

## PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DE SERVICIOS DE RUTA FLEXIBLE EN PUNTA ARENAS

Matías Diddier Salinas, Universidad de Chile – masalinas@ug.uchile.cl

Alejandro Tirachini, University of Twente y Universidad de Chile –

alejandrotirachini@utwente.nl

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

### RESUMEN

En este artículo se detalla la simulación de un sistema *On-Demand Ridepooling* en Punta Arenas, junto a un análisis de efectos de distintos tamaños de flota en variables de servicio y en costos de usuarios y del operador. La metodología se basa en asignación de individuos a vehículos disponibles optimizando puntos de recogida y bajada. Resultados indican mayor eficiencia con respecto a un servicio “puerta a puerta” y un tamaño de flota óptimo de 400 vehículos. Tamaños de flota mayores entregan mejores niveles de servicio a usuarios y aumentan el costo total del operador, con baja utilización y ocupación promedios.

*Palabras clave: Ridepooling, Movilidad compartida, Punta Arenas*

### ABSTRACT

This article details the simulation of an *On-Demand Ridepooling* system in Punta Arenas, along with an analysis of the effects of different fleet sizes on service variables and user and operator costs. The methodology is based on assigning individuals to available vehicles optimizing pick-up and drop-off points. Results indicate greater efficiency with respect to a “door-to-door” service and an optimal fleet size of 400 vehicles. Larger fleet sizes provide better levels of service to users and increase the total cost of the operator, with low average utilization and occupancy.

*Keywords: Ridepooling, Shared mobility, Punta Arenas*

## 1. INTRODUCCIÓN

Ciudades en constante crecimiento han visto cómo el aumento del uso del automóvil particular, en desmedro de modos de transporte más sustentables, han causado un alza en externalidades negativas relacionadas, como congestión, contaminación y siniestros viales, entre otras. Las nuevas tecnologías en el transporte aparecieron con la idea de revertir o disminuir esta situación. La inserción de plataformas de *Ridehailing* (como Uber, Cabify o DiDi) prometía que el uso del automóvil sería más eficiente. Sin embargo la situación ha empeorado, ya que gran parte de los pasajeros de estas plataformas provienen del transporte público, provocando un aumento del número total de vehículos-kilómetro recorridos y con ello las externalidades negativas del uso del automóvil (Diao et al., 2021; Henao y Marshall, 2019; Tirachini y Gómez-Lobo, 2020; Wu y MacKenzie, 2021; Shi et al., 2021; Choi et al., 2022). Además, al disminuir los pasajeros del transporte público este sistema queda en riesgo de caer en un círculo vicioso disminuyendo su calidad de servicio, lo que a su vez provoca una baja en su utilización (Bar-Yosef et al., 2013).

El sistema de *On-Demand Ridepooling* es una solución intermedia entre el transporte público (como buses o taxis colectivos) al admitir el traslado de varios pasajeros en vehículos compartidos, y el sistema *Ridehailing* al permitir al usuario solicitar el servicio *on-demand*, manteniendo una ruta flexible. De esta manera, presentan el potencial de disminuir la flota necesaria de vehículos en las calles para suplir el mismo servicio (Santi et al., 2014), reduciendo así las externalidades negativas provocadas por ellos.

El caso chileno es especialmente relevante en este ámbito, pues las ciudades regionales de tamaño medio aquejan un sistema de transporte público deficiente. Es aquí donde un modo de transporte en particular, el taxi colectivo, se ha convertido en un medio fundamental de transporte. Aunque presenta una ruta fija conocida por los usuarios, en la práctica los taxis colectivos tienen una manera de funcionar similar al sistema *Ridepooling*: existen desvíos habituales de la ruta para acercar a sus pasajeros a bordo a su destino. A pesar de ello, este modo de transporte no ha sido lo suficientemente estudiado (Domarchi, 2017), por lo que presenta un alto potencial de mejora en ámbitos como la información y coordinación centralizadas gracias a las nuevas tecnologías.

El objetivo principal de este artículo es la simulación de la red de transporte público urbano de una ciudad chilena de tamaño medio, bajo la modalidad de *On-Demand Ridepooling* según la propuesta de Fielbaum et al. (2021). Para luego analizar su costo y ejecutar un análisis de sensibilidad respecto a parámetros relevantes, con el fin de concluir si este sistema es operacionalmente aplicable en una ciudad de estas características. La contribución de este artículo consiste en la recopilación y transformación de datos necesarios para ejecutar el modelo de *On-Demand Ridepooling*, la adaptación y aplicación del modelo en la ciudad de Punta Arenas y el análisis comparativo posterior a su ejecución, que entregará utilidad en materia de políticas públicas.

En lo que sigue del artículo, el Capítulo 2 caracteriza a la ciudad de Punta Arenas, el caso de estudio en el que se aplicará la simulación. El Capítulo 3 detalla la metodología aplicada y el proceso para la preparación de los datos requeridos. El Capítulo 4 muestra los resultados obtenidos bajo ciertos parámetros específicos, aplicando un análisis de sensibilidad. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan conclusiones y se proponen futuras ideas de estudios, asociados con este planteamiento.

## 2. ANTECEDENTES DE PUNTA ARENAS

Punta Arenas es la capital de la Región de Magallanes, en la zona austral de Chile. Corresponde a una ciudad de tamaño medio que al 2019 poseía una población de 133.254 habitantes y 44.163 viviendas, y una tasa de motorización de 1,09 vehículos por vivienda. Gran parte de las actividades comerciales se encuentran en el centro de la ciudad, relegando las zonas residenciales a su alrededor y hacia las afueras (SECTRA, 2020). La zona presenta temperaturas muy bajas, con una temperatura media normal de 6,5°C (Santana et al., 2009).

El sistema de actividades de la ciudad ha podido ser catastrado y modelado recientemente a través de SECTRA (2020) y SECTRA (2022). En SECTRA (2020) se ejecutó una Encuesta de Movilidad, durante la cual se encuestaron viviendas representativas de la población de Punta Arenas y se registraron las características de los viajes realizados por sus habitantes: origen, destino, propósito, periodo del día en que se realiza y modo de transporte utilizado, entre otras. Cada uno de estos viajes representa a los viajes realizados por un porcentaje de la población, ejemplificado con un factor de expansión asociado al viaje encuestado. En SECTRA (2022) se continúa este análisis con el objetivo de diseñar un nuevo Plan Maestro de Transporte para la ciudad.

El sistema de buses urbanos de transporte público de Punta Arenas es regulado y subsidiado por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT) en su operación. Cuenta con 9 servicios en la ciudad y con una flota de 70 buses en donde normalmente opera el 90 %, con una capacidad de 45 pasajeros cada uno. Los taxis colectivos urbanos funcionan con 55 líneas y una flota de 1.092 vehículos en donde normalmente opera el 83 %, con una capacidad de 4 pasajeros cada uno. Los servicios de buses poseen una ruta fija y paradas establecidas; los servicios de taxi colectivo en la práctica presentan rutas flexibles en torno a recorridos fijos (SECTRA, 2022).

Dadas las condiciones previamente mencionadas es que en Punta Arenas el automóvil particular predomina sobre el resto de modos de transporte. En un día laboral normal el 62,3 % de viajes se realizan en vehículos particulares, contra un 19,6 % de viajes que se realizan en transporte público urbano. El 67,9 % de viajes en transporte público urbano se realiza en taxis colectivos, mientras que el resto se realiza en buses. Con respecto a la duración de estos viajes, el tiempo promedio de un viaje es de 21 minutos, siendo mayor por 8 y 16 minutos en promedio en taxis colectivos y buses, respectivamente. Además, al menos el 76 % de viajes en transporte público tienen una espera promedio de 10 minutos o menos, y el 86 % tiene un tiempo de acceso de 5 minutos o menos (SECTRA, 2022).

La Figura 1 muestra, mediante un mapa de calor, las velocidades de circulación promedio en el periodo Punta Mañana (7:30-9:00) sobre las vías troncales, colectoras y de servicio en Punta Arenas. Estas velocidades se obtuvieron como resultado de un modelo VIVALDI (SECTRA, 2022), cuyos datos de calibración se estimaron como el promedio de velocidad en 5 registros mediante el método del vehículo flotante (SECTRA, 2020). Considerando que la velocidad máxima en este tipo de vías es de 50 km/h, se puede deducir el efecto de la congestión sobre las velocidades de circulación en varios sectores de la ciudad.

Estos antecedentes sugieren que un sistema *On-Demand Ridepooling* podría mejorar las condiciones

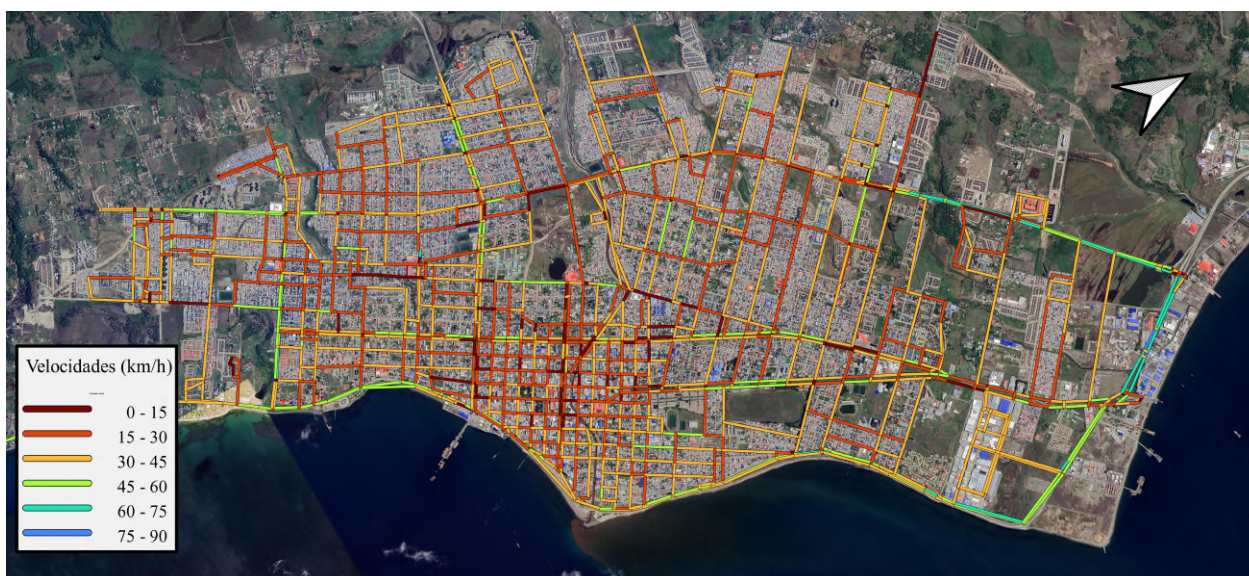


Figura 1: Velocidad promedio de circulación sobre vías troncales, colectoras y de servicio de Punta Arenas en periodo Punta Mañana. Fuente: Elaboración propia en base a datos de SECTRA (2022).

de transporte público de la ciudad, disminuyendo los tiempos de viaje, espera y acceso de los usuarios bajo un menor tamaño de flota operativa. Bajo estas condiciones, se podrían reducir la congestión y las externalidades que produce un exceso de flota de taxis colectivos, además de generar la posibilidad de atraer nuevos usuarios al sistema de transporte público, disminuyendo el uso del automóvil particular.

### 3. METODOLOGÍA

Los taxis colectivos de Punta Arenas tienen un comportamiento que tiende a asemejarse al sistema *Ridepooling*, en el sentido que modifican su ruta a conveniencia para evitar atochamientos de tráfico o para acercar a pasajeros a su destino, siempre y cuando el resto de pasajeros a bordo esté de acuerdo con este desvío y que no implique un tiempo añadido de viaje excesivo. Sumado a la importancia que tienen los taxis colectivos dentro del transporte público urbano de la ciudad, se busca simular su funcionamiento a través del sistema *On-Demand Ridepooling*, el cual funciona como un sistema intermedio entre servicios de transporte público de ruta fija como buses, y servicios de *Ridehailing* como Uber o Cabify, presentes en el país. A continuación se describe el diseño de este sistema y el proceso de preparación de los datos requeridos para aplicarlo.

#### 3.1. Diseño de On-Demand Ridepooling

En esta sección se explica el funcionamiento del sistema *On-Demand Ridepooling*. Este diseño se basa en el método de Fielbaum et al. (2021), en los que se realizan asignaciones de viajes solicitados por individuos a vehículos disponibles. En este proceso además se optimizan los puntos de recogida y bajada de pasajeros, lo que implica que los individuos puedan tener que caminar en algunos casos.

La red vial simplificada de Punta Arenas se puede ver como un grafo fuertemente conexo  $G = (N, E)$ . Cada arco  $e \in E$  posee tiempos fijos de viaje en vehículo  $t_V(e)$  y de caminata  $t_W(e)$ , que representan el tiempo que tarda en recorrer el arco completo un vehículo y una persona caminando, respectivamente.

Las  $p$  solicitudes de viaje, que representan cada una a un individuo que desea viajar, se caracterizan como una tupla de 3 elementos  $r = (o_r, d_r, tr_r)$  que representan respectivamente un nodo de origen del viaje  $o_r$ , un nodo de destino  $d_r$  y la hora exacta de la solicitud  $tr_r$ . El conjunto de solicitudes de viaje  $R = \{r_1, \dots, r_p\}$  buscará ser asignado a un conjunto de vehículos  $V = \{v_1, \dots, v_m\}$ , en donde los  $m$  vehículos consisten en una tupla de 4 elementos  $v = (P_v, \kappa, A_v, S_v)$  que representan respectivamente su posición actual  $P_v$ , capacidad de pasajeros  $\kappa$ , las solicitudes de viaje asignadas a este vehículo  $A_v$ , y los próximos nodos a visitar  $S_v$  que corresponden a puntos de recogida o bajada de pasajeros según las solicitudes asignadas.

El costo  $UC(r)$  percibido por el individuo  $r$  que posee su respectiva solicitud de viaje se basa en su tiempo de viaje en el vehículo  $IV(r)$ , su tiempo de espera a por el vehículo que lo traslada  $Wait(r)$ , y su tiempo de caminata hacia el nodo de recogida y desde el nodo de bajada  $Walk(r)$ . Esto se refleja en la Ecuación (1), en donde los parámetros  $\alpha_{IV}$ ,  $\alpha_{Wait}$  y  $\alpha_{Walk}$  corresponden respectivamente a los valores del tiempo de viaje, de espera y de caminata.

$$UC(r) = \alpha_{IV} \cdot IV(r) + \alpha_{Wait} \cdot Wait(r) + \alpha_{Walk} \cdot Walk(r) \quad (1)$$

El costo  $OC$  percibido por el operador de los vehículos se divide en un costo de capital  $OC_c$  y en costos operacionales  $OC_o$ . Los costos de operación dependen de los vehículos-hora recorridos  $VHT$ , mientras que los costos de capital dependen únicamente del tamaño de flota  $Fleet$ , tal como se aprecia en la Ecuación (2). Esto significa que aunque toda la flota esté disponible y su tamaño afecte en los costos de capital, los costos operacionales solo se verán afectados por su utilización.

$$OC = C_c \cdot Fleet + C_o \cdot VHT = OC_c + OC_o \quad (2)$$

El proceso de asignación de solicitudes de viaje a vehículos disponibles se realiza de forma iterativa cada  $\Delta t = 1$  minuto, en donde las solicitudes se acumulan durante este periodo para luego ser asignadas a la misma vez. Sea  $R_t$  el conjunto de solicitudes de viaje que deben ser asignadas en el periodo  $t$ . Inicialmente se calcula un conjunto de rutas posibles  $\mathcal{T}$ , con la ruta  $T \in \mathcal{T}$  formada a partir de un subconjunto de solicitudes  $req(T) \subseteq R_t$  junto a las solicitudes ya asignadas previamente a un vehículo  $veh(T)$ . Estas rutas deben cumplir ciertas condiciones para ser factibles: no superar la capacidad máxima del vehículo  $\kappa$  con la asignación de nuevas solicitudes y respetar los límites máximos definidos para la espera, caminata y demora de los individuos. Además, cada ruta  $T$  afecta de manera diferente los costos de los individuos que solicitan un viaje  $req(T)$ , a los individuos ya asignados al vehículo  $veh(T)$  y al costo operacional por la nueva ruta del vehículo.

Con el conjunto de rutas posibles  $\mathcal{T}$  y el conjunto de vehículos  $V$  se procede a resolver el problema de optimización entero que tiene como función objetivo la Ecuación (3), con las Ecuaciones (4) y (5) como restricciones de este problema. Las variables binarias  $x_T$  indican los recorridos que serán ejecutados, y las variables binarias  $z_r$  señalan solicitudes de viaje que han sido rechazadas. Cabe destacar que se permite el rechazo de solicitudes que son imposibles de satisfacer dados los límites

máximos definidos para la espera, caminata y demora de individuos, o solicitudes que resultan en una gran ineficiencia del sistema; todo a cambio de una penalización definida por la constante  $\psi$ .

$$\min_{x, z \in \{0,1\}} \sum_{T \in \mathcal{T}} x_T \cdot (UC(T) + OC_o(T)) + \sum_{r \in R_t} z_r \cdot \psi \quad (3)$$

$$s.a. \quad z_r + \sum_{T: r \in req(T)} x_T = 1 \quad \forall r \in R_t \quad (4)$$

$$\sum_{T: veh(T) = v} x_T \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (5)$$

Finalmente, se ejecuta un reajuste de todo el sistema luego de haber asignado nuevas solicitudes, en donde se cambia la ruta de los vehículos relacionados. Vehículos disponibles son enviados a sectores de mayor demanda según método de Fielbaum et al. (2021). Las solicitudes de viajes rechazadas se acumulan para el periodo  $t + 1$ .

### 3.2. Proceso de preparación de datos requeridos

En esta sección se detalla el procedimiento para obtener los elementos necesarios para la ejecución del sistema *On-Demand Ridepooling* antes especificado, y el procesamiento realizado para adecuar estos elementos a la necesidad del modelo.

Desde la Encuesta de Movilidad obtenida por SECTRA (2020) se seleccionaron los viajes que fuesen efectuados en el periodo Punta Mañana de un día laboral, y que fuesen realizados vía taxis colectivos dentro de la zona urbana. Estos viajes fueron agrupados según su par origen-destino, obteniendo la suma de sus factores de expansión. De esta manera se obtuvo un total de  $p = 4.280$  viajes, que equivale a un 0,98 % del total de viajes expandidos en la Encuesta de Movilidad. Teniendo esta información se individualizó cada viaje creando las solicitudes de viaje  $r \in R$ , asignando para cada una de las 4.280 solicitudes sus puntos de origen referencial  $or_r$  y destino referencial  $dr_r$ . Además se le asignó un horario de inicio del viaje  $tr_r$  uniformemente aleatorio dentro del periodo Punta Mañana (considerado de 1:30 horas).

Se trabajó con una red vial reducida de Punta Arenas en la que se consideran vías troncales, colectoras y de servicio, mediante la forma de un grafo dirigido conexo  $G = (N, E)$  de 970 nodos  $n \in N$  y 2.226 arcos  $e \in E$ . Los arcos además poseen como característica una velocidad promedio de circulación  $vel_V(e)$  en el periodo Punta Mañana, la cual actúa como costo del arco. Sobre esta red se aplicó el algoritmo de Dijkstra para encontrar la ruta más rápida entre todos los pares de nodos y su costo, considerando vehículos motorizados y caminatas. Para los vehículos, se utilizó la velocidad en los arcos para obtener los tiempos de viaje en vehículo mediante la relación  $vel_V(e) = d(e)/t_V(e)$  con  $d(e)$  el largo del arco. Para la caminata se asumió una velocidad  $vel_W(e) = vel_W = 4,5 \text{ km/h}$  obteniendo los tiempos de caminata respectivos de cada arco según la relación  $vel_W = d(e)/t_W(e)$ .

Los pares origen-destino  $(or_r, dr_r)$  de las solicitudes de viaje son referenciales, dado el factor de expansión otorgado a viajes reales encuestados. En otras palabras, no se conocen exactamente

los orígenes y destinos reales de todos los viajes. Es por esto que se distribuyen aleatoriamente el origen y destino de cada viaje a sus nodos respectivamente circundantes, en donde los nodos más cercanos tienen mayor probabilidad de ser seleccionados, de forma que  $(or_r, dr_r) \approx (o_r, d_r)$ . Con este método se obtienen pares origen-destino aproximados a partir de sus símiles referenciales.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Parámetros y escenarios creados

Para ejecutar la simulación del sistema *On-Demand Ridepooling* se utilizaron los parámetros que se encuentran en la Tabla 1, relacionados a los usuarios y al operador de los vehículos. Los parámetros  $\alpha_i$  y  $C_j$  fueron obtenidos de Fielbaum et al. (2022), que se basa en parámetros originalmente estimados en Tirachini y Antoniou (2020). Los parámetros de costo representan la operación de vehículos eléctricos en Chile, e incluyen tanto costo de capital como de operación. Por otra parte, el parámetro  $\psi$  fue escogido arbitrariamente de manera que el sistema priorice transportar a la mayor cantidad de usuarios posible, sujeto a las restricciones y a que no imponga un costo excesivo sobre otros usuarios. La capacidad aplicada es  $\kappa = 4$  pasajeros, capacidad actual de los vehículos que operan como taxis colectivos en la ciudad de Punta Arenas. La simulación se ejecutó por 90 periodos, que equivalen a los 90 minutos que dura el periodo Punta Mañana. Los vehículos fueron distribuidos aleatoriamente en los nodos del grafo representativo de la ciudad.

Los parámetros  $\Omega_i$  mostrados en la Tabla 2 representan los valores máximos permitidos de tiempos de caminata, espera y demora para cada usuario. Posibles rutas que transgredan estos valores máximos para algún usuario serán filtradas previo a la resolución del problema de optimización entero.

Tabla 1: Parámetros de costos asociados al usuario y al operador. *Fuente: Fielbaum et al. (2022).*

$\alpha_{IV}$ (US\$/h)	$\alpha_{Wait}$ (US\$/h)	$\alpha_{Walk}$ (US\$/h)	$\psi$ (US\$)	$C_c$ (US\$/día)	$C_o$ (US\$/h)
2,9	5,8	7,25	10	83,7	1,302

Tabla 2: Tiempos máximos de caminata, espera y demora permitidos en el sistema. *Fuente: Elaboración propia.*

$\Omega_{Walk}$ (min)	$\Omega_{Wait}$ (min)	$\Omega_{Delay}$ (min)
5	5	10

El primer escenario busca representar la situación actual de los taxis colectivos de Punta Arenas si estos actuaran bajo la modalidad *On-Demand Ridepooling*. Este escenario contará con  $m = 900$  vehículos, que representan la flota operativa de taxis colectivos de la ciudad. El segundo escenario simulará una operación exclusivamente “puerta a puerta” que no obligará a los usuarios a caminar hacia un punto de recogida o desde el punto de bajada del vehículo, asumiendo la flota del primer escenario pero con  $\Omega_{Walk} = 0$ . Además se simularán otros 18 escenarios basados en el escenario original, pero con flotas operativas en el rango entre 100 y 1.300 vehículos.



## 4.2. Resultados de la simulación

La Figura 2 muestra histogramas del tiempo de caminata, espera y demora percibido por los usuarios en el primer escenario. Se puede notar que la mayoría de usuarios no se ve obligado a caminar hacia un punto de recogida o desde el punto de bajada del vehículo. En efecto, solo el 15 % de los usuarios requiere caminar algún tramo en su viaje bajo la simulación del sistema *On-Demand Ridepooling* en las mismas condiciones de los taxis colectivos en la actualidad. Aunque el 86 % de viajes que se efectúan en el transporte público de Punta Arenas tienen un tiempo de acceso de 5 minutos o menos (SECTRA, 2022), sería una mejora significativa que el 85 % de usuarios de taxis colectivos no requieran efectuar caminatas para realizar sus viajes. Con respecto al tiempo de espera de los usuarios, casi todos deben esperar al menos un minuto a la llegada del vehículo dado el funcionamiento de la simulación, en donde la lista de solicitudes se actualiza cada minuto. El 50 % de los usuarios tuvieron que esperar hasta 1,93 minutos, y el 75 % de los usuarios tuvieron que esperar hasta 2,62 minutos por su vehículo. Por otra parte, todos los usuarios se vieron obligados a extender su viaje al menos un minuto más. El 50 % de los usuarios sufrieron una extensión de hasta 2,77 minutos, y el 75 % de los usuarios sufrieron una extensión de hasta 4,23 minutos.

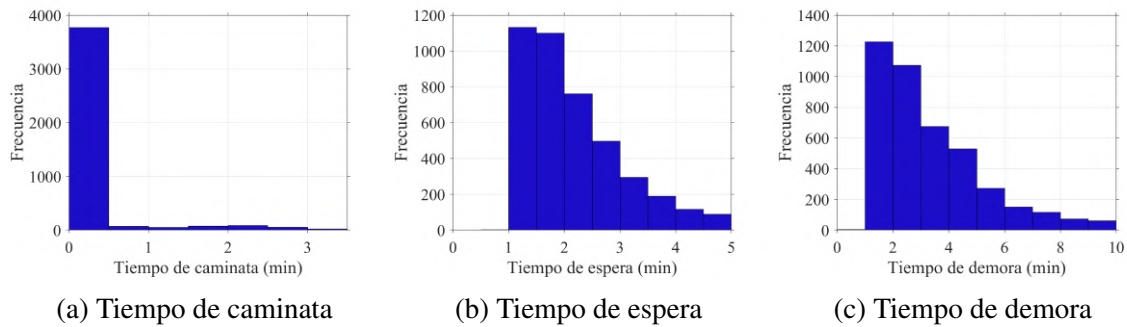


Figura 2: Histogramas del tiempo de caminata, espera y demora de los usuarios en el escenario base.

La Tabla 3 muestra los principales resultados relacionados al usuario, de las simulaciones del escenario base y del escenario en que el servicio es “puerta a puerta”. Cabe destacar que el costo promedio del usuario  $\overline{UC}$  solo considera a usuarios con solicitudes aceptadas, dada la penalización fija del rechazo de solicitudes. Como se puede observar, las métricas no sufren un cambio drástico: el tiempo promedio de espera aumenta un 5,14 % mientras que el tiempo promedio de demora disminuye un 1,22 %, y la tasa de rechazo aumenta 0,16 puntos porcentuales. Sin embargo, el costo promedio del usuario aceptado aumenta un 17,07 %. Esta situación ocurre porque en el escenario base solo un 15,02 % de los usuarios era obligado a caminar, reduciendo su propio tiempo de espera y el del resto de usuarios en promedio, mejorando las condiciones de los usuarios en general.

Tabla 3: Resultados atingentes al usuario de la simulación de los escenarios base y sin caminatas.

Escenario	$\overline{Walk}$ (min)	$\overline{Wait}$ (min)	$\overline{Delay}$ (min)	$\overline{UC}$ (US\$/pax)	Rechazos	Caminatas
Base	0,17	2,14	3,29	0,41	2,36 %	15,02 %
$\Omega_{Walk} = 0$	0,00	2,25	3,25	0,48	2,52 %	0,00 %

La Tabla 4 muestra los principales resultados relacionados al operador, de las simulaciones del



escenario base y del escenario en que el servicio es “puerta a puerta”. El costo de capital se mantiene constante al no modificar la flota, convirtiendo al costo total dependiente únicamente del costo de operación. Según estos resultados, el operador ve empeoradas marginalmente sus condiciones dado que su costo total aumenta en US\$2. Esto ocurre por el aumento en 0,33 % de la utilización promedio de sus vehículos dada una mayor circulación de los mismos en la ciudad, lo que se traduce en una adición de US\$2 en sus costos operacionales. Sin embargo, el costo promedio percibido por el operador no sufre una variación significativa. Considerando además el deterioro de las condiciones de los usuarios del sistema reflejado en su costo promedio, se puede concluir que la entrega de un servicio “puerta a puerta” provoca un deterioro del sistema.

Tabla 4: Resultados atinentes al operador de la simulación de los escenarios base y sin caminatas.

Escenario	$VHT$ (veh-h)	Utilización (min/veh)	$OC$ (US\$)	$OC_o$ (US\$)	$\overline{OC}$ (US\$/h-veh)
Base	322,83	21,52	7.953	420	5,89
$\Omega_{Walk} = 0$	323,87	21,59	7.955	422	5,89

En la Figura 3a se puede observar cada promedio de tiempos de caminata, espera y demoras y su variación al alterar la cantidad de vehículos disponibles en el sistema de *On-Demand Ridepooling*. La tendencia perceptible es una disminución en promedio de cada tiempo antes señalado al añadir vehículos disponibles. El efecto neto es mayor sobre la demora promedio, pues este valor disminuye hasta en 0,71 minutos entre escenarios próximos, y disminuye 2,43 minutos entre el escenario de 100 vehículos y el escenario de 1.300 vehículos disponibles, lo cual equivale a un 46,42 %. Sin embargo, el efecto relativo es mayor sobre el tiempo de caminata promedio, pues aunque el efecto neto sea bajo, en términos porcentuales disminuye hasta en 16,80 % entre escenarios próximos, y disminuye 70,01 % al comparar el escenario de flota de 100 vehículos con el escenario de 1.300 vehículos disponibles.

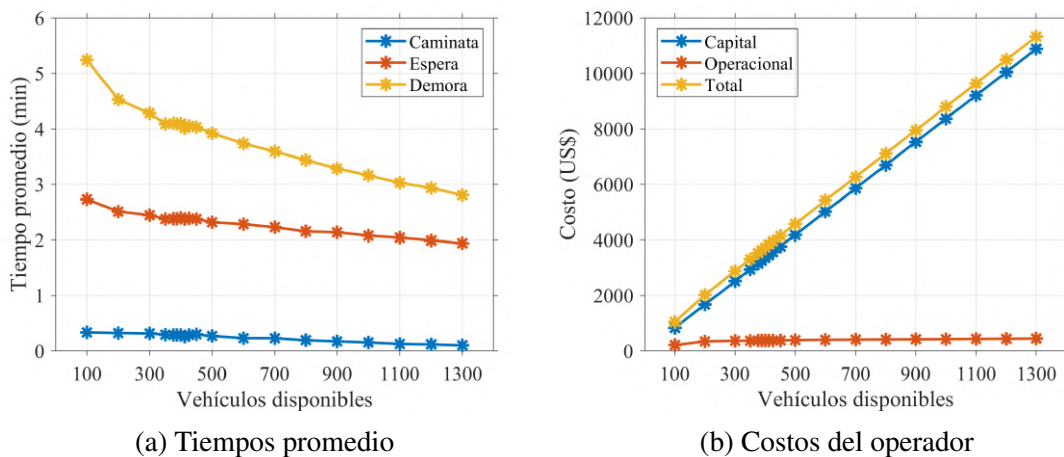


Figura 3: Tiempos promedio de caminata, espera y demora de los usuarios, y costos de capital, operacional y total del operador de los vehículos, frente a distinta flota disponible.

En la Figura 3b se observan los costos de capital, operacional y total del operador de los vehículos, bajo las distintas configuraciones de vehículos disponibles en el sistema. Se puede distinguir con

claridad que, desde una flota operativa de 200 vehículos en adelante, el costo total del operador es proporcional al costo de capital, mientras que el costo operativo se mantiene relativamente constante en términos netos. En efecto, mientras el costo total aumenta hasta en US\$857 al comparar entre los escenarios de 200 y 300 vehículos disponibles, el costo de capital aumenta en US\$837 y el costo operacional aumenta en US\$20. En términos porcentuales, el incremento de costo entre el escenario de 100 vehículos y el escenario de 1.300 vehículos disponibles es de 981 % en el costo total, 1.200 % en el costo de capital y 112 % en el costo operacional.

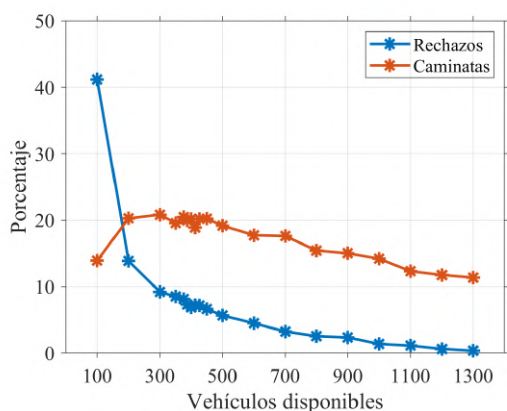


Figura 4: Tasa de rechazo y porcentaje de usuarios que caminan frente a distinta flota.

esta cifra disminuye a un 0,35 %, equivalente a 15 usuarios rechazados.

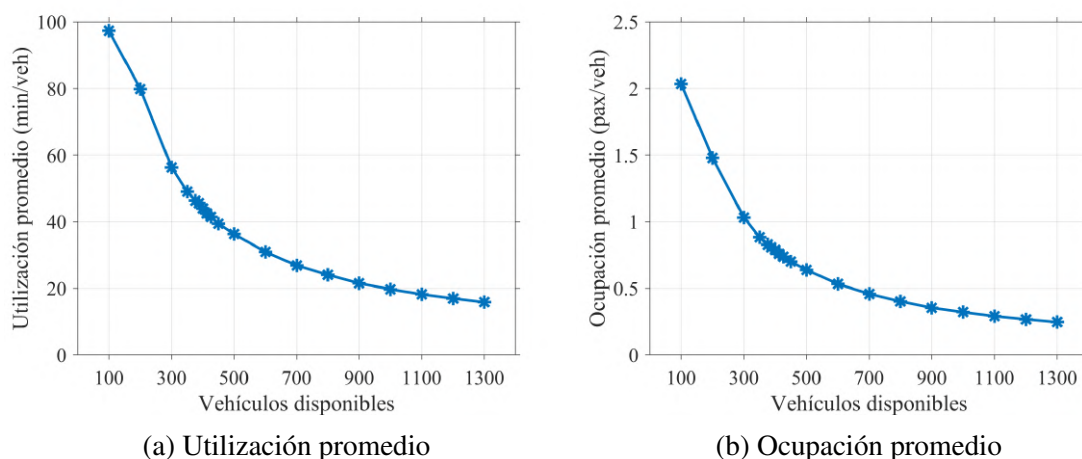
Es importante el número de usuarios rechazados por el sistema, pues ellos no necesariamente migrarán al transporte público mayor: dada la partición modal del 62,3 % de vehículos particulares (SECTRA, 2022), es probable que estos individuos utilicen sus propios automóviles para ejecutar sus viajes, aumentando las externalidades negativas como la congestión o las emisiones de material particulado, afectando al resto de habitantes de la ciudad.

Se puede ver que el número de usuarios rechazados disminuye a medida que aumenta la flota de vehículos disponibles. No obstante, en la realidad de Punta Arenas una flota de 900 taxis colectivos logra suplir toda la demanda. Posibles formas de disminuir la tasa de rechazo modelada son modificando los parámetros iniciales del modelo, modificando el funcionamiento del modelo de asignación mismo o redistribuyendo de forma estratégica los vehículos que se encuentren libres.

La curva de usuarios que caminan posee una pendiente negativa desde una flota de 500 vehículos en adelante, manteniéndose estable con flotas entre los 200 y 500 vehículos. Sin embargo, en el paso de 100 a 200 vehículos disponibles el porcentaje de usuarios que caminan aumenta de un 13,90 % a un 20,28 %, volviendo a acercarse a 14,21 % recién en el escenario de 1.000 vehículos disponibles. La razón de esta extraña situación es la imposibilidad de suplir la demanda de viajes con la oferta de vehículos disponibles bajo los parámetros especificados: con una flota de 100 automóviles la tasa de rechazo alcanza un 41,17 %, disminuyendo a 13,86 % con una flota de 200 vehículos. Por

lo tanto, se infiere que al verse el sistema sobrepasado, le entrega una mejor calidad de servicio a los usuarios que sí puede transportar.

Este sobrepaso se deduce de la Figura 5a, en la que se muestra el nivel de utilización promedio de los vehículos según el número de vehículos disponibles en cada escenario. Recordando que se analiza un periodo de 90 minutos (dando además un espacio de tiempo de 30 minutos para que los vehículos completen los viajes de los usuarios a bordo, si es necesario), bajo una flota de 100 automóviles el nivel de utilización promedio es de 97,29 minutos, lo que indica que en promedio ningún vehículo tuvo periodos de inactividad. Mientras que en el escenario de 1.300 vehículos disponibles los vehículos se utilizaron en promedio 15,85 minutos, lo que significa que estuvieron en movimiento un 17,61 % del tiempo. Estas cifras explican la reducción del incremento del costo operacional, pero si estos vehículos no tienen espacios de estacionamiento distribuidos en la ciudad pueden generar kilómetros en vacío al moverse sin pasajeros, contribuyendo a la congestión y aumentando innecesariamente el gasto operacional.



(a) Utilización promedio

(b) Ocupación promedio

Figura 5: Promedios de utilización y nivel de ocupación de los vehículos, frente a distinta flota.

La Figura 5b muestra el nivel de ocupación promedio de los vehículos según el número de vehículos disponibles en cada escenario. Recordando que la capacidad máxima es de 4 pasajeros por vehículo, se puede apreciar que el nivel de ocupación máximo alcanzado en promedio es de 2 pasajeros, en el escenario de 100 vehículos y en el que el sistema se ve sobrepasado; hasta el escenario de 300 vehículos disponibles el promedio de ocupación es mayor a 1 pasajero. De este nivel de flota en adelante se infiere que un gran número de pasajeros viajan solos en el vehículo, al menos la mayor parte del viaje. Sumado al porcentaje de caminatas decreciente que se observa en la Figura 4, se puede concluir que el sistema tiende a convertirse en un sistema *Ridehailing* con un tamaño de flota muy elevado. Tanto el nivel de ocupación promedio como la utilización promedio presentan curvas decrecientes tendientes a estabilizarse en torno a un valor constante con respecto a la variación del tamaño de flota, y se puede apreciar visualmente una correlación entre ambas variables bajo estos niveles de ocupación y utilización.

En la Figura 6a se presenta el costo promedio percibido por los usuarios cuyas solicitudes fueron aceptadas por el sistema, bajo distintas configuraciones de flota disponible. El costo percibido por

los usuarios presenta una tendencia a la baja con respecto al aumento de flota en el sistema, pasando de US\$0,84 por pasajero en el escenario de 100 vehículos disponibles a US\$0,32 por pasajero en el escenario de 1.300 vehículos. Esto tiene directa relación con la disminución en los promedios de tiempo de caminata, espera y demoras con un aumento de la flota disponible, lo que se traduce en mejores condiciones de servicio para el usuario y un menor costo percibido por éste. No se considera en este análisis a los usuarios cuya solicitud fue rechazada pues, dada la penalización fija, se genera un costo directamente proporcional a la tasa de rechazo.

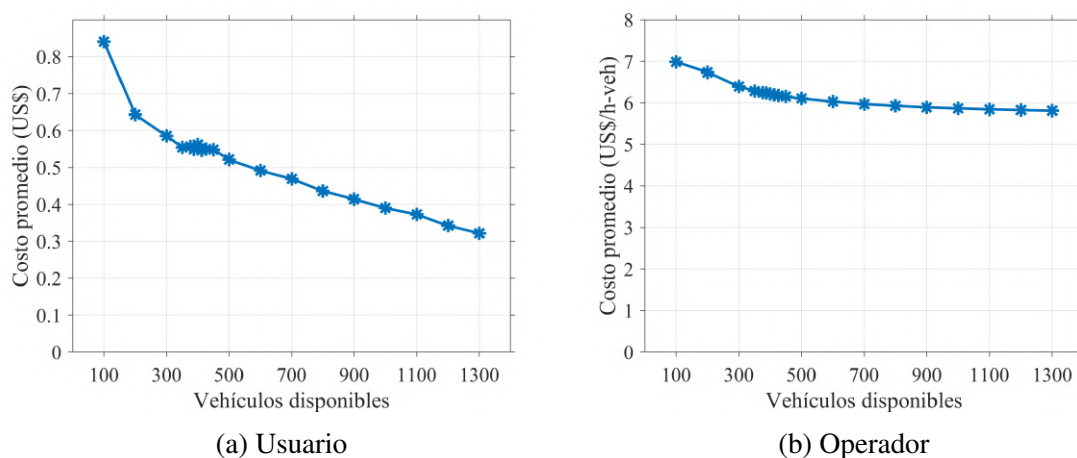


Figura 6: Costos promedio de los usuarios y del operador de los vehículos, frente a distinta flota disponible.

Cabe destacar que, mientras el incremento del costo de capital es lineal y directamente proporcional a la adición de vehículos, el incremento del costo operacional se reduce dada la curva decreciente en la tasa de utilización, observable en la Figura 5a. Esto induce a un efecto cada vez menos significativo del costo operacional, y se puede notar en la Figura 6b, la cual muestra el costo promedio del operador ante los distintos escenarios. En ella se proyecta una estabilización de este costo promedio, demostrando que el efecto del bajo incremento en los costos operacionales tiene cada vez una menor injerencia sobre los costos totales del operador. En otras palabras, el aumento de flota tiene un efecto cada vez menor en el número de vehículos-hora recorridos ( $VHT$ ).

Al analizar los costos de usuarios y del operador, presentes en la Figura 7, se puede deducir claramente que los usuarios prefieren un tamaño de flota grande, mientras que el operador prefiere un tamaño de flota pequeño. Es así que se puede encontrar un tamaño de flota óptimo entre los 300 y 500 vehículos, en donde la curva de costos del sistema se mantiene estable, pero con realidades distintas: en el primer caso los usuarios en su conjunto tienen costos altos y los operadores tienen costos bajos, mientras que en el segundo caso ambos tienen costos similares. Por lo tanto, existe un amplio espacio de decisión de la flota operativa según la variable a la que se desee prestar atención: costo de usuarios, costo de operador, niveles de ocupación o de utilización de vehículos, tasa de rechazo o tasa de usuarios que caminan, entre otras. Esta decisión es importante en el ámbito de políticas públicas, considerando incluso un nivel de subsidio al sistema.

Sin embargo, el costo más bajo del sistema se da bajo una configuración de flota operativa de 400

vehículos. Esta flota equivale al 44 % de la flota operativa actual de taxis colectivos de la ciudad de Punta Arenas, por lo que se concluye que el sistema *On-Demand Ridepooling* bajo los supuestos aplicados tiene potencial de reducir la congestión y otras externalidades negativas por la disminución de vehículos operativos, y generaría recursos disponibles en el sistema de transporte público de la ciudad reflejados en una reducción importante del costo de capital. Estos recursos pueden ser aprovechados para mejorar el sistema y su calidad de servicio, incentivando la atracción de nuevos pasajeros y generando un círculo virtuoso. No obstante, este óptimo provoca que un 6,87 % de los usuarios, número pequeño pero significativo, sea rechazado por el sistema. Esto produce la necesidad de reconducirlos al sistema de transporte público mayor o generar las condiciones para que el sistema les entregue el servicio de igual forma, en donde se incluye una modificación al modelo de asignación a vehículos o al modelo de simulación.

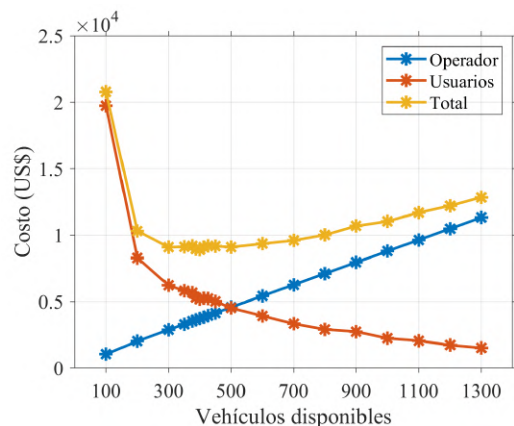


Figura 7: Costos totales del operador, de los usuarios y del sistema, frente a distinta flota.

## 5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha ejecutado una simulación del sistema *On-Demand Ridepooling* bajo el contexto y condiciones de los taxis colectivos de la ciudad de Punta Arenas, utilizando información real de su red vial y elementos de la Encuesta de Movilidad recientemente desarrollada, junto a un procesamiento previo respectivo. Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad al permitir y prohibir caminatas a puntos de recogida o desde puntos de bajada, y modificando el tamaño de la flota operativa disponible.

El análisis de sensibilidad muestra que entre los tiempos promedio de demora, espera y caminata, es este último el que presenta una mayor disminución relativa con respecto al aumento de flota disponible en el sistema. Sin embargo, dado que el tiempo promedio de caminata es pequeño y pocos usuarios efectivamente caminan, la mayor disminución neta es del tiempo promedio de demora. Todo lo anterior conlleva a un mejor nivel de servicio para los usuarios al aumentar el tamaño de la flota operativa, tendiendo a recibir un servicio del estilo *Ridehailing*, reflejado en un menor costo promedio percibido y en una baja ocupación promedio de los vehículos. Es más, bajo un aumento de la flota de taxis colectivos actual es factible servir a toda la demanda en el periodo Punta Mañana, en el que la mayoría de usuarios recibiría un servicio “puerta a puerta”. Mas un incremento de flota podría aumentar la congestión en la ciudad, perjudicando los tiempos de viaje y espera de todos los usuarios y aumentando además el costo operacional si no se disponen de plazas de estacionamiento. Además, los resultados sugieren que un sistema *On-Demand Ridepooling* de 900 vehículos que entrega un servicio “puerta a puerta” podría ser más deficiente frente a un sistema que obliga a algunos usuarios a caminar a puntos de recogida o desde puntos de bajada. Estos *trade-off* son relevantes en materia de políticas públicas.

Relacionado al operador de la flota, se presentan costos operativos relativamente constantes frente a la variación del número de vehículos disponibles, explicado por una curva decreciente del tiempo promedio de utilización de los vehículos. Sin embargo, el costo total percibido por el operador depende principalmente del costo de capital, traduciéndose en una tendencia a la estabilización del costo promedio por vehículo. Por lo tanto, para el operador es más conveniente operar con el menor tamaño de flota posible, maximizando su utilización.

Dados los intereses opuestos entre los usuarios y el operador, se alcanza un punto óptimo que minimiza los costos del sistema bajo una flota de 400 vehículos, lo cual equivale al 44 % de la flota operativa actual de taxis colectivos de la ciudad, siendo capaz de transportar a más del 93 % de la demanda. La aplicación del sistema permitiría disminuir la congestión y otras externalidades producidas por los vehículos que dejarían de circular, y se podrían liberar recursos actuales, que pueden ser utilizados en distintas políticas públicas en favor de los ciudadanos.

Dentro de las posibles líneas de investigación futuras relacionadas con esta temática, se incluye la integración a la simulación del modelo *On-Demand Ridepooling* de los buses urbanos de la ciudad de Punta Arenas como servicios de ruta fija, de manera que sea posible analizar la interacción entre los servicios de ruta fija y ruta flexible. También es posible un análisis de la optimización de rutas del transporte público mayor, sirviendo las zonas con mayor demanda y relegando las zonas no servidas al transporte de ruta flexible, con el potencial de optimizar los costos y entregar una mejor calidad de servicio. Todo esto para buscar una manera de lidiar de la mejor manera con los *trade-off* anteriormente mencionados.

Además, se propone utilizar distintas fuentes de datos para ejecutar la simulación del modelo *On-Demand Ridepooling*, aumentar el límite de tiempos máximos  $\Omega_i$  y variar el costo del rechazo  $\psi$ , comparando resultados obtenidos, además de detectar flota y capacidad óptimas en cada caso. Asimismo, la adaptación del modelo con el contexto y condiciones de otras ciudades permitirá generalizar conclusiones respecto al sistema, junto a la posibilidad de una implementación piloto real en una ciudad de tamaño medio.

## REFERENCIAS

- Bar-Yosef, A., Martens, K., y Benenson, I. (2013). A model of the vicious cycle of a bus line. **Transportation Research Part B: Methodological**, 54, 37-50. doi: 10.1016/j.trb.2013.03.010
- Choi, Y., Guhathakurta, S., y Pande, A. (2022). An empirical Bayes approach to quantifying the impact of transportation network companies (TNCs) operations on travel demand. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 161, 269-283. doi: 10.1016/j.tra.2022.04.008
- Diao, M., Kong, H., y Zhao, J. (2021). Impacts of transportation network companies on urban mobility. **Nature Sustainability**, 4, 494-500. doi: 10.1038/s41893-020-00678-z



- Domarchi, C. (2017). **Modelos de comportamiento de usuarios de taxi colectivo en Santiago** (Tesis de Master, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile). doi: 10.7764/tesisUC/ING/21879
- Fielbaum, A., Bai, X., y Alonso-Mora, J. (2021). On-demand ridesharing with optimized pick-up and drop-off walking locations. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 126, 103061. doi: 10.1016/j.trc.2021.103061
- Fielbaum, A., Tirachini, A., y Alonso-Mora, J. (2022). **Pareto-improvement of public transport via line-based integration of on-demand ridepooling**. [No publicado].
- Henao, A., y Marshall, W. (2019). The impact of ride-hailing on vehicle miles traveled. **Transportation**, 46, 2173-2194. doi: 10.1007/s11116-018-9923-2
- Santana, A., Butorovic, N., y Olave, C. (2009). Variación de la temperatura en Punta Arenas (Chile) en los últimos 120 años. **Anales del Instituto de la Patagonia**, 37, 85 - 96. doi: 10.4067/S0718-686X2009000100008
- Santi, P., Resta, G., Szell, M., Sobolevsky, S., Strogatz, S., y Ratti, C. (2014). Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 111, 13290-13294. doi: 10.1073/pnas.1403657111
- SECTRA. (2020). **Actualización Plan de Transporte Urbano Punta Arenas, Etapa I**. Secretaría de Planificación de Transporte. Realizado por Trasa Ingeniería.
- SECTRA. (2022). **Actualización Plan de Transporte Urbano Punta Arenas, Etapa II**. [No publicado]. Secretaría de Planificación de Transporte. Realizado por CityPlanning.
- Shi, K., Shao, R., De Vos, J., Cheng, L., y Witlox, F. (2021). The influence of ride-hailing on travel frequency and mode choice. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 101, 103125. doi: 10.1016/j.trd.2021.103125
- Tirachini, A., y Antoniou, C. (2020). The economics of automated public transport: Effects on operator cost, travel time, fare and subsidy. **Economics of Transportation**, 21, 100151. doi: 10.1016/j.ecotra.2019.100151
- Tirachini, A., y Gómez-Lobo, A. (2020). Does ride-hailing increase or decrease vehicle kilometers traveled (VKT)? A simulation approach for Santiago de Chile. **International Journal of Sustainable Transportation**, 14, 187-204. doi: 10.1080/15568318.2018.1539146
- Wu, X., y MacKenzie, D. (2021). Assessing the VMT effect of ridesourcing services in the US. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 94, 102816. doi: 10.1016/j.trd.2021.102816