar las diferencias entre los tiempos de viaje planificados y los realmente experimentados requería métodos manuales, como observaciones en terreno o encuestas a pasajeros, procesos costosos y limitados en cobertura temporal y espacial. Sin embargo, en la actualidad existe una amplia disponibilidad de fuentes de datos que permiten caracterizar estos fenómenos con mucha mayor precisión. Entre ellas destacan los sistemas AVL (Automatic Vehicle Location), que registran de manera continua la posición y velocidad de los vehículos, facilitando la estimación de los tiempos de viaje reales, la identificación de patrones de variabilidad y el desarrollo de estrategias operacionales más efectivas. Conociendo cómo varían los tiempos de viaje en diferentes rutas y momentos del día, es posible evaluar con mayor detalle la capacidad del sistema para conectar eficientemente distintos destinos, lo que se vincula directamente

con el concepto de accesibilidad.

La accesibilidad se entiende como la facilidad con la que los ciudadanos pueden alcanzar destinos u oportunidades (como empleo, educación o servicios) utilizando la red de transporte disponible. Este concepto es fundamental en la planificación urbana, ya que permite identificar desigualdades territoriales y evaluar qué tan efectivamente un sistema conecta distintas zonas de la ciudad. Para medirla pueden emplearse diversos indicadores, pero el tiempo de viaje suele ser uno de los más intuitivos y representativos, dado que es un indicador directo de la facilidad o dificultad con la que una persona puede alcanzar un destino. Los estudios de accesibilidad suelen basarse en los tiempos de viaje planificados, generando así estimaciones de accesibilidad teórica. Sin embargo, pocos trabajos consideran la variación observada en la operación efectiva del sistema, es decir, la diferencia entre los tiempos planificados y los realmente experimentados por los usuarios, lo que permite estimar la accesibilidad real.

El objetivo principal de este trabajo es presentar una metodología para cuantificar la variabilidad operativa de un sistema de transporte público, analizando las diferencias entre los tiempos planificados y los reales. Esto incluye la evaluación de indicadores de puntualidad por parada, los desvíos acumulados por viaje y las diferencias en los tiempos de viaje entre zonas de la ciudad. Adicionalmente, se evalúa cómo estas variaciones impactan en la accesibilidad urbana, permitiendo determinar si las irregularidades observadas afectan la capacidad efectiva del sistema para conectar las distintas zonas. Como caso de estudio, la metodología se aplica al sistema de transporte público de Montevideo.

En el sistema de transporte público de Montevideo, los ómnibus cuentan con dispositivos GPS que registran en tiempo real la ubicación geográfica de los vehículos. Estos datos permiten reconstruir el recorrido efectivo de cada unidad y constituyen una fuente de información valiosa para estudiar el desempeño real del sistema y compararlos con los horarios y tiempos planificados. Sin embargo, su aprovechamiento no es directo. Para poder utilizarlos para el análisis se requiere un procesamiento detallado que permita reconstruir pasadas reales por las paradas, estimar tiempos de viaje entre paradas y segmentos, y así poder contrastarlos con la información oficial.

En el Capítulo 2 de este documento se establece el marco conceptual del trabajo, describiendo el caso de estudio del sistema de transporte público de Montevideo, los conjuntos de datos utilizados, incluyendo su estructura y origen, y revisando trabajos relacionados en el área de recolección y procesamiento de datos GPS, análisis de puntualidad y accesibilidad urbana. En el Capítulo 3 se detalla la metodología implementada, incluyendo la recolección, limpieza y transformación de los datos GPS para reconstruir pasadas reales por paradas, la estimación de tiempos efectivos de viaje y los procedimientos para comparar la operación real con la planificada. El Capítulo 4 presenta los resultados obtenidos al aplicar la metodología sobre el caso de estudio, abarcando el análisis de puntualidad, la distribución de desvíos, las diferencias entre tiempos reales y planificados, y la evaluación del impacto sobre la accesibilidad urbana. Finalmente, el Capítulo 5 expone las conclusiones principales del estudio, la discusión de los resultados y posibles líneas de trabajo futuro.

## Capítulo 2

# Análisis de tiempos de viajes en sistemas de transporte

En este capítulo se presenta el marco teórico y los antecedentes relacionados al estudio de los tiempos de viaje en sistemas de transporte público, además de la descripción del caso de estudio. Primero se define el problema central, luego se describe el Sistema de Transporte Metropolitano de Montevideo y las características de los datos planificados disponibles. Finalmente se revisan los trabajos relacionados en torno a puntualidad, uso de posiciones GPS y su emparejamiento con paradas, y estudios de accesibilidad basados en datos planificados y reales.

### 2.1. Definición del problema

La medición y análisis de los tiempos de viaje en el transporte público constituye un elemento central para evaluar el desempeño del sistema y la calidad del servicio percibida por los usuarios. En la práctica, estos tiempos pueden presentar variabilidad respecto a los planificados, que puede estar asociada a distintos factores como condiciones del tránsito, flujos de pasajeros, semáforos y eventos inesperados. Como consecuencia, los tiempos planificados utilizados para diseñar los horarios y frecuencias pueden diferir de los tiempos efectivamente observados en la operación diaria. Esta diferencia afecta la puntualidad, la confiabilidad del servicio y la experiencia de viaje.

En muchos estudios de planificación del transporte y accesibilidad, los análisis se basan exclusivamente en los tiempos teóricos programados, ya que son fácilmente accesibles y estables en el tiempo. Sin embargo, cuando existen diferencias entre los tiempos planificados y los reales, las estimaciones a partir de ellos pueden ser imprecisas.

En sistemas donde se cuenta con la tecnología de localización de los vehículos con sus posiciones GPS, que permiten registrar en tiempo real la ubicación de cada ómnibus, estos datos permiten reconstruir los recorridos efectivamente realizados y estimar los tiempos reales de viaje entre paradas, proporcionando una visión más acorde al funcionamiento real del sistema. No obstante, su uso requiere procesos específicos de limpieza, emparejamiento con las paradas y comparación con la información planificada.

En este trabajo se aborda el problema de estudiar las diferencias entre los tiempos planificados y los tiempos reales de viaje en el transporte público. Para ello, se recolectan y procesan datos GPS reales de las unidades, se reconstruyen los tiempos observados entre paradas y se comparan con los tiempos teóricos. Luego, se estudia cómo estas diferencias inciden en las mediciones de accesibilidad utilizando el transporte público. Finalmente, se aplica la metodología al caso de estudio del sistema de transporte público de Montevideo.

## 2.2. Caso de estudio: Sistema de Transporte Público de Montevideo

El departamento de Montevideo, ubicado en el sur de Uruguay, cuenta con una superficie aproximada de 530 km<sup>2</sup> y concentra cerca del 40% de la población del país. La distribución de la población en el departamento es heterogénea, las zonas cercanas a la costa del Río de la Plata presentan mayor densidad poblacional, mientras que las áreas periféricas suelen ser más dispersas y con menor nivel de urbanización.

A efectos estadísticos y de planificación territorial, el Instituto Nacional de Estadística (INE) define una división del territorio compuesta por 1.063 segmentos censales, los cuales son unidades territoriales de uso frecuente en análisis urbanos y socioeconómicos. La Figura 2.1 muestra un mapa de Montevideo y su división en segmentos censales. Éstos incluyen información sobre su población, densidad habitacional, composición socioeconómica y otras estadísticas derivadas de los censos. Su escala relativamente pequeña los convierte en una unidad adecuada para estudios de accesibilidad y cobertura del transporte. En este trabajo, los segmentos censales son utilizados para evaluar la accesibilidad ofrecida por el sistema de transporte al considerar tiempos de viaje planificados y reales.

El transporte público de Montevideo forma parte del Sistema de Transporte Metropolitano (STM), gestionado por la Intendencia de Montevideo en coordinación con cuatro empresas operadoras privadas. El STM integra servicios urbanos y suburbanos. La red de ómnibus cuenta actualmente con 136 líneas, teniendo cada una de ellas múltiples variantes, como recorridos más cortos, destinos alternativos, y los sentidos de ida y vuelta. Considerando todas las variantes existentes, el sistema tiene en total 1.227 trayectos distintos. La red dispone de 4.878 paradas distribuidas a lo largo del departamento y una flota activa de 1.531 unidades. Cada vehículo de la flota está equipado con un siste-

ma de posicionamiento global (GPS) que transmite periódicamente la ubicación geográfica del ómnibus, permitiendo conocer su posición y velocidad a lo largo del viaje. Esta información permite monitorear en tiempo real los desplazamientos y reconstruir viajes completos mediante el procesamiento de las secuencias de ubicaciones.

En la Figura 2.2 se muestra el mapa de Montevideo con todas las paradas. Se observa que la mayor densidad de paradas y líneas está en la zona céntrica de la ciudad, y que la mayoría de las líneas convergen hacia dicha zona.

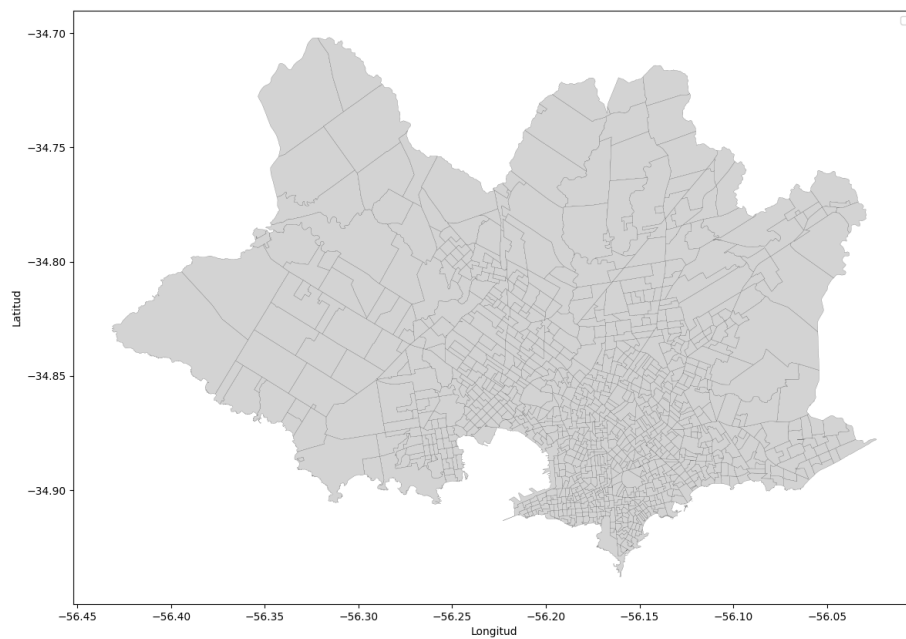


Figura 2.1: Segmentos Censales de Montevideo

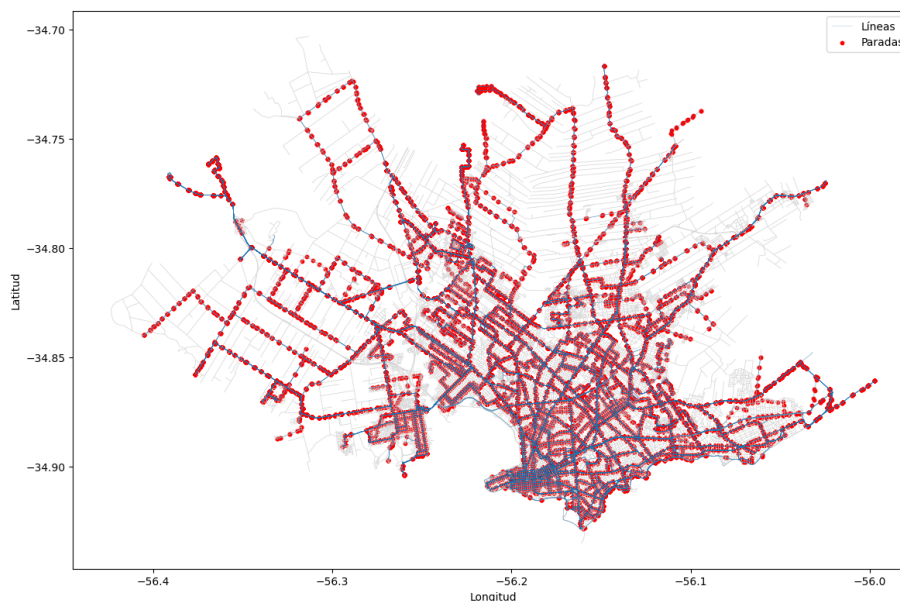


Figura 2.2: Líneas y paradas del Sistema de Transporte Metropolitano de Montevideo

## 2.3. Trabajos relacionados

En esta sección se revisan estudios vinculados al análisis de tiempos de viaje, la variabilidad en la operación del transporte público y la medición de accesibilidad. En 2.3.1 se revisan investigaciones que analizan el cumplimiento de los horarios planificados, los rangos temporales que se consideran para evaluar la puntualidad y sus implicancias sobre la calidad del servicio. Luego, en 2.3.2, se abordan estudios relacionados con la estimación de los tiempos de viaje utilizando datos reales, incluyendo metodologías basadas en GPS y técnicas para reconstruir trayectorias y detectar variabilidad. Finalmente, en 2.3.3, se examinan trabajos que integran la variación del tiempo de viaje y los datos reales en el cálculo de accesibilidad.

### 2.3.1. Puntualidad

La puntualidad es un indicador importante de la calidad del transporte público, ya que determina en gran medida la confiabilidad con que perciben los usuarios al servicio. Para quienes viajan en ómnibus, poder prever la hora de llegada de las unidades a las paradas es crucial para, por ejemplo, organizar actividades cotidianas, realizar transbordos y minimizar tiempos de espera. Cuando los vehículos se adelantan, pueden dejar atrás a los usuarios que planificaron su llegada en función del horario oficial. Cuando se atrasan, aumentan los tiempos

de espera y la incertidumbre asociada al viaje. Ambos fenómenos afectan la percepción de calidad y pueden reducir la disposición a utilizar el sistema con regularidad. Para evaluar la puntualidad, resulta necesario establecer un umbral que determine qué se considera una llegada “a tiempo” a las paradas. Este rango debe contemplar la variabilidad inherente al tránsito y a la demanda, pero al mismo tiempo reflejar el desempeño real del sistema. Definir este rango de puntualidad es un paso necesario para medir la calidad del servicio.

Diversos estudios adoptan rangos específicos según las características del sistema analizado. Carrasco (2012) analiza la operación de la Línea 31 de Zúrich (Suiza), una línea de alta calidad y demanda, utilizando métricas como el tiempo de viaje, velocidad, puntualidad y tiempo de espera. En particular, la puntualidad se evalúa mediante un indicador de desempeño (On-Time Performance, OTP) definido por el operador de la ciudad, que considera una pasada puntual si ocurre no más de 30 segundos antes y no más de 60 segundos después de la hora programada. Este rango acotado refleja una expectativa de adherencia estricta al horario, coherente con la operación de alta frecuencia y confiabilidad esperada. Los resultados muestran variaciones según el momento del día que se observe, con un mejor desempeño en momentos de menor demanda, donde los servicios presentan retrasos promedio de apenas 24 segundos, y un peor desempeño durante el pico de la tarde, donde ocurren mayores tiempos de viaje.

Otros trabajos se concentran en el comportamiento de los conductores ante información de adherencia en tiempo real. Ji, He, y Zhang (2014) analizan la fiabilidad del servicio desde esta perspectiva. El estudio utiliza datos de AVL del Campus Loop North de la Universidad Estatal de Ohio durante el horario pico matutino en 2010 y define la puntualidad a partir de la desviación respecto al horario programado. Un ómnibus se considera temprano si su desviación es menor a -1 minuto, puntual si se encuentra entre -1 y +2 minutos, y tarde si supera los +2 minutos. Este rango acotado permite evaluar con precisión cómo reaccionan los conductores ante distintas condiciones de operación. Los autores encuentran evidencia de que los conductores ajustan su comportamiento para mantener la adherencia al horario. Los buses que llegan temprano tienden a extender su tiempo de permanencia o reducir su velocidad, mientras que los que llegan tarde acortan la detención e intentan recuperar tiempo en el recorrido, aunque con menor eficacia debido al tráfico en horas pico.

Un enfoque complementario es presentado en Arhin y Noel (2013), donde los autores examinan el desempeño del transporte público en la ciudad de Washington. El objetivo es analizar la puntualidad del sistema considerando dos definiciones distintas de llegada a tiempo a una parada. El estudio utiliza, por un lado, el umbral definido por la Autoridad de Tránsito Metropolitano de Washington (WMATA), que considera puntual un ómnibus que arriba dentro del rango de 2 minutos temprano a 7 minutos tarde, asociado al cumplimiento de una meta del 78 % del total de pasadas por parada. Por otro lado, se contrastan estos resultados con el estándar de la industria, que es más estricto y que define una llegada puntual dentro del intervalo de 1 minuto temprano a 5 minutos tarde, utilizado por diversas agencias en Estados Unidos. A partir de una medición realizada en 15 rutas durante períodos de hora pico entre Junio de 2012 y Junio

de 2013, el informe evidencia cómo la elección del umbral afecta la evaluación del desempeño. Mientras que con el criterio de la WMATA se alcanza un 75 % de pasadas puntuales por las paradas, este valor cae al 61 % bajo el estándar más estricto.

El manual *Transit Capacity and Quality of Service Manual*, [TRB and NASEM \(2013\)](#), proporciona el marco de referencia más utilizado en Estados Unidos para evaluar la fiabilidad de los servicios de transporte público. En este manual se destaca que la definición del umbral de puntualidad afecta directamente los resultados, y un criterio habitual es considerar “a tiempo” una pasada que ocurre entre 1 minuto antes y 5 minutos después del horario programado, coincidiendo con el criterio más estricto utilizado en el trabajo anterior. El manual también resalta que las pasadas tempranas son especialmente problemáticas para los usuarios, ya que para un pasajero que llega a tiempo, una pasada temprana es equivalente a que el vehículo se retrase por la cantidad de tiempo en que demora en pasar la siguiente unidad, ya que perdió su viaje programado. Sin embargo, las salidas ligeramente tempranas desde origen (como el minuto de tolerancia) pueden ayudar a mantener la fiabilidad más adelante en la ruta.

Finalmente, otros estudios, como [Mishra, Pulugurtha, y Mathew \(2023\)](#) y [Urban Transport Group \(2014\)](#), utilizan también el intervalo de entre 1 minuto temprano a 5 minutos tarde como criterio para definir una pasada “a tiempo”, confirmando que es uno de los criterios más extendidos en la evaluación de la puntualidad del transporte público. En conjunto, los trabajos revisados muestran una tendencia hacia rangos relativamente estrictos, motivados por la creciente disponibilidad de datos AVL y por el interés en medir la calidad del servicio desde la perspectiva del usuario.

### 2.3.2. Análisis de datos AVL

El uso de datos AVL en ómnibus, y en particular de posiciones GPS, se ha vuelto cada vez más accesible y extendido, lo que ha permitido el desarrollo de una gran variedad de estudios orientados a analizar los tiempos de viaje y el desempeño operativo mediante estas tecnologías. Esta disponibilidad creciente de datos ha impulsado metodologías más precisas y escalables para evaluar la operación real del transporte público, superando las limitaciones de los sistemas tradicionales basados en observación manual.

Uno de los trabajos que muestra este cambio es [Bullock, Jiang, y Stopher \(2005\)](#), donde los autores presentan el proceso que realizaron para obtener posiciones GPS de los ómnibus y medir su puntualidad y tiempos de viaje, a diferencia de lo que se hacía anteriormente con observadores ubicados en puntos fijos del recorrido. El objetivo principal fue desarrollar una herramienta de bajo costo que recolecte las posiciones GPS de los ómnibus, para luego procesarlas y así medir la puntualidad de los servicios. La recolección de las posiciones es hecha de forma pasiva, almacenándolas en el correr del viaje y siendo obtenidas al finalizar el recorrido. Los autores lograron mostrar que utilizando esta herramienta se puede recolectar gran cantidad de datos a bajo costo. Desarrollaron también un software para el procesamiento de dichas medidas, con el objetivo

de obtener información analizable, calcular tiempos de viaje y compararlos con los datos planificados. Los resultados dejaron ver retrasos acumulativos al final de las rutas, confirmando a la vez que esta tecnología es una herramienta útil y económica para recolectar datos y analizar los tiempos de viaje en el transporte público. El estudio concluye que la utilización de posiciones GPS pasivas constituye una solución técnica económica y eficaz para operadores que buscan mejorar la medición del desempeño sin afrontar la inversión que requieren los sistemas AVL en línea. Su portabilidad, bajo costo y capacidad para generar conjuntos de datos amplios lo convierten en una herramienta especialmente útil en rutas extensas o en contextos de congestión.

Otro aporte relevante es el trabajo de [Yan, Liu, y Bie \(2016\)](#), en el que desarrollan y validan una metodología integral para evaluar el rendimiento operativo de rutas de ómnibus utilizando grandes volúmenes de datos provenientes de sistemas AVL. Este estudio aprovecha las capacidades de registro continuo de posiciones GPS para analizar en detalle tanto la variabilidad de los tiempos de viaje como el nivel de servicio y la regularidad del tránsito. El objetivo central es proporcionar a las autoridades y operadores herramientas cuantitativas que permitan diagnosticar problemas operativos, ajustar la programación y mejorar la gestión de los servicios. La propuesta se estructura en dos dimensiones complementarias. La primera se orienta al análisis del tránsito desde la perspectiva operativa, mediante indicadores como percentiles de tiempo de viaje, coeficiente de variación, velocidad y distribuciones de tiempos. La segunda dimensión se focaliza en aspectos vinculados a la regulación del servicio, incluyendo la adherencia al horario y la regularidad del intervalo. Este conjunto de indicadores permite evaluar no solo la eficiencia del movimiento de los ómnibus, sino también la estabilidad y previsibilidad del servicio desde la perspectiva del usuario. La metodología se aplicó a un caso de estudio real, analizando una ruta en uno de los corredores más congestionados del distrito central de Suzhou (China). A pesar de contar con un carril exclusivo para los ómnibus en parte del recorrido, y prioridad semafórica en varias intersecciones, los resultados revelaron un bajo desempeño global. Se detectó una adherencia al horario deficiente, marcada por un alto porcentaje de salidas tempranas, lo que contribuye a la irregularidad de los intervalos. El análisis permitió identificar tramos críticos donde se combinan baja velocidad, alta variabilidad y elevada carga de pasajeros, evidenciando cuellos de botella que degradan la fiabilidad del servicio.

Un tercer aporte significativo dentro de la literatura es el trabajo de [Xu y Shen \(2012\)](#), que propone un enfoque automatizado para determinar los tiempos de viaje programados (Scheduled Trip Time, ST) utilizando datos históricos de sistemas AVL. El estudio parte de la problemática de que en numerosos sistemas de transporte los tiempos programados suelen establecerse de manera manual, con base en la experiencia del programador, y manteniéndose constantes a lo largo del día. Esta práctica impide capturar la variabilidad real de las condiciones de operación, lo que conduce a horarios poco realistas y baja adherencia. Frente a esto, los autores desarrollan un método que automatiza la determinación del ST mediante el procesamiento de grandes volúmenes de datos de posiciones GPS. La metodología se estructura en cuatro etapas principales.

En primer lugar, se realiza la extracción y depuración de muestras de tiempo de ejecución a partir de los datos de posicionamiento, incluyendo el filtrado de registros inválidos y detección de valores atípicos. Luego, se divide el día en bandas de tiempo homogéneas, mediante un algoritmo que pondera el número de observaciones en cada banda, evitando que segmentos con pocas muestras distorsionen la estructura temporal. Sobre esta base, la tercera etapa genera los valores de ST a partir de un modelo de optimización orientado a minimizar el tiempo de espera de los pasajeros. Finalmente, el método se valida mediante un sistema de simulación para recrear condiciones realistas y evaluar el rendimiento de los horarios calculados. En términos generales, el estudio evidencia el potencial del análisis de posiciones GPS, no solo para diagnosticar problemas de operación, sino también para optimizar la planificación del servicio. Al automatizar un proceso tradicionalmente basado en juicio manual, la metodología permite capturar la variabilidad temporal del tráfico y generar horarios más realistas y robustos. Como limitación, los autores señalan que el enfoque se sustenta en patrones pasados, destacando la necesidad de integrar técnicas de predicción en investigaciones futuras.

Pangilinan, Wilson, y Moore (2008) también analizan cómo la información de posiciones GPS en tiempo real puede utilizarse para mejorar la fiabilidad del servicio de ómnibus, abordando una de las principales dificultades de los sistemas de transporte público, la variabilidad en los intervalos y la inestabilidad operativa. Los autores se centran en un proyecto piloto implementado por la Chicago Transit Authority (CTA) en la Ruta 20 Madison, donde se equiparon ómnibus con tecnología capaz de transmitir en tiempo real su ubicación y adherencia al horario. El experimento se desarrolló durante varios días de operación en horas pico, en los que un despachador utilizó exclusivamente la información de GPS para tomar decisiones operativas y coordinar acciones con supervisores de campo ubicados en puntos estratégicos. Los resultados mostraron mejoras significativas en la regularidad de los intervalos, con una reducción de la variación del 21 % en el punto estudiado durante la semana del experimento. Además, la disponibilidad de información en tiempo real permitió implementar intervenciones que no serían posibles mediante supervisión tradicional, como la corrección inmediata de grandes brechas de servicio. Una simulación basada en datos históricos confirmó que la estrategia podría generar mejoras aún mayores si se aplicara de forma sostenida. Finalmente, el estudio identifica desafíos clave para su implementación a gran escala, como la sobrecarga de información para los despachadores y las limitaciones de comunicación con supervisores de campo, y propone avanzar hacia sistemas más automatizados.

La literatura también examina la calidad de los datos AVL y su impacto en las métricas derivadas. Barabino, Di Francesco, y Mozzoni (2017), por ejemplo, estudian el impacto de anomalías frecuentes en los datos de posiciones GPS sobre la medición de la fiabilidad del servicio. Aunque estos sistemas están ampliamente difundidos, los registros suelen incluir inconsistencias, como puntos de datos faltantes y adelantamientos no detectados, que afectan directamente la estimación de métricas clave como los intervalos entre dos unidades consecutivas y la puntualidad. Ignorar estas anomalías puede conducir a interpretaciones erróneas

del desempeño real del servicio. El trabajo analiza cómo estas anomalías alteran la evaluación de la regularidad y la desviación de horario, comparando seis escenarios de tratamiento de datos, desde uno completamente corregido (tomado como referencia) hasta otros donde se ignoran uno o varios tipos de anomalías. Para ello, se aplican algoritmos de reconstrucción temporal previamente validados y se utilizan datos reales, los cuales son más de 180 mil registros GPS provenientes de tres rutas de distinta frecuencia del operador CTM en Cagliari (Italia). En conjunto, el trabajo destaca que una medición de fiabilidad centrada en la experiencia del pasajero requiere procesar y corregir explícitamente las anomalías presentes en los datos de posiciones GPS, especialmente al evaluar la regularidad del servicio.

Por otro lado, [Wessel, Allen, y Farber \(2017\)](#) se centran en la integración entre datos planificados y observados, presentando un método para mejorar retroactivamente la precisión de General Transit Feed Specification (GTFS), un estándar ampliamente utilizado por agencias de transporte para publicar información sobre rutas, horarios y paradas en un formato estructurado. Los datos GTFS describen cómo debería operar el sistema según los horarios programados, pero no reflejan necesariamente cómo operan realmente los vehículos en condiciones de tráfico, demanda o eventos imprevistos. El objetivo central del trabajo es transformar estos datos basados en la planificación, en uno construido a partir de observaciones reales del movimiento de los vehículos, para obtener representaciones más precisas de la operación del sistema y poder analizar desempeño, fiabilidad y accesibilidad. La metodología combina las fuentes de datos GTFS existente, que provee la estructura del servicio y la ubicación de las paradas, los datos de posicionamiento de vehículos en tiempo real que capturan la operación observada y la red vial que permite reconstruir las trayectorias. A partir de estas fuentes se monitorean los vehículos, se infieren sus viajes, se corrigen los errores de GPS, y finalmente se estiman los tiempos reales de pasada por cada parada del sistema. El proceso inicia con la recopilación de datos GPS provenientes de una API pública. Cada registro incluye la identificación del vehículo, la ruta, la dirección, la ubicación GPS y la hora en la que fue reportada. Los datos recolectados se almacenan en una base de datos PostGIS para luego procesarlos. Dado que los registros GPS contienen errores espaciales y temporales, se aplica un proceso de map-matching para mejorar su precisión y reconstruir trayectorias realistas. Primero se filtran posiciones claramente erróneas mediante un análisis de velocidad entre puntos consecutivos, eliminando aquellos que implicarían velocidades muy altas e irreales. Luego, las secuencias depuradas de posiciones se ajustan a la red vial considerando las rutas efectivamente operadas por los vehículos. Una vez reconstruida cada trayectoria, se determinan los tiempos reales de llegada a las paradas. Para ello, se identifican las posiciones GPS relevantes a partir del GTFS (según ruta y sentido) y se filtran aquellas ubicadas dentro del rango de los 20 metros de la trayectoria emparejada. Cada parada se asocia al punto más cercano del recorrido, y su hora de paso se estima mediante interpolación lineal entre las posiciones GPS inmediatamente anteriores y posteriores. El resultado es un conjunto de datos GTFS retrospectivo completo, que refleja día por día cómo operó efectivamente el sistema. Su

utilidad se demuestra en un estudio sobre accesibilidad laboral en la ciudad de Toronto (Canadá), donde se comparan los resultados obtenidos con datos programados y observados, destacando diferencias en el acceso a oportunidades y la importancia de trabajar con datos reales para obtener mediciones más precisas del desempeño del transporte público.

Finalmente, en [Nesmachnow y cols. \(2023\)](#), los autores presentan una metodología basada en big data para la caracterización detallada de los tiempos de viaje en sistemas de transporte público. El enfoque integra datos abiertos de infraestructura y horarios, información de ventas de boletos y registros GPS en tiempo real, permitiendo estimar de manera precisa los tiempos de viaje de los ómnibus y cuantificar la actuación efectiva del servicio. La metodología se aplicó al Sistema de Transporte Metropolitano de Montevideo, utilizando técnicas de computación paralela para manejar el volumen de datos. El estudio emplea un conjunto de métricas, como demora respecto al horario planificado, tasa de arribo en tiempo (OTAR), velocidad operacional y tiempo adicional respecto al automóvil (ATToA), para evaluar la puntualidad, eficiencia y estabilidad del sistema. Los resultados muestran un nivel razonable de cumplimiento del horario y una proporción relativamente baja de desvíos significativos. También se identifican variaciones importantes entre líneas y casos extremos que sugieren la necesidad de intervenciones operativas. En conjunto, el trabajo demuestra el potencial de la fusión de datos abiertos y reales para monitorear el desempeño del transporte público y orientar decisiones de planificación y gestión.

En conjunto, estos trabajos muestran la evolución de las metodologías de datos AVL basadas en posiciones de GPS, desde herramientas de bajo costo orientadas a medir puntualidad hasta sistemas complejos que permiten reconstrucción de trayectorias, análisis de fiabilidad, generación automatizada de horarios y estudios de accesibilidad basados en datos observados.

### 2.3.3. Accesibilidad

Una de las aplicaciones más relevantes del uso de datos GPS en el transporte público, tal como se observa en trabajos previos, es la evaluación de la accesibilidad. En este contexto, la accesibilidad se entiende como la facilidad con la que las personas pueden alcanzar destinos u oportunidades empleando la red de transporte disponible. Incorporar los tiempos observados, y no limitarse únicamente a los planificados, permite estimar con mayor precisión el acceso efectivo a oportunidades, así como cuantificar el impacto que generan los retrasos, adelantos y variaciones operativas.

En esta línea, [Batty \(2009\)](#) presenta una revisión de la evolución del concepto de accesibilidad en la planificación urbana y del transporte, destacando la diversidad de enfoques desarrollados durante casi un siglo. Además afirma que la accesibilidad se ha convertido en un pilar de la planificación durante los últimos cincuenta años. Esto implica que entenderla adecuadamente es fundamental para analizar cómo las personas interactúan con el territorio, cómo se distribuyen las actividades y cómo se estructuran las ciudades. El autor señala que, si bien la accesibilidad se ha consolidado como un elemento central para

comprender dicha interacción, en su momento existía una fragmentación conceptual significativa. Batty define a la accesibilidad como la relación entre las oportunidades disponibles en un lugar y el costo necesario para alcanzarlas, y distingue tres aproximaciones principales al concepto de accesibilidad. La accesibilidad basada en oportunidades se centra en el comportamiento y en las posibilidades de acceso a actividades valiosas, entendiendo que lo relevante es cuán cerca está un individuo de las oportunidades disponibles, más que la estructura detallada del sistema de transporte. La accesibilidad basada en nodos, en cambio, hace explícita la infraestructura física y evalúa la conectividad de puntos específicos de la red, como intersecciones o estaciones, mediante distancias o tiempos mínimos hacia otros nodos. Finalmente, la accesibilidad basada en segmentos desplaza el análisis desde los puntos hacia los tramos de la red, midiendo cómo se relacionan entre sí las calles o segmentos viales en términos de integración.

El estudio [Nichols, Ryan, y Palmqvist \(2024\)](#) analiza cómo los retrasos recurrentes en el transporte público afectan la accesibilidad a los puestos de trabajo y las decisiones de viaje de los usuarios en la región de Scania, Suecia. A diferencia de las evaluaciones basadas únicamente en horarios programados, el trabajo incorpora datos reales de operación para medir la accesibilidad observada, permitiendo capturar la pérdida efectiva de oportunidades que generan los retrasos. Para ello, los autores construyen dos versiones paralelas del sistema de transporte, una basada en horarios programados y otra utilizando tiempos de viaje reales. Con estas dos representaciones comparan el acceso a oportunidades laborales bajo distintos presupuestos de viaje. Además, estiman retrasos recurrentes mediante la mediana del atraso entre pares origen-destino. Los resultados muestran que los retrasos reducen la accesibilidad a los puestos de trabajo en torno a un 4–9%, dependiendo del umbral temporal considerado. Esta pérdida relativa es más marcada en zonas periféricas, aunque en términos absolutos impacta más en áreas urbanas donde se concentra la población. El estudio también encuentra que una mayor exposición a retrasos recurrentes se asocia con una menor probabilidad de elegir el transporte público frente a otros medios de transporte.

En el caso de Montevideo también existe un conjunto relevante de estudios que exploran la accesibilidad desde distintas perspectivas. Un aporte destacado es [Hernandez, Hansz, y Massobrio \(2020\)](#), donde se examina cómo la accesibilidad territorial a empleos, es decir la capacidad de llegar físicamente a las oportunidades laborales mediante el transporte público, influye tanto en su distribución social como en la tasa de desempleo. En una primera instancia, el estudio cuantifica y describe los patrones de accesibilidad en la ciudad a partir de un indicador de oportunidades acumuladas y una matriz de tiempos de viaje construida específicamente para el análisis. Este abordaje permite caracterizar los niveles de acceso efectivo a empleos según ubicación y condición socioeconómica, y realiza un diagnóstico territorial de la accesibilidad, mostrando que los sectores más pobres y periféricos no solo disponen de menos oportunidades alcanzables, sino que esta menor accesibilidad aumenta de forma medible su riesgo de desempleo. En este trabajo se presenta un modelo, creado y aplicado

por los autores, para obtener una matriz origen-destino de tiempos de viaje entre zonas de la ciudad, considerando los tiempos de caminata, espera y a bordo de los ómnibus. En el documento [Massobrio, Hernández, y Hansz \(2019\)](#) se explica más al detalle dicho modelo, que es el que va a ser utilizado en este trabajo.

Finalmente, otros estudios complementan este panorama analizando la accesibilidad en relación con diferentes tipos de oportunidades en la ciudad. Por ejemplo, [Hernandez \(2018\)](#) aborda su vínculo con el acceso a empleo y educación, mientras que [Hernandez y Rossel \(2022\)](#) estudia cómo la accesibilidad del sistema de transporte influye en el acceso a centros de salud. En conjunto, estas investigaciones muestran que la accesibilidad en Montevideo presenta desigualdades territoriales y sociales, y que su evaluación depende en gran medida de contar con datos de operación confiables y adecuadamente procesados.

## 2.4. Conclusiones

En conjunto, los trabajos revisados muestran la importancia de analizar la puntualidad, la variabilidad de los tiempos de viaje y su impacto tanto en la calidad del servicio como en la accesibilidad. La mayoría de estos estudios aprovechan datos provenientes de tecnologías AVL, en particular de GPS, para evaluar la confiabilidad operativa y la variabilidad de los tiempos de viaje. Sin embargo, existen pocos trabajos relacionados en el contexto de Montevideo, Uruguay. Si bien el estudio detallado en la revisión de la literatura ([Nesmachnow y cols., 2023](#)) utiliza fuentes de datos similares a las utilizadas en este trabajo, su evaluación se centra en los tiempos de viaje de manera general, sin aplicar los criterios de la literatura respecto a la puntualidad, ni distinguir entre llegadas anticipadas o atrasadas a las paradas de ómnibus.

En cuanto a la literatura relacionada al concepto de accesibilidad, se observa que la mayoría de los trabajos en el área utilizan indicadores de accesibilidad basados en horarios planificados. Pocos trabajos establecen indicadores de accesibilidad basados en tiempos de viaje reales. En particular, en el contexto de Montevideo, todos los trabajos relevados que estudian la accesibilidad en la ciudad a diferentes oportunidades se basan exclusivamente en tiempos de viaje teóricos o planificados. Esto hace que los resultados reflejen el sistema diseñado, pero no necesariamente el sistema tal como es experimentado por los usuarios en la realidad. En este contexto, el presente trabajo aporta la contribución de incorporar datos de posiciones GPS reales para reconstruir las pasadas por parada, comparar tiempos de viaje reales con los planificados y, posteriormente, generar matrices de tiempo de viaje tanto reales como teóricas que sirven como insumo para analizar la accesibilidad. Esta integración permite evaluar cómo las diferencias entre la operación planificada y la operación efectiva se traducen en variaciones en la accesibilidad. De este modo, el estudio complementa la evidencia disponible y ofrece una perspectiva más alineada con la experiencia real de los pasajeros.

## Capítulo 3

# Metodología

Este capítulo describe la metodología propuesta para el análisis de los tiempos de viaje en sistemas de transporte público, ejemplificando en particular con las fuentes de datos disponibles para el caso de estudio de la ciudad de Montevideo. En primer lugar, la Sección 3.1 presenta el procedimiento de recolección de datos a partir de la observación real y de la planificación, detallando las fuentes de información utilizadas y los criterios aplicados para obtener los datos del sistema de transporte. Luego, la Sección 3.2 describe el procesamiento de datos, donde se explican los pasos seguidos para filtrar, estructurar y vincular los distintos conjuntos de datos, así como la generación de las variables necesarias para el análisis posterior. Finalmente, la Sección 3.3 expone la aplicación de estos datos al modelo de accesibilidad, integrando la información procesada para comparar la accesibilidad dentro de la ciudad estudiada en función de los tiempos de viaje estimados según ambas fuentes de datos.

### 3.1. Recolección de datos

Esta sección describe la metodología seguida para la recolección de los datos necesarios para el análisis. En la Sección 3.1.1 se detalla el procedimiento de obtención de posiciones GPS en tiempo real de los ómnibus, incluyendo las fuentes disponibles, la evaluación de alternativas y el mecanismo implementado para recolectar información de manera periódica. Posteriormente, en la Sección 3.1.2 se presentan los datos estáticos del sistema de transporte, incluyendo los horarios programados, los recorridos de las líneas y la ubicación de las paradas, ejemplificándolo con los datos obtenidos del portal de datos abiertos de la Intendencia de Montevideo.

#### 3.1.1. Posiciones GPS en tiempo real

Para calcular los tiempos de viaje reales entre paradas es necesario contar con las posiciones GPS de todos los ómnibus en intervalos regulares de tiempo.

En la Sección 3.1.1.1 se presentan y comparan las distintas fuentes de datos GPS disponibles, evaluando su adecuación para este trabajo y justificando la selección del servicio finalmente utilizado. Luego, en la Sección 3.1.1.2 se detalla el procedimiento implementado para la recolección periódica de los datos, incluyendo la descripción del script desarrollado, la frecuencia de captura y el almacenamiento de la información en la base de datos.

#### 3.1.1.1. Fuentes de datos GPS disponibles

La Intendencia de Montevideo dispone de varios servicios web (APIs) orientados al transporte público. La API “Servicios Abiertos - Transporte” (<https://github.com/dti-montevideo/servicios-abiertos/blob/master/transporte.md>) provee información relativa a las líneas de ómnibus, las paradas y los horarios planificados. Por otro lado, también existe la API pública <https://api.montevideo.gub.uy/apidocs/publictransport>, que proporciona información de los ómnibus, incluyendo la lista de paradas, las líneas que pasan por cada una de ellas y los próximos ómnibus estimados a llegar a determinada parada de acuerdo a los horarios planificados. Sin embargo, ambas APIs están orientadas a datos planificados (i.e., teóricos) y lo que buscamos para este trabajo es información en tiempo real sobre las posiciones de las unidades.

Por tal motivo, fue necesario identificar una fuente que ofrezca las ubicaciones en tiempo real de los vehículos. Durante esta búsqueda, se analizó la aplicación web ‘Cómo ir’ (<https://m.montevideo.gub.uy/comoir/>), la cual muestra un mapa donde se pueden visualizar todas las paradas, pudiendo seleccionar una y ver los ómnibus que están próximos a llegar. Al inspeccionar las llamadas que hace la aplicación para obtener esta información, se observa que al seleccionar una parada, se realiza una llamada a la API: [https://api.montevideo.gub.uy/transporteRest/siguientesParada/:id\\_parada](https://api.montevideo.gub.uy/transporteRest/siguientesParada/:id_parada). Esta API devuelve una respuesta en formato JSON con información sobre los próximos arribos. La respuesta incluye información acerca de cada unidad próxima a arribar a la parada, incluyendo las coordenadas de su ubicación actual, el destino, el nombre de la línea, el código de la variante, el identificador del ómnibus y de la empresa, y los minutos en los que se estima que va a llegar a la parada. El Listado 1 muestra una respuesta de ejemplo correspondiente a la parada con identificador 4002.

Si bien esta API permite obtener la posición de los ómnibus próximos a una parada específica, su utilización resulta ineficiente para este trabajo, ya que implicaría consultar individualmente cada una de las paradas del sistema para obtener la posición de todas las unidades.

Como alternativa, se encontró una herramienta web pública ofrecida por la Intendencia de Montevideo donde se presenta un mapa interactivo que permite visualizar la posición en tiempo real de todos los ómnibus en servicio, pudiendo filtrar por compañía o por número de línea. La interfaz de esta herramienta web se puede ver en la Figura 3.1 y la herramienta se encuentra disponible en <https://www.montevideo.gub.uy/buses/>.

```
[
  {
    "time": 1745971200000,
    "coordinates": [
      -56.17575,
      -34.90389
    ],
    "destino": "CEMENTERIO DEL NORTE",
    "hora": 2100,
    "linea": "144",
    "accesibilidad": true,
    "variante": 883,
    "dia_anterior": null,
    "tipoAccesibilidad": 3,
    "minutos": 1,
    "real": true,
    "parada_actual": "JOSE ENRIQUE RODO y MAGALLANES",
    "idBus": 248,
    "idEmpresa": 50,
    "horaDesc": "21:00"
  },
  {
    ...
  },
  ...
]
```

Listado 1: Ejemplo de respuesta JSON de la API utilizada por Como Ir para la parada 4002

Inspeccionando las solicitudes de red que hace esta herramienta se observa que la aplicación se comunica con el servicio <https://www.montevideo.gub.uy/buses/rest/stm-online>. Este servicio recibe como parámetros opcionales la empresa y líneas que se quieren filtrar, mientras que si se hace la solicitud sin ningún filtro se obtienen las posiciones para todas las compañías y todas las líneas. Para realizar una consulta sin ningún filtro, se deben especificar los siguientes parámetros en la llamada:

```
{
  "empresa": "-1",
  "lineas": [""]
}
```

La Figura 3.2 muestra un ejemplo de una consulta sin ningún filtro.

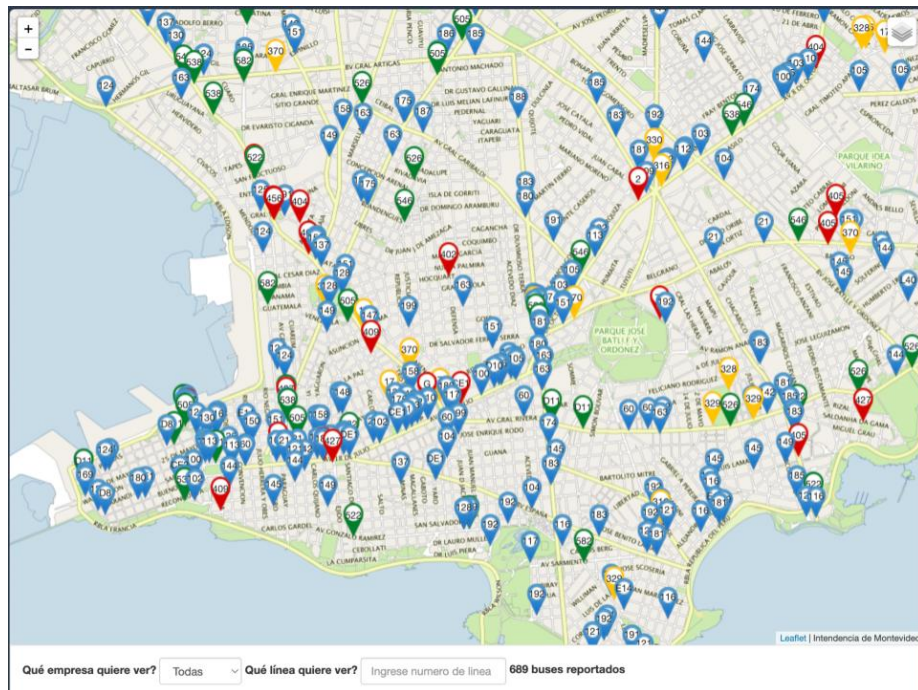


Figura 3.1: Mapa con posiciones en tiempo real de los ómnibus

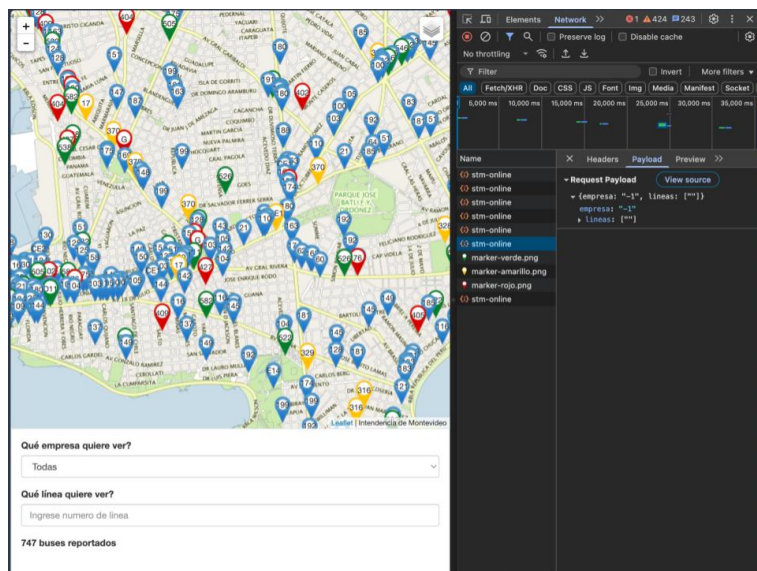


Figura 3.2: Llamada para obtener posiciones

En el caso que se desee aplicar algún filtro, la solicitud se realiza especificando la empresa y líneas a considerar, por ejemplo:

```
{
  "empresa": "50",
  "lineas": ["148", " 151"]
}
```

donde el valor 50 del parámetro “empresa” corresponde a la empresa CUTCSA y las líneas a considerar son la 148 y 151. La Figura 3.3 muestra un ejemplo de una consulta al servicio aplicando filtros.

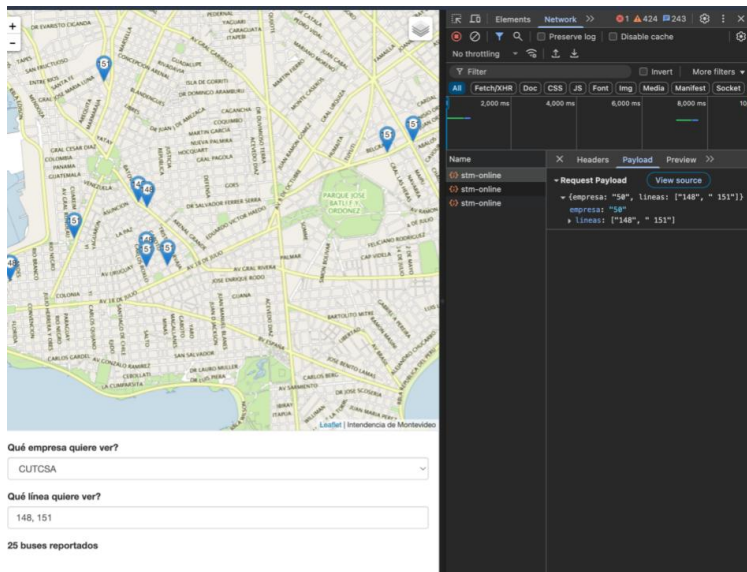


Figura 3.3: Llamada para obtener posiciones con filtro aplicado

La respuesta de este servicio se encuentra en formato JSON e incluye información relativa al identificador de la empresa y del ómnibus, la frecuencia (que indica la hora de salida desde origen para ese viaje), el código de la variante, el nombre de la línea, la velocidad al momento de la medida, el destino, las coordenadas de la posición actual, entre otras características del viaje. El Listado 2 muestra un ejemplo de esta respuesta.

Este servicio es el elegido para la recolección de los datos de GPS ya que resulta ser la mejor opción de todas las consideradas, al permitir obtener las posiciones de todas las unidades del sistema de transporte en una única consulta.

Tiempo después de haber utilizado el servicio mencionado, se observó que la Intendencia de Montevideo creó una API pública <https://api.montevideo.gub.uy/api/transportepublico/buses>, la cual expone la misma información pero con una mejor documentación. No se llegó a considerar esta API ya que se publicó luego de la etapa de recolección de datos.

```

{
  "type": "Feature",
  "properties": {
    "id": "stm.pck:50:empresa:340:variante:738:bus",
    "codigoEmpresa": 50,
    "frecuencia": 17230,
    "codigoBus": 738,
    "variante": 340,
    "linea": "103",
    "sublinea": "PZA. ESPAÑA - LOS AROMOS",
    "tipoLinea": 2,
    "tipoLineaDesc": "Urbana",
    "destino": 8,
    "destinoDesc": "LOS AROMOS",
    "subsistema": 1,
    "subsistemaDesc": "Montevideo",
    "version": 1,
    "velocidad": 7
  },
  "geometry": {
    "type": "Point",
    "coordinates": [
      -56.04408,
      -34.776443
    ]
  }
}

```

Listado 2: Ejemplo de respuesta JSON de la API del servicio de mapa de ómnibus

### 3.1.1.2. Recolección de datos GPS

Una vez elegida la fuente de datos para las posiciones en tiempo real de los ómnibus, es necesario definir el proceso para la recolección periódica de los datos. Con ese fin, se desarrolló un script que se encarga de realizar la llamada al servicio cada 15 segundos, durante una cantidad de días y en un período de horas de interés. El script almacena cada respuesta en una base de datos para su posterior procesamiento. La frecuencia definida de 15 segundos ofrece un balance razonable entre la cantidad de consultas realizadas al servicio y la granularidad de los datos obtenidos. Dicho script fue implementado utilizando el lenguaje de programación Ruby y desplegado en la plataforma Heroku ([www.heroku.com](http://www.heroku.com)).

Para la ejecución periódica se utiliza la herramienta Clockwork ([www.github.com/Rykian/clockwork](http://www.github.com/Rykian/clockwork)), la cual permite definir intervalos de ejecución para tareas. El script también se encarga de almacenar los datos obtenidos en cada

llamada en una base de datos *PostgreSQL*. Estos datos se almacenan en columnas que se describen en la Tabla 3.1. De esta manera, el sistema realiza automáticamente las consultas al servicio y almacena la información resultante. Al finalizar el período en el que se quiere recabar la información, se puede exportar la tabla de la base de datos en formato CSV para poder procesar los datos recolectados.

Columna	Descripción
timestamp	Horario cuándo se registró la posición GPS
trip_id	Identificador único del viaje
latitud	Latitud de las coordenadas GPS
longitud	Longitud de las coordenadas GPS
codigoBus	Identificador del ómnibus
codigoEmpresa	Identificador de la empresa que opera la línea
frecuencia	Horario de salida desde origen del viaje
variante	Código de la variante
linea	Nombre de la línea

Tabla 3.1: Información almacenada de las posiciones GPS

### 3.1.2. Datos estáticos del sistema de transporte

Para el análisis y la comparación con los datos reales, es necesario también contar con la información de los horarios programados, así como con información acerca de los recorridos de las líneas y de la ubicación de las paradas. La Intendencia de Montevideo publica esta información en su portal de datos abiertos, específicamente en la sección del Sistema de Transporte Metropolitano <https://ckan.montevideo.gub.uy/dataset/?tags=STM>. De allí se puede obtener información de las líneas y variantes. En el conjunto de datos llamado *uptu\_pasada\_variante* (<https://ckan.montevideo.gub.uy/dataset/horarios-de-omnibus-urbanos-por-parada-stm>), se tiene la información de horarios para todas las variantes. Allí se pueden ver los horarios de salida y el horario de pasada por cada parada del recorrido. Existe otro conjunto de datos similar, pero donde se tiene la información de las variantes que no son maximales, es decir las variantes alternativas que hacen recorridos más cortos respecto a la variante maximal. Este conjunto de datos es llamado *uptu\_variante\_no\_maximal* y se puede ver en <https://ckan.montevideo.gub.uy/dataset/lineas-de-omnibus-origen-y-destino>. En el conjunto de datos *v\_uptu\_paradas* (<https://ckan.montevideo.gub.uy/dataset/transporte-colectivo-paradas-puntos-de-control-y-recorridos-de-omnibus>) se puede obtener la información de las paradas del sistema. En estos datos se puede ver el código que identifica a cada parada, a qué línea pertenece y su ubicación geográfica. La información de los recorridos de las líneas se obtiene del conjunto de datos *v\_uptu\_lsv\_destinos* disponible en <https://ckan.montevideo.gub.uy/>

[dataset/lineas-de-omnibus-origen-y-destino](#). En estos datos se incluye la geometría de todo el recorrido de cada variante, lo que permite tener georeferenciado cada recorrido.

## 3.2. Procesamiento de datos

Una vez obtenidos los datos de posicionamiento real GPS de las unidades para el período de tiempo bajo estudio, junto con los datos planificados publicados, el siguiente paso consiste en integrar y procesar todas las fuentes de datos para poder calcular los tiempos de viaje reales y así compararlos con los tiempos de viaje planificados. El procesamiento completo se divide en varias etapas, detalladas a continuación.

El flujo comienza con la carga de los horarios planificados de las pasadas por paradas (*uptu\_pasada\_variante*). A esta información se le incorpora el nombre de la línea mediante una unión con los datos descriptivos de rutas (*v\_uptu\_lsv\_destinos*). Esta integración es importante, ya que permite identificar correctamente qué líneas están presentes en los datos planificados y, en consecuencia, filtrar las mediciones GPS para conservar únicamente aquellas pertenecientes a líneas que también están definidas en el dataset teórico. De este modo se garantiza que la comparación posterior entre tiempos reales y planificados se realice sobre conjuntos equivalentes.

Luego, se cargan los datos correspondientes a las paradas de ómnibus del sistema, provenientes del conjunto *v\_uptu\_paradas*, los cuales proporcionan tanto la ubicación de cada parada como su identificador único dentro del sistema. Esta información es necesaria para asignar una medición GPS a cada parada. A estos datos se suman las paradas asociadas a variantes no maximales (*uptu\_variante\_no\_maximal*), lo que permite capturar recorridos que difieren respecto de la variante principal. También se añade la geometría de los recorridos (*v\_uptu\_lsv\_destinos*), que define el trazado espacial de las líneas.

La integración de estos conjuntos permite construir un esquema completo del recorrido, compuesto por la secuencia ordenada de paradas (incluyendo su ordinal dentro del trayecto), la ubicación geográfica de cada una y la geometría del trazado correspondiente a cada variante. Con esta información, se calcula la distancia acumulada desde el origen de la línea hasta cada parada, para que sea posible la interpolación posterior. Además, se construye un *buffer* de 50 metros alrededor de cada parada. Este *buffer* es un área de distancia aceptable para considerar que la posición dada por el GPS corresponde a una pasada del ómnibus por la parada.

A continuación, se procede a la asociación entre mediciones GPS y paradas. Para cada viaje se identifican las paradas correspondientes a la línea y variante detectada y se intersectan sus *buffers* con las posiciones GPS, quedándose solo con las posiciones que caen dentro de los *buffers* de las paradas. Cuando existen múltiples mediciones dentro del *buffer* de una misma parada, se conserva únicamente la primera medición registrada. Se aplica una excepción a la primera parada del recorrido, debido a que el vehículo puede registrar múltiples

posiciones antes de iniciar formalmente el viaje. En este caso se selecciona la última medición dentro del *buffer*. En la Figura 3.4 se ilustra un ejemplo de este proceso, donde tenemos una parada con el *buffer* aplicado y las posiciones GPS de un viaje en particular. Se observa en la imagen que las posiciones por fuera del *buffer* no se consideran para ser asociadas a dicha parada. De las posiciones consideradas (i.e., las que están dentro del *buffer*) se toma la primera registrada.

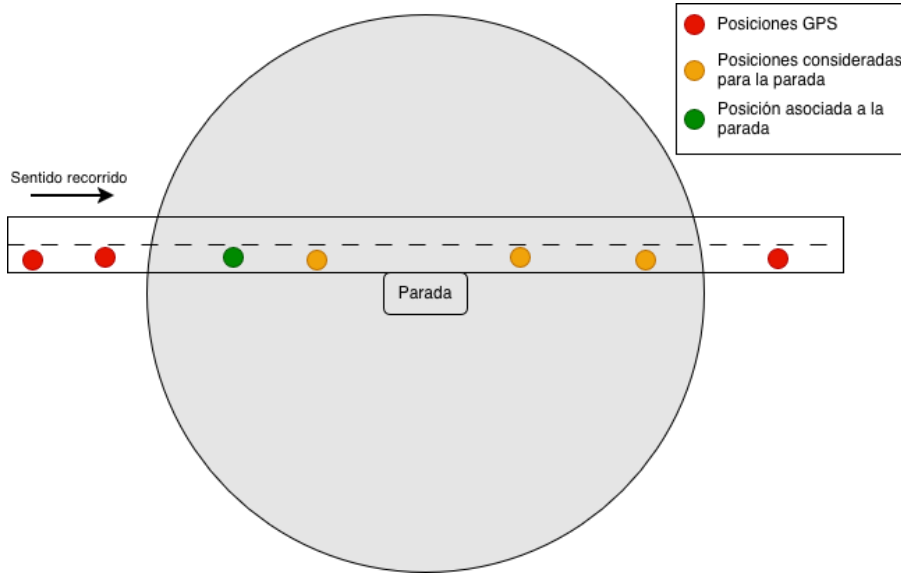


Figura 3.4: Asociación de posiciones GPS a una parada

Una vez establecida esta primera correspondencia entre posiciones GPS y paradas, se ejecuta un proceso de depuración destinado a filtrar y eliminar secuencias inconsistentes. Se descartan viajes que solo contienen una medición en la primera parada o aquellos en que el *timestamp* asignado a la primera parada es posterior al *timestamp* de la siguiente. Asimismo se eliminan tramos con intervalos superiores a 15 minutos entre mediciones en paradas consecutivas, ya que esto puede indicar interrupciones significativas, pérdida de señal GPS o errores de identificación. Además se verifica que el identificador secuencial de parada (*seq\_stop\_id*) aumente de forma estricta en cada paso del recorrido. Cuando esta monotonía se rompe, todas las mediciones posteriores se descartan, ya que se interpreta que se perdió la coherencia del viaje.

Luego de aplicar estos filtros se realiza una serie de verificaciones adicionales para asegurar la integridad de la secuencia de los viajes. Se controla que no haya duplicados en *seq\_stop\_id* ni en el identificador de parada, que todos los datos pertenezcan a la misma variante, al mismo identificador de viaje (*trip\_id*) y al mismo horario de salida, y que el orden temporal de los *timestamps* sea estrictamente creciente.

En la siguiente etapa se procede a la interpolación de paradas faltantes, un paso necesario para completar la secuencia en situaciones donde no hay detecciones GPS dentro del *buffer* de una parada. Para ello se utiliza la distancia acumulada desde el origen como eje de interpolación. La interpolación solo se ejecuta cuando la cantidad de paradas consecutivas ausentes no supera a cinco, evitando generar datos interpolados excesivamente alejados de la realidad. Tras completar esta operación, se vuelve a verificar la coherencia de la secuencia interpolada, asegurando que los identificadores de parada y su orden se mantengan consistentes y que toda la secuencia pertenezca a la misma variante.

A continuación se identifican y descartan aquellas paradas que no poseen ninguna observación real para ningún viaje durante el período analizado. Para cada parada restante se calcula el tiempo acumulado real, definido como la diferencia entre su *timestamp* asociado a las pasadas reales y la hora teórica de salida desde la primera parada. Este tiempo acumulado representa el tiempo efectivamente transcurrido desde el origen hasta cada punto del recorrido.

Para obtener el tiempo acumulado planificado, asociado a cada pasada por las paradas, se consulta el horario teórico. En principio se busca la combinación exacta entre variante, horario de salida y ordinal de parada. Sin embargo, debido a discrepancias entre los horarios, a veces esta correspondencia no existe, y el horario de salida planificado difiere por algunos minutos con los observados. En estos casos se amplía la búsqueda permitiendo coincidencias dentro de un margen entre -5 y +5 minutos en el horario de salida. Dado que las diferencias en la hora de salida dentro de este rango son mínimas, se puede asumir que el tiempo acumulado planificado obtenido sigue siendo representativo ya que son horarios similares.

Con todos estos elementos se construye una tabla donde cada fila contiene los valores de tiempo acumulado real, tiempo acumulado planificado, línea, variante, *trip\_id*, si la hora de pasada por la parada fue interpolada, el total de paradas de la variante y otros atributos relevantes. Este *dataset* constituye la base para calcular los tiempos de viaje reales entre pares consecutivos de paradas para cada viaje observado. Finalmente, al promediar los tiempos obtenidos a lo largo de múltiples viajes, se obtiene una estimación del tiempo promedio de viaje entre paradas. En la Tabla A.1 del anexo se describe el *dataset* construido con la información mencionada.

### 3.3. Aplicación a un modelo de accesibilidad

En el trabajo *Travel time estimation for public transportation systems* (Massobrio y cols., 2019), se presenta un modelo para estimar los tiempos de viaje en un sistema de transporte público, combinando información estructural del sistema (líneas, paradas, recorridos) y horarios planificados de operación. El objetivo principal del modelo es construir una representación del sistema que permita calcular tiempos de viaje entre zonas de la ciudad, considerando no solo el trayecto en ómnibus, sino también las etapas de caminata, espera y transbordos. En esta sección se describe el funcionamiento del modelo de

accesibilidad y la extensión realizada para considerar tiempos de viaje reales en lugar de planificados.

### **3.3.1. Entradas del modelo**

El modelo recibe como insumo un conjunto de datos que representan la estructura y operativa del sistema de transporte público. En primer lugar, se define una partición del territorio urbano en zonas, que funcionan como orígenes y destinos de los viajes. En particular, para el caso de estudio de este trabajo, se utilizan los segmentos censales de Montevideo.

Además, el modelo recibe información detallada sobre la red del transporte público, incluyendo la ubicación geográfica de las paradas, la estructura de las líneas y sus variantes, así como la secuencia de paradas que conforman cada recorrido. Estos datos permiten reconstruir la topología del sistema y definir las transiciones posibles entre una parada y la siguiente dentro del recorrido de cada línea. Para dos líneas distintas que cuentan con paradas cercanas entre sí, también permite identificar puntos potenciales de transbordo entre servicios.

El modelo utiliza además los horarios de operación del sistema, que especifican para cada línea y variante los horarios de salida y los tiempos planificados de pasada por cada parada. Estos horarios constituyen la referencia temporal sobre la cual se estiman los tiempos de viaje dentro del vehículo.

En este trabajo, se propone extender este modelo para considerar, no solo los tiempos de viaje que surgen de los horarios planificados, sino también los tiempos de viaje obtenidos a partir del procesamiento de las posiciones GPS de las unidades, permitiendo así la comparación de los resultados de ambas ejecuciones del modelo.

### **3.3.2. Lógica del modelo**

El primer paso del modelo consiste en identificar, para cada zona origen y destino, las paradas que sirven como puntos de acceso y salida del sistema. Esta asociación se realiza seleccionando las paradas ubicadas dentro o en las proximidades de cada zona. A partir de esta vinculación, el modelo determina cuáles son los posibles puntos de entrada para cada origen, y los puntos de salida para cada destino.

Posteriormente, se construye la estructura del viaje en transporte público utilizando la información de las líneas y sus recorridos. Cada secuencia de paradas de una variante se interpreta como un conjunto de transiciones posibles entre una parada y la siguiente. A estas transiciones se les asigna un tiempo de viaje, el cual proviene de los horarios de entrada. Esta etapa es fundamental, ya que define la componente de tiempo dentro del vehículo del viaje.

En este paso se precisa tener una estructura que contenga para cada par de paradas, una lista de las líneas que las conectan, con una lista de tiempos de viaje entre dichas paradas para cada línea. En el caso de los horarios planificados, el modelo original se encarga de construir esta estructura a partir de los horarios de pasadas de cada variante por cada parada. Para la extensión del modelo

propuesta en este trabajo, los datos obtenidos a partir de las posiciones GPS se procesan para seguir el mismo formato y poder ingresarlos como datos de entrada al modelo. Un ejemplo de la estructura necesaria es el siguiente:

```
{
  (4135, 853): {
    '128': [165.0, 124.49, 150.0, 137.0],
    '494': [444.0, 320.0, 464.0]
  },
  (5953, 1569): {
    '128': [563.0, 448.0, 709.0],
    '494': [490.0, 372.0]
  },
  ...
}
```

Donde  $(4135, 853)$  indica que dentro se van a tener los viajes desde la parada con el identificador  $4135$  a la parada  $853$ . Para este caso, por ejemplo, se tienen dos líneas que viajan de una parada a la otra (líneas 128 y 494), y para cada una de ellas se tiene una lista de tiempos para sus distintos viajes.

El modelo también considera la posibilidad de realizar transbordos entre líneas. Para ello, identifica todas las parejas de paradas pertenecientes a líneas distintas que se encuentran dentro de una distancia razonable para caminar. Dicha distancia es configurable y se puede ajustar en distintas ejecuciones del modelo. Cuando se identifican estos pares de paradas, se incorpora una transición adicional entre ambas, cuyo tiempo corresponde al desplazamiento caminando requerido para realizar el transbordo.

Una vez definidas las transiciones en ómnibus y las posibles conexiones entre líneas, el modelo incorpora el componente temporal de espera del viaje. En particular, utiliza la información de los horarios planificados, aproximando la espera mediante valores medios basados en la frecuencia de cada línea dentro del tiempo que se está estudiando.

El resultado de este proceso es un grafo en el que los nodos representan estados accesibles dentro del sistema (paradas y posibles puntos de transbordo) y las aristas representan las transiciones permitidas, cada una con un tiempo asociado. Esta estructura permite calcular rutas completas utilizando algoritmos de minimización, seleccionando para cada origen y destino la trayectoria de menor tiempo total.

### 3.3.3. Resultado del modelo

El modelo produce como salida final una matriz origen-destino con la estimación del tiempo total de viaje entre todas las zonas. Para cada par origen-destino, el modelo calcula el tiempo mínimo estimado de viaje, considerando todas las etapas involucradas en el desplazamiento, que son la caminata inicial hasta la parada más cercana, el tiempo de espera asociado en las paradas, el tiempo efectivo de viaje a bordo del ómnibus, los posibles transbordos y la caminata

final hasta el destino. Además del tiempo total, el modelo proporciona el tiempo de cada una de las etapas del viaje. También se obtiene la cantidad de ómnibus que se utilizan en el viaje, y la cantidad de etapas de caminatas. Es importante destacar que la extensión propuesta al modelo solo afecta a los tiempos de viaje dentro del vehículo y no a los demás componentes del viaje.

A su vez cada etapa de ejecución del modelo produce su salida parcial, que resultan útiles también para su estudio y comparación. Como primer resultado parcial, el modelo calcula el tiempo de viaje promedio de cada línea para cada par de paradas de su recorrido. El segundo resultado parcial es el tiempo promedio de viaje considerando todas las líneas y el tiempo de espera promedio, para cada par de paradas.



## Capítulo 4

# Resultados y discusión

En este capítulo se presentan las etapas que permitieron conformar el conjunto de datos utilizado, así como los resultados obtenidos y su correspondiente análisis. Primero se aborda la recolección y limpieza de los datos GPS y la comparación entre la red observada y la red teórica (Sección 4.1). Luego se exponen los resultados del análisis comparativo entre los tiempos reales y planificados (Sección 4.2). A continuación, se estudian las diferencias en los tiempos promedio de viaje entre paradas y su distribución (Sección 4.3). Finalmente, se comparan los resultados de aplicar el modelo de accesibilidad utilizando ambos conjuntos de datos (Sección 4.4).

### 4.1. Aplicación de metodología

En esta sección se presenta la aplicación práctica de la metodología desarrollada para el análisis del sistema de transporte. En la Sección 4.1.1 se describe el proceso de recolección, limpieza y preparación de los datos reales y planificados. Luego, en la Sección 4.1.2 se comparan ambas fuentes para evaluar su consistencia y determinar el conjunto final de información utilizado en los análisis posteriores. El código del script para la recolección de los datos GPS, y los pasos para su procesamiento se encuentra disponible en el siguiente repositorio <https://github.com/andresg4/evaluacion-transporte-publico>

#### 4.1.1. Recolección y limpieza de datos

El proceso de análisis comienza con la obtención de los datos reales de posicionamiento GPS de las unidades del sistema de transporte público de Montevideo. Para ello se utiliza el script descrito en la metodología, consultando periódicamente la API pública de la Intendencia de Montevideo. Dicha recolección se realizó durante el período comprendido entre el 24 y el 28 de Junio del 2024, abarcando así una semana completa de operación del sistema en los días laborables de mayor demanda matutina. El horario considerado es entre las 7

AM y las 9 AM, ya que es el horario de mayor demanda matutina asociado a viajes hacia lugares de trabajo o estudio. El script estuvo activo diariamente entre las 6 AM y las 11 AM, para cubrir ampliamente dicho intervalo a estudiar. Al finalizar la semana de recolección, la base de datos contenía 2.266.419 registros, cada uno correspondiente a una posición GPS específica de una unidad. Estos datos se exportaron en formato CSV para su posterior procesamiento.

Al filtrar por el horario específico que interesa para el estudio, la cantidad de registros fue de 2.261.357. Estas mediciones abarcan 129 líneas, y teniendo en cuenta las distintas variantes, el número asciende a 437. Por su parte, los horarios planificados de la Intendencia en el mismo intervalo incluyen 130 líneas y 439 variantes, lo que muestra que prácticamente todas las variantes del sistema se encuentran representadas en los datos capturados. De hecho, al filtrar las mediciones GPS para conservar únicamente aquellas cuya línea existe también en los datos planificados, se mantienen 2.261.334 registros, lo cual indica que la cobertura de la base real respecto al conjunto teórico es prácticamente total. El conjunto de variantes presentes simultáneamente en los datos reales y planificados asciende finalmente a 436.

Después del procesamiento y filtrado, el conjunto de datos final contiene 8.655 viajes distintos, correspondientes a estas 436 variantes. Se observa que del total de paradas de cada viaje, el 92.4 % tiene asociado un tiempo de pasada del ómnibus por la parada. El 82.7 % de estas mediciones provienen directamente de datos GPS, mientras que el 17.3 % restante corresponde a valores interpolados.

Durante el análisis se identificaron diferencias entre el conjunto de paradas detectadas en los datos GPS y las declaradas en los horarios planificados. En particular, se observaron dos paradas que aparecen en los datos reales pero no en los datos planificados, cuya localización se presenta en el anexo en la Figura A.1. Estas diferencias pueden deberse a demoras en actualizaciones de los datos oficiales o modificaciones operativas en el momento de la recolección de los datos.

Por otro lado se identificó el caso contrario, existen 32 paradas presentes en los datos planificados que no fueron asociadas a ninguna medición GPS durante el período analizado. La ubicación de estas paradas se pueden observar en la Figura A.2 del anexo, y se distribuyen en cinco líneas. La línea L13 concentra la mayoría de los casos con 15 paradas ausentes, la L12 con 11 ausencias, la G8 con 3, la L20 con 2 y la línea 2 con 1 parada no observada. Estas ausencias se pueden explicar por distintos factores, entre ellos la baja frecuencia de operación de las líneas en la franja horaria estudiada, recorridos alternativos utilizados durante la semana analizada, o problemas en la transmisión de datos GPS de algunas unidades.

Para los análisis de aquí en adelante, se descartaron estas paradas, resultando en 4.766 paradas únicas. Aplicando la lógica descrita en la sección de metodología para calcular los tiempos acumulados (tiempo de viaje desde la primer parada al resto de las paradas del recorrido), obtenemos un tiempo acumulado real para el 91,3 % de las paradas, y un tiempo acumulado planificado para el 100 %. También se calculó el horario teórico de pasadas por parada, sumando el tiempo acumulado planificado al horario de salida planificado.

### 4.1.2. Comparación entre la red observada y la red teórica de pares de paradas

Para cada par consecutivo de paradas recorrido por una línea, es posible calcular un tiempo promedio de viaje tanto a partir de los datos reales (GPS) como a partir del horario planificado. El primer paso consiste en comparar el conjunto de pares de paradas efectivamente observados con los que surgen de la información oficial.

A partir de los datos GPS procesados se obtienen 384.377 pares de paradas con tiempos de viaje asociados. Por su parte, el conjunto construido a partir de los datos planificados contiene 394.991 pares, lo que implica que existen 10.614 pares presentes únicamente en los datos planificados, equivalentes al 2,7% del total. Esto sugiere que una pequeña porción de los datos planificados del sistema no se observa en la práctica durante la semana analizada, ya sea por ausencia de viajes, variantes no operativas o diferencias entre la planificación y la operación real.

Asimismo, se detecta que una línea, la *L12*, está presente en los datos planificados pero no aparece en los datos reales.

## 4.2. Análisis comparativo entre horarios reales y horarios planificados

Teniendo el conjunto final de datos ya conformado, en esta sección se comparan los tiempos reales observados con los tiempos planificados, analizando el grado de desvío existente entre ambos y evaluando en qué medida el comportamiento observado se ajusta a lo esperado. El análisis se organiza de la siguiente manera. Primero se presenta la distribución general de las diferencias entre los tiempos acumulados registrados y los planificados (Sección 4.2.1), luego se examinan los atrasos y adelantamientos respecto a lo planificado (Sección 4.2.2) y el nivel de puntualidad según distintos criterios (Sección 4.2.3). Posteriormente, se profundiza en los desvíos a distintos niveles, considerando viajes individuales (Sección 4.2.4), variantes (Sección 4.2.5) y paradas a lo largo del recorrido (Sección 4.2.6). Finalmente, se evalúa el desempeño de cada variante en relación con su puntualidad (Sección 4.2.7).

### 4.2.1. Distribución general de las diferencias entre tiempo acumulado real y planificado

Para comenzar el análisis comparativo entre los horarios obtenidos de los datos reales y los horarios planificados, se estudió la distribución general de sus diferencias. Para calcular esta diferencia se restó el tiempo acumulado real menos el planificado para cada pasada por las paradas, por lo que una diferencia positiva indica que el real es mayor que el planificado, mostrando que en la práctica se demora más tiempo en llegar a esa parada que en lo planificado. Si la diferencia es negativa, indica lo contrario, que en la práctica se llega más

rápido que en lo planificado a dicha parada. La Tabla 4.1 muestra las principales estadísticas de esta diferencia para todos los viajes del conjunto de datos. Se observan valores extremos considerables, tanto positivos como negativos, y el 50 % central de todas las medidas (rango intercuartílico - IQR) se concentra en un intervalo acotado, entre -2,22 y +2,65 minutos, lo que indica que existen desvíos incluso dentro de esta zona de la distribución.

Al analizar más detalladamente los valores extremos, se identifican dos situaciones principales. En primer lugar, aparecen casos claramente aislados en los que solo existe una pasada registrada para un viaje determinado, y esa única observación presenta una diferencia muy grande respecto a lo planificado. Dado que no forman parte de un recorrido completo y no siguen el patrón general del resto de las mediciones, estas observaciones se interpretan como registros erróneos o atípicos del sistema. En segundo lugar, se observan viajes completos que muestran diferencias elevadas pero no tan extremas. En estos casos, las discrepancias podrían deberse a desvíos operativos reales (por ejemplo, un viaje que inició más tarde de lo programado) o a posibles inconsistencias en la asignación del horario teórico correspondiente a las posiciones GPS.

	Minutos
Muestra	465.728
Promedio	0,41
Std	4,20
Mín	-109,67
25 %	-2,22
50 %	0,08
75 %	2,65
Máx	127,37
IQR	4,87

Tabla 4.1: Análisis de diferencias entre tiempos acumulados

La Figura 4.1 muestra el histograma de la cantidad de pasadas por parada cuya diferencia del tiempo acumulado real y el planificado se encuentra dentro de los 10 minutos. Esta visualización permite dimensionar cuán frecuentes son los desvíos y qué tan significativos son en general.

A partir de esta distribución general, se calcularon también porcentajes de pasadas dentro de márgenes específicos de tolerancia. Se observó que el 22,88 % de las pasadas difiere en un minuto o menos respecto al horario planificado, el 59,15 % se mantiene dentro de los 3 minutos y el 80,66 % dentro de los 5 minutos. En cambio, el 2,69 % presenta desvíos superiores a los 10 minutos, lo cual representa un volumen reducido en comparación con el total.

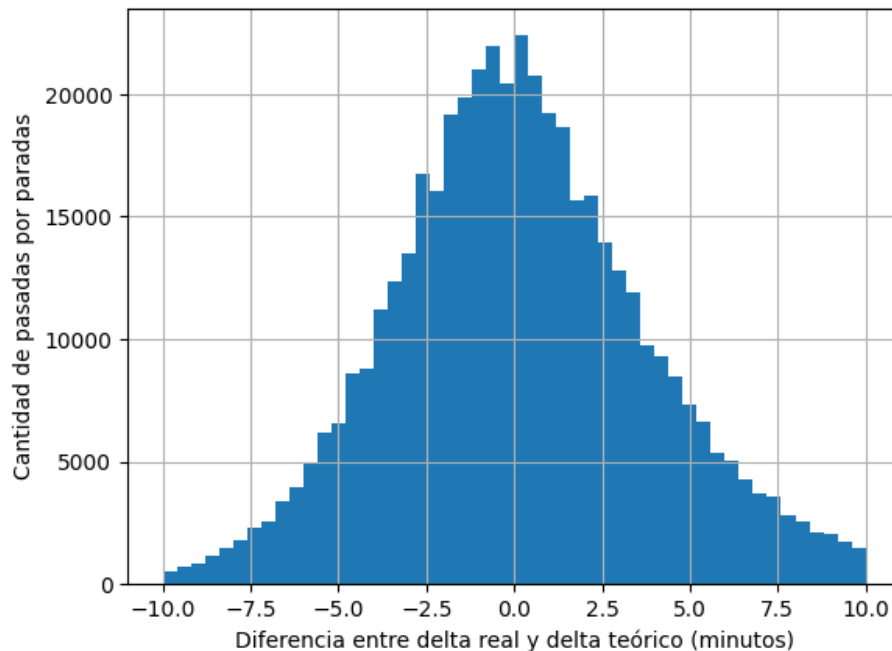


Figura 4.1: Diferencia del tiempo acumulado real y el planificado

#### 4.2.2. Análisis de atrasos y adelantos

Dado que los desvíos positivos y negativos tienen interpretaciones distintas, se realizó un análisis separado para ambos casos. Las diferencias positivas (cuando el tiempo acumulado real es mayor al planificado) representan atrasos en la parada por la parada, lo que implica un incremento en el tiempo de espera del usuario. Por el contrario, las diferencias negativas corresponden a adelantos, situación que puede resultar más problemática, ya que si el ómnibus pasa antes de lo previsto, el usuario puede perderlo aún habiendo llegado en hora a la parada según el horario planificado, debiendo esperar al siguiente servicio.

En la Tabla 4.2 se presentan las estadísticas de los atrasos y los adelantos. Con respecto a los atrasos se observa que tienen un promedio de 3,47 minutos y una mediana de 2,6 minutos, indicando que el atraso típico es leve, aunque con presencia de valores extremos muy altos. Para los adelantos, muestran un promedio de -2,78 minutos y una mediana de -2,27 minutos. Nuevamente, aparecen valores atípicos relevantes, aunque la mayoría se concentra en desviaciones moderadas. Se puede observar un leve sesgo hacia los atrasos, tanto en valores extremos como en el promedio y la mediana.

Finalmente, la relación entre tiempo acumulado real y planificado se visualiza en la Figura 4.2, donde se observa la dispersión de las pasadas alrededor de la diagonal ideal, donde los tiempos acumulados reales y planificados coinciden, lo

	Atrasos (minutos)	Adelantos (minutos)
Muestra	237.182	227.759
Promedio	3,47	-2,78
Std	3,25	2,27
Mín	0,01	-109,67
25 %	1,16	-3,95
50 %	2,60	-2,27
75 %	4,80	-1,07
Máx	127,37	-0,01
IQR	3,64	2,88

Tabla 4.2: Análisis de diferencias entre tiempos acumulados positivos y negativos

que indicaría una pasada exactamente cuando el horario planificado lo indica. Se puede ver que la mayoría se mantiene cerca de la diagonal, teniendo algunos puntos alejados y otros muy alejados, que indican una discrepancia grande entre los dos valores para muy pocos casos. También se vuelve a apreciar lo observado anteriormente sobre el sesgo de atrasos por sobre adelantos, ya que se ve una mayor dispersión de puntos por sobre la línea diagonal roja que por debajo.

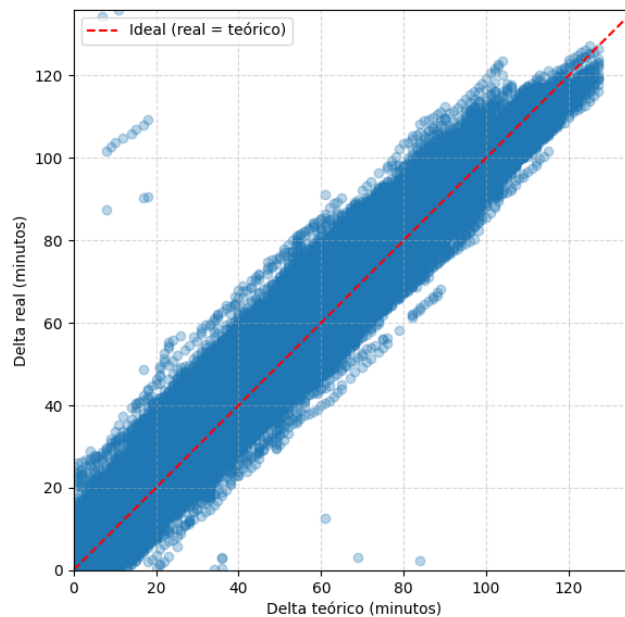


Figura 4.2: Tiempo acumulado real vs planificado

### 4.2.3. Puntualidad a nivel de pasada y desempeño por variante

Como se observó en el análisis de los trabajos relacionados, existen diversos criterios para definir qué rangos temporales permiten considerar que una pasada por una parada es puntual o “a tiempo”.

Si tomamos en cuenta la medida de puntualidad mencionada en [Ji y cols. \(2014\)](#), la cual considera que una pasada es puntual cuando la diferencia entre el tiempo de pasada real y el planificado está en el rango entre -1 minuto y +2 minutos, el 32,4% de las pasadas pueden considerarse puntuales. Utilizando un criterio menos estricto, como el mencionado en [TRB and NASEM \(2013\)](#), [Mishra y cols. \(2023\)](#) y [Urban Transport Group \(2014\)](#), donde una pasada de un viaje por la parada se considera puntual si la diferencia entre el tiempo real y el tiempo planificado es de entre -1 minuto y +5 minutos, el 50,69% del total de pasadas puede considerarse puntual. Flexibilizando aún más el criterio, si consideramos una diferencia de entre -2 minutos y +7 minutos como aceptable, como se utiliza en [Arhin y Noel \(2013\)](#), la puntualidad asciende al 66,93%.

Para profundizar este análisis, se evaluó el desempeño por variante. Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran las veinte variantes que presentan mayor y menor proporción de pasadas puntuales bajo el criterio más utilizado en los trabajos analizados, el rango de -1 y +5 minutos. Esta comparación permite identificar las líneas con buen desempeño y señalar aquellas cuyo cumplimiento de horarios resulta más problemático.

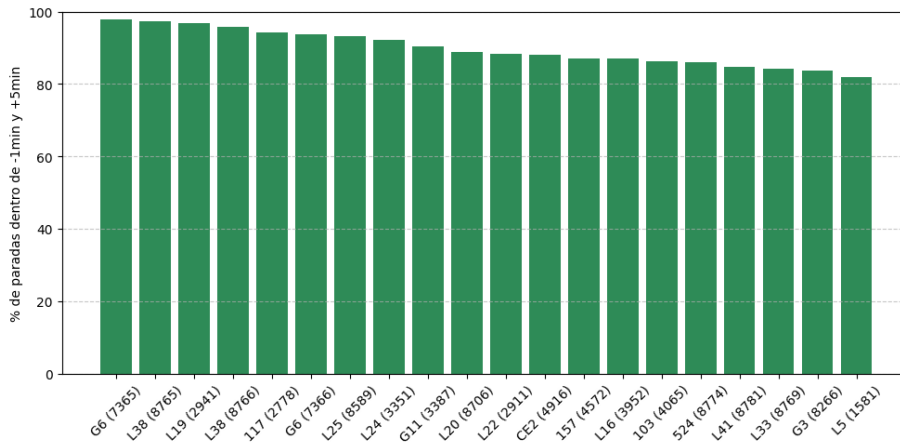


Figura 4.3: Mejores 20 variantes en puntualidad

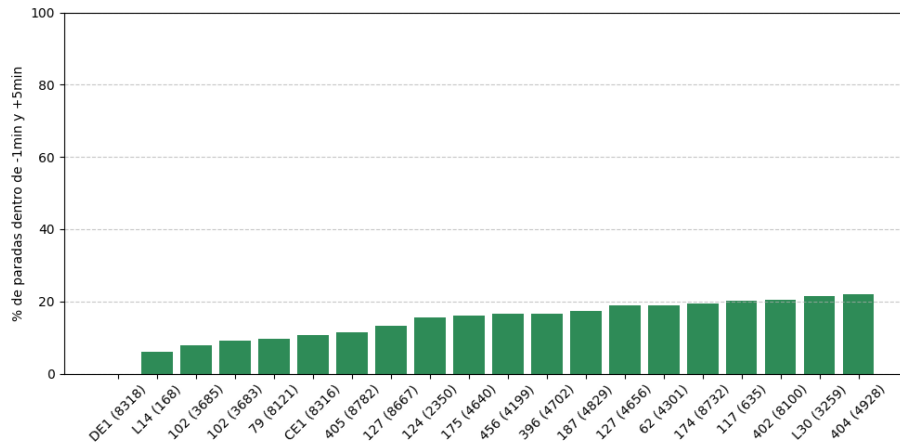


Figura 4.4: Peores 20 variantes en puntualidad

Se observa que la mayoría de las líneas con mejor cumplimiento corresponden a servicios locales, caracterizados por recorridos más cortos y, en general, por operar en zonas más alejadas del centro, donde el tránsito es menos intenso y por tanto ejerce menor influencia sobre los tiempos de viaje. La variante con mayor puntualidad pertenece a la línea G6 (un servicio local del área metropolitana) que presenta un 97,8% de sus pasadas dentro del rango considerado puntual. La Tabla 4.3 resume las estadísticas de las cinco variantes con mejor comportamiento en este aspecto.

En contraste, la variante con peor desempeño pertenece a la línea DE1, un servicio diferencial que no presenta ninguna pasada puntual (0%). El análisis de sus estadísticas revela que este bajo cumplimiento se debe a que todas sus pasadas por las paradas presentan adelantamientos superiores a un minuto. Un patrón similar se observa en las siguientes cuatro variantes con peor desempeño, cuyas estadísticas se muestran en la Tabla 4.4; en todos los casos, un porcentaje elevado de las pasadas corresponde a adelantamientos mayores a un minuto.

Es importante volver a destacar que los adelantamientos no constituyen necesariamente un comportamiento favorable desde la perspectiva del usuario. Cuando un ómnibus pasa antes del horario planificado, aumenta la probabilidad de que el usuario pierda el servicio aún llegando en tiempo, lo que puede implicar tiempos de espera sustancialmente mayores hasta el siguiente viaje.

	G6 (7365)	L38 (8765)	L19 (2941)	L38 (8766)	117 (2778)
Muestra	46	357	31	253	105
Promedio	1,36	1,41	2,82	0,60	0,67
Std	1,55	1,33	2,00	0,90	1,27
Mín	-1,22	-2,38	-0,27	-2,67	-2,42
25 %	0,24	0,50	1,03	0,00	-0,13
50 %	0,83	1,48	4,12	0,67	0,48
75 %	2,57	2,28	4,47	1,28	1,82
Máx	4,58	5,07	5,05	2,40	3,45
IQR	2,33	1,78	3,45	1,28	1,95

Tabla 4.3: Análisis de mejores 5 variantes en puntualidad (minutos)

	DE1 (8318)	L14 (168)	102 (3685)	102 (3683)	79 (8121)
Muestra	47	709	216	299	257
Promedio	-4,55	-5,83	-5,92	-4,22	-5,66
Std	1,90	2,90	3,23	2,37	4,63
Mín	-8,75	-13,73	-12,52	-9,15	-16,08
25 %	-5,06	-7,71	-8,14	-5,96	-8,25
50 %	-4,17	-6,06	-5,95	-4,45	-6,25
75 %	-3,64	-4,16	-3,91	-2,63	-4,40
Máx	-1,55	4,92	2,08	2,05	8,05
IQR	1,42	3,55	4,23	3,33	3,85

Tabla 4.4: Análisis de peores 5 variantes en puntualidad (minutos)

#### 4.2.4. Análisis por viaje: frecuencia de desvíos y desvíos máximos

Además de estudiar las pasadas individualmente, se analizó el desempeño a nivel de viaje. La Tabla 4.5 muestra el porcentaje de viajes que presentan al menos una pasada con desviaciones superiores a 1, 3, 5 y 10 minutos, considerando el valor absoluto de la diferencia entre el tiempo real y el planificado, por lo que el desvío puede corresponder tanto a adelantos como a atrasos. Se observa que prácticamente todos los viajes (99,45 %) presentan al menos una parada con un desvío mayor a un minuto, y que más de la mitad (57,26 %) experimenta en algún momento desviaciones iguales o superiores a 5 minutos. Asimismo, el 10,65 % de los viajes presenta al menos una desviación que supera los 10 minutos a lo largo de su recorrido.

Este análisis es relevante porque, a lo largo de un mismo viaje, un ómnibus puede experimentar atrasos puntuales (por congestión, semáforos o demanda inusual) y posteriormente recuperar parte o la totalidad de ese atraso. Si solo se considerara la situación al final del recorrido, podría concluirse erróneamente que el viaje no presentó problemas, cuando en realidad sí existieron desviaciones

intermedias que afectaron la regularidad del servicio. Por ello, resulta necesario estudiar tanto el comportamiento global del viaje como los desvíos locales en cada pasada.

Desvío (mins)	% viajes
1	99,45
3	86,55
5	57,26
10	10,65

Tabla 4.5: Porcentaje de viajes con al menos una parada con desvío

Por otro lado, se calculó el desvío máximo absoluto registrado en cada viaje. Los resultados se observan en la Tabla 4.6 y en el histograma de la Figura 4.5. El desvío máximo promedio por viaje es de 6,22 minutos, aunque algunos alcanzan valores excepcionales superiores a una hora, que corresponden a situaciones particulares.

	Desvío máximo
Muestra	8.655
Promedio	6,22
Std	4,50
Mín	0,03
25 %	3,85
50 %	5,50
75 %	7,67
Máx	127,37

Tabla 4.6: Análisis desvío máximo por viaje

También se consideraron por separado los máximos atrasos y adelantos por viaje. En la Tabla 4.7 se muestran las estadísticas de ambas distribuciones, y en la Figura 4.6 sus histogramas. Las medidas indican que, aún cuando los viajes pueden presentar algún adelanto o atraso significativo, la mayoría de los casos se concentra en valores moderados.

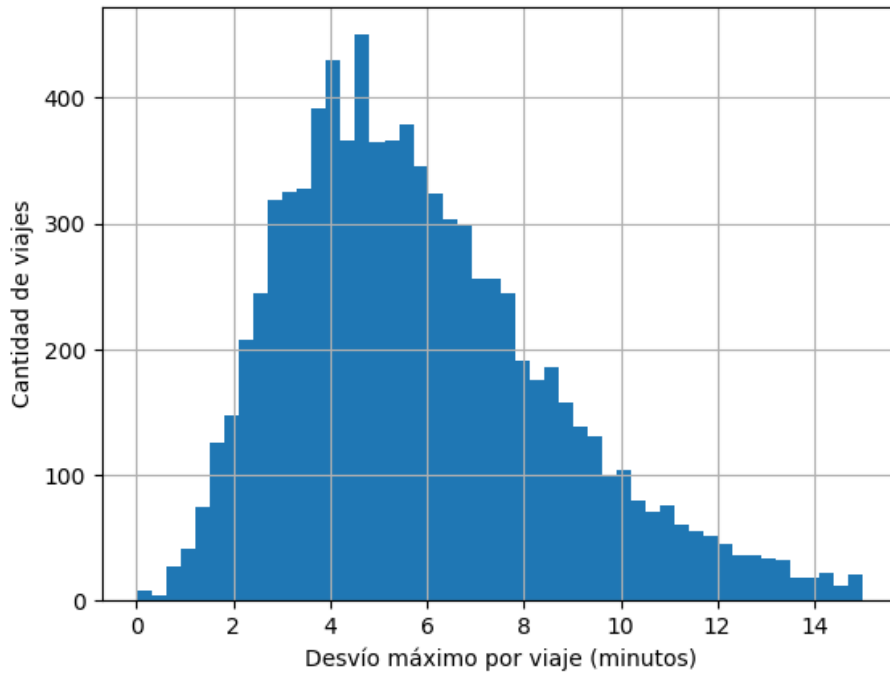


Figura 4.5: Histograma del desvío máximo por viaje

	Máximo atraso	Máximo adelanto
Muestra	8,655	8,655
Promedio	4,16	-3,43
Std	4,57	3,61
Mín	0,00	-109,67
25 %	1,08	-5,20
75 %	6,07	-2,95
50 %	3,13	-0,85
Máx	127,37	0,00

Tabla 4.7: Análisis de atrasos y adelantos máximos por viaje (minutos)

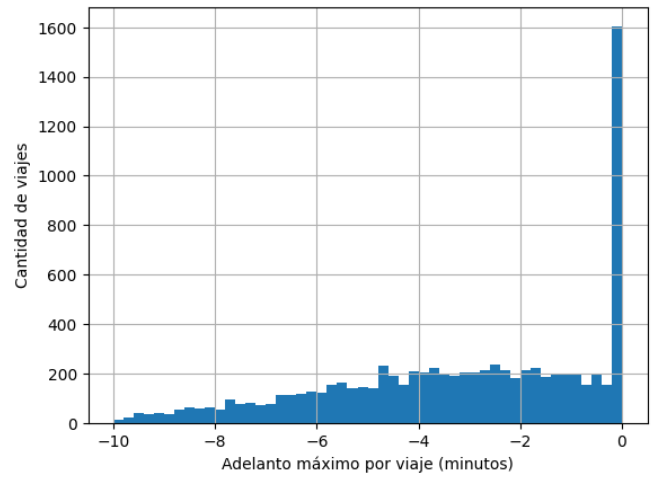
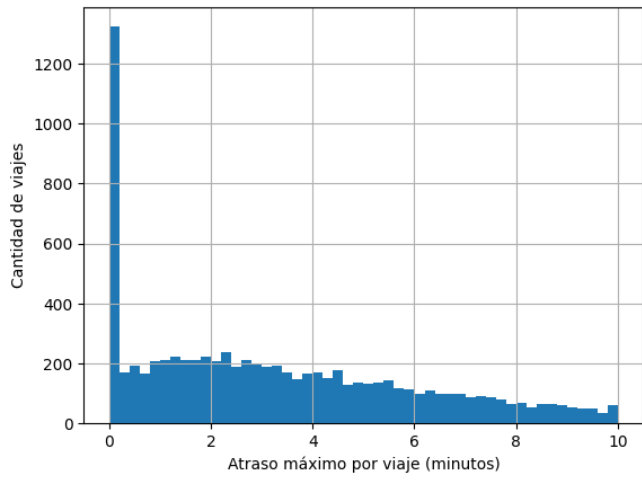


Figura 4.6: Histogramas de atraso y adelanto máximo por viaje

#### 4.2.5. Análisis por variante: atrasos, adelantos y desviaciones finales

El análisis también se realizó agrupando la información a nivel de variante. La Tabla 4.8 presenta las estadísticas de los máximos atrasos y adelantos observados para cada variante en el conjunto de datos. Se observa que la mitad de las variantes tienen al menos un atraso de 10 minutos, y al menos un adelanto de 7 minutos.

	Máximo atraso	Máximo adelanto
Muestra	436	436
Promedio	11,76	-8,55
Std	11,31	8,61
Mín	0,00	-109,67
25 %	6,62	-9,54
50 %	10,12	-7,59
75 %	14,20	-5,40
Máx	127,37	0,00
IQR	7,58	4,14

Tabla 4.8: Análisis de máximos atrasos y adelantos de cada variante (minutos)

Un aspecto adicional considerado fue la diferencia entre tiempo acumulado real y planificado en la última parada de cada recorrido. La Tabla 4.9 resume el promedio de estas diferencias. La distribución se encuentra centrada cerca de cero, aunque muestra una ligera tendencia al adelanto. Esto se puede explicar por la dinámica al final del recorrido donde ocurren en mayoría descensos, un proceso más rápido que el ascenso, lo que puede explicar que hacia el final se vaya recuperando el posible tiempo de atraso acumulado durante el recorrido.

	Minutos
Muestra	436
Promedio	-0,76
Std	3,20
Mín	-15,03
25 %	-2,67
50 %	-0,99
75 %	0,89
Máx	13,88
IQR	3,56

Tabla 4.9: Análisis de desviación promedio al final de cada recorrido

Además de analizar los valores extremos de atraso y adelanto, resulta relevante estudiar el comportamiento promedio de cada variante a lo largo de todo su recorrido. Para ello se calcula, para cada variante, el promedio de la diferencia entre los tiempos acumulados reales y planificados considerando las pasadas por todas las paradas en todos sus viajes. Este indicador resume la tendencia general de cada variante a circular con atraso (promedios positivos) o con adelanto (promedios negativos).

Los resultados muestran diferencias significativas entre variantes. Algunas presentan valores promedio claramente positivos, lo que indica que, en términos generales, sus viajes suelen desarrollarse más lentamente que lo previsto por el horario planificado. En la Tabla 4.10 se muestran las 20 variantes con mayores atrasos promedio.

Otras variantes muestran valores negativos, lo que implica que tienden a recorrer sus tramos más rápido que lo estipulado, acumulando adelantos a lo largo del recorrido. La Tabla 4.11 presenta las 20 variantes con mayores adelantos promedio.

Además, al observar en detalle los casos individuales, surgen patrones que se alinean con los análisis previos. Por ejemplo, la variante 8318 de la línea DE1 aparece entre las que presentan mayores adelantos promedio, algo consistente con lo observado en las estadísticas del porcentaje de pasadas puntuales. Este comportamiento sugiere que, incluso a lo largo de todo el recorrido, esta variante tiende sistemáticamente a circular por delante del horario planificado.

También se destaca que algunas líneas locales muestran adelantos promedio. Este resultado puede deberse a que en ciertos recorridos locales existen tramos con menor congestión y menor variabilidad en el tránsito, y por lo tanto, si no se regula adecuadamente la velocidad o el cumplimiento del horario, los vehículos pueden tender a adelantar su paso por las paradas, un fenómeno con implicancias relevantes para los usuarios. En líneas de baja frecuencia, un adelanto puede resultar especialmente problemático, ya que el pasajero que arriba en horario puede encontrarse con que el ómnibus ya pasó, y la espera hasta la siguiente pasada puede ser considerable. En consecuencia, estos adelantos, aunque puedan parecer menores desde el punto de vista operativo, generan un impacto significativo en la confiabilidad del servicio desde la perspectiva del pasajero. No obstante, es importante señalar que, como se mostró previamente, la mayoría de las variantes más puntuales pertenecen a líneas locales.

Analizando las variantes con mayor atraso promedio, se observa que todas corresponden a recorridos largos, con una cantidad alta de paradas y que conectan zonas periféricas con áreas céntricas de la ciudad (o en sentido inverso). Este tipo de trazados están más expuestos a factores que incrementan la variabilidad del tiempo de viaje, como tramos con alta congestión, múltiples intersecciones semaforizadas y mayor acumulación de pasajeros. En conjunto, estos elementos contribuyen a que los atrasos se amplifiquen a medida que avanza el recorrido, lo que podría explicar la tendencia sistemática de estas variantes a operar por detrás de lo planificado.

Variante	Línea	Promedio (minutos)
4570	157	8,39
4949	329	7,54
3937	D5	6,99
8533	427	6,70
595	113	6,41
4717	175	6,26
592	112	5,74
4642	191	5,57
4704	169	5,21
4754	130	5,19
4621	155	5,15
8691	110	5,13
7992	409	5,11
4662	505	5,11
4308	149	5,07
3700	142	4,85
3672	155	4,84
7902	113	4,79
3991	158	4,62
4159	103	4,45

Tabla 4.10: Variantes con mayor atraso promedio

Variante	Línea	Promedio (minutos)
4702	396	-6,31
3685	102	-5,92
168	L14	-5,83
8121	79	-5,66
2350	124	-4,86
8318	DE1	-4,55
4640	175	-4,32
3683	102	-4,22
8316	CE1	-4,00
8732	174	-3,96
8100	402	-3,66
8782	405	-3,50
8667	127	-3,32
4350	149	-3,21
3666	102	-3,15
1944	L29	-3,10
1958	L9	-3,04
3259	L30	-3,01
1570	L22	-2,89
3987	156	-2,76

Tabla 4.11: Variantes con mayor adelanto promedio

#### 4.2.6. Análisis por parada: evolución del desvío a lo largo del recorrido

Otro enfoque para el estudio consiste en analizar cómo evolucionan los desvíos a lo largo del recorrido de una determinada línea. Para ello, se calculó el promedio de la diferencia entre el tiempo acumulado real y el planificado en cada número de parada del recorrido, así como el porcentaje de pasadas puntuales por parada. Las Figuras 4.7 y 4.8 presentan estos resultados.

Este análisis permite observar que el desvío respecto a lo planificado va aumentando a medida que el viaje avanza, y por momentos hay recuperaciones parciales que se pueden explicar por los viajes de menor cantidad de paradas que van terminando.

Un aspecto adicional relevante es que el 25 % de los viajes ya comienzan fuera del rango de puntualidad al momento de partir desde su origen. Al estudiar estos casos considerando atrasos y adelantos, se observa que el 20 % de los viajes inicia con más de un minuto de adelanto respecto al horario planificado, mientras que el 5 % parte con un atraso superior a cinco minutos. Esta falta de alineación inicial puede deberse a ineficiencias en el proceso de despacho en la terminal

de origen. También puede explicarse por la forma en que se construyen los horarios teóricos, ya que suelen estar expresados en minutos exactos, mientras que los registros reales se miden con precisión de segundos y esa diferencia de granularidad puede generar discrepancias entre ambos.

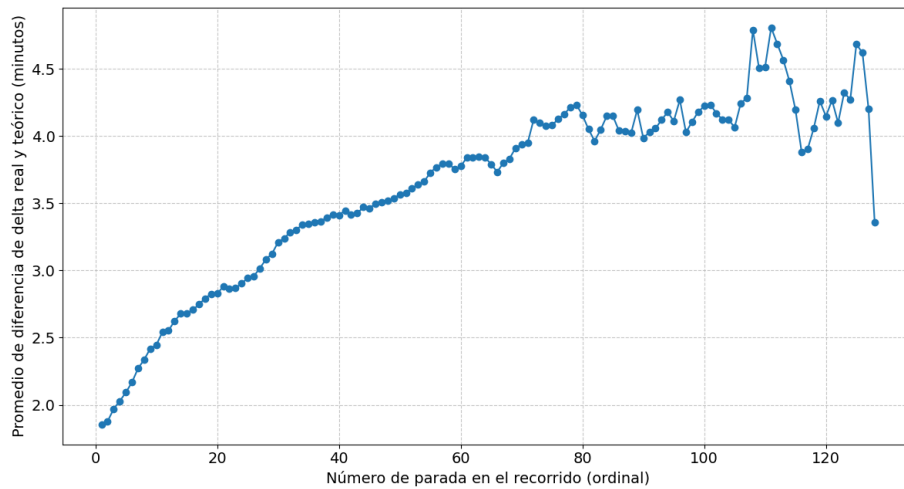


Figura 4.7: Promedio de la diferencia entre tiempo acumulado real y planificado por cada parada

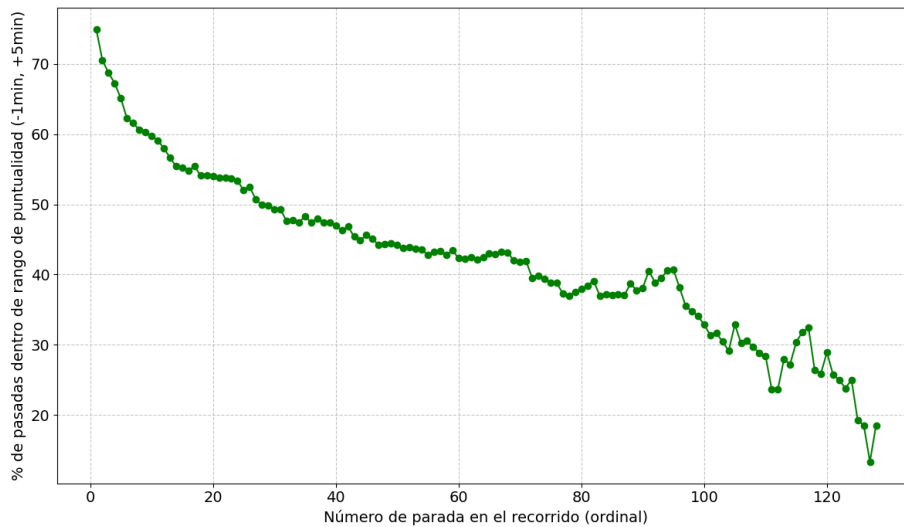


Figura 4.8: Porcentaje de pasadas dentro de rango de puntualidad para cada parada

#### 4.2.7. Relación entre precisión y puntualidad: desempeño agregado por variante

Con el objetivo de obtener una visión más global del comportamiento de cada variante, se integraron en un mismo análisis distintas métricas derivadas de las pasadas por las paradas. En particular, se consideró simultáneamente el promedio de la diferencia entre el tiempo acumulado real y planificado, el porcentaje de pasadas que se mantienen dentro del rango de puntualidad definido entre un minuto de adelanto y cinco minutos de atraso, y el valor absoluto promedio de los desvíos, que permite apreciar la magnitud del error sin distinguir entre atrasos y adelantos. La combinación de estas medidas ofrece una caracterización más completa del desempeño, al capturar tanto la dirección como la magnitud de los desvíos respecto a lo programado.

A partir de estas métricas se generaron representaciones gráficas en las que cada punto corresponde a una variante del sistema. En la Figura 4.9 se muestra la relación entre el promedio del desvío y el porcentaje de pasadas puntuales. Y en la Figura 4.10 la relación entre el promedio absoluto del desvío y el mismo porcentaje. Estos diagramas permiten visualizar patrones generales y, al mismo tiempo, identificar diferencias entre variantes.

Se puede observar que son pocas las variantes que tienen un alto porcentaje de sus pasadas por paradas puntuales, pero también la mayoría tiene el promedio de diferencia entre tiempos reales y planificados dentro de la puntualidad considerada como tolerable.

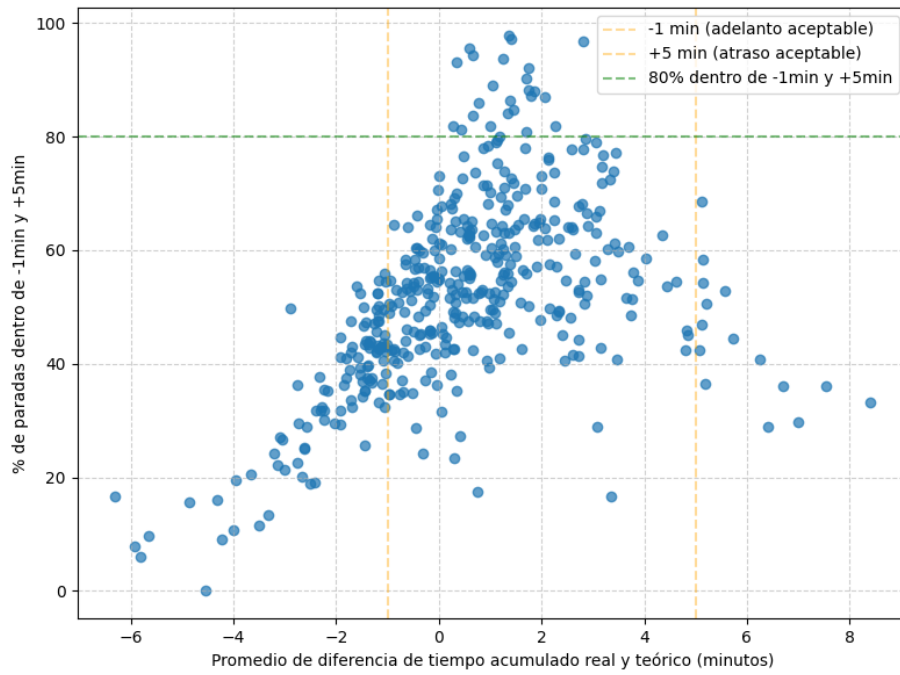


Figura 4.9: Desempeño por variante — precisión vs puntualidad

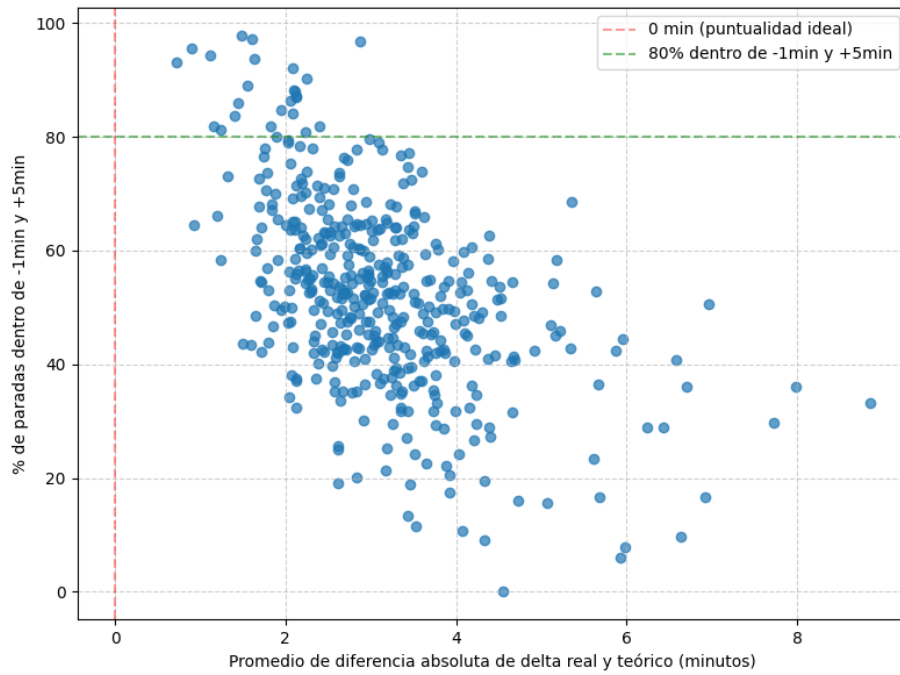


Figura 4.10: Desempeño por variante — precisión absoluta vs puntualidad

### 4.3. Análisis de tiempos promedio de viaje entre paradas

En esta sección se presenta un análisis de los tiempos promedio de viaje entre paradas, comparando los valores calculados a partir de los datos GPS con los tiempos planificados. Se estudian las diferencias entre ambos, su distribución y los casos más extremos, con el fin de identificar cuánto se desvía la operación real de lo previsto en la planificación.

Una vez identificados los pares de paradas comunes a ambos conjuntos, se compara el tiempo de viaje promedio estimado con datos reales frente al tiempo planificado. La Tabla 4.12 resume la distribución de las diferencias (real – planificado), mientras que en la Figura 4.11 se presenta su representación gráfica.

	Minutos
Muestra	384.377
Promedio	-0,27
Std	2,60
Mín	-14,23
0 %	-14,23
10 %	-3,33
20 %	-2,10
30 %	-1,32
40 %	-0,72
50 %	-0,22
60 %	0,27
70 %	0,82
80 %	1,53
90 %	2,63
100 %	18,52
Máx	18,52

Tabla 4.12: Análisis de diferencias entre tiempos promedios de viaje entre pares de paradas

Los resultados muestran una distribución centrada levemente por debajo de cero, el promedio general de la diferencia es de  $-0,27$  minutos, lo que indica que, en términos agregados, el sistema opera apenas más rápido que lo indicado por el horario planificado. Este comportamiento puede deberse a lo señalado en secciones anteriores, los horarios planificados están definidos a nivel de minutos, por lo que en paradas muy próximas pueden existir tiempos de viaje reales menores que no se ven reflejados en la planificación. También se observa que la dispersión es considerable, con valores que van desde adelantos promedio de 14,2 minutos hasta atrasos promedio de 18,5 minutos dependiendo del par de paradas considerado.

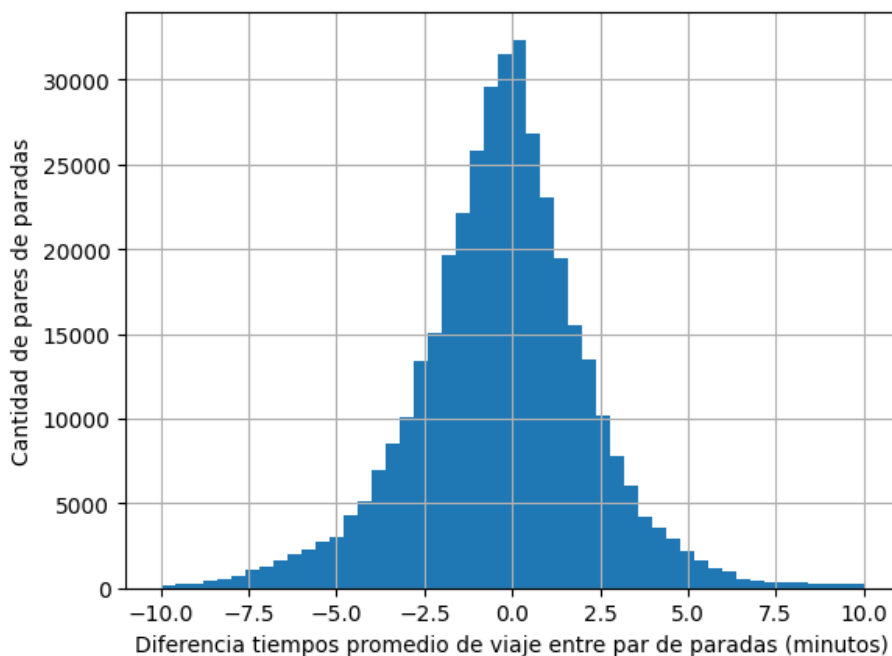


Figura 4.11: Diferencias de tiempos de viaje promedio entre paradas

Este caso más extremo de atraso promedio entre pares de paradas se observa en el tramo comprendido entre las paradas 6424 y 3389 de la línea 149.

Al observar el viaje desde su origen hasta la parada 6424, los datos planificados asignan un tiempo de 31 minutos, mientras que las observaciones reales indican 18,85 minutos, es decir, un adelanto promedio de 12,15 minutos. A partir de ese punto, la relación se invierte, y el tiempo desde la parada 6424 hasta el final del recorrido (parada 3389) es de 66 minutos en los datos planificados, pero asciende a 84,5 minutos en la operación real, equivalente a un atraso promedio de 18,5 minutos. Finalmente, desde el inicio del recorrido hasta su fin, el tiempo total planificado es de 97 minutos, mientras que el tiempo real promedio es de 103 minutos, lo que implica un atraso global de 6 minutos. La Figura 4.12 ilustra el tramo sobre el mapa de la ciudad y la dinámica a lo largo del recorrido. Cada parada se representa con un color según la diferencia promedio entre el tiempo real de viaje y el planificado, desde la primer parada. Tonos verdes indican adelantos, mientras que tonos rojos señalan atrasos, con intensidades mayores cuanto más grande es la desviación. Esta representación permite visualizar de manera clara cómo, en promedio, el viaje comienza con adelantos marcados en el tramo inicial, especialmente hasta la parada 6424, para luego mostrar una transición progresiva hacia atrasos crecientes en la segunda mitad del recorrido.

En conjunto, el análisis de casos particulares como éste permite identificar líneas y segmentos que operan por fuera de lo planificado, lo que a su vez puede servir para desarrollar estrategias específicas orientadas a mejorar el desempeño operativo de dichas líneas.

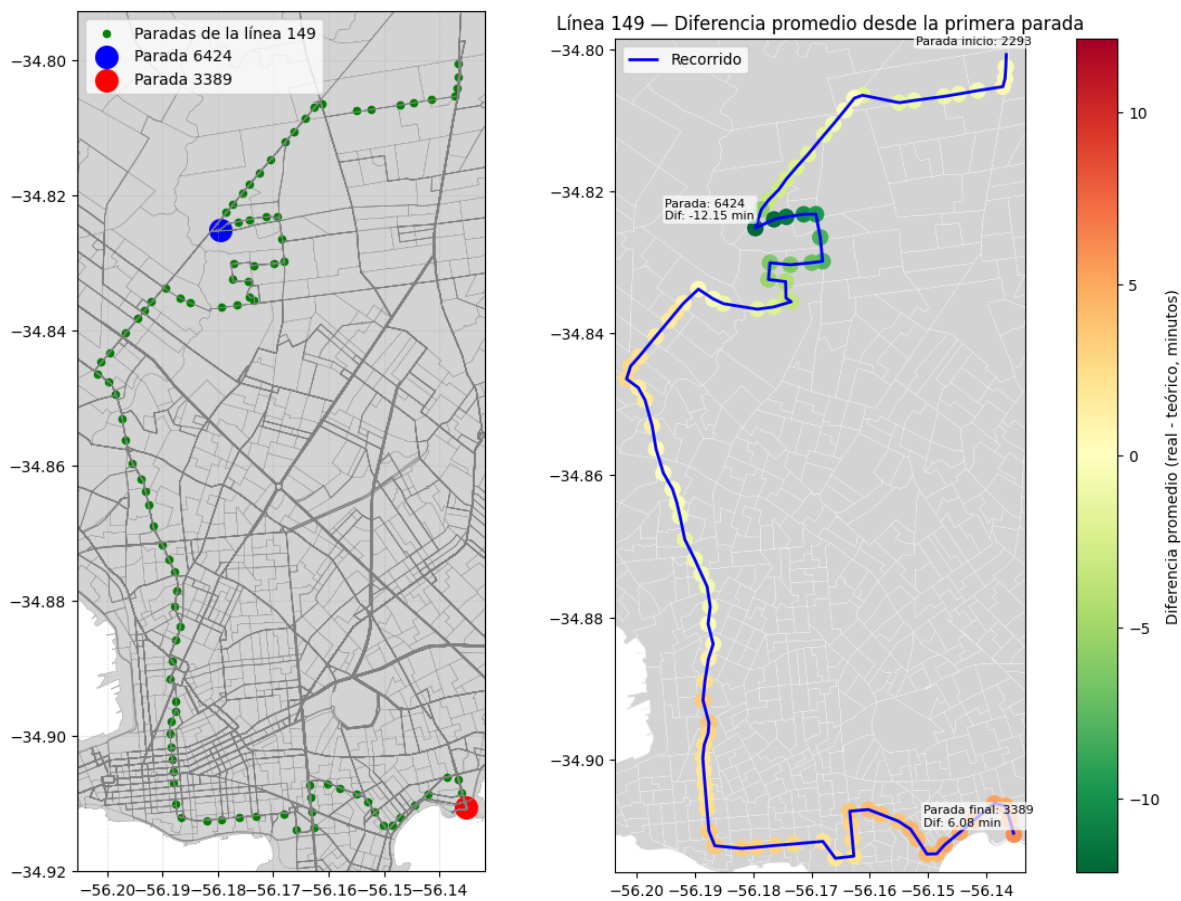


Figura 4.12: Recorrido y diferencias de tiempos de viaje promedio desde origen para la línea 149 con sentido hacia el sur

## 4.4. Aplicación al modelo de accesibilidad

En esta sección se analiza cómo las diferencias entre los tiempos de viaje reales y los planificados influyen en los resultados del modelo de accesibilidad. Primero se describen los parámetros de ejecución del modelo bajo ambos escenarios (Sección 4.4.1). A continuación, se comparan los tiempos de viaje obtenidos entre segmentos censales (Sección 4.4.2) y se examinan los casos extremos en las diferencias de tiempos (Sección 4.4.3). Posteriormente, se estudian las variaciones en la cantidad de destinos alcanzables dentro de un umbral temporal dado (Sección 4.4.4). Finalmente, se presenta un mapa interactivo de accesibilidad que permite explorar visualmente los resultados (Sección 4.4.5).

### 4.4.1. Parámetros de ejecución y estadísticas generales

El modelo se ejecutó tanto con los tiempos de viaje estimados a partir de los datos reales (GPS) como con aquellos obtenidos de los horarios planificados. En ambos casos se emplearon los mismos parámetros operativos, considerando un máximo de 2 transbordos, un tiempo máximo global de caminata de 20 minutos y un máximo de 30 minutos para la caminata entre centroides de los segmentos censales.

El conjunto completo de pares de origen–destino entre segmentos censales es de 1.129.969 posibles combinaciones, de las cuales el modelo logra resolver 1.090.952 conexiones, equivalentes al 96,5 % del total. El resto corresponde a pares desconectados bajo las restricciones de caminata, transbordos y disponibilidad de servicios.

Los valores agregados de los tiempos medios por etapa del viaje muestran resultados muy similares entre ambas ejecuciones. En los datos reales, el tiempo promedio a bordo alcanza los 39,6 minutos, la caminata promedia 12,3 minutos, y la espera 7,7 minutos. Cuando se utilizan los datos planificados, estos valores son prácticamente iguales, con diferencias menores a un minuto en cada componente.

### 4.4.2. Comparación de tiempos de viaje entre segmentos censales

El modelo produce, para cada par de segmentos censales, un tiempo total de viaje que incluye caminata inicial, espera, desplazamientos en ómnibus, transbordos y caminatas finales. La comparación entre los tiempos totales calculados con datos reales y con datos planificados permite evaluar el impacto que tienen las diferencias operativas del sistema sobre la accesibilidad efectiva. El promedio general es de 0,20 minutos, lo que indica que, en términos agregados, los tiempos reales resultan apenas superiores a los planificados. No obstante, la dispersión es considerable. Se observan diferencias de hasta  $-16,38$  minutos (viajes reales más rápidos) y hasta  $+11,02$  minutos (viajes reales más lentos). La Tabla 4.13 resume la distribución de dichas diferencias.

Minutos	
Muestra	1.090,952
Promedio	0,20
Std	2,35
Mín	-16,38
25 %	-1,03
50 %	0,25
75 %	1,65
Máx	11,02

Tabla 4.13: Análisis de diferencias tiempos de viaje entre segmentos censales

#### 4.4.3. Análisis de casos extremos

La mayor diferencia negativa se observa para el par de segmentos censales ubicados en la zona de Villa García – Manga Rural (origen) y en la zona de Abayubá Norte (destino). Para este par, el modelo basado en tiempos reales estima un tiempo de viaje 16 minutos menor que el estimado según los tiempos planificados, es decir, más rápido. La Figura 4.13 muestra la ubicación de ambos segmentos en el mapa.

Por otro lado, la mayor diferencia positiva corresponde al par de segmentos censales con origen al norte de la zona de Manga y Toledo Chico, y destino en la zona de Melilla. En este caso, la ejecución con tiempos reales arroja un tiempo 11 minutos mayor que el planificado, es decir, una mayor demora. Este caso se muestra en la Figura 4.14.

Este tipo de casos resulta especialmente relevante para estudios de planificación, ya que pueden señalar zonas de la ciudad donde los horarios planificados no reflejan adecuadamente lo que ocurre en la realidad. Analizar estos casos extremos permite evidenciar diferencias entre la accesibilidad que creemos que existe a partir de los horarios teóricos, y la accesibilidad que realmente experimentan las personas al considerar los tiempos de viaje reales. Ésto ofrece una oportunidad para identificar áreas particularmente afectadas del territorio, en las cuales los problemas de accesibilidad podrían pasar inadvertidos si se utilizara únicamente información de los horarios planificados.

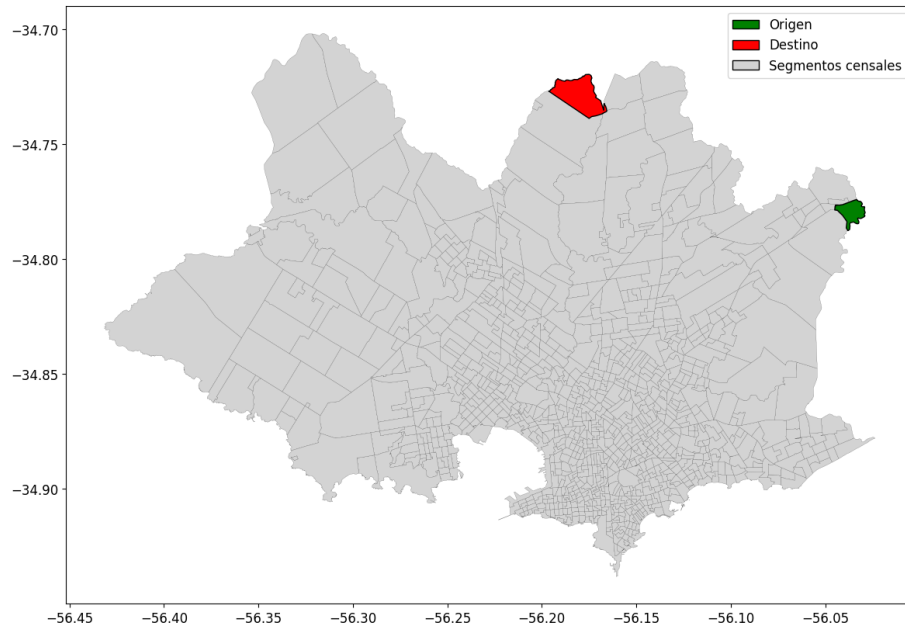


Figura 4.13: Mayor diferencia positiva de tiempos de viaje entre segmentos

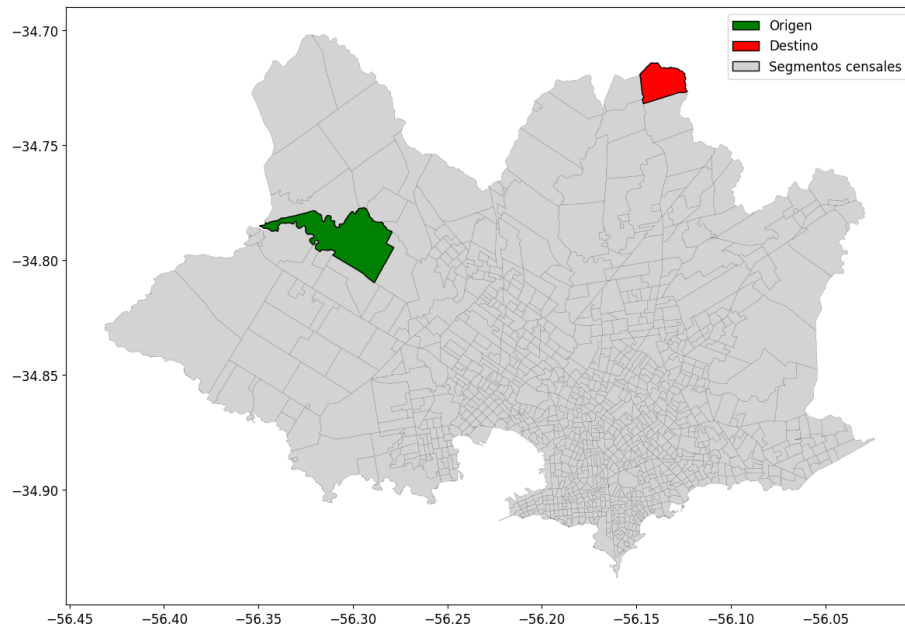


Figura 4.14: Mayor diferencia negativa de tiempos de viaje entre segmentos

#### 4.4.4. Accesibilidad: comparación según cantidad de destinos alcanzables

Teniendo los tiempos exactos de viaje entre los segmentos, se puede evaluar la accesibilidad desde cada uno de ellos, entendida como la cantidad de otros segmentos a los que es posible llegar dentro de cierto umbral de tiempo. Este análisis se realizó para diferentes límites de tiempo, aunque se presenta aquí el caso de 40 minutos.

Para cada segmento censal se calcula cuántos otros segmentos son alcanzables dentro de ese límite utilizando los tiempos reales y cuántos utilizando los tiempos planificados. La comparación permite identificar zonas donde la accesibilidad real es mayor que la teórica, y viceversa.

Algunos segmentos presentan una accesibilidad superior bajo los datos reales, lo que indica que la operación efectiva del sistema les brinda mejores oportunidades de movilidad de las que sugiere el diseño planificado. En otros casos ocurre lo contrario, la accesibilidad real resulta menor, evidenciando posibles problemas operativos que reducen la accesibilidad que en teoría deberían tener. La Figura 4.15 muestra el segmento censal que presenta la mayor diferencia a favor de los tiempos reales, es decir, aquel donde la accesibilidad real supera en mayor medida a la accesibilidad planificada, considerando la diferencia en la cantidad de segmentos censales alcanzables desde dicho origen. Por su parte, la Figura 4.16 muestra el segmento con la mayor diferencia a favor de los tiempos planificados, donde la accesibilidad teórica resulta sustancialmente superior a la observada en la práctica.

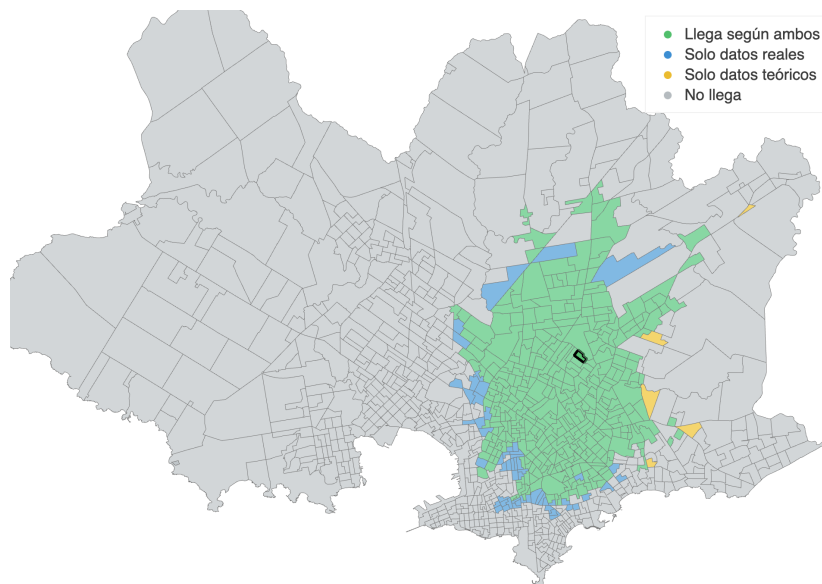


Figura 4.15: Segmento censal con la mayor diferencia positiva entre accesibilidad real y planificada

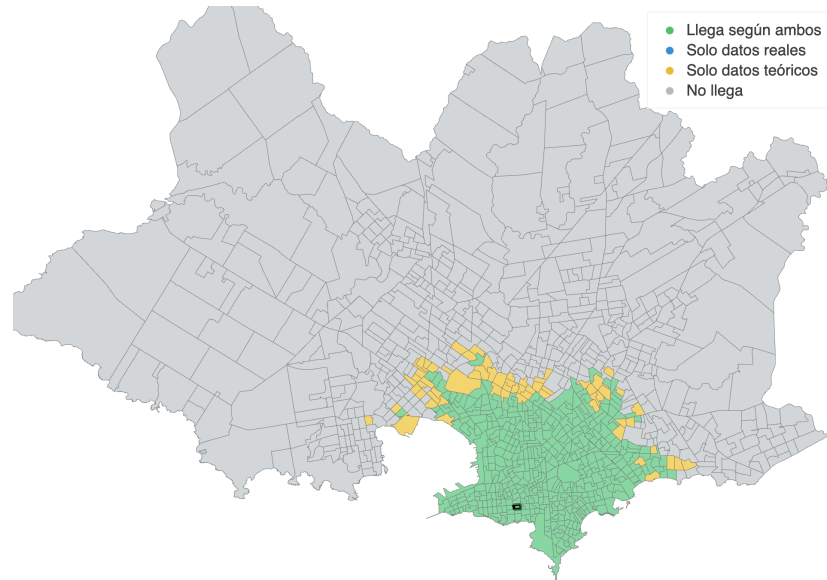


Figura 4.16: Segmento censal con la mayor diferencia negativa entre accesibilidad real y planificada

En la primera figura, el segmento censal corresponde al barrio Ituzaingó. Allí se observa una diferencia de 54 segmentos adicionales que resultan accesibles en 40 minutos cuando se consideran los tiempos reales en comparación con los planificados. Si bien algunos pocos segmentos hacia el este dejan de ser accesibles bajo los datos reales, esto se ve ampliamente compensado por una mayor accesibilidad hacia el sur, oeste y norte, donde numerosos segmentos pasan a quedar dentro del umbral de 40 minutos. En consecuencia, para esta zona, la operación efectiva del sistema brinda mayores oportunidades de movilidad que las previstas en la planificación.

En la segunda figura, el segmento censal corresponde a la zona del barrio Palermo. En este caso, la diferencia asciende a 65 segmentos que aparecen como accesibles según los tiempos planificados, pero no bajo los tiempos observados. Esto indica que, para esta zona, los datos planificados sobreestiman la accesibilidad real, reflejando que las condiciones efectivas de operación reducen las oportunidades de movilidad que la planificación sugiere.

El análisis puede extenderse a todos los pares origen–destino para determinar, bajo el umbral de 40 minutos, cuáles son accesibles en ambas ejecuciones, cuáles solamente con los datos reales y cuáles solamente con los planificados. La Tabla 4.14 resume estos resultados.

Analizando estos números, se observa que para el 97,3% de los pares de segmentos censales la accesibilidad no cambia al considerar tiempos planificados o reales. O bien son accesibles en ambos casos, o bien no lo son en ninguno. Dentro del 2,7% restante, el 61,6% corresponde a pares que resultan accesibles según los tiempos planificados, pero dejan de serlo cuando se consideran los

	Accesible según planificado	No accesible según planificado
Accesible según real	371.086	11.496
No accesible según real	18.466	728.921

Tabla 4.14: Accesibilidad entre segmentos

tiempos observados, lo que indica que la operación efectiva introduce demoras que afectan la conectividad dentro del umbral de 40 minutos.

El bajo impacto que la variabilidad de los tiempos de viaje de las líneas tiene sobre la accesibilidad estimada por el modelo puede explicarse, en parte, porque además del tiempo a bordo el modelo incorpora tiempos de caminata, espera y penalización de transbordos. Como estos componentes se mantienen constantes tanto para la aplicación con datos GPS como para la basada en datos planificados, la variación en los tiempos de viaje en los vehículos representa solo una fracción del tiempo total considerado.

#### 4.4.5. Mapa interactivo de accesibilidad

Con el objetivo de complementar el análisis y facilitar la exploración visual de los resultados del modelo, se desarrolló una herramienta interactiva que permite examinar la accesibilidad entre segmentos censales de Montevideo, bajo diferentes umbrales de tiempos de viaje y considerando tanto los planificados como los observados en la realidad. El mapa presenta la totalidad de los segmentos censales de la ciudad y, al seleccionar cualquiera de ellos como origen, muestra gráficamente tres categorías de accesibilidad. Por un lado, los segmentos que son alcanzables tanto con los tiempos reales como con los planificados, por otro aquellos que pueden alcanzarse únicamente bajo la operación real, y finalmente aquellos que solo resultan accesibles según los tiempos planificados. Esta visualización permite comparar si la accesibilidad efectiva obtenida a partir de la operación real del sistema mejora, coincide o disminuye respecto a la accesibilidad prevista por los horarios oficiales. Un ejemplo de este mapa se puede ver en la Figura 4.17.

La herramienta dispone de una barra deslizable para ajustar dinámicamente el umbral temporal, permitiendo observar cómo varía el conjunto de segmentos accesibles a medida que el tiempo máximo de viaje se incrementa o se reduce. Dicha herramienta puede ser accedida y utilizada en la siguiente url:

<https://andresg4.github.io/mapa-accesibilidad-montevideo/>.

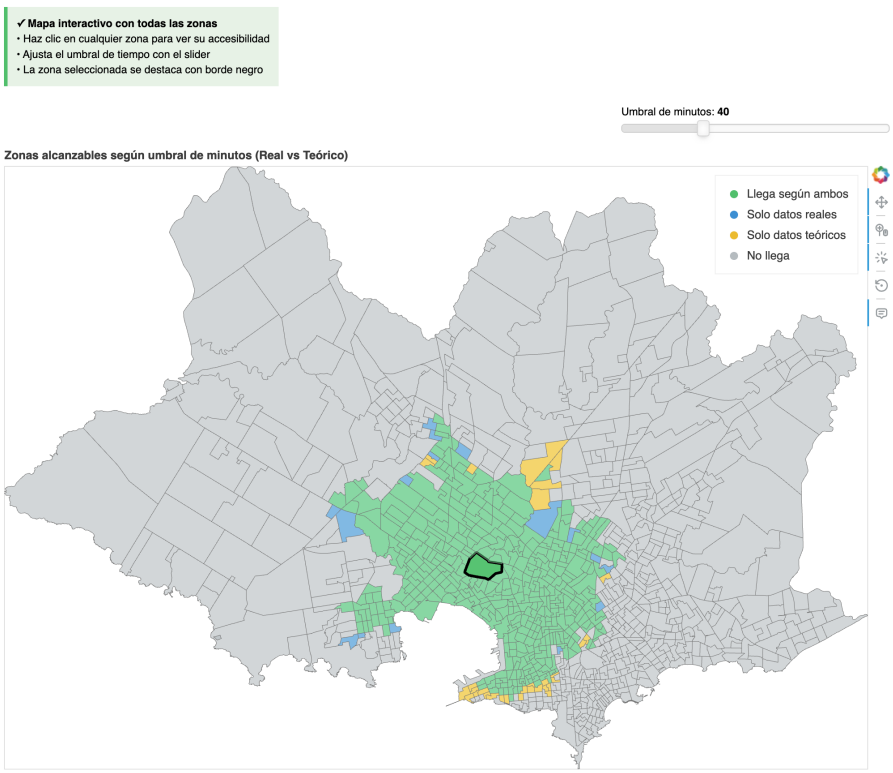


Figura 4.17: Mapa interactivo de accesibilidad

## Capítulo 5

# Conclusiones y Trabajo Futuro

En este capítulo se describen los principales hallazgos y conclusiones obtenidas en este trabajo, y las principales líneas de trabajo futuro.

### 5.1. Conclusiones

Este proyecto tuvo como propósito desarrollar y aplicar una metodología para comparar los tiempos de viaje reales y los tiempos teóricos establecidos en la planificación del transporte público. La metodología implementada permitió, a partir de datos de posicionamiento GPS, reconstruir los recorridos, obtener tiempos de pasada reales por parada, calcular diferencias respecto a los horarios planificados y evaluar estas diferencias a distintos niveles de agregación.

Esta metodología fue aplicada al caso de estudio del transporte público de la ciudad de Montevideo, donde se estudió el impacto que estas variaciones entre los tiempos de viaje reales y planificados tienen en la accesibilidad entre zonas de la ciudad y se elaboró una herramienta para poder visualizar de forma interactiva los resultados alcanzados.

Uno de los principales hallazgos del estudio sobre Montevideo es la marcada variabilidad en los tiempos de operación reales. Al analizar las diferencias entre las pasadas reales y las planificadas por las paradas se observa que el rango intercuartílico (IQR), es decir el 50% central de todas las medidas, se encuentra entre  $-2,22$  y  $+2,65$  minutos, lo cual indica la existencia de desvíos incluso en esta zona de la distribución, aunque dicho desvío es bastante acotado. Esta variabilidad se refleja también en la puntualidad, al aplicar el criterio utilizado por diversas agencias internacionales (pasadas entre  $-1$  y  $+5$  minutos respecto al horario planificado), se observa que solo el 50,69% de las mediciones pueden considerarse puntuales. Además, más de la mitad de los viajes (57,26%) presenta al menos un desvío igual o superior a 5 minutos, lo cual evidencia que la irregularidad es un comportamiento bastante expandido en el sistema.

La variabilidad también se evidencia al analizar las distintas líneas (variantes) del sistema. La mitad de ellas registra al menos un atraso de 10 minutos y al menos un adelanto de 7 minutos en algún viaje en la semana que se estudió, lo que muestra que las irregularidades no se limitan a casos excepcionales, sino que afectan a un conjunto amplio y diverso de recorridos. Al considerar el porcentaje de pasadas puntuales por parada a nivel de variante, se observa que los valores más altos (los que indican un mayor apego al horario planificado) corresponden en general a líneas locales. Éstas suelen operar recorridos más cortos y en zonas con menor intensidad de tránsito, condiciones que tienden a reducir la variabilidad en los tiempos de viaje, siempre que se regule adecuadamente la velocidad y el cumplimiento del horario para evitar adelantamientos no deseados. Por el contrario, las variantes con menores porcentajes de puntualidad (mayor desviación respecto al horario planificado) en general son líneas de recorrido más extenso y que atraviesan la zona céntrica o tienen su origen o destino en ella. En estos casos, tanto la longitud del recorrido como las congestiones propias del área central pueden explicar, al menos en parte, la mayor variabilidad observada.

Al considerar los tiempos de viaje entre segmentos censales, la diferencia promedio es de 0,20 minutos, indicando conexiones observadas en promedio apenas más lentas que lo planificado, pero con una dispersión considerable, con diferencias para ciertos pares origen-destino que alcanzan desde -16,38 minutos (tiempo de acceso notablemente más rápido) hasta 11,02 minutos (acceso sustancialmente más lento). Esto refleja que, si bien el promedio se mantiene estable, la experiencia real de viaje puede variar significativamente según el par de zonas que se considere.

A pesar de estas variaciones, el impacto en la accesibilidad urbana medida entre pares de segmentos censales resulta acotado a nivel general. Al analizar la accesibilidad entre segmentos censales con un tiempo máximo de viaje de 40 minutos, el 97,3% del total de combinaciones no experimenta cambios en su accesibilidad al utilizar tiempos reales en lugar de planificados. El bajo impacto a nivel agregado se debe, entre otros motivos, a que el modelo de accesibilidad considera no solo los tiempos de viaje dentro del vehículo, sino también los tiempos de caminata de acceso/egreso a la red, tiempos de espera y penalización por transbordos, que se mantienen incambiables al hacer la comparación y constituyen una parte significativa del tiempo total de viaje entre pares de segmentos censales. Si bien la variabilidad agregada es acotada, el porcentaje afectado de segmentos constituye un conjunto relevante, ya que representa aquellos casos en los que la diferencia entre los tiempos de viaje reales y los planificados sí afectan la viabilidad de ciertos desplazamientos hacia otras zonas de la ciudad.

Estos resultados permiten concluir que el uso de datos GPS y su adecuado procesamiento permite comprender de mejor forma las diferencias experimentadas por los usuarios entre los tiempos de viaje reales y los planificados. Asimismo, los indicadores desarrollados en este trabajo (puntualidad, desvíos por viaje, dispersión de tiempos por variante y diferencias de accesibilidad real-teórica) constituyen insumos valiosos para futuros análisis, permitiendo monitorear la evolución del sistema y ayudar a orientar políticas de mejora operativa.

## 5.2. Trabajo futuro

El trabajo se centró en la cuantificación de la puntualidad y accesibilidad, limitándose al uso de datos reales de una semana de operación durante el pico matutino de días hábiles entre las 7 AM y 9 AM. Para establecer una base de comparación más amplia, la primera línea de trabajo futuro puede apuntar a una extensión temporal del análisis. Podría ampliarse la recolección de posiciones GPS a períodos más extensos, lo que por un lado permitiría suavizar los impactos de medidas anormales por causas puntuales, y por otro lado analizar la estacionalidad del sistema (contrastando el desempeño por ejemplo en invierno vs. verano o períodos de clases vs. vacaciones). Además se podría comparar el comportamiento en el pico vespertino, donde la dinámica de la congestión y el retorno de la jornada laboral presentan características operativas diferentes.

Adicionalmente, si bien el trabajo actual cuantificó los desvíos del sistema, no se profundizó en sus causas. En este sentido, una segunda línea de investigación se puede enfocar en un análisis de causalidad. Sería relevante cruzar los datos de GPS con fuentes de información externas, como por ejemplo información sobre el tráfico vehicular. Este cruce de datos permitiría distinguir qué proporción de la variabilidad observada se puede atribuir a factores externos inevitables (embotellamientos, accidentes) y qué proporción es consecuencia directa de la gestión operativa interna del sistema de transporte.

En cuanto a la aplicación del modelo de accesibilidad, se identifican dos líneas claras de trabajo futuro. La primera consiste en ampliar la comparación actual entre los tiempos planificados y los tiempos reales, incorporando no solo el tiempo de viaje dentro del vehículo, sino también el tiempo de espera en la parada. Además, sería conveniente incluir una penalización adicional para aquellos casos en los que los desvíos respecto a los horarios programados impidan realizar transbordos entre líneas. De este modo, se podría evaluar cómo estos desvíos afectan a un conjunto más amplio de componentes del tiempo total de viaje y, en consecuencia, al indicador de accesibilidad. La segunda línea propuesta es analizar con mayor profundidad cuáles son los segmentos que sí ven su accesibilidad afectada por los desvíos respecto a la planificación. Resulta interesante incluir datos socioeconómicos de los segmentos censales (disponibles a través del censo o la encuesta continua de hogares) para tratar de identificar si existen inequidades entre los segmentos que ven su accesibilidad afectada.



# Referencias

- Arhin, S., y Noel, E. C. (2013). *Evaluation of bus transit reliability in the District of Columbia* (MNTRC Report 12-14). San José, CA: Mineta National Transit Research Consortium, College of Business, San José State University.
- Barabino, B., Di Francesco, M., y Mozzoni, S. (2017). Time reliability measures in bus transport services from the accurate use of automatic vehicle location raw data. *Quality and Reliability Engineering International*, 33(5), 969-978.
- Batty, M. (2009). Accessibility: In search of a unified theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(2), 191-194.
- Bullock, P., Jiang, Q., y Stopher, P. R. (2005). Using GPS technology to measure on-time running of scheduled bus services. *Journal of Public Transportation*, 8(1), 21-40.
- Carrasco, N. (2012). Quantifying reliability of transit service in Zurich, Switzerland: Case study of bus line 31. *Transportation Research Record*, 2274(1), 114-125.
- Hernandez, D. (2018). Uneven mobilities, uneven opportunities: Social distribution of public transport accessibility to jobs and education in Montevideo. *Journal of Transport Geography*, 67, 119-125.
- Hernandez, D., Hansz, M., y Massobrio, R. (2020). Job accessibility through public transport and unemployment in latin america: The case of Montevideo (Uruguay). *Journal of Transport Geography*, 85, 102742.
- Hernandez, D., y Rossel, C. (2022). Unraveling social inequalities in urban health care accessibility in Montevideo: A space-time approach. *Journal of Urban Affairs*, 46.
- Ji, Y., He, L., y Zhang, H. M. (2014). Bus drivers' responses to real-time schedule adherence and the effects on transit reliability. *Transportation Research Record*, 2417(1), 1-9.
- Massobrio, R., Hernández, D., y Hansz, M. (2019). *Travel time estimation for public transportation systems*. Online: <https://www.ucu.edu.uy/aucdocumento.aspx?971,1619>. (Accedido: 2025-11-30)
- Mishra, R., Pulugurtha, S. S., y Mathew, S. (2023). Examining associations with on-time performance and identifying relevant road network, demographic, socioeconomic and land use characteristics within the bus stop vicinity for

- proactive and reliable public transportation system planning. *Multimodal Transportation*, 2(4), 100094.
- Nesmachnow, S., Massobrio, R., Guridi, S., Olmedo, S., y Tchernykh, A. (2023). Big data analysis for travel time characterization in public transportation systems. *Sustainability*, 15(19).
- Nichols, A., Ryan, J., y Palmqvist, C.-W. (2024). The importance of recurring public transport delays for accessibility and mode choice. *Journal of Transport Geography*, 115, 103796.
- Pangilinan, C., Wilson, N., y Moore, A. (2008). Bus supervision deployment strategies and use of real-time automatic vehicle location for improved bus service reliability. *Transportation Research Record*, 2063(1), 28-33.
- Transportation Research Board and National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2013). *Transit capacity and quality of service manual, third edition* (I. Kittelson & Associates y P. Brinckerhoff, Eds.). Washington, DC: The National Academies Press.
- Urban Transport Group. (2014). *Bus punctuality: Towards a structure that can deliver*. Online: [https://www.urbantransportgroup.org/system/files/general-docs/pteg%20bus%20punctuality%20web%20report%20June%202014\\_FINAL2.pdf](https://www.urbantransportgroup.org/system/files/general-docs/pteg%20bus%20punctuality%20web%20report%20June%202014_FINAL2.pdf). (Accedido: 2025-11-30)
- Wessel, N., Allen, J., y Farber, S. (2017). Constructing a routable retrospective transit timetable from a real-time vehicle location feed and GTFS. *Journal of Transport Geography*, 62, 92-97.
- Xu, J., y Shen, Y. (2012). Setting scheduled trip time based on avl data. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 12(5), 39-45.
- Yan, Y., Liu, Z., y Bie, Y. (2016, 04). Performance evaluation of bus routes using automatic vehicle location data. *Journal of Transportation Engineering*, 142, 04016029.

# Anexo A

## Anexo

Columna	Descripción	Ejemplo de valor
cod_variante	Código de la variante	8312
frecuencia	Horario de salida desde origen	1900-01-01 07:25:00
cod_ubic_parada	Identificador de la parada	3934
ordinal	Posición de la parada en el recorrido	5
timestamp	Horario de registro de la posición GPS	2024-06-24 07:30:20
tiempo_acumulado	Tiempo de viaje desde origen según datos reales	17
interpolated	Indica si la medida fue recolectada originalmente o interpolada	False
name	Nombre de la línea	E14
trip_id	Identificador único del viaje	06-24-2024-8312-7250
tiempo_acumulado_teorico	Tiempo de viaje desde origen según horarios teóricos	60
hora_teorico	Horario teórico de pasada	1900-01-01 07:26:00
total_paradas	Total de paradas del recorrido	54
tiempo_acumulado_T	Diferencia en minutos entre los tiempos de viaje según reales y planificados	-0,72

Tabla A.1: Estructura de datos de pasadas reales por paradas

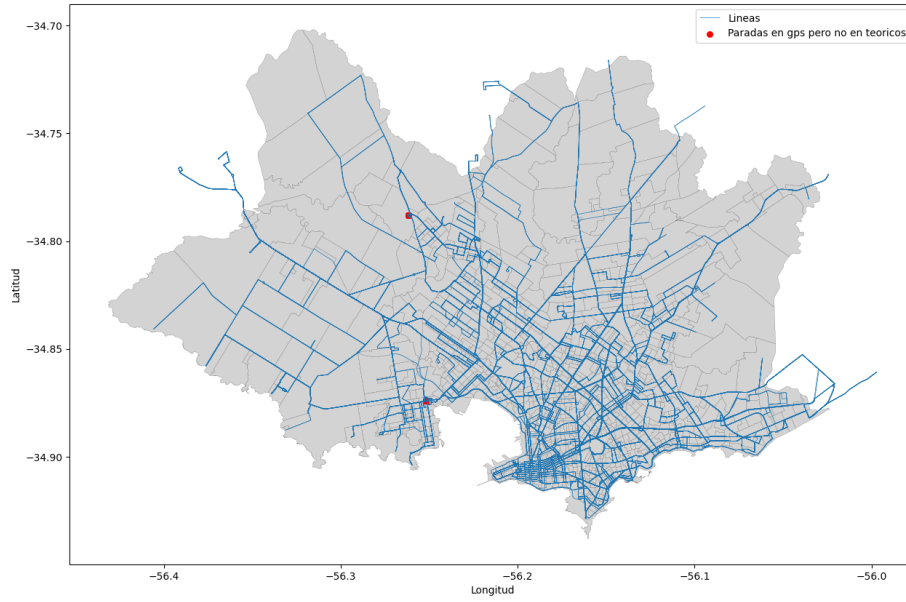


Figura A.1: Paradas en GPS pero no en planificados

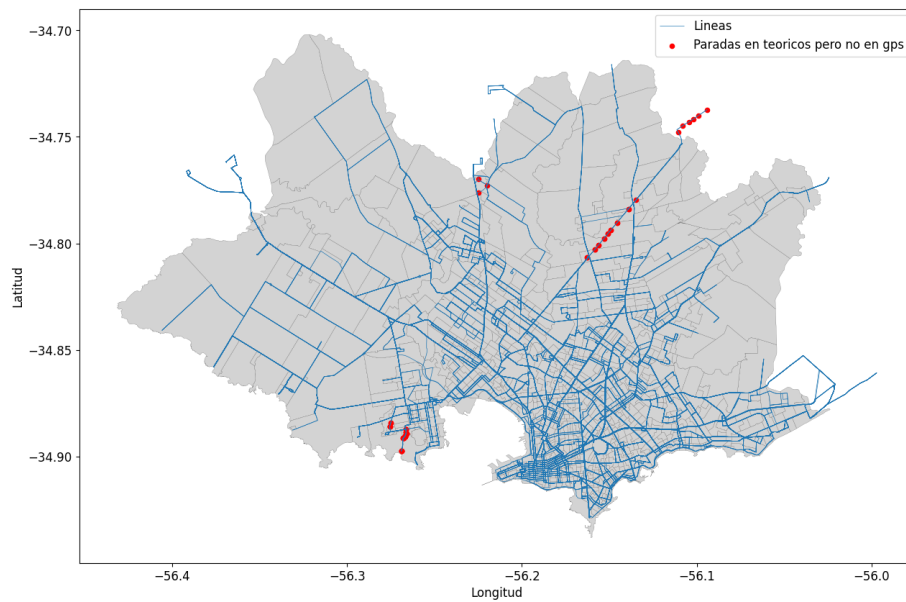


Figura A.2: Paradas en planificados pero no en GPS