

SISTEMAS DE VIAJES COMPARTIDOS CON PUNTOS DE SUBIDA Y BAJADA JERÁRQUICOS

Francisco Vilches, Universidad de Chile – francisco.vilches@ug.uchile.cl

Cristián E. Cortés, Universidad de Chile e Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI) – ccortes@ing.uchile.cl

Andrés Fielbaum, University of Sydney – andres.fielbaum@sydney.edu.au

RESUMEN

En este artículo se estudia el impacto de la asignación de lugares de parada para recoger y dejar pasajeros mediante jerarquías, en el rendimiento de los sistemas *ridesharing* o de vehículo compartido. Se desarrolló un modelo que integra elección de lugares de parada de los vehículos sobre un modelo de ruteo en el contexto de *ridesharing* con modelos de *Contraction Hierarchies*, de donde se muestra que los métodos de asignación de paraderos, especialmente aquellos basados en jerarquías, mejoran significativamente el *ratio* de servicio en comparación con aquel que se obtiene de un modelo *Door to Door* más tradicional, observando además la notoria influencia de la capacidad de los vehículos en el rendimiento del sistema. Como trabajo futuro, se propone la inclusión de congestión vehicular y la exploración de otros métodos de asignación de paraderos, en un contexto de tiempos de viaje variables

Palabras clave: ridesharing, Pick and drop off points, hierarchical order

ABSTRACT

In this article we study the impact on the stop locations for picking and/or delivering passengers using hierarchies on the performance of ridesharing systems. We developed a model that integrates the election of stop locations with a well-known routing model developed for ridesharing problems together with Contraction Hierarchy Ranking models. It was found that stop assignment methods, particularly with hierarchies, significantly improve the service rate compared to a more traditional Door to Door model, observing also a notorious influence of vehicle capacity on system performance. Future work includes considering traffic congestion and exploring alternative stop assignment methods.

Keywords: ridesharing, Pick and drop off points, hierarchical order

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha observado un aumento significativo en Chile del uso de servicios de transporte personalizados, tales como Uber, Cabify y Didi, especialmente en los principales centros urbanos como Santiago, Concepción y Valparaíso. Esta tendencia se debe a diversos motivos. Algunas personas consideran que estos servicios ofrecen una alternativa más cómoda y rápida en comparación con el transporte público, y a un precio razonable, mientras que otras los eligen por motivos de seguridad y conveniencia.

En términos económicos, los aspectos financieros desempeñan un papel crucial en la elección del modo de transporte. Desde el punto de vista monetario, el uso de servicios de transporte personalizados puede resultar más rentable que mantener un vehículo propio, teniendo en cuenta la frecuencia y distancia de los viajes, así como los costos asociados con seguros, combustible y estacionamiento. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos servicios suelen ser más costosos que el transporte público debido a su mayor exclusividad y personalización del viaje.

Con el objetivo de reducir la cantidad de vehículos necesarios para satisfacer la demanda de viajes urbanos, una solución válida es diseñar metodologías que permitan combinar múltiples pasajeros en un solo vehículo. Esto no solo contribuye al reparto de costos, sino que también proporciona un mayor nivel de personalización y seguridad en comparación con el transporte público tradicional. Esta estrategia se conoce como *ridesharing* y busca equilibrar la satisfacción de los pasajeros con la reducción del impacto ambiental derivado del uso de vehículos.

A nivel global, varias empresas han adoptado modelos de *ridesharing*. Por ejemplo, MOIA ha implementado un servicio de *ridesharing* on-demand en las ciudades de Hamburgo y Hannover (Alemania), utilizando un sistema de paradas designadas para su operación. Otro ejemplo destacado es UberX Share de Uber, un servicio de *ridesharing* on-demand disponible en 44 ciudades que permite a los pasajeros seleccionar libremente sus puntos de origen y destino.

Basándonos en los ejemplos mencionados anteriormente y en un análisis de mercado de servicios de *ridesharing* a nivel global (Foljanty, 2023), se pueden identificar dos enfoques principales para los modelos de *ridesharing* on-demand: los modelos *Door to Door* y los modelos basados en PUDO Points (Puntos de Recogida y Entrega).

Los modelos *Door to Door* ofrecen a los pasajeros una amplia flexibilidad para seleccionar sus puntos de origen y destino en cualquier ubicación accesible. Esto se asemeja a un servicio de taxi o ridesourcing, pero con la ventaja adicional de compartir el viaje con otros pasajeros. Por otro lado, los modelos basados en PUDO Points son más estructurados y dirigen a los pasajeros hacia puntos de recogida y entrega específicos, similares a las paradas de autobús. Esta modalidad puede optimizar las rutas y mejorar la eficiencia general del servicio, aunque a costa de una menor flexibilidad para el pasajero y un mayor esfuerzo para llegar a los puntos correspondientes.

En este estudio, se presenta una metodología para la asignación de paradas (PUDO Points) en un sistema de *ridesharing* on-demand, en el cual los pasajeros deben realizar trayectos a pie hacia y desde estos puntos cuando sea necesario. Para desarrollar esta metodología, se realizó un análisis de la topología de la red y se tomó como inspiración la definición de las jerarquías de contracción (Contraction Hierarchies) (Geisberger et al., 2012) para establecer un orden jerárquico de los nodos. Esta aproximación nos permite identificar y asignar estratégicamente las paradas, optimizando así el servicio de *ridesharing* on-demand, el cual sigue la metodología de ruteo propuesta por Alonso-Mora et al. (2017).

La estructura del artículo es la siguiente. En la siguiente Sección 2, se presenta una revisión del

estado del arte del *ridesharing*. Luego en 3 se define el método de selección de paraderos según una jerarquía, así como la forma como estas jerarquías son construidas. Luego, en Sección 4 se describe el modelo de *ridesharing* utilizado. En la Sección 5 se presentan resultados en base a una aplicación en un sector de la ciudad de Santiago, para luego en Sección 6 entregar conclusiones y líneas de trabajo futuro.

2. ESTADO DEL ARTE EN MODELOS DE *RIDESHARING*

Dentro de la literatura asociada, se pueden destacar distintos enfoques para resolver el problema de *ridesharing*. A continuación, se presenta un resumen de los aspectos más relevantes de cada modelo y las métricas de interés correspondientes en la Tabla 1.

Además de los modelos sintetizados en Tabla 1, existen medidas complementarias para reducir el impacto negativo del *ridesharing*. Entre ellas se encuentran las caminatas y la elección de lugares de recogida y entrega.

Caminatas: A menudo, las caminatas pueden ser incorporadas eficientemente antes o después de un viaje en *ridesharing*. Por ejemplo, caminar hacia una intersección más accesible o un lugar con menor tráfico puede permitir una recogida más rápida y reducir el tiempo del trayecto. Esto no solo contribuye a la eficiencia del viaje, sino que también puede tener un impacto positivo en la congestión de tráfico al evitar que los vehículos de *ridesharing* tengan que maniobrar en calles congestionadas (Fielbaum et al., 2021)

Elección de lugares de recogida y entrega: Al igual que la elección de paraderos en el transporte público, en *ridesharing* es importante seleccionar lugares de recogida y entrega que sean convenientes y eficientes. A través de las aplicaciones de *ridesharing*, los usuarios pueden seleccionar puntos de recogida que sean seguros, accesibles y que permitan un tráfico fluido. Además, al elegir puntos de entrega cercanos a los destinos finales, pero en zonas menos congestionadas, se puede contribuir a la disminución del tráfico en áreas de alta densidad (Stiglic et al., 2015).

3. ALGORITMO DE SELECCIÓN DE PARADEROS DE ALTA JERARQUÍA Y JERARQUIZACIÓN DE NODOS

3.1. Descripción de algoritmo

Para poder incorporar de manera sencilla las caminatas y los lugares de parada al sistema, se propone un algoritmo inteligente para la selección de paraderos. Este algoritmo se basa en una jerarquización de la red y utiliza un radio de búsqueda. El objetivo del radio de búsqueda es asegurar que cada nodo paradero esté a una distancia mínima de otro nodo paradero, mientras que la jerarquización de la red permite asignar una puntuación a cada nodo en función de las métricas evaluadas.

Sea n un nodo cualquiera del grafo G , r un método de jerarquización de nodos y N_r el conjunto de nodos del grafo G ordenados según la jerarquía r . Definimos $F(n, G, M)$ como la función que devuelve el subconjunto de nodos de G que se encuentran a una distancia igual o menor a M metros del nodo n . Además, se definen de manera auxiliar los conjuntos L_M y T_M como conjuntos vacíos.

A continuación se presenta el algoritmo de selección de paraderos de alta jerarquía:

Tabla 1: Resumen de los aspectos más relevantes de cada artículo y métricas de interés en el estado del arte de ridesharing.

Artículo	Aspectos Relevantes	Métricas de Interés	Citas
Optimization for dynamic ride-sharing: A review	Optimización para el ridesharing dinámico. Enfoque basado en la programación de vehículos y la asignación de viajes.	Eficiencia de la asignación de viajes, tiempo de viaje, satisfacción del usuario.	(Agatz et al., 2012)
On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment	Enfoque de alta capacidad para el ridesharing a demanda a través de la asignación dinámica de viajes y vehículos.	Capacidad de servicio, tiempo de espera, eficiencia operativa.	(Alonso-Mora et al., 2017)
Ridesharing: The state-of-the-art and future directions	Revisión exhaustiva del estado del arte en ridesharing, abordando tanto aspectos operativos como estratégicos.	Número de viajes compartidos, eficiencia de la red, costos operativos.	(Furuhata et al., 2013)
The Share-a-Ride problem: People and parcels sharing taxis	Estrategias de búsqueda de pasajeros en un entorno de taxi. Enfoque basado en la minería de datos para descubrir estrategias de búsqueda de pasajeros.	Tiempo de búsqueda, eficiencia de la búsqueda, satisfacción del pasajero.	(Li et al., 2011)
Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks	Cuantificación de los beneficios del ridesharing a través de redes de compartibilidad. Enfoque basado en la teoría de grafos para modelar y analizar el ridesharing.	Beneficios de la compartibilidad, eficiencia de la red, satisfacción del usuario.	(Santi et al., 2014)

3.2. Jerarquización de Nodos

La jerarquización de nodos se define como el proceso de asignar una posición o rango único a cada uno de los nodos en una red. Este proceso permite establecer una estructura jerárquica que refleje la importancia relativa de los nodos en función de ciertos atributos o características. En este estudio, se implementan tres métodos de jerarquización de nodos distintos: Jerarquía Convexa, Jerarquía CHR y Jerarquía Aleatoria.

3.2.1. Jerarquía Convexa

La Jerarquía Convexa, también conocida como Jerarquía α , asigna una posición o rango a cada nodo utilizando una función convexa de dos atributos del nodo. Para ello, se define la función $VA(i, n)$ que devuelve el valor del atributo i para el nodo n . Para ajustar la importancia de cada atributo, se utiliza una constante $\alpha \in [0, 1]$ que define el grado de ponderación entre los atributos.

La función de jerarquización convexa $r(n, \alpha, i, j)$ para un nodo n con los atributos (i, j) y la constante α se define de la siguiente manera:

Algorithm 1 Algoritmo para obtener el conjunto de paraderos de alta jerarquía

```

1: for  $i \in N_r$  do                                ▷ Para cada nodo en  $N_r$ 
2:   if  $i \in L_M$  then                                ▷ Si el nodo ya está en  $L_M$ 
3:     Pasar al siguiente nodo.
4:   end if
5:   if  $i \notin L_M$  then                                ▷ Si el nodo no está en  $L_M$ 
6:      $T_M = T_M \cup \{i\}$                                 ▷ Agregar el nodo a  $T_M$ 
7:      $L_M = L_M \cup \{i\} \cup F(i, G, M)$                 ▷ Actualizar  $L_M$ 
8:   end if
9:   if  $L_M == N$  then                                ▷ Si  $L_M$  es igual a  $N$ 
10:    Finalizar.
11:   end if
12: end for

```

$$r(n, \alpha, i, j) = \alpha \times VA(i, n) + (1 - \alpha) \times VA(j, n) \quad (1)$$

Con el fin de ajustar los efectos de disparidad entre los atributos de la red, se propone una versión normalizada de la función de jerarquización convexa. Para ello, se utiliza la función $MVA(i, G)$ que devuelve el valor máximo del atributo i para todo el grafo G .

La función de jerarquización convexa normalizada $r_norm(n, G, \alpha, i, j)$ para un nodo n en el grafo G , con los atributos (i, j) y la constante α , se define de la siguiente manera:

$$r_norm(n, G, \alpha, i, j) = \alpha \times \frac{VA(i, n)}{MVA(i, G)} + (1 - \alpha) \times \frac{VA(j, n)}{MVA(j, G)} \quad (2)$$

En este trabajo, se seleccionan el grado del nodo y la velocidad promedio de los enlaces adyacentes como atributos para la jerarquía convexa. Debido a la disparidad en las unidades de estos atributos, se utiliza la función de jerarquización convexa normalizada.

Para garantizar que cada nodo tenga un valor de jerarquización único y evitar que varios nodos compartan el mismo valor, los nodos se ordenan de manera descendente según su identificador único.

3.2.2. Jerarquía CHR (Contraction Hierarchy Ranking)

Para comprender el concepto de Jerarquía CHR, es necesario entender la definición de *Contraction Hierarchies (CH)* (Geisberger et al., 2012). Las CH son una alternativa para calcular las rutas más cortas entre un par de nodos, utilizando un algoritmo de dos fases que consta de una fase de preprocesamiento y una fase de búsqueda.

La fase de preprocesamiento implica la contracción secuencial de los nodos del grafo, añadiendo aristas de atajo para preservar las distancias más cortas entre todos los pares de nodos. Durante esta fase, cada nodo se asigna un orden de contracción basado en criterios como la importancia del nodo en la red o la cantidad de atajos que se crearían al contraerlo. Este proceso genera un grafo jerarquizado en el que las aristas de niveles superiores actúan como atajos para rutas más largas.

La fase de búsqueda utiliza una variante bidireccional del algoritmo de Dijkstra, conocida como búsqueda de acceso directo, sobre el grafo jerarquizado. Esta búsqueda se realiza simultáneamente

desde el nodo origen y el nodo destino, considerando únicamente las aristas que conectan con nodos de jerarquía superior. Cuando las dos búsquedas se encuentran, se combinan los resultados para obtener la ruta más corta. Esta técnica reduce significativamente el número de aristas y nodos que se exploran en comparación con un algoritmo de búsqueda de rutas más cortas convencional, lo que resulta en un cálculo significativamente más rápido.

La Jerarquía CHR, cuyas iniciales corresponden a *Contraction Hierarchies Ranking*, utiliza como jerarquía la permutación inversa del orden de contracción generado durante la fase de preprocesamiento, conocido como **Ranking**.

En este artículo, se considera el trabajo propuesto por Gottesbüren et al. (2019), que aprovecha los métodos de partición de grafos para acelerar la fase de preprocesamiento de las CH.

Entre los diversos métodos de partición de redes estudiados, el algoritmo de *Inertial Flow* (Schild y Sommer, 2015) destaca por su simplicidad y eficacia en redes basadas en mapas.

El algoritmo de *Inertial Flow* se enfoca en mejorar la eficiencia de las rutas mediante la creación de una jerarquía de nodos basada en la inercia y el flujo dentro de la red de transporte.

Este algoritmo analiza la red y calcula una medida de inercia para cada nodo, que representa la tendencia de un nodo a mantener constante el flujo de tráfico en una dirección. Los nodos con alta inercia son aquellos por los que es probable que el tráfico fluya de manera eficiente y sin cambios significativos en la dirección. Después de calcular la inercia, el algoritmo examina el flujo a través de cada nodo, que corresponde a la cantidad de tráfico que puede pasar por un nodo en un período de tiempo determinado. Al combinar la inercia y el flujo, el algoritmo asigna un nivel jerárquico a cada nodo.

3.2.3. Jerarquía Aleatoria

La Jerarquía Aleatoria, también conocida como *Random*, implica asignar aleatoriamente un rango único a cada nodo de la red. En este enfoque, no se utilizan criterios específicos ni consideraciones de importancia o estructura de la red para determinar el rango de los nodos. En cambio, cada nodo se etiqueta con un valor aleatorio, lo que resulta en una jerarquía no ordenada ni relacionada con las características de la red.

La Jerarquía Aleatoria ofrece una perspectiva diferente y no estructurada de la jerarquización de nodos. En comparación con las jerarquías basadas en algoritmos más complejos o criterios específicos, la Jerarquía Aleatoria puede ser útil para comparaciones y análisis exploratorios, donde no se busca una jerarquía basada en criterios predefinidos. Sin embargo, debido a su naturaleza aleatoria, puede no ofrecer ventajas en términos de optimización o eficiencia en el cálculo de rutas.

4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE RIDESHARING DE ALONSO MORA

Para describir el modelo de *ridesharing* presentado por Alonso-Mora et al. (2017), es necesario considerar los tres problemas principales que se encuentran presentes en los sistemas de *ridesharing* y *carpooling*, los cuales corresponden a: 1 lograr calcular de manera incremental una asignación óptima entre las solicitudes entrantes, 2 permitir la operación y asignación continua de solicitudes de viaje entrantes a la flota de vehículos y 3 permitir un reequilibrio de la flota de vehículos.

Basándose en estos tres problemas, se presentan cuatro enfoques para resolverlos: asignar las solicitudes de viajes a los vehículos por lotes, mantener disponibilidad del sistema en cualquier momento, asignar de manera continua los viajes y reequilibrar la flota de vehículos.

Para resolver los problemas 1 y 2, se presenta el siguiente esquema de solución: primero se genera un grafo de emparejamiento RV (*Request-Vehicle*), el cual seleccionará qué solicitudes pueden compartir un viaje considerando sus orígenes y destinos, y seleccionará qué vehículos pueden satisfacer las solicitudes individualmente, teniendo en cuenta los pasajeros a bordo.

Luego se genera un grafo RTV (*Request-Travel-Vehicle*), el cual explora las regiones del grafo donde su subgrafo inducido es completo, de tal forma que encuentre viajes (múltiples R) que se puedan combinar y transportar por un único vehículo.

Finalmente, se realiza una asignación óptima, dado el grafo RTV, que calcula la solución óptima de tal forma que exista como máximo un viaje por vehículo. Esto provoca que el problema se convierta en un ILP (*Programación Lineal Entera*).

Para resolver el problema 3, se utiliza una asignación de lotes continua, es decir, se agregan al modelo las solicitudes de viaje que se han generado desde la última asignación. La duración de cada uno de los pasos de tiempo es fija.

Para resolver el problema 4, después de la asignación, se denomina al conjunto R_{Ko} como el conjunto de solicitudes no asignadas y al conjunto de vehículos vacíos como el conjunto V_{idle} . En caso de que los conjuntos R_{Ko} y V_{idle} no estén vacíos, se procede a reequilibrar la flota de vehículos. Para hacer esto, después de cada asignación por lotes, los vehículos en V_{idle} se asignan a solicitudes en R_{Ko} para minimizar la suma de los tiempos de viaje, con la restricción de que todas las solicitudes o todos los vehículos estén asignados. Con este enfoque, si todas las solicitudes pueden ser satisfechas, algunos vehículos pueden permanecer inactivos, ahorrando combustible y distancia recorrida.

4.1. Variables del Modelo de *ridesharing*

Las variables necesarias a considerar para modelar correctamente el proceso descrito anteriormente son las siguientes:

- **Paso de simulación (TS):** Tiempo en segundos entre las distintas actualizaciones del modelo.
- **Tiempo de simulación:** Tiempo en segundos que posee el sistema para realizar de manera continua las asignaciones. Se debe mencionar que, independientemente del **TS**, se realiza una última asignación al final del tiempo permitido.
- **Tiempo de Espera Máximo (MWaitT):** Tiempo de espera máximo en segundos para que un pasajero sea atendido. Este corresponde al tiempo que transcurre entre el momento en el que llega la solicitud de viaje y algún vehículo recoge al pasajero.
- **Tiempo de Desvío Máximo (MDT):** Tiempo de desvío máximo por pasajero permitido en segundos. Este corresponde a la diferencia entre el tiempo de viaje directo y el tiempo de viaje que efectivamente realiza.
- **Capacidad:** Corresponde a la capacidad de cada uno de los vehículos para poder trasladar pasajeros.

Adicionalmente, se definen nuevas variables con el fin de incorporar caminatas al modelo.

- **Distancia de Caminata:** Corresponde a la distancia máxima de caminata por tramo **M** que pueden realizar los pasajeros para ir hacia/desde los paraderos. La distancia total que un pasajero realiza no puede superar $2M$.

- **Velocidad de Caminata:** Corresponde a la velocidad a la que los pasajeros se trasladan caminando a través de la red. Esta velocidad se estima en 1.25 metros/segundo (Silva et al., 2014).
- **Demanda:** En este estudio, se emplea un enfoque estocástico para la generación de demanda de viajes. Específicamente, se simula una serie de solicitudes de viaje con orígenes y destinos aleatorios.

Es importante destacar que, para asegurar la relevancia práctica en el contexto de *ridesharing*, se impone una restricción en la proximidad geográfica de los orígenes y destinos. En concreto, la distancia mínima entre el origen y el destino de cada solicitud de viaje debe ser superior a un umbral predeterminado, que en este caso se ha fijado en $2M$. Esta restricción evita escenarios no realistas donde los orígenes y destinos estén demasiado cerca el uno del otro, lo que podría no justificar el uso de un vehículo.

4.2. Modelo de Asignación de Paraderos (MAP)

Con base en los modelos de *ridesharing* estudiados, se definen los siguientes métodos de asignación de paraderos para cada viaje. Los paraderos corresponden a los puntos en donde los pasajeros serán recogidos y dejados en su viaje.

Door to Door (DtD): Este es el caso en el que los pasajeros son recogidos y dejados directamente en sus orígenes y destinos respectivos, es decir, sus orígenes y destinos son sus paraderos.

Closest Meeting Point (CMP): Corresponde a la asignación de paraderos que están a la distancia más cercana de los orígenes y destinos del viaje. Esto implica que los pasajeros podrían tener que caminar una corta distancia para llegar a su destino final o al punto de recogida.

Optimal Meeting Point (OMP): Proceso de asignación óptima de paraderos, que busca minimizar el tiempo total de viaje. Este proceso corresponde a la asignación de paraderos que se encuentran, según un radio de búsqueda predefinido, cercanos a los orígenes y destinos del viaje. Esto implica que los pasajeros podrían tener que caminar una distancia mayor que en el caso **CMP** para llegar a su destino final o al punto de recogida, con la posibilidad de que el tiempo de trayecto total (Caminatas + Viaje) sea menor al caso **CMP**.

4.3. Representación del Modelo Implementado

Para entender mejor el modelo implementado, se representa en la Figura 1 la secuencia de pasos que se deben seguir para poder replicar el experimento.

5. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección, se describe los parámetros a utilizar en el modelo de ruteo, los detalles del caso de estudio, incluyendo la red utilizada para definir el movimiento de los vehículos así como los nodos de parada. Esta red fue codificada sobre la red de OpenStreetMaps de Santiago disponible open source. Luego realiza un análisis de los resultados obtenidos mediante simulación utilizando métricas específicas definidas en subsección 5.3 previamente definidas. Es importante destacar que el análisis de estos datos nos permitirá evaluar la eficacia del modelo propuesto en diferentes escenarios y condiciones.

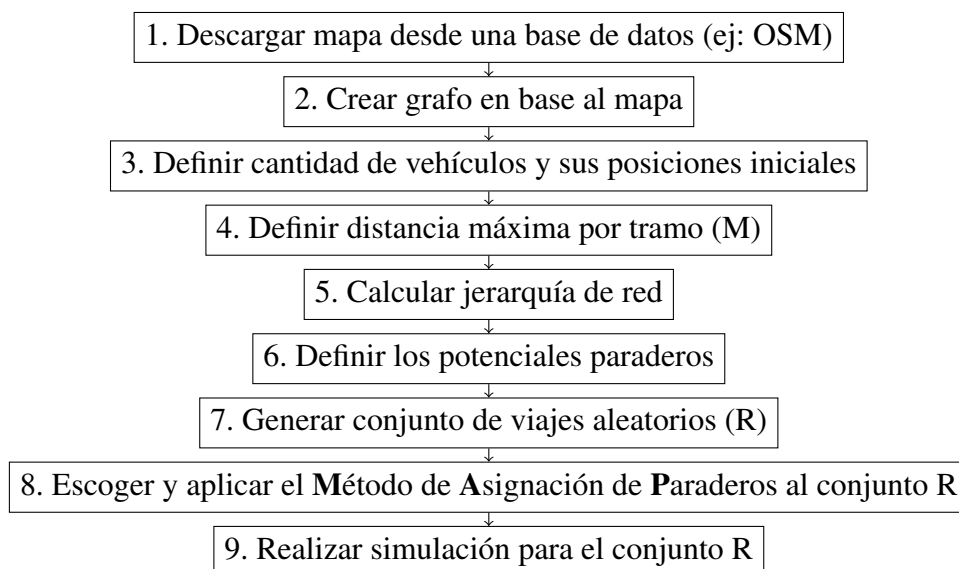


Figura 1: Esquema del Modelo Implementado

5.1. Definición de Caso Base

Antes de sumergirnos en el análisis de los diferentes escenarios y parámetros, es fundamental establecer un conjunto de condiciones iniciales y parámetros bajo los cuales se evaluará el rendimiento de los algoritmos y metodologías presentados. Esto nos proporciona una línea de base y un entorno controlado que facilita la comparación de los resultados en diferentes escenarios y configuraciones.

Tabla 2: Definición de Variables para el Caso Base

Variable de Simulación	Valor
Área a estudiar	Providencia
Solicitudes	1000 solicitudes
Tiempo de Simulación	3600 segundos
TS	90 segundos
MWaitT	600 segundos
MDT	600 segundos
Jerarquía	CHR
MAP	CMP
Distancia de Caminata	450 metros
Número de vehículos	100 vehículos
Capacidad	3 pasajeros

En la Tabla 2, se presenta la configuración que se utilizará como caso base en este estudio. Esta configuración fue elegida después de considerar varias alternativas y busca representar un escenario relativamente común y realista, pero al mismo tiempo lo suficientemente genérico como para servir de base para análisis más detallados.

Las variables de simulación incluyen parámetros como la cantidad de solicitudes, el tiempo permitido para realizar las asignaciones, el tamaño del paso de tiempo entre asignaciones, entre

otros. Es importante destacar que estos valores fueron seleccionados con el objetivo de equilibrar la complejidad computacional y la precisión en la simulación.

Para expresar de manera gráfica el área de trabajo estudiada, se incluye en la Figura 2 el grafo correspondiente al caso base, donde los nodos amarillos corresponden a los paraderos asignados según la jerarquía y la distancia máxima definidas, la cantidad total de nodos de la red es de 2035, mientras que para este caso base se logran definir 94 paraderos.

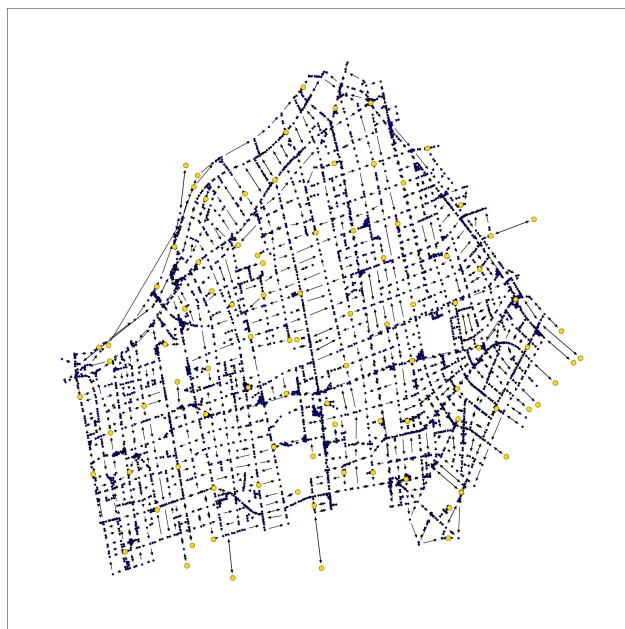


Figura 2: Grafo de Providencia utilizado para el Caso Base

En los experimentos subsiguientes, variaremos ciertos parámetros para evaluar cómo responden los algoritmos bajo diferentes condiciones. Es importante tener en cuenta que cualquier cambio en estos parámetros puede tener un impacto en los resultados, por lo que al interpretar los resultados, es vital considerar el contexto del caso base.

5.2. Metodología del Análisis

Los datos fueron recopilados a través de múltiples ejecuciones de la simulación, utilizando distintos parámetros y configuraciones. Se aseguró que cada simulación se realizara en condiciones controladas para permitir una comparación justa y significativa de los resultados.

5.3. Métricas de Evaluación

Para evaluar el rendimiento y la eficacia del sistema de transporte propuesto, es fundamental contar con un conjunto de métricas que nos permitan cuantificar aspectos clave del sistema. A continuación, se detallan las métricas seleccionadas para este propósito:

- **Tiempo de Ejecución (ET):** Es el tiempo total en segundos que requiere el ejecutar la simulación o el algoritmo.

- **Tasa de Servicio (SR):** Es la proporción de solicitudes de viaje que son atendidas con éxito por el sistema en relación al número total de solicitudes.
- **Viajes con desvíos:** Cantidad de viajes realizados que presentan desvíos
- **Tiempo de Espera Promedio (MWaitT):** Es el promedio de tiempo que los pasajeros deben esperar desde que solicitan el servicio hasta que son recogidos por el vehículo.
- **Tiempo de Desvío Promedio (MDT):** Representa el tiempo adicional promedio que un vehículo debe viajar para recoger o dejar pasajeros en comparación con el tiempo que tomaría si no hubiera desvíos.
- **Horas Promedio de los Vehículos en Movimiento (VHT):** Representa el tiempo promedio en horas que los vehículos pasan en movimiento durante la simulación.
- **Distancia de Caminata Promedio Total (MWalkD):** Es la distancia promedio en metros que los pasajeros deben caminar para llegar a sus puntos de encuentro.

Considerando las métricas anteriormente expuestas, se procede a generar la Tabla 3, en donde se presentan los resultados de las métricas escogidas para el caso base del modelo implementado.

Tabla 3: Resultados del Caso Base

Atributo	Valor
Tiempo de Ejecución (segundos)	14
Ratio de Servicio (%)	0.872
Viajes con Desvíos	221
Tiempo promedio de desvío (segundos)	119
Tiempo promedio de espera (minutos)	3.016
VHT (Horas)	0.65
Distancia promedio de caminata (metros)	390

Según estos resultados, podemos observar que usando la configuración establecida, se logra un ratio de servicio del 87.2 %, con un tiempo de espera bajo (3 minutos). A costa de que en promedio los pasajeros deben caminar 390 metros (aproximadamente 5 minutos) y que una cierta cantidad de pasajeros se desvíen de sus trayectos directos (221), en el caso de que su viaje realice un desvío, el tiempo de desvío promedio es cercano a los 2 minutos (118 segundos). Por lo que se considera un *trade-off* válido con el fin de mejorar la calidad del servicio.

5.4. Análisis de Sensibilidad de Capacidad

Con el fin de realizar un análisis de sensibilidad para la capacidad de los vehículos, se realizaron comparativas utilizando diferentes capacidades. En la Tabla 4, se muestra una comparativa en el caso de que la capacidad de los vehículos sea mínima (1), lo que implica que no existe la posibilidad de realizar múltiples viajes en un vehículo. Podemos constatar que, en este caso, el método de asignación de paraderos para viajes no compartidos es ineficiente en comparación al modelo Door to Door (DtD).

Tabla 4: Análisis de Sensibilidad de Capacidad

Capacidad	1	1(-)	2	3	3 (Rnd)	3 (-)
Tiempo de Ejecución (Segundos)	3	5	16	21	14	24
Jerarquía	CHR	-	CHR	CHR	Rnd	-
Ratio de Servicio (%)	0.719	0.736	0.874	0.872	0.832	0.793
MAP	CMP	DtD	CMP	CMP	CMP	DtD
Viajes con Desvíos	0	0	213	221	199	267
Tiempo promedio de Desvío (segundos)	-	-	113	119	132	105
Tiempo Promedio de Espera (minutos)	2.67	2.62	3.05	3.02	3.15	2.96
VHT (Horas)	0.58	0.61	0.66	0.65	0.65	0.68
Distancia Promedio de Caminata (metros)	392	0	389	390	423	0

De la misma forma, en la Tabla 4, podemos observar que un aumento en la capacidad de los vehículos resulta en un aumento considerable en las tasas de servicio, a costa de agregar pequeños desvíos a una cierta cantidad de viajes. Por otro lado, podemos observar que la utilización de paraderos en sistemas de viajes compartidos presenta mejoras en las tasas de servicio al agregar caminatas, independientemente de la jerarquía utilizada para definir los paraderos.

5.5. Análisis de Sensibilidad a la Frecuencia de Actualización del Sistema (TS)

Para realizar un análisis relevante para una posible implementación de este tipo de sistemas, se analiza la sensibilidad del sistema a variaciones en la frecuencia de actualización, es decir, variaciones en el **Time Step** (TS).

En la Tabla 5 se puede observar que a medida que el **Time Step** disminuye, aumenta el esfuerzo computacional asociado y se identifica una ineficiencia en las métricas de interés. Por otro lado, se puede observar que a mayor **Time Step**, aumenta el espacio de probabilidades asociado a la asignación entre vehículos y solicitudes de viaje, lo que se traduce en mejores combinaciones de viajes.

Tabla 5: Análisis de Sensibilidad para TS

Time Step	30	60	90	120	300
Tiempo de Ejecución (Segundos)	95	38	21	16	23
Ratio de Servicio	0.675	0.791	0.872	0.907	0.875
Viajes con Desvíos	270	227	221	254	235
Tiempo Promedio de Desvío (Segundos)	120	115	119	122	122
Tiempo Promedio de Espera (Minutos)	3.07	3.0	3.02	3.19	4.16
VHT (Horas)	0.48	0.58	0.65	0.69	0.64
Distancia de Caminata Promedio (metros)	396	397	390	390	388

De acuerdo a estos resultados, se puede deducir que un **Time Step** de al menos 90 segundos es un tiempo razonable para una posible implementación de este tipo de sistema.

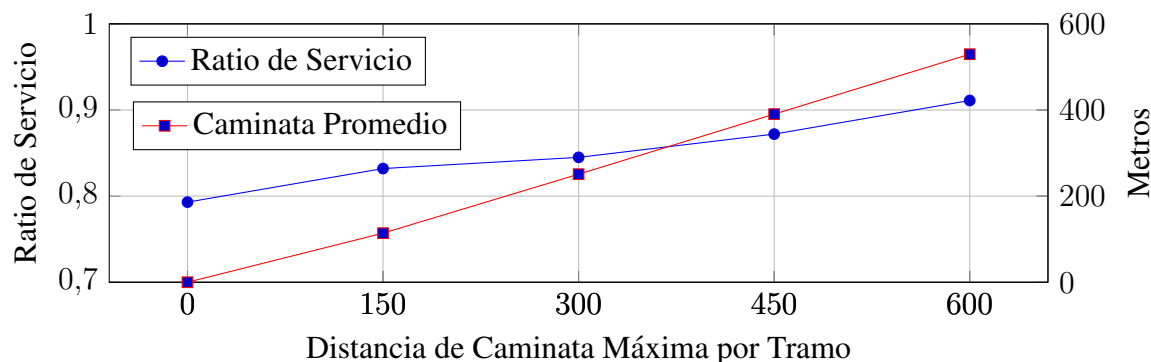


Figura 3: Gráfico comparativo de Ratio de Servicio y Distancia de Caminata Promedio según Distancia de Caminata Máxima por Tramo

5.6. Análisis de Sensibilidad para el Método de Asignación de Paraderos

Para validar la eficacia del uso de paraderos en este tipo de sistemas, se procede a realizar un análisis con respecto a los métodos de asignación de paraderos.

En la Tabla 6 se puede apreciar que el método de asignación de paraderos influye de manera positiva en las métricas evaluadas, es decir, que el uso de paraderos (CMP y OMP) constituye una mejora con respecto al modelo DtD.

Con respecto a los modelos de asignación planteados en este trabajo, se puede observar que el modelo OMP constituye una mejora en el ratio de servicio con respecto al modelo CMP, sin embargo, el costo de esta mejora se asocia a un aumento en la cantidad de viajes con desvíos.

Tabla 6: Análisis de Sensibilidad de Métodos de Asignación

Método de Asignación	DtD	CMP	OMP
Jerarquía	-	CHR	CHR
Tiempo de Ejecución (Segundos)	24	14	15
Ratio de Servicio (%)	0.793	0.872	0.89
Viajes con Desvíos	267	221	235
Tiempo promedio de desvío (Segundos)	105	119	112
Tiempo promedio de espera (Minutos)	2.96	3.02	3.01
VHT (Horas)	0.68	0.65	0.66
Distancia promedio de caminata (Metros)	0	390	390

5.7. Análisis de Sensibilidad de Caminata Máxima por Tramo

Para analizar la sensibilidad con respecto a la distancia máxima de caminata por tramo que deben realizar los usuarios, se decidió evaluar para distintas distancias de caminata, específicamente para $M = \{0, 150, 300, 450, 600\}$. En base a eso, se analizará principalmente los promedios de caminata y los ratios de servicio.

Con ello, podemos observar que incluso con cortas caminatas, estas influyen de manera positiva en el sistema. En la Figura 3 se encuentra la comparación de las métricas antes mencionadas.

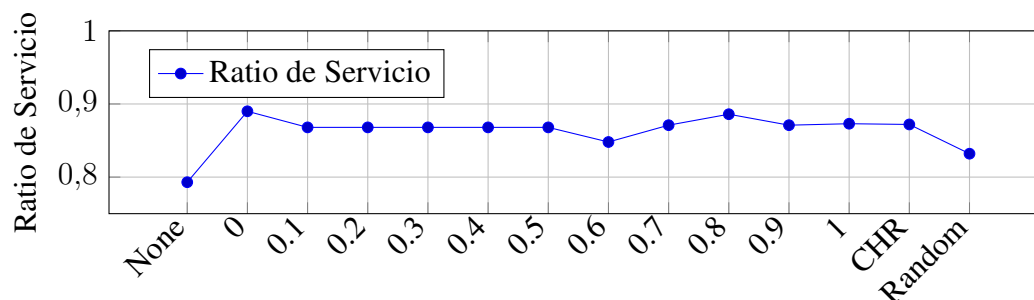


Figura 4: Gráfico comparativo de Ratio de Servicio según Jerarquía

5.8. Análisis de Sensibilidad para el Tipo de Jerarquía

Para analizar como afecta el tipo de jerarquía utilizado en el algoritmo de selección de paraderos, se decidió concentrar los resultados en la métrica de Ratio de Servicio, esto es debido a la similitud en los valores encontrados para el resto de métricas.

Con el fin de realizar un análisis detallado con respecto a la jerarquía convexa, se decidió sensibilizar adicionalmente con respecto a α , en donde α aumenta gradualmente su valor desde 0 a 1.

Por otro lado, para visualizar de manera mas evidente el impacto que las distintas jerarquías influyen en el sistema, se decidió incluir una jerarquía "None" la cual corresponde al modelo sin paraderos (DtD). Teniendo en consideración lo anterior, podemos observar en la Figura 4 que existen jerarquías mejores que otras. Lo interesante de esto, es que, el promedio de los valores asociados a las jerarquías convexas utilizadas se comportan de manera similar a la jerarquía CHR, ambas logrando mejores resultados que la Jerarquía Aleatoria y que el caso sin paraderos.

6. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Con base en el análisis realizado, queda en evidencia que los métodos de *ridesharing* se ven beneficiados por la asignación de lugares de recogida y entrega de pasajeros. Tanto el método *Closest Meeting Point* (CMP) como el *Optimal Meeting Point* (OMP) logran mejorar el ratio de servicio en comparación con el modelo *Door to Door* (DtD), lo que indica que la introducción de paraderos en el sistema contribuye a una mayor eficiencia y capacidad de atención de las solicitudes de viaje.

Además, se observó que la capacidad de los vehículos también juega un papel importante en el rendimiento del sistema. A medida que se incrementa la capacidad de los vehículos, se obtiene un mayor ratio de servicio, lo que implica que se pueden atender más solicitudes de viaje de manera exitosa. Sin embargo, esto también puede conllevar un aumento en la cantidad de viajes con desvíos, lo que indica que se deben encontrar balances adecuados en la capacidad para optimizar el sistema.

Como investigación futura, se propone la inclusión de cambios en la velocidad general del sistema (incorporando el fenómeno de congestión de tráfico). Esto permitiría simular situaciones más realistas y evaluar cómo afecta el tráfico y la velocidad de desplazamiento en el rendimiento del sistema de *ridesharing*.

Agradecimientos: Esta investigación fue parcialmente financiada por el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ANID PIA/PUENTE AFB220003) y por ANID/Fondecyt/Regular 1191200.

REFERENCIAS

- Agatz, N., Erera, A. L., y Savelsbergh, M. W. (2012). Optimization for dynamic ride-sharing: A review. **European Journal of Operational Research**, 223 (2), 295–303. doi: 10.1016/j.ejor.2012.05.031
- Alonso-Mora, J., Samaranayake, S., Wallar, A., Frazzoli, E., y Rus, D. (2017). On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 114 (3), 4625–4630. doi: 10.1073/pnas.1611675114
- Fielbaum, A., Bai, X., y Alonso-Mora, J. (2021). On-demand ridesharing with optimized pick-up and drop-off walking locations. , 126, 103061. Descargado 2023-06-13, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X21000887> doi: 10.1016/j.trc.2021.103061
- Foljanty, L. (2023, May). **On-demand transit market report q1/2023**. Descargado de <https://www.linkedin.com/pulse/on-demand-transit-market-report-q12023-lukas-foljanty>
- Furuhata, M., Dessouky, M., Ordóñez, F., Brunet, M.-E., y Wang, X. (2013). Ridesharing: The state-of-the-art and future directions. **Transportation Research Part B: Methodological**, 57, 28–46. doi: 10.1016/j.trb.2013.07.005
- Geisberger, R., Sanders, P., Schultes, D., y Vetter, C. (2012). Exact routing in large road networks using contraction hierarchies. , 46 (3), 388–404. Descargado 2023-06-13, de <https://www.jstor.org/stable/23263550> (Publisher: INFORMS)
- Gottesbüren, L., Hamann, M., Uhl, T. N., y Wagner, D. (2019). Faster and better nested dissection orders for customizable contraction hierarchies. , 12 (9), 196. Descargado 2023-06-15, de <http://arxiv.org/abs/1906.11811> doi: 10.3390/a12090196
- Li, X., Zhao, P., Kveton, B., y Gomes, C. P. (2011). The share-a-ride problem: People and parcels sharing taxis. En **Proceedings of the 17th acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining** (pp. 623–631). doi: 10.1145/2020408.2020500
- Santi, P., Resta, G., Szell, M., Sobolevsky, S., Strogatz, S. H., y Ratti, C. (2014). Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 111 (37), 13290–13294. doi: 10.1073/pnas.1403657111
- Schild, A., y Sommer, C. (2015). On balanced separators in road networks. En E. Bampis (Ed.), **Experimental algorithms** (pp. 286–297). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-20086-6_22
- Silva, A., Cunha, J., y Silva, J. (2014). Estimation of pedestrian walking speeds on footways. , 167, 32–43. doi: 10.1680/muen.12.00048
- Stiglic, M., Agatz, N., Savelsbergh, M., y Gradisar, M. (2015). The benefits of meeting points in ride-sharing systems. , 82, 36–53. Descargado 2023-07-06, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261515002088> doi: 10.1016/j.trb.2015.07.025