

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – CHILE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Estudio general sobre el uso y relocalización de vehículos
compartidos urbanos. Una aplicación para el caso de la
ciudad de Concepción**

por

Claudio Rojas González

Profesor guía:

Dra. Lorena Pradenas Rojas

Concepción, enero 2021

Tesis presentada a la

**DIRECCIÓN DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**



Para optar al grado de
MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento





Dedicado a mi familia y amigos

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN	1
1.1 Hipótesis de investigación	3
1.2 Objetivo general	4
1.3 Objetivos específicos	4
1.4 Estructura del informe	5
CAPÍTULO 2 – DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y ESTADO DEL ARTE	6
2.1 Movilidad compartida	7
2.2 Impacto potencial de la adopción masiva de transporte compartido	11
2.3 Transporte compartido en el Gran Concepción	13
2.4 Sistema de Bicicletas compartidas	14
2.5 Relocalización en sistema de Bicicletas Compartidas Flotantes	21
CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA	24
3.1 Estudio de la demanda de transporte urbano en la ciudad de Concepción	24
3.1.1 Análisis de la Base de Datos	24
3.1.2 Definición de set de datos de demanda	25
3.2 Aproximación a un modelo de matemático para resolver el problema de redistribución de BCFs en la ciudad de Concepción	27
3.2.1 Formulación del modelo matemático	27
3.2.2 Definición de instancias de prueba	30
3.3 Propuesta de integración del modelo de relocalización con un modelo de recompensa al usuario	31
3.3.1 Definición de métrica para la evaluación del equilibrio en sistemas BCFs	31
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	36
4.1 Levantamiento de información sobre demanda de transporte urbano en el Gran Concepción	36
4.2 Análisis de demanda de viajes en la ciudad de Concepción	37
4.3 Generación y caracterización de sets de datos e instancias de prueba	43
4.4 Evaluación de la idoneidad de las estaciones sugeridas por la implementación del modelo matemático y el desempeño de este	45
4.5 Integración de la participación del usuario al modelo propuesto	53
4.5.1 Orientación de propuesta de integración	53
4.5.2 Propuesta de integración	55
CAPÍTULO 5 - DISCUSIÓN	61
CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES	65
GLOSARIO	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXOS	73

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: Comparación de estrategias utilizadas para resolver el BRP..... **19-20**

TABLA 2: Comportamiento del modelo matemático propuesto..... **53**



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Tipos de Sistemas de Movilidad Compartida disponibles.	9
Figura 2. Sistema de bicicletas compartidas flotantes Mobike.....	16
Figura 3. Proyección temporal de la demanda de viajes para la ciudad de Concepción.	38
Figura 4. Proyección espacial de la demanda de viajes para la comuna de Concepción.	41
Figura 5. Demanda de viajes en el sector céntrico de la ciudad de Concepción	42
Figura 6. Zona de alta demanda de viajes en el sector céntrico de la ciudad de Concepción	43
Figura 7. Geolocalización de demanda de viajes que tributa sobre la ciudad de Concepción	44
Figura 8. Geolocalización de demanda de viajes que ocurren a las 18:00 horas en la ciudad de Concepción	45
Figura 9. Demanda cubierta por el conjunto de estaciones candidatas, propuesta en base a caracterización de demanda inicial	48
Figura 10. Demanda cubierta por 10 estaciones, propuestas por la metaheurística y el modelo de programación matemático implementado.....	49
Figura 11. Demanda cubierta por 20 estaciones, propuestas por la metaheurística y el modelo de programación matemático implementado.....	50
Figura 12. Demanda cubierta por 30 estaciones, propuestas por la metaheurística y el modelo de programación matemático implementado.....	51
Figura 13. Desempeño del modelo matemático utilizado para minimizar la función objetivo.....	52
Figura 14. Pseudocódigo propuesto para integrar participación de usuario.	60

RESUMEN

Estudio general sobre el uso y relocalización de vehículos compartidos urbanos. Una aplicación para el caso de la ciudad de Concepción

Claudio Rojas González
Enero 2020

Profesor Guía: Dra. Lorena Pradenas Rojas
Programa: Magister en Ingeniería Industrial



Palabras claves: Bicicletas Compartidas Flotantes, Sistemas de Movilidad Compartida, Estudio de Movilidad en concepción

El objetivo de este estudio es proponer un modelo de programación matemática que permita proyectar la relocalización de estaciones de bicicletas compartidas para la ciudad de Concepción y responder de manera oportuna a la potencial demanda prevista para la ciudad. El modelo fue resuelto con una metaheurística implementada en lenguaje de programación Python y su funcionalidad fue validada mediante instancias construidas a partir de datos reales de demanda de viajes, solicitados sobre el área urbana de Concepción. De este modo, el modelo permite resolver, en tiempos computacionales menores a 4 minutos, el problema de relocalización para todas las instancias ensayadas, proyectando además aumentos sustanciales en la cobertura de demanda.

ABSTRACT

General study of the use and relocation of urban shared vehicles. An application for the city of Concepción

Claudio Rojas González
January 2020

Tutor: Dra. Lorena Pradenas Rojas
Program: Master in Industrial Engineering

Key words: Floating Shared Bicycles; Shared Mobility Systems; Concepción Mobility Study

This study aims to develop a mathematical programming model that allows to project the relocation of shared bicycle stations for the city of Concepción and to respond in a timely manner to the potential demand forecasted for the city. The model was solved with a metaheuristic implemented in Python programming language and its functionality was validated through instances built from real data of travel demand, requested on the urban area of Concepción. In this way, the model allows to solve, in computational times of less than 4 minutes, the problem of relocation for all the instances tested, also projecting substantial increases in demand coverage.



CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

La actual sobrepoblación del parque automotriz genera más de un quinto de la polución atmosférica mundial, por lo que el último tiempo se han establecido en el mundo diversas políticas ambientales destinadas a favorecer la ocupación e instauración de sistemas de transporte sustentables, que permitan aminorar este problema. Lo anterior, involucra el uso de vehículos compartidos como automóviles, bicicletas y scooters que, al incorporar tecnologías inalámbricas y de geoposicionamiento, permiten a los usuarios recogerlos en puntos estratégicos de la ciudad para movilizarse dentro de ella y pagar solo el tramo utilizado. Si bien, esto reporta un importante beneficio a la congestión vial de las ciudades, actualmente el reposicionamiento de los vehículos flotantes es un problema para las agencias operadoras que los administran, ya que, al tener la capacidad de ser estacionados en cualquier sitio, los vehículos tienden a dispersarse por la ciudad en patrones que no coinciden necesariamente con los sitios de alta demanda, donde son más requeridos. Con esto, se dificulta la recolección y relocalización de los vehículos hacia estas zonas de alta demanda, implicando finalmente que la empresa deba costear la operación de camiones de carga para efectuar el reposicionamiento de los vehículos hacia estas zonas de alta demanda. En este sentido, se hace imprescindible para las empresas

operadoras mejorar el mecanismo de planificación de la relocalización de vehículos flotantes compartidos, ya que al no ser un sistema que logre sustentarse tan solo con el flujo de clientes suscritos al servicio (Schaller, 2017), debe disminuir al máximo los costos operacionales asociados al reposicionamiento de los vehículos, para asegurar que estos estén disponibles para nuevos clientes y asegurar su fidelidad ante el servicio.

La relevancia de esta investigación, por lo tanto, radica en obtener una visión certera e informada de los mecanismos involucrados en el diseño de una red de estaciones virtuales para Bicicletas Compartidas Flotantes (BCFs), así como también, la factibilidad de que estos sistemas puedan ser implementados de forma eficiente y sustentable en la ciudad de Concepción. Del mismo modo, se espera que el desarrollo de este trabajo permita generar una primera aproximación a la evaluación de la demanda de viajes compartidos dentro de la ciudad y que la información generada resulte relevante para los encargados de decidir la planificación e implementación eficiente de estos servicios y eventualmente, en la masificación del uso de BCFs debido al aumento en la disponibilidad de vehículos que son relocalizados con la metodología propuesta.

1.1 Hipótesis de investigación

Considerando el actual avance de tecnologías digitales y de interconectividad, la masiva adopción de tecnologías relacionadas con la movilidad compartida urbana y la necesidad de contar con un sistema de transporte comunitario sustentable en la ciudad de Concepción, se plantea la siguiente hipótesis de investigación en este estudio:

Un modelo de optimización para un sistema de movilidad compartida proyectado para la ciudad de Concepción, permitiría mejorar la disponibilidad del servicio al relocalizar de forma eficiente los vehículos a puntos de alta demanda de transporte



1.2 Objetivo general

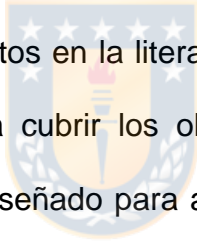
Proponer y resolver un modelo de optimización que permita proyectar la localización eficiente de estaciones de recogida de bicicletas compartidas flotantes para la ciudad de Concepción y así, responder de manera oportuna a la demanda determinada para un intervalo de tiempo específico.

1.3 Objetivos específicos

1. Determinar la situación basal de la demanda de viajes para la ciudad de Concepción y la factibilidad de suplir parte de esta con un sistema de Bicicletas Compartidas Flotantes.
2. Proponer un modelo de optimización que permita resolver de forma eficiente la localización de estaciones de recogida de bicicletas flotantes en de la ciudad de Concepción
3. Generar instancias de prueba que permitan probar el modelo de optimización con datos de demanda reales.
4. Proyectar en la ciudad de Concepción la ubicación de estaciones virtuales de bicicletas compartidas flotantes entregadas por el modelo.
5. Proponer una integración entre los resultados alcanzados y un potencial mecanismo de recompensa al usuario que promueva la relocalización de los vehículos compartidos.
6. Analizar la información de salida, concluir y recomendar

1.4 Estructura del informe

El presente trabajo está compuesto por 6 capítulos. El Capítulo 1 proporciona una breve introducción y se presentan los objetivos del estudio. El Capítulo 2 presenta una contextualización del problema del reposicionamiento de bicicletas flotantes compartidas. Además, se presenta el marco teórico con los principales aspectos asociados con la temática. En particular, con los relacionados a estrategias para: resolver el problema de reposición de bicicletas compartidas, ruteo eficiente requerido para reposicionar los vehículos ante una demanda insatisfecha y finalmente, una revisión de los modelos de equilibrio para estaciones virtuales propuestos en la literatura. En el Capítulo 3 se presenta la metodología planteada para cubrir los objetivos del proyecto, el modelo de programación matemática diseñado para abordar el problema y una propuesta que integra el modelo con mecanismos que permiten sustentar el servicio en el tiempo. En el Capítulo 4 se presentan los principales resultados obtenidos y en el Capítulo 5, el análisis de los mismos. Finalmente, el Capítulo 6 presenta las conclusiones obtenidas de esta investigación y proyecciones de futuros estudios.



CAPÍTULO 2 – DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y ESTADO DEL ARTE

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de la ONU indicó, en su último reporte, que de no presentarse cambios urgentes y de gran escala por parte de gobiernos e individuos en materia de sustentabilidad climática, el planeta arriesgaría su habitabilidad al año 2030, resultando en una catástrofe global (*BBC News*, 2018). Si consideramos que vehículos personales y camiones de carga son responsables de casi un quinto de la polución de Gases Invernadero mundial (Nejat et al., 2015), no cabe duda que las medidas tomadas a favor del descongestionamiento vehicular resultan imprescindibles para cumplir con tal objetivo.

Según Ignacio Alcalde, experto en *Smart Cities* y territorios inteligentes, el motor que impulsa la sociedad es la innovación tecnológica y el escenario, donde se verá reflejada aquella innovación es la ciudad. Esto resulta clave en el diseño de entornos urbanos sustentables, ya que todo parece indicar que las tendencias en transporte y conciencia climática empujarán en los próximos años a que la movilidad urbana sea eléctrica, autónoma, compartida y conectada (Alcalde, 2018). En este sentido, los esquemas de movilización compartida se destacan por reducir significativamente el consumo energético y la eficiencia del sistema

en términos de costos y tiempo de viaje, siempre que, se relacionen e integren al contexto urbano particular del territorio donde se insertan (Becker et al., 2019).

Para el caso de la ciudad de Concepción, donde la cantidad de vehículos en circulación superaba los 565.000 automóviles al año 2018, resulta imprescindible disponer de estrategias de distribución vial orientadas a descongestionar el centro urbano, especialmente aquellas que contemplan la integración de vehículos compartidos livianos con el transporte público, ya que permiten a los usuarios alcanzar rápidamente puntos de interés dentro de la ciudad, así como también disminuir el uso de automóviles, el gasto asociado al transporte y la contaminación ambiental. En este sentido, es relevante conocer los distintos enfoques dispuestos por los sistemas de movilidad compartida que se han implementado alrededor del mundo, siendo esta una oportunidad para determinar el o los modelos que mejor se adapten a la realidad de la comuna y los recursos disponibles. En las siguientes secciones del presente capítulo, se proporciona el contexto histórico y teórico de los sistemas de movilidad compartida y las principales metodologías propuestas en la literatura para resolver el problema de relocalización eficiente de vehículos en las estaciones de recogida.

2.1 Movilidad compartida

En términos generales, se define la movilidad compartida como todo servicio y recurso de transporte que se comparte entre los usuarios, ya sea de forma simultánea o uno, tras otros (Shared-Use Mobility Center, 2019). Lo anterior, ha sido cubierto en la literatura no solo en el transporte de personas sino que también, en el transporte de recursos en vehículos compartidos (Figura 1) y con el fin de compartir los costos de transporte, aumentar la disponibilidad de vehículos y generar, por consiguiente, un aumento en la calidad del servicio.

Entre los vehículos más utilizados para abastecer los servicios de movilidad compartida, encontramos: automóviles de uso personal y compartido (automóviles/van/minivan para transporte de personas y/o bienes), Scooters y Bicicletas. Todos estos vehículos están acondicionados para un alto tráfico de pasajeros e incorporan mecanismos de seguridad como el cobro inteligente, bloqueo de equipos tras servicio, geolocalización, entre otros (S. Shaheen et al., 2015)

Los vehículos de movilidad compartida permiten al usuario acceder en el corto plazo a una amplia gama de modos de transporte, adaptándose a sus requerimientos puntuales y durante el tiempo que sea necesario, todo esto con la finalidad de complementar rutas de viaje en sincronía con el transporte público y a su vez disminuir: el número de vehículos personales en circulación, la congestión vehicular y la polución que estos emiten. Así, los servicios de

movilidad compartida se han prospectado como una importante alternativa para solucionar la grave situación ambiental que enfrentamos y se espera, en el mediano plazo, que estos se conviertan en el eslabón que articule los planes de descongestión vehicular urbana en las principales ciudades del mundo.

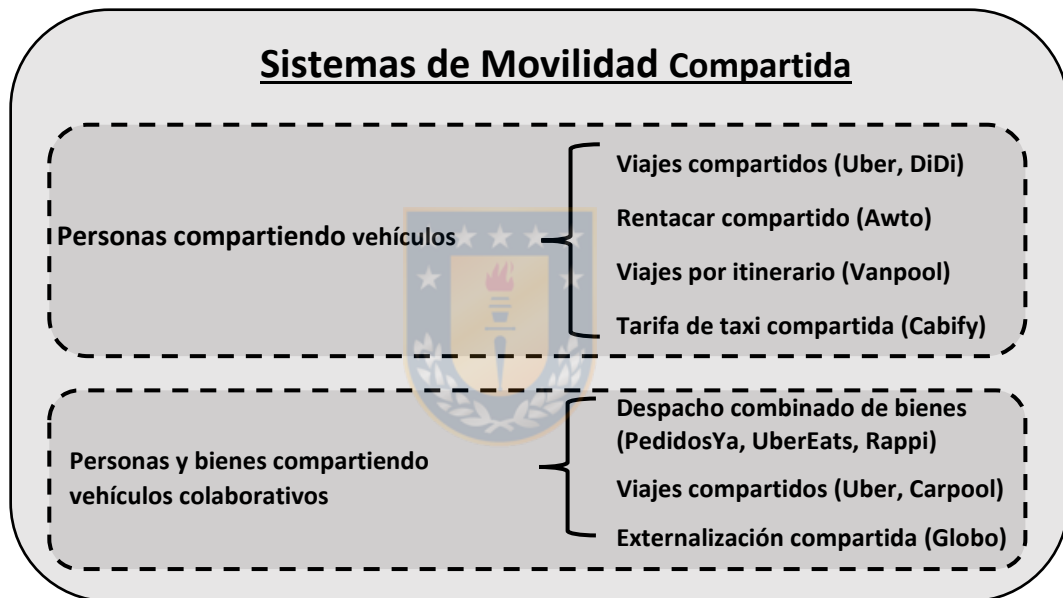


Figura 1. Tipos de Sistemas de Movilidad Compartida disponibles. Fuente: elaboración propia, adaptado desde Shaheen et al. (2015)

El concepto de transporte compartido, no es reciente, sino que inicia en el año 1965 en Ámsterdam, como parte de un proyecto social impulsado por el activista holandés Luud Schimmelpennink, en conjunto con el movimiento contracultural *Provo*, denominado “el plan de las bicicletas blancas”. En esta iniciativa se repartieron 50 bicicletas pintadas de blanco por todo Ámsterdam para

que cualquiera pudiese utilizarlas sin cargo, con el objetivo de incentivar el uso compartido de este medio de transporte, sin embargo, muchas de esas bicicletas fueron sustraídas rápidamente o sufrieron daños, por lo que se hizo imposible sostener el proyecto. En la década del 90' varias ciudades danesas comenzaron a implementar sistemas más formales de movilidad compartida, basados en el modelo de Schimmelpennink, pero incorporando estaciones de recogida designadas y parquímetros de monedas para retirar las bicicletas. Este tipo de iniciativas, junto al activismo ciudadano y la promulgación de políticas públicas pro-ciclismo, contribuyó en gran medida a la explosiva masificación del uso de bicicletas en Dinamarca. Incluso, desplazando el predominio del automóvil como principal medio de transporte. Así es como el famoso programa Bycyklen ("City Bike") lanzado en 1995 en Copenhague, que ha sido objeto de inspiración para muchas ciudades debido a su modelo de gestión logística, dejó tras su cierre -a fines de 2012- un 36% de ocupación de este medio de transporte en esta ciudad. Paulatinamente, estos sistemas compartidos comienzan a transformarse en sistemas de suscripción de usuarios, administrados por agentes operadores que resguardan la integridad de las bicicletas y su uso en un área determinada de la ciudad. De este modo, se comienzan a aplicar multas a aquellos usuarios que infringen las normas de uso.

La masificación de estos servicios a gran escala, sin embargo, fue establecida en Francia por la compañía Vélib' en el año 2007, quienes instalaron en la ciudad de París cerca de 750 estaciones con más de 10.000 bicicletas de

uso compartido, duplicando rápidamente su tamaño para fines de 2012 mediante un contrato a 10 años con la empresa de publicidad JCDecaux, que permitió aumentar en un 41% el número de ciclistas en las calles. Este hito fue posible gracias a la masificación de tecnologías de la información y conectividad, que permitieron el cobro y monitoreo automático del servicio.

Desde diciembre de 2011, Vélib 'se ha complementado con Autolib', un esquema de uso compartido de automóviles eléctricos que funciona con principios similares y que ha permitido, descongestionar en gran medida el tráfico en el centro de la capital francesa. Este modelo interconectado se ha replicado en varios países del mundo, incluso destinando un sistema de pago centralizado para poder utilizar libremente los distintos medios de transporte. Esta migración del modelo de movilidad compartida hacia los vehículos motorizados se ha visto reflejada en las tendencias de mercado, donde el negocio de los automóviles compartidos espera un crecimiento de usuarios del 20% al 2024, con retornos estimados por sobre los US\$ 1.500 millones, siendo las principales compañías que capturan el mercado Autolib', Car2Go, Cambio, Cityhop, Communauto Inc, Carshare, Zipcar, entre otras (*Car Sharing Market* - GMI, 2018).

A contar del año 2017, y con la llegada de nuevas tecnologías de interconectividad, se han dispuesto en las principales ciudades del mundo Scooters eléctricos (e-Scooters) operados por compañías como: Lime, Uber, Grin, Lyft y Bird. Estos vehículos ofrecen una solución intermedia a los usuarios

que recorren distancias cortas para interconectar los distintos modos de transporte, por lo que han adquirido una importante expansión internacional, reportando millones de viajes diariamente. Para el 2030, el mercado global de e-scooters espera alcanzar entre los USD\$300 mil a USD\$500 mil millones, según la consultora CB insight (CB Insights, 2019)

2.2 Impacto potencial de la adopción masiva de transporte compartido

Según el reciente informe desarrollado por el Instituto de Políticas de Transporte y Desarrollo en materias de transporte urbano (Fulton et al., 2017), una sinergia entre las 3 principales revoluciones tecnológicas del transporte: Electrificación vehicular, automatización y movilidad compartida generalizada, podría cambiar radicalmente el transporte urbano global, permitiendo reducir por sobre un 80% las emisiones de CO₂, en el caso de que las principales ciudades del mundo adoptasen las medidas propuestas. Asimismo, el informe señala que los costos globales de transporte de vehículos urbanos al año 2050 podrían verse reducidos en un 40%, si se adoptan simultáneamente estas tres tecnologías, siendo el uso compartido de vehículos y las fuentes de energía renovables fundamentales para su éxito.

Si la mayoría de la población escogiera los servicios de viaje compartido para acudir a sus destinos en vez de conducir o alquilar un automóvil para uso personal, el número de vehículos en circulación se reduciría dramáticamente. Así

lo confirmó el foro Internacional de Transporte de la OECD mediante una simulación efectuada en Lisboa, en la cual se determinó que dicha ciudad podría satisfacer la demanda de viajes diarios con solo el 10% de los vehículos actualmente en uso, considerando transportes combinados de entre 8 a 16 pasajeros (OECD - International Transport Forum, 2015). Estas simulaciones, sin embargo, se establecen bajo los supuestos de que la población que se traslada es medianamente adaptable, que dejaría de conducir sus vehículos propios y que estaría dispuesta a compartir sus viajes con extraños en favor de disminuir la congestión vehicular y abaratar costos de transporte. El problema, según los expertos, no se solucionaría tan solo con la provisión y adecuación de sistemas de transporte de alquiler y/o públicos, sino que supone una verdadera adopción de viajes compartidos por parte de la población, que necesariamente debe estar asociado sinérgicamente a un potente sistema de transporte público, o de lo contrario, la demanda haría que el sistema derive finalmente en: un aumento del tráfico, congestión vehicular, un mayor uso de energía y un aumento en la polución (Schaller, 2017).

2.3 Transporte compartido en el Gran Concepción

En los últimos años, la ciudad de Concepción ubicada en la Región del Bio-Bío ha visto desarrollada su inclusividad vial bajo el alero de la Política Nacional de Desarrollo Urbano, promovida el año 2014 por el Ministerio de

Vivienda y Urbanismo de Chile. En este contexto, se renovaron y modernizaron ciclovías que interconectan arterias viales claves de la capital penquista y comunas aledañas, así como también se modificaron los límites de velocidad de zonas urbanas a un máximo de 30 km/h, con el fin de favorecer la coexistencia vial entre vehículos y bicicletas y de contribuir a la descongestión del tráfico vehicular en los sectores céntricos de la ciudad. A esto se suma la llegada de proveedores de servicios de movilidad compartida del tipo e-scooter (FrogChile) y automóviles (Awto), quienes poco a poco van sumando clientes que prefieren estos servicios de micro-movilidad.

Actualmente, la red de ciclovías del Gran Concepción alcanza los 80 kilómetros y se propone a llegar a 252 kilómetros construidos al 2030 (Diario Concepción, 2019). En estas vías coexisten bicicletas convencionales, eléctricas y e-scooter, integrándose estos últimos a mediados del 2019 como el primer sistema de transporte compartido instaurado en la comuna. Según reportes de la Seremi de Transportes de Concepción, la municipalidad estaría abierta a la entrada de bicicletas de uso compartido del tipo flotante, por lo que estaría preparando un estudio de factibilidad que concluirá con una licitación del servicio a mediados del 2020. Si consideramos que los tramos de interconexión que existen entre los servicios de transporte públicos como el Biotrén, taxis colectivos, la red de microbuses del gran Concepción, las universidades y el casco metropolitano no superan en promedio los 3 km de distancia entre puntos, resulta factible que un

sistema de transporte compartido presente alta demanda y permita incentivar el uso del transporte público por sobre automóviles particulares.

2.4 Sistema de Bicicletas compartidas

Según datos recopilados en tiempo real por el Bike Sharing World Map (O'brien, 2020), actualmente en el mundo existen más de 481.500 bicicletas operativas de uso comunitario distribuidas en 486 ciudades. Entre estas, podemos destacar aquellas ciudades que ostentan el mayor porcentaje de ocupación de este medio de transporte, como son: Copenhague, Amsterdam, Utrecht, Bordeaux, Paris, Tokyo, Bristol, Nuremberg, Barcelona, Buenos Aires, Ciudad de México, Hangzhou, entre las más representativas. Estas son administradas tanto por operadores públicos como privados, reportando en conjunto más de 800.000 viajes diarios. En Chile, sin embargo, este sistema compartido de movilización se ha establecido a la fecha solo en Santiago, bajo un número acotado de operadores, entre los que encontramos Bike Santiago (Tembici), Mobike Chile y Bici Las Condes, concentrándose la distribución de vehículos principalmente en el sector oriente de la capital (Figura 2).



Figura 2. Sistema de bicicletas compartidas flotantes Mobike. Fuente: Mobike.com

El último reporte de Global Market Insights, Inc. proyecta que la flota mundial de bicicletas compartidas espere un crecimiento del 8% entre 2019 a 2025, con retornos cercanos a los US\$ 10.000 millones, siendo los principales actores del mercado Ofo, Velib', Lime, Mobike, Neutron Holdings Inc., Youon Bikes, Tembici, Capital Bikeshare, Divvy Bikes, Ford GoBike y Nextbik (*Bike Sharing Market - GMI, 2019*). Debido a lo anterior, se considera que el crecimiento y expansión de la bicicleta como sistemas de transporte para distancias intermedias se verá potenciado en los próximos años por: el aumento en los costos de combustibles; el limitado número de plazas de estacionamiento y su alto costo; mejoras tecnológicas relativas a conectividad inalámbrica (acceso a red 5G); cambios en infraestructura vial; entre otros factores clave (INVERS, 2018; S. A. Shaheen & Cohen, 2007).

En el último tiempo, un nuevo e innovador sistema de manejo de bicicletas compartidas ha revolucionado la movilidad de los usuarios y la accesibilidad de estos al servicio. Se trata de las Bicicletas Compartidas Flotantes (BCFs), las que apoyadas por el creciente desarrollo de tecnologías móviles y de sensorización, prescinden de estaciones fijas de estacionamiento y recogida (Caggiani et al., 2018). Esto evita que el modelo sea afectado por el colapso de estaciones de entrega, principal problema que afecta al modelo tradicional, pues obliga a los operadores a invertir fuertemente en operativos de reacomodamiento manual de vehículos que saturan dichas estaciones, aumentando de forma directa los costos operacionales del servicio (Raviv et al., 2013). Este problema es reconocido en literatura como el *Pickup and Delivery Problem* (PDP), o específicamente *Bike Repositioning Problem* (BRP), y puede ser modelado desde una estrategia dinámica o estática (Chemla et al., 2013).

El escenario estático es el que mayor cantidad de reportes acumula en la literatura (Chemla et al., 2013; Raviv et al., 2013). La estrategia de éste radica en evaluar el estado del sistema durante la noche, cuando el sistema está detenido o la demanda es muy baja y se basa, principalmente en el conteo de las bicicletas disponibles en cada zona. Luego, utiliza este estado como línea base para definir posteriormente el plan de redistribución. Algunas de las estrategias metodológicas utilizadas para determinar este escenario contemplan el empleo de algoritmos basados en *Tabu Search* iterativo (Ho & Szeto, 2014), *Branch and Bound* (Kadri et al., 2016), la metaheurística *Chemical Reaction Optimization*

(Szeto et al., 2016), búsquedas híbridas en vecindarios grandes (Ho & Szeto, 2017), entre otros.

En el escenario dinámico de relocalización, el estatus del sistema cambia constantemente a medida que el servicio es utilizado, por lo que su análisis requiere de la adquisición y procesamiento de datos en tiempo real, apoyado por técnicas predictivas. Dentro de las aproximaciones utilizadas para resolver este tipo de escenarios podemos distinguir el empleo de simulaciones dinámicas en el espacio-tiempo que permiten determinar los patrones de distribución (Caggiani & Ottomanelli, 2013); propuestas más proactivas donde la redistribución ocurre antes de que suceda alguna ineficiencia (Regue, 2014); uso de algoritmo de colonia de abejas para disminuir al mismo tiempo la demanda insatisfecha y el costo ecológico de reubicación de las bicicletas (Shui & Szeto, 2018); e incluso, la propuesta de políticas de incentivos “en línea” a los clientes, para motivarlos a devolver las bicicletas en sitios de alta demanda (Pfrommer et al., 2014; Singla et al., 2015),

Un resumen comparativo entre las distintas estrategias antes mencionadas se observa en Tabla 1.

Tabla 1: Comparación de estrategias utilizadas para resolver el BRP. Fuente: elaboración propia.

Referencia	Método	Función Objetivo	Ventajas	Limitaciones
Ho y Szeto (2014)	Algoritmo Tabu Search – Enfoque estático	Minimizar penalizaciones asociadas a ocupación de estaciones	Entrega un conjunto de soluciones de buena calidad en tiempos computacionales menores a 0,5 segundos. El algoritmo, posee una estructura iterativa con varios mecanismos de intensificación/diversificación para llegar a una muy buena solución en no más de 5 iteraciones.	La heurística se comporta bien en planificaciones a corto plazo, sin embargo, requiere de mayor tiempo de ejecución para horizontes a largo plazo o cuando el número de vehículos aumenta.
Kadri et al. (2016)	Algoritmo <i>Branch and Bound</i> – Enfoque estático	Minimizar tiempo total de espera en que una estación está desequilibrada	Para instancias menores a 30 nodos, el algoritmo logra obtener buenas soluciones en menos de 1s	Solo puede resolver problemas con instancias de hasta 30 nodos en un tiempo computacional razonable (<1s)
Szeto et al. (2016)	metaheurística <i>Chemical Reaction</i> optimizada – <i>Enfoque estático</i>	Minimizar desequilibrio de estaciones en un tiempo acotado (tiempo total de reposicionamiento)	Permite obtener rutas y cantidad de vehículos que deben intercambiarse en cada estación, basado en métodos de búsqueda intensiva de vecindarios mejorados, en comparación con el algoritmo original, lo que permite acotar el espacio de solución y disminuir el tiempo de resolución en instancias de gran tamaño (>300 nodos).	Requiere un ajuste fino de los parámetros para lograr el grado de optimalidad propuesto. Este ajuste difiere con cada estado particular del sistema, por lo que hay que realizarlo cada vez que este cambia.
Ho y Szeto (2017)	Heurística de búsquedas híbridas en vecindarios grandes – Enfoque estático	Minimizar penalizaciones asociadas a ocupación de estaciones	Estrategia híbrida combina una búsqueda en vecindarios con diversos mecanismos de intensificación/diversificación, aplicando a los resultados más promisorios un <i>Tabu Search</i> . Lo anterior permite mejorar el desempeño en 1,06% promedio por sobre heurísticas matemáticas (Forma et al., 2015) y a una fracción de tiempo computacional (20 a 30 s vs más de 60 min).	Heurística no considera situaciones en donde estaciones balanceadas puedan utilizarse para rebalancear estaciones vecinas con mayor grado de penalización

Caggiani y Ottomanelli (2013)	Simulación dinámica en el espacio-tiempo del sistema, mientras se determinan los patrones de distribución de demanda - Enfoque dinámico	Minimizar costo de reposicionamiento de bicicletas	El modelo considera la variación dinámica de la demanda (De bicicletas y de estaciones disponibles) para micro-simular el sistema de disponibilidad en el espacio-tiempo y determinar los flujos de reposicionamiento óptimos, patrones de distribución y tiempos de intervalo entre operaciones de relocalización.	El modelo solo es adecuado para escenarios sin congestión del sistema (baja demanda), teniendo por lo tanto mayor utilidad como manejo preventivo de sistemas de bicicletas
Regue (2014)	Simulación dinámica basada en 4 modelos predictivos – Enfoque dinámico	Minimizar desbalance de ocupación de estaciones	El modelo está compuesto por cuatro componentes modulares: predicción de demanda, inventario de estado de estaciones, necesidad de redistribución y un modelo de ruteo de vehículos. En conjunto actúan como un sistema proactivo que evita ineficiencias del sistema, aumentando los desbalances que se observan en estaciones durante peaks de demanda.	No considera impacto en costo de reposicionamiento.
Shui y Szeto (2018)	Algoritmo de colonia de abejas en conjunto con heurística de carga/descarga – Enfoque dinámico	Minimizar demanda insatisfecha y huella de carbono asociada al reposicionamiento	El modelo contempla la evaluación de un horizonte operacional multi-periodo para determinar el ruteo y la cantidad de bicicletas que descargar en cada nodo, considerando en que la demanda de cada nodo varía en el tiempo. Así, descompone el problema dinámico en una serie de etapas en las que se resuelve el problema de forma estática con el algoritmo de colonia de abejas sumado a heurísticas específicas para carga/descarga y ruteo.	Para etapas más largas, el modelo tiende a planear una ruta donde carga muchas bicicletas en las primeras paradas, lo que desbalancea el sistema al querer compensar la demanda de CO2.
Pfrommer et al. (2014)	Modelo predictivo basado en incentivos dinámicos para los usuarios – Enfoque dinámico	Minimizar costo operacional del servicio	El modelo determina inicialmente el estado del sistema, para luego asignar una recompensa dinámica al usuario que lo incentiva a devolver la bicicleta en estaciones desocupadas, relajando de este modo el sistema y reduciendo los costos por reposicionamiento que implica la contratación de personal dedicado a ello.	La decisión del usuario no es manejable. El modelo contempla la linearización de esta respuesta para que el modelo cobre validez, por lo que simulación no es completamente acertada.

2.5 Relocalización en sistema de Bicicletas Compartidas Flotantes (BCFs)

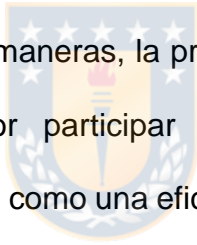
En los sistemas BCFs modernos, la localización de los vehículos se determina mediante un receptor satelital integrado en el chasis de la bicicleta, o bien, mediante la señal enviada a los servidores centrales por los *smartphones* de los usuarios al desbloquearlas. Esto permite mantener un registro en tiempo real del estado del sistema, facilita a los usuarios conocer el sitio geográfico exacto donde se encuentran bicicletas disponibles y además, no los obliga a depositarla en un sitio fijo al finalizar el viaje. No obstante, la libertad de estacionar la bicicleta en cualquier sitio genera el problema de desbalance en tiempo y espacio de la distribución del conjunto de vehículos disponibles y la potencial insatisfacción del cliente al no poder encontrar una bicicleta libre cerca del punto de origen del viaje. Asimismo, este desbalance puede cambiar aleatoriamente durante el día y día tras día, haciendo el proceso de relocalización de las BCFs mucho más desafiante que el sistema tradicional de bicicletas, con estaciones estáticas.

En bibliografía, son escasos los reportes que cubren el problema de redistribución de BCFs. Por lo tanto, los operadores tienden a resolverlo de manera interna, a través de la redistribución manual de vehículos, según los sitios de mayor demanda observados. Caggiani y colaboradores (Caggiani et al., 2018) proponen una metodología de distribución dinámica del sistema BCF que comienza con la predicción de la cantidad y posición de bicicletas en un área

determinada mediante redes neuronales autorregresivas y concluye con un sistema de apoyo a la toma de decisiones para el proceso de relocalización. Pal y Zhang (Pal & Zhang, 2017), por su parte, proponen un algoritmo híbrido entre una búsqueda anidada en vecindarios grandes con una búsqueda en descenso de vecindarios variables (NLNS + VND) que permite resolver el problema de rebalanceo estático del BCF en tiempos computacionales del orden de minutos. Las referencias en bibliografía en cuanto a la optimización de estaciones virtuales de BCFs, resultan bastante acotadas, a pesar de lo significativo que resulta el problema en el diseño de los nuevos sistemas de BCFs que comienzan a tomar fuerza en los principales centros urbanos del mundo. Sun, Li y Zuo (Sun et al., 2019), proponen una metodología para optimizar la localización de estaciones virtuales de recogida de BCFs utilizando un algoritmo de *clustering* basado en la maximización de la demanda del usuario, el que permite resolver el problema en tiempo real. Ban y Hyun, (Ban & Hyun, 2019b), proponen un novedoso algoritmo para tratar el problema de distribución de BCFs, basado en una distribución de curvatura que asigna un indicador de desbalance a cada estación, el cual permite determinar el estado general del sistema en un tiempo particular y sugerir mecanismos eficientes de redistribución de bicicletas a los agentes operadores.

Ante este escenario, resulta crucial integrar nuevos modelos de equilibrio para estaciones virtuales de BCFs que incorporen el factor de decisión del usuario y su disponibilidad a cooperar con el rebalanceo de dichas estaciones. La razón detrás de esta premisa recae en la necesidad de disminuir los costos

operacionales del sistema al promover que el usuario colabore con el rebalanceo de las bicicletas en puntos de alta demanda, que normalmente deben ser cubiertos por camiones de carga y personal dedicado a esta tarea. Pfrommer y colaboradores (Pfrommer et al., 2014), concluyen al respecto, que un sistema de incentivos al cliente por reposicionamiento de vehículos de este tipo, permite sostener la demanda de las estaciones de recogida del sistema de bicicletas compartidas durante los fines de semanas hasta en un 87%, sin embargo, no se obtiene la misma respuesta en los días de semana, donde la demanda es mayor y los incentivos ofertados no son suficientes para que el usuario decida participar en el intercambio. De todas maneras, la propuesta de contar con un sistema de recompensa al usuario por participar en la relocalización de vehículos compartidos flotantes se alza como una eficiente propuesta para solventar el alto costo operacional asociado al reposicionamiento de estos vehículos y a las cuantiosas pérdidas por concepto de abandono o robo de los vehículos.



CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA

3.1 Estudio de la demanda de transporte urbano en la ciudad de Concepción

3.1.1 Análisis de la Base de Datos

Para estimar la demanda de transporte en la ciudad de concepción, se recopiló información generada por la Secretaría de Planificación de Transportes (SECTRA) de la región del Bio-Bío, solicitud mediada por el portal de transparencia de la Municipalidad de Concepción. Este organismo técnico, dependiente de la Subsecretaría de Transportes del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile, se especializa en la planificación de transporte y tiene como principales funciones proponer planes de desarrollo de los sistemas de transporte urbano, evaluar socialmente iniciativas de inversión en infraestructura y gestión de los sistemas de transporte, además de desarrollar las metodologías y modelos necesarios para el análisis de movilidad. La información entregada, corresponde a una base de datos de demanda de viajes obtenida de la encuesta aleatoria a usuarios del servicio de transportes interurbano, que contiene, entre otra información: geolocalizaciones de puntos de partida y llegada en trayectos interurbanos; caracterización de las personas encuestadas; tiempos y distancias de viaje y un informe de actualización del plan de transporte del Gran Concepción en respuesta a la información analizada. En este informe se

presentan, entre otras estrategias, la relocalización de paradas de autobuses en puntos de alta demanda, así como la incorporación paulatina de ciclovías a la red interurbana, con el objetivo de interconectar las comunas del Gran Concepción y descongestionar el tráfico vehicular.

En esta tesis, se analizó y normalizó la base de datos obtenida desde SECTRA, tomando la encuesta de origen destino como referencia del estado basal de la demanda de transporte público en la ciudad de Concepción. Así mismo, se analizaron potenciales estaciones candidatas y generó el conjunto de datos que se utilizó para determinar la localización eficiente de estaciones de recogida de bicicletas compartidas flotantes (BCFs) en la ciudad.

Todo el manejo de la Base de Datos, la metaheurística detrás de la implementación del modelo de programación matemática y análisis posterior de resultados, se implementó en lenguaje de programación Python en su versión 3.5.6, integrando las librerías pandas, numpy, matplotlib, geopandas, folium, docplex y LocalSolver, en versiones actualizadas y compatibles entre sí. El código se ejecutó en un computador portátil, procesador Intel CORE i7 de 8va generación y 8 GB de memoria RAM.

3.1.2 Definición de conjunto de datos de demanda

En términos generales, el problema de relocalización y distribución de BCFs busca recomodar los vehículos de forma eficiente en favor de la demanda.

Ante este escenario, el primer paso es determinar la mejor localización para situar las estaciones de recogida dentro de la ciudad, de tal modo que puedan maximizar el número de clientes que el sistema puede atender. Para ello, se mapearon las demandas individuales de transporte obtenidas desde la base de datos de SECTRA filtrando, solo aquellos puntos solicitados dentro de los márgenes que acotan la *conurbación*¹ céntrica de la ciudad de Concepción, que es donde se podría mantener el control del sistema en una etapa de implementación inicial. Posteriormente, el conjunto de datos obtenido se caracterizó según hora de solicitud, dirección del viaje, ubicación georeferenciada y la distancia geográfica calculada entre dichas coordenadas. Así, este conjunto de datos, tras ser sometidos a una serie de técnicas de manejo de datos logra contener: los conjuntos, parámetros y variables que serán requeridas como entrada del modelo matemático.

¹ Del inglés *conurbation*. Conjunto de varios núcleos urbanos inicialmente independientes y contiguos por sus márgenes, que al crecer acaban formando una unidad funcional.

3.2 Aproximación a un modelo de matemático para resolver el problema de redistribución de BCFs en la ciudad de Concepción

3.2.1 Formulación del modelo matemático

El modelo de optimización presentado a continuación busca representar el diseño preliminar de la ubicación eficiente de una red de estaciones de BCFs en tiempos computacionales adecuados para la toma de decisiones, es decir, en el orden de minutos. Esto se abordó al extrapolar la demanda de transporte existente en la ciudad de Concepción en un momento específico del día, sobre la que se resolvió el problema de localización inicial de estaciones virtuales de recogida bajo un modelo de satisfacción de demanda de máxima cobertura. De este modo, se evaluaron distintos modelos matemáticos que abordan el problema como son: *p-median*, *p-centre* y *maximum coverage*, siendo el problema de *p-median* con restricción de capacidad de estaciones el que mejor se adapta a las necesidades antes planteadas, ya que busca generar soluciones adecuadas para cubrir la mayor cantidad de demanda proyectada, mientras que utiliza menos recursos computacionales que los otros modelos ensayados para minimizar la distancia a la que quedan los puntos de su estación más cercana.

En términos generales, este modelo podría considerarse una variación del problema de cobertura máxima de *p-medianas*, introducido por Church y ReVelle en 1974 (Church & ReVELLE, 1974), salvo que considera la capacidad máxima de las estaciones virtuales suscritas en el área de cobertura como una restricción

del modelo, para evitar que se aglomeren las bicicletas en un punto particular de la ciudad durante las horas punta.

De este modo, el modelo busca maximizar la cobertura de las estaciones propuestas, al minimizar la suma de distancias que existe entre cada nodo de demanda que se dirige hacia estas estaciones. Esto, sujeto a ciertas restricciones de capacidad que permiten asegurar, que no se sobrepase la capacidad de cada estación, así como también que ningún usuario requiera caminar una distancia excesiva para alcanzar dichas estaciones. Así, el problema puede modelarse según el siguiente modelo de programación matemática binaria entera:

$$Z = \min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{jj} = p, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} q_i x_{ij} \leq Q x_{jj}, \quad \forall j \in N, \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \quad (5)$$

Donde:

$N = \{1, \dots, n\}$ es el conjunto de nodos de demanda, donde se encuentran incluido el subconjunto de potenciales estaciones (*p-hubs* o medianas); q_i es la

demanda de cada punto y Q es la capacidad máxima de cada estación; d_{ij} es la matriz de distancia; x_{ij} es la matriz de localización, con $x_{ij} = 1$ si el punto i se asigna a una estación j y $x_{ij} = 0$, en otro caso; $x_{jj} = 1$ si la estación j es seleccionada y $x_{jj} = 0$, en otro caso.

La función objetivo (1) minimiza la sumatoria de distancias entre todos los nodos de demanda. Las restricciones (2) aseguran que cada nodo se asigna exactamente a una estación (*p-hub*). Las restricciones (3) controlan el número de estaciones p que serán asignadas. Las restricciones (4) aseguran que la capacidad total de las estaciones se respete. Finalmente, las restricciones (5) definen la naturaleza entera de la variable.

Este problema de optimización combinatoria se clasifica como *NP-Hard*, incluso cuando la demanda es discreta, sin embargo, en la literatura se ha logrado resolver eficientemente al calcular de forma separada, la ubicación y reasignación de las estaciones, por ejemplo, mediante la intensificación de búsqueda sistemática con un algoritmo tipo *Tabu Search*, o heurísticas basadas en *Branch and Bound* y relajación Lagrangeana.

El modelo se implementó en lenguaje Python, utilizando para su resolución la librería LocalSolver versión 9.5.2, que permite resolver modelos de optimización matemática mediante distintas heurísticas y la librería docplex, que integra el software de optimización Cplex Studio versión 12.8.0 a Python.

LocalSolver se utilizó para resolver de forma eficiente el modelo, mientras que Cplex se utilizó para resolverlo mediante un método exacto. Ambas librerías operan bajo una licencia de usuario único, exclusivamente con fines académicos.

Para definir la distancia máxima de cobertura que tendría cada estación candidata, se estimó un radio de 200 metros, acorde a información recabada desde literatura sobre distancias máximas que los usuarios estarían dispuestos a caminar para encontrar un vehículo compartido (Pfrommer et al., 2014; Reiss & Bogenberger, 2017; Sun et al., 2019). Del mismo modo, se estimó un segundo radio de cobertura de 200 metros, sobre el radio cubierto por las estaciones, asociado a la distancia donde existe una mayor probabilidad de que un usuario operador, pudiese colaborar con el transporte de vehículos hacia y desde el perímetro de estas estaciones para descongestionarlas, o bien, reabastecerlas.

El valor de q_i , que representa la demanda de cada estación candidata, fue generado de forma aleatoria utilizando la librería numpy en su versión 1.15.2, con lo que se generan valores pseudo-aleatorios entre un rango de 5 a 31 solicitudes por estación. La capacidad Q de cada estación se estableció de forma preliminar en un límite de 30 bicicletas, para evitar la aglomeración de vehículos en zonas de alta sobrecarga. Este valor se estimó en base al volumen teórico que ocupan dichos vehículos y los espacios públicos que pueden contenerlos. Para el cálculo de las distancias entre puntos, se utilizó la Fórmula *Haversine*, que resulta más apropiada para calcular distancias entre dos puntos geo-referenciados.

3.2.2 Definición de instancias de prueba.

Con el objetivo de probar el modelo de programación matemática descrito en la sección 3.2 ante distintos volúmenes de demanda, se crearon 3 tipos de instancias de prueba que representan puntos geo-referenciados de demanda de viajes dentro de la ciudad de Concepción. La primera de ellas, IN01, corresponde a la muestra aleatoria del 60% de datos de la base de demanda normalizada de viajes que se solicitan sobre la ciudad de Concepción y considera un tamaño de 4.504 entradas. La segunda instancia IN02, corresponde a la porción de datos de la base de demanda que se registra, puntualmente a las 18:00 horas en la ciudad de Concepción y presenta un tamaño de 965 entradas. Con esta instancia se construyeron las gráficas geo-referenciadas que consideran el posicionamiento de las estaciones entregadas por el modelo matemático propuesto. Finalmente, la instancia IN03, corresponde a una muestra aleatoria del 20% de los datos de demanda que se contienen en la IN02. Esta instancia de 193 entradas se utilizó para ajustar el modelo y comprobar su correcto funcionamiento.

Cada instancia se corrió en el modelo propuesto durante 600 segundos, sin límite de iteraciones, bajo distintas condiciones de operación (cantidad de estaciones), registrándose periódicamente el valor de la función objetivo y la eventual pérdida de la cobertura de demanda que pueda existir.

3.3 Propuesta de integración del modelo de relocalización con un modelo de recompensa al usuario

3.3.1 Definición de métrica para la evaluación del equilibrio en sistemas BCFs

Antes de definir un modelo de incentivos al usuario que permita motivar la relocalización de los vehículos compartidos para estabilizar el sistema, se requiere especificar la métrica de evaluación que determinará el estado de distribución en el que se encuentra el sistema de bicicletas en un tiempo determinado. Este parámetro debe ser representativo de la capacidad de cada estación de recogida definida en el modelo de relocalización antes descrito para que puedan ser vinculantes. Considerando las condiciones particulares de movilidad compartida que caracterizan a la ciudad de Concepción, se propone abordar el problema desde un enfoque estático del sistema y utilizar la Métrica de Desequilibrio/Reequilibrio (RIM, por sus siglas en inglés) propuesta por Ban y Hyun (Ban & Hyun, 2019a) para calcular el estado de distribución de un sistema de bicicletas urbano en un espacio de tiempo particular. Es importante señalar que el RIM está sujeto a la influencia de factores de decisión externos, generalmente mediados por el usuario, que en la literatura han sido estimados en base a encuestas aleatorias aplicadas a los usuarios del servicio. Para esta actividad, se consideraron dichas estimaciones y se estableció una comparativa con la situación basal de demanda de transporte determinada para la ciudad de Concepción, en función de estimar el potencial de integración que tendría con el modelo propuesto y definir los requerimientos particulares para este caso.

3.3.2 Propuesta de un modelo de incentivo al usuario para relocalizar BCFs

La integración del modelo propuesto en esta tesis se plantea en términos de localizar eficientemente la ubicación de estaciones virtuales de recogida de bicicletas en aquellas zonas que presentan alta demanda en un periodo determinado de tiempo. Estas zonas, quedan delimitadas en la aplicación del sistema como sitios preferidos para estacionar las bicicletas, las que tienen un límite de vehículos que aceptan, para evitar su saturación. Así, teniendo en consideración que la demanda cambia con el tiempo y que la distribución de las estaciones puede ser dispuesta dinámicamente acorde a los requerimientos de los clientes, se abre una ventana de acción para que las empresas operadoras de los servicios de BCFs puedan desplazar el flujo de vehículos que colapsan una estación y redirigirlos hacia otras estaciones exhaustas, aumentando con esto la disponibilidad del servicio. Si bien actualmente ésta redistribución es realizada exclusivamente por las empresas operadoras, la propuesta de este trabajo busca demostrar la factibilidad de incluir a clientes en el proceso de reubicación de bicicletas hacia y desde estas zonas de alta demanda, favoreciendo con esto el equilibrio del sistema.

Para proponer un modelo de incentivo al usuario factible de ser integrado al modelo de relocalización propuesto, se realizará una exhaustiva revisión bibliográfica, en busca de un esquema que permita acoplarse a las nuevas tecnologías y al mismo tiempo complementar los resultados obtenidos con el

modelo de relocalización propuesto. Para ello, se propone evaluar el potencial beneficio de utilizar un sistema mixto de relocalización de BCFs en que usuarios que actúan como “operarios temporales”, contribuyen a mejorar la disponibilidad del sistema junto a la empresa operaria y sus camiones de relocalización. Así, mediante una comparativa en cuanto al potencial gasto que se asociaría a la implementación de este sistema mixto versus el gasto asociado a la relocalización gestionada solo por la empresa operadora, se podría estimar -de forma preliminar- la viabilidad económica de implementar dicho modelo, al menos en ventanas de tiempo asociadas a alta demanda como lo propone Pfrommer y colaboradores (Pfrommer et al., 2014). Cabe destacar que el cálculo del costo de mantención del sistema propuesto en esta actividad se basa en supuestos recopilados desde literatura (Reiss & Bogenberger, 2017; Singla et al., 2015; Vogel et al., 2011) y por lo tanto, no refleja fielmente la compleja red de factores que influyen en el equilibrio del sistema, ni el estado actual en el que operan las empresas operadoras a nivel nacional.

Los supuestos utilizados para establecer una aproximación al costo operacional del servicio de BCFs son los siguientes:

- 1) Cada cliente que actúa como operador temporal obtiene un incentivo monetario de \$120 por cada vehículo que relocaliza hacia el rango de la estación más cercana (Pfrommer et al., 2014).

2) Costo de relocalización mediado por camión de carga depende de distancia recorrida, consumo de combustible del camión relocalizador y sueldos de dos operadores.



CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

4.1 Levantamiento de información sobre demanda de transporte urbano en el Gran Concepción

Los datos de demanda de transporte en la provincia de Concepción fueron solicitados a la Secretaría de Planificación de Transportes – SECTRA, mediante ley de transparencia del Estado (*Ley 20.285 - BCN, 2008*). Este organismo técnico depende del Ministerio de Transportes y telecomunicaciones del Gobierno de Chile y se encarga de realizar estudios de planificación de transporte, proponer planes de desarrollo de los sistemas de transporte urbano, evaluar la factibilidad de iniciativas de inversión en infraestructura y gestión de los sistemas de transporte y desarrollar las metodologías y modelos necesarios para el análisis de transporte. La información entregada se compone de una base de datos con cerca de 47.580 entradas provenientes de encuestas a usuarios del transporte público y privado del Gran Concepción que especifica factores como tendencias de movilidad, horarios de viaje y coordenadas de origen – destino, así como una serie de archivos de geolocalización y distribución de zonas que permiten caracterizar los viajes urbanos y sus requerimientos sobre el sistema de transporte de la *conurbación*. Esta información fue evaluada a cabalidad y sirvió de base para generar las instancias de prueba y la caracterización del sistema

de transporte urbano en la ciudad de Concepción, que avanza progresivamente hacia la disminución de la congestión vehicular en zonas céntricas de la ciudad, la construcción de zonas de transporte mixto y corredores de transporte exclusivo para vehículos sin motor y eléctricos.

4.2 Análisis de demanda de viajes en la ciudad de Concepción

Para estimar la demanda de usuarios del transporte urbano, se consideraron sólo los datos levantados desde encuestas a usuarios durante viajes efectuados de lunes a viernes. El análisis preliminar de esta información reveló la existencia de entradas incompletas, así como errores en la digitación de coordenadas, probablemente asociados a errores en la división decimal de los datos georreferenciados. Las entradas con algún dato incompleto fueron imputadas considerando el promedio de la fila, mientras que los errores de digitación fueron corregidos caso a caso. Los datos de georreferenciación fueron transformados a sistema métrico, eliminando las filas completas de los datos atípicos. De esta forma, se obtiene una base de datos filtrada, donde se indican parámetros de horas de salida y llegada, punto geo-referenciado de origen y destino, distrito donde inicia el viaje y lugar de destino, además de la distancia total recorrida.

La demanda temporal de viajes solicitada en la ciudad de Concepción se observa en la Figura 3. Se destacan varios *peaks* de demanda, con un notorio

aumento entre 7:00 y 8:00 horas, atribuible al horario de ingreso laboral y escolar diurno, seguido por un aumento entre las 13:00 y 16:00 horas, el cual se mantiene relativamente constante hasta el peak de las 18:00 horas, donde luego comienza a declinar paulatinamente.

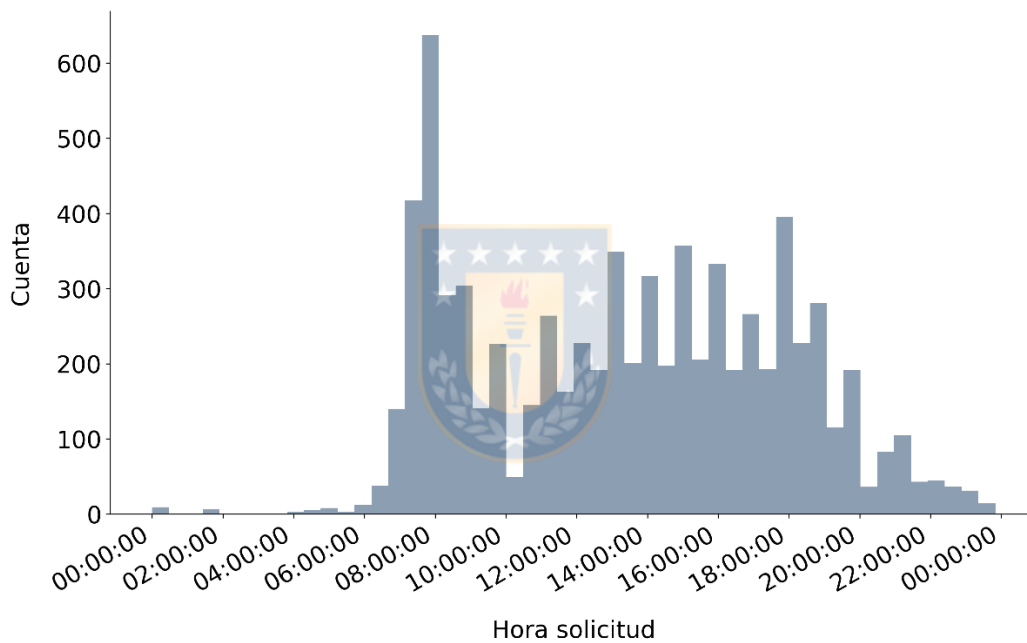


Figura 3. Proyección temporal de la demanda de viajes para la ciudad de Concepción. Fuente: elaboración propia, a partir de encuesta origen-destino

Un breve análisis de la demanda espacial de estos viajes (Figura 4), parece indicar una marcada concentración de solicitud de viajes en las ciudades de Coronel, Chiguayante, Hualpén y Concepción. Siendo, esta última la que mayor demanda concentra, con un 42,5% de las solicitudes. Ahora bien, si nos enfocamos de forma particular en la demanda de la ciudad de Concepción, observamos que la concentración de solicitudes de viaje principalmente en zonas céntricas de la ciudad (Figura 5).

En cuanto a la cantidad de puntos de demanda que tienen como origen y destino la misma ciudad de Concepción, es decir, aquellos que potencialmente utilizarían un sistema de transporte compartido urbano, tenemos un total de 7507 entradas, que corresponde al 59,1% de las solicitudes. El segundo destino más requerido, corresponde a la ciudad de San Pedro de la Paz, con un 10% de las solicitudes. Para los efectos de esta proyección, solo se considerarán los viajes dentro de la ciudad de Concepción. Respecto a los horarios en que ocurren dichas demandas, se observan dos peaks, uno a las 8:00 horas y otro a las 18:00 horas.

En relación a la distancia de viaje informada en la encuesta, tenemos que el desplazamiento promedio dentro de la ciudad de Concepción no supera los 2,2 km, el 25% de los desplazamientos es menor a 783 metros, el 50% menor a 1,82 km y el 75% de ellos es menor a 3,3 km. La máxima distancia de desplazamiento

registrada en la encuesta es de 32 km y la mínima se indica como 0 metros, aunque este valor puede corresponder a algún error de digitación.

A partir de esta información, se caracterizaron los 25 puntos de mayor demanda en el sector centro de la ciudad, se evaluó su proximidad con zonas de alto interés y movilidad y se geo-referenciaron sobre el mapa de Concepción, con el objetivo de considerarlos como referencia de potenciales estaciones de recogida (Figura 6). Cabe destacar que la mayoría de estos puntos de alta demanda concuerda en sus características esenciales con los criterios sugeridos por la Guía de Planificación de sistemas de bicicletas compartidas del *Institute for Transportation & Development Policy* para establecer estaciones de recogida (ITDP, 2014), conectando: distintos tipos de suelo, líneas de transporte público y puntos de alto interés turístico y comercial (ver Figura 6).

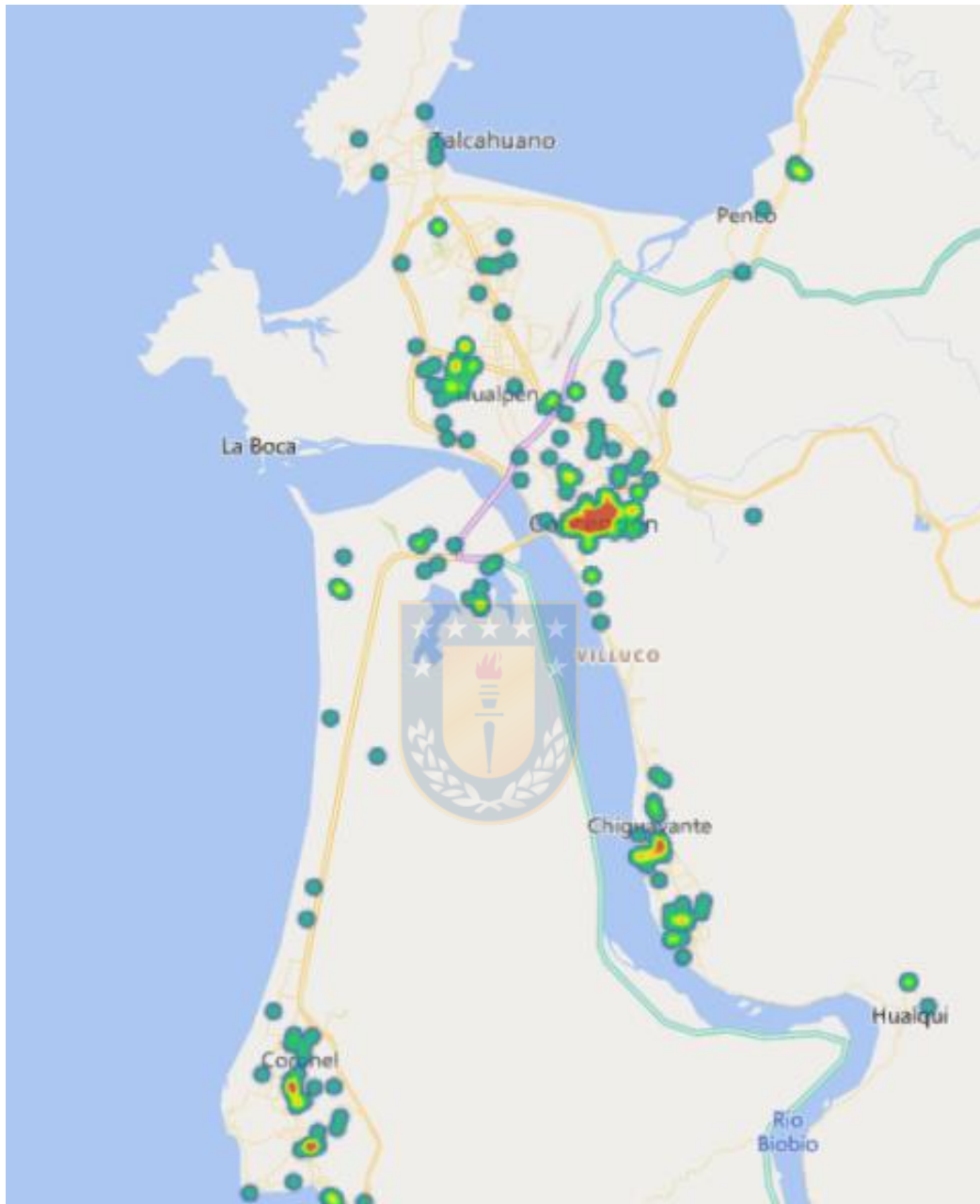


Figura 4. Proyección espacial de la demanda de viajes para la comuna de Concepción.
Fuente: elaboración propia.

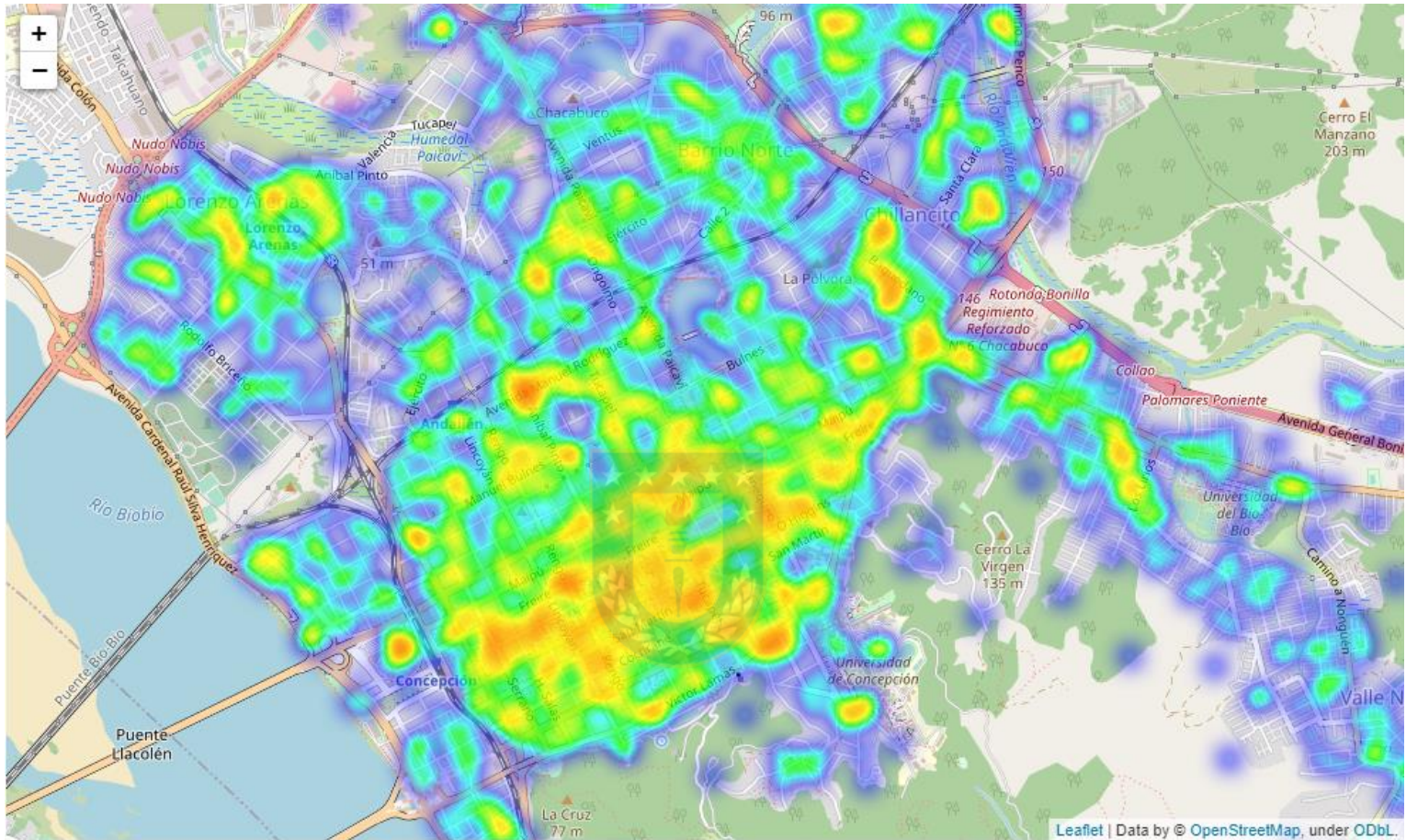


Figura 5. Demanda de viajes en el sector céntrico de la ciudad de Concepción. Fuente: elaboración propia

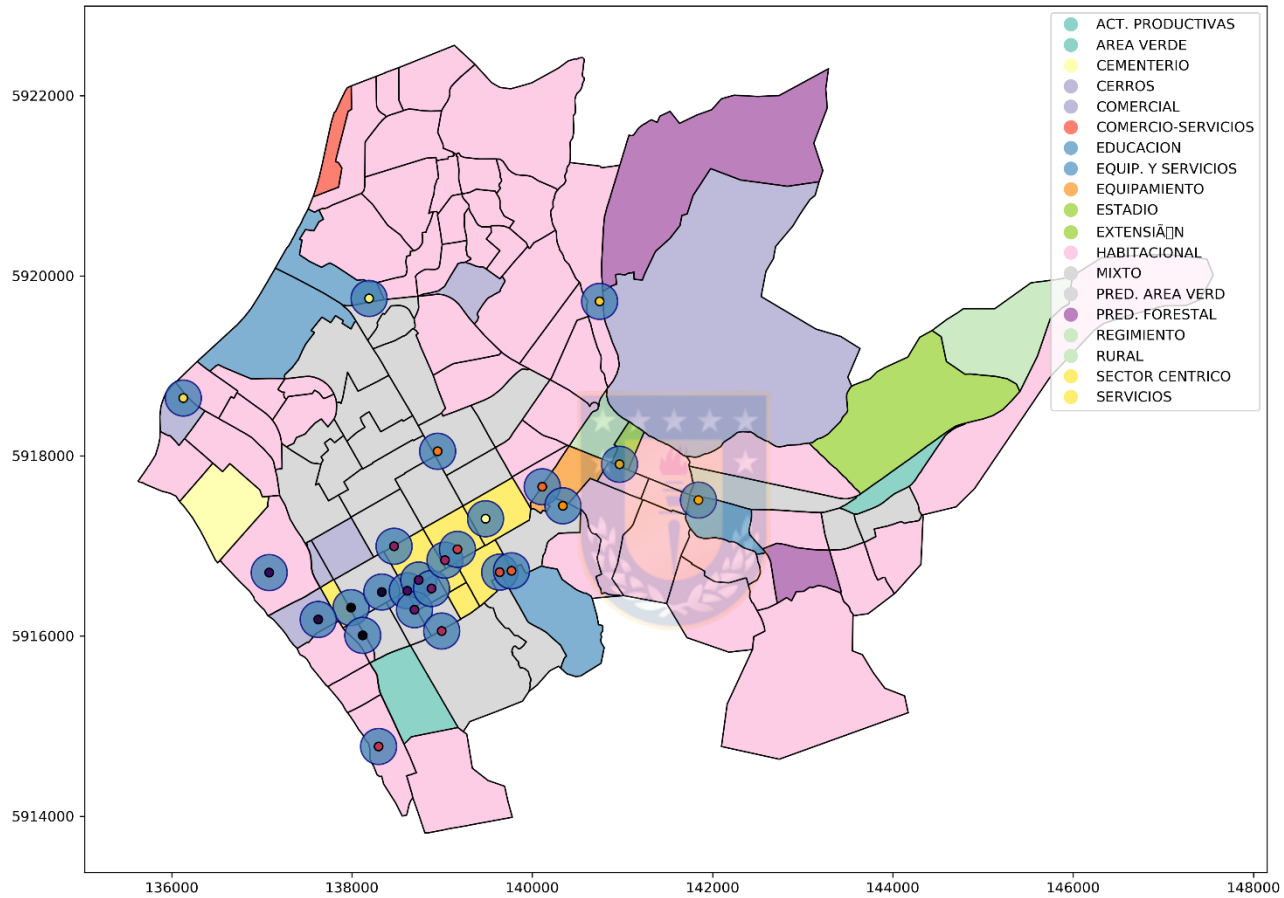


Figura 6. Zona de alta demanda de viajes en el sector céntrico de la ciudad de Concepción. Fuente: elaboración propia

4.3 Generación y caracterización de conjuntos de datos e instancias de prueba

Al mapear los puntos de demanda sobre la ciudad de Concepción (Figura 7), tenemos la distribución espacial de 20.179 entradas, principalmente sobre el sector céntrico de la ciudad.

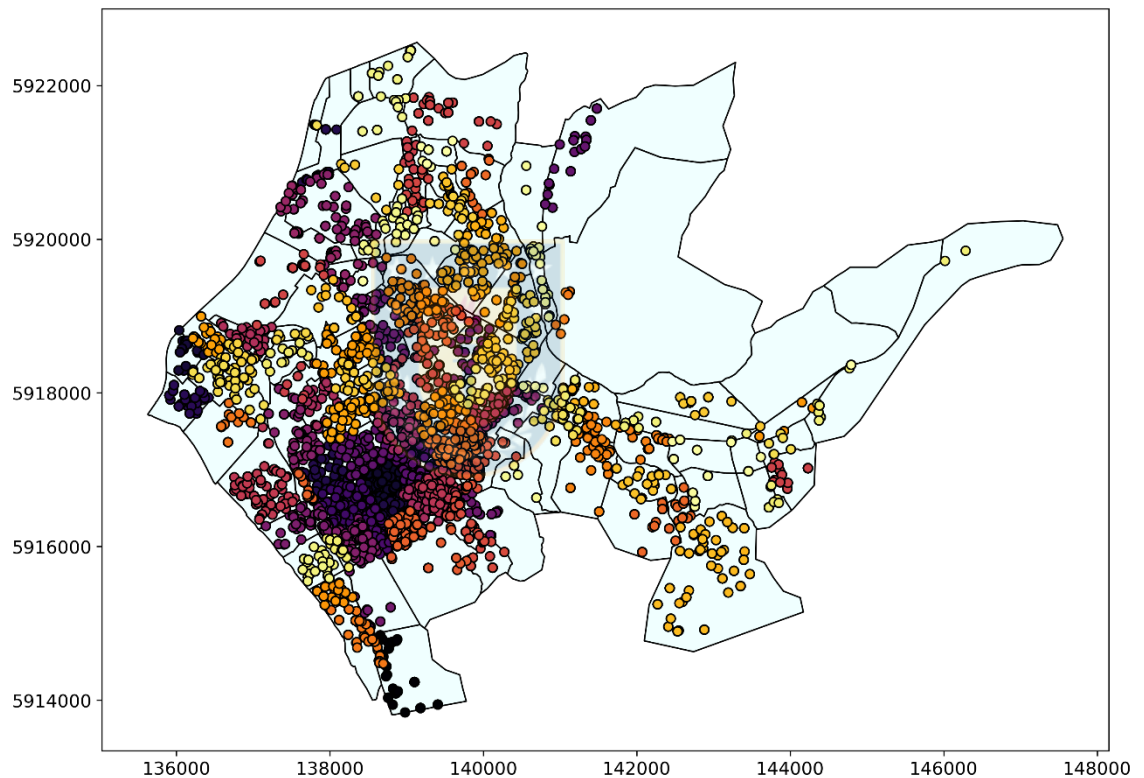


Figura 7. Geolocalización de demanda de viajes sobre la ciudad de Concepción. Fuente: elaboración propia

Luego, al filtrar solo las demandas que ocurren a las 18:00 horas, tenemos la distribución que compone la instancia IN02, conjunto de datos que será tomado como referencia para analizar los posteriores experimentos (Figura 8). Se puede

observar que la distribución espacial de este conjunto de datos es representativa del anterior conjunto que concentra la totalidad de las entradas.

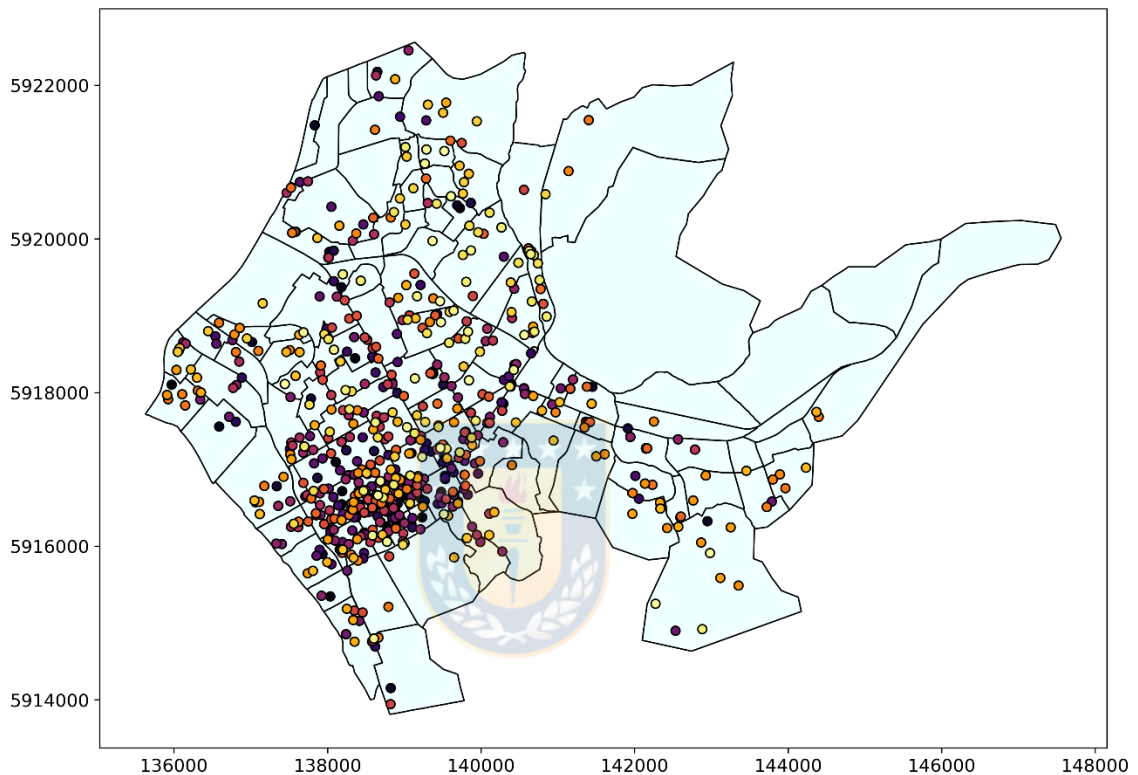


Figura 8. Geolocalización de demanda de viajes que ocurren a las 18:00 horas en la ciudad de Concepción. Fuente: elaboración propia

Al igual que la IN02, se analizaron y geo-referenciaron las instancias IN01 e IN03, obteniéndose resultados similares a los obtenidos para IN02 (resultados no mostrados en este documento para evitar sobrecarga de información). Todas las instancias de prueba fueron normalizadas y ajustadas para ser leídas

correctamente por el modelo matemático implementado. El código de esta implementación está disponible en el Anexo 1 de esta Tesis.

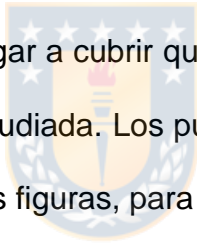
4.4 Evaluación de la idoneidad de las estaciones sugeridas por la implementación del modelo matemático y el desempeño de este

Tras resolver el modelo matemático para cada instancia, se obtuvo un conjunto de índices que definen la posición eficiente de potenciales estaciones de recogida para un sistema de BCFs a disponer en la ciudad de Concepción. Estos índices fueron geo-referenciados desde la base de datos, generando el posicionamiento de las estaciones candidatas que se presentan a continuación.

En la Figura 9 observamos la demanda que puede captar el conjunto de estaciones candidatas que fueron caracterizadas en la sección 4.2, considerando que cada estación abarca un radio de 200 metros, representado por un área circular de color azul. Estas paradas albergan el 35.4% de las demandas solicitadas a las 18:00 horas (en la figura, puntos en el rango de las paradas), Sin embargo, un 64,6% de éstas no son cubiertas y requieren de relocalización ante la eventualidad que correspondan a puntos de destino donde los clientes estacionan las bicicletas libremente. Estas bicicletas permanecen allí, hasta que la empresa operadora las reubique si no son previamente solicitadas por otro usuario.

La Figura 10 refleja la ubicación eficiente de 10 estaciones de recogida calculadas para la instancia IN02 a partir de la metaheurística y el modelo de

programación matemática utilizado. Estas, en conjunto, cubren la mayor cantidad de demanda posible, acorde a las restricciones impuestas por el modelo. En este sentido, cabe recordar que se fijó una capacidad de 30 bicicletas por estación, lo que permite a este esquema captar un 16,2% de la demanda estudiada. En un radio amarillo ubicado desde la periferia de cada estación flotante, se observa el radio de acción que tiene una mayor probabilidad de gatillar la cooperación de un usuario que actúe como operario temporal del sistema, ya sea para descongestionar la estación, o bien para acercar un vehículo a esta posición. De este modo, en la Figura 10 se grafican con puntos de tonalidad azul las solicitudes de demanda que podrían llegar a cubrir que, para esta instancia, corresponde a un 44,6% de la demanda estudiada. Los puntos de demanda no cubiertos no se representan en las siguientes figuras, para no saturar las imágenes.



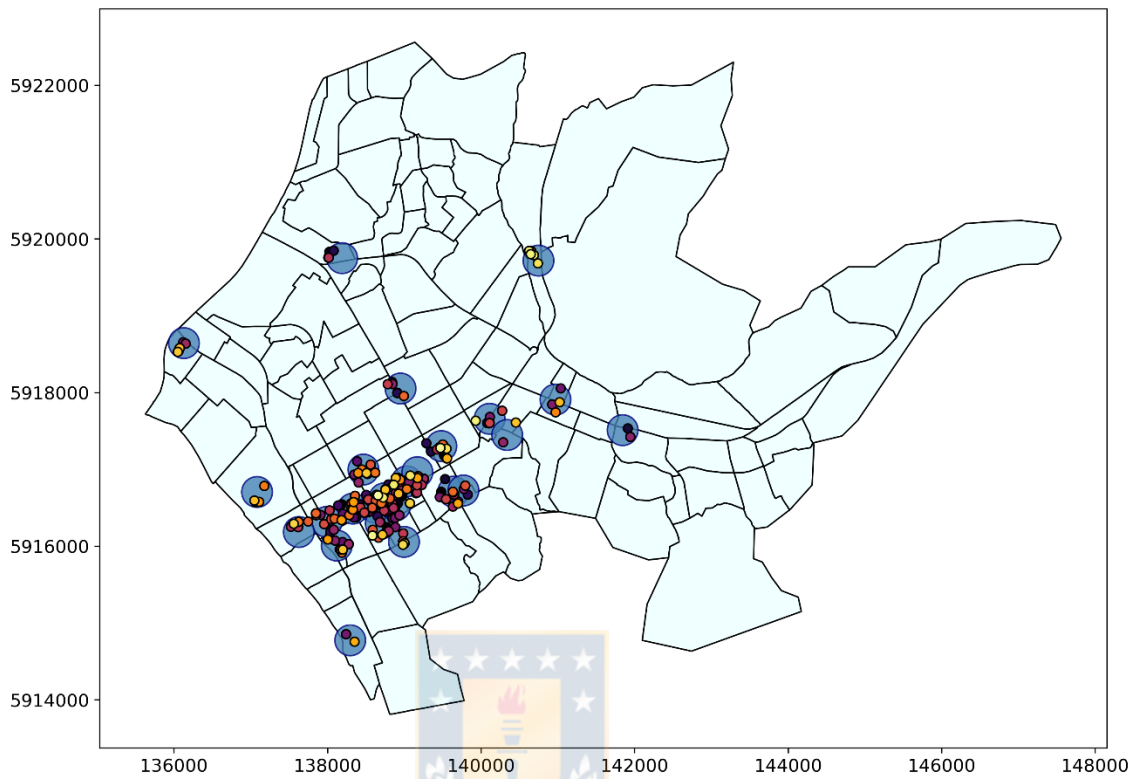


Figura 9. Demanda cubierta por el conjunto de estaciones candidatas, propuesta en base a caracterización de demanda inicial. Fuente: elaboración propia

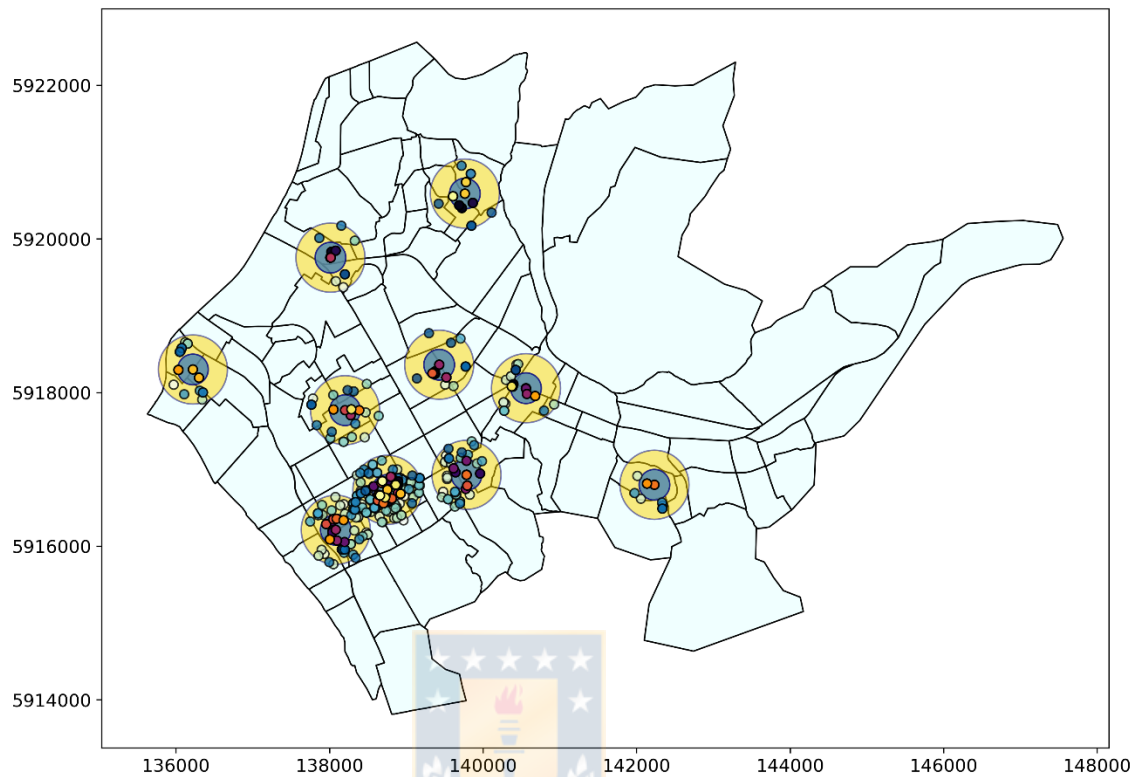


Figura 10. Demanda cubierta por 10 estaciones, propuestas por la metaheurística y el modelo de programación matemático implementado. Fuente: elaboración propia

Del mismo modo, se evaluó sobre la instancia IN02 la cobertura de demanda cuando se limita el sistema a 20 y 30 estaciones de recogida (Figura 11 y Figura 12, respectivamente), con el objetivo de determinar diferencias en la capacidad de cobertura de la demanda estudiada. Este mismo análisis fue replicado para las instancias IN01 e IN03 y se presentan detalladamente, en Tabla 2.

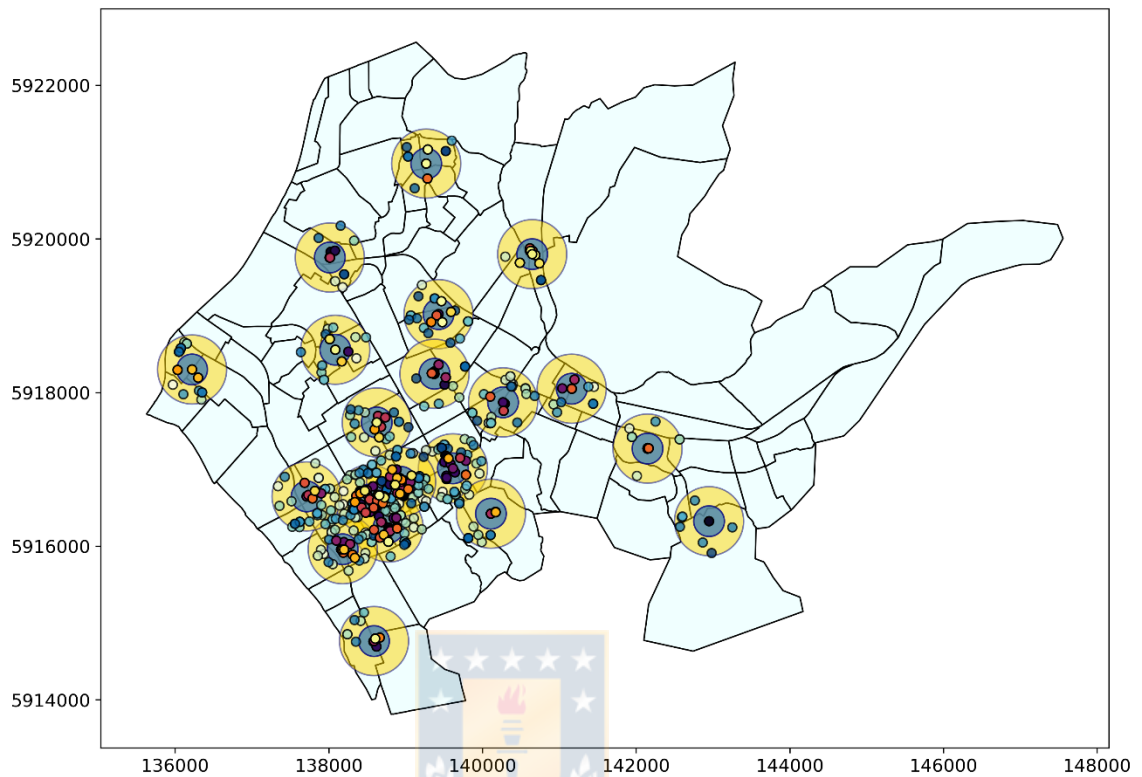


Figura 11. Demanda cubierta por 20 estaciones, propuestas por la metaheurística y el modelo de programación matemático implementado. Fuente: elaboración propia

El límite de estaciones seleccionadas, se escogió a modo referencial, esperando encontrar diferencias entre la eficiencia que existe entre un sistema con más o menos puntos de recogida. Para este caso, en que se evalúa la demanda en una ventana de tiempo particular para la instancia IN02, los resultados tienden a indicar que 20 estaciones, cubren de manera eficiente el flujo de solicitudes, y que éstas se distribuyen de manera homogénea por la ciudad. El aumento del número de estaciones por sobre 30, no genera mayores

beneficios de cobertura y eventualmente, podría significar un mayor costo de mantenimiento del sistema.

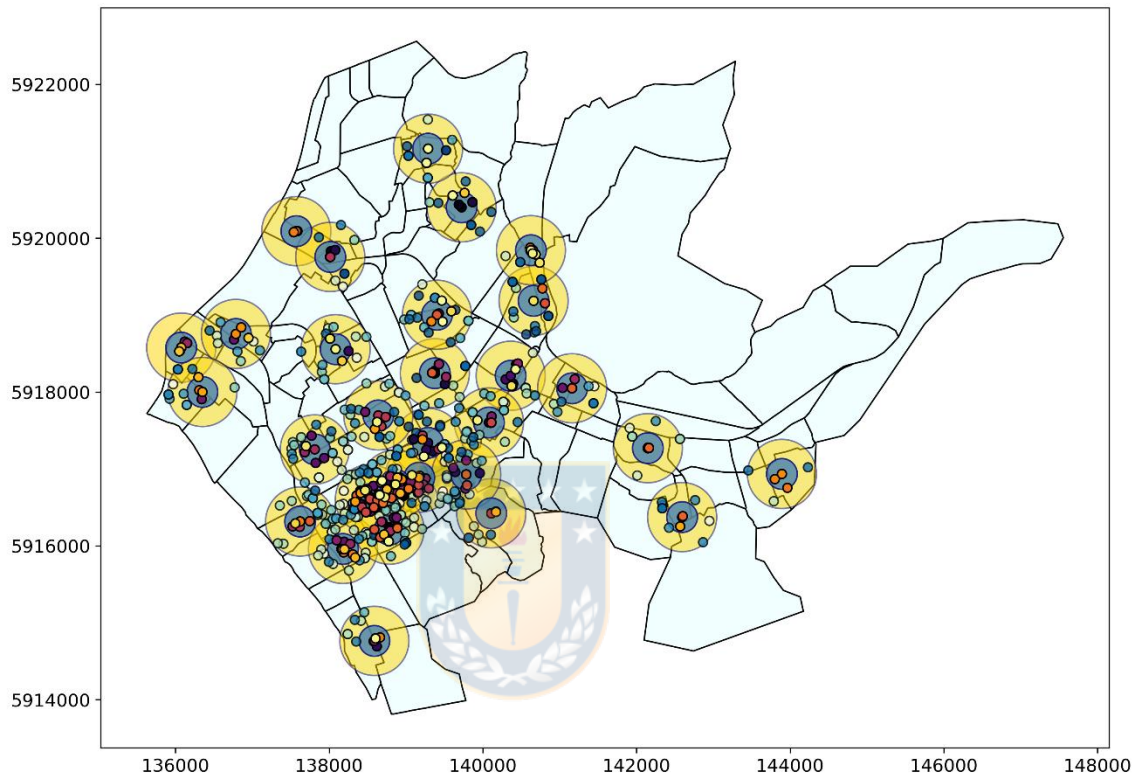


Figura 12. Demanda cubierta por 30 estaciones, propuestas por la metaheurística y el modelo de programación matemático implementado. Fuente: elaboración propia

En la Tabla 2 se expone además una estimación de costos de reposicionamiento de bicicletas orientada a mantener el equilibrio del sistema para cada disposición espacial de los *Hubs* o estaciones de recogida. Si bien este cálculo no contempla todos los factores involucrados, sin dudas permite respaldar la sustentabilidad económica de implementar el modelo, en cuanto se observa un aumento de la cobertura de la demanda tras una localización eficiente de las

estaciones, así como también, puede apreciarse un claro beneficio económico derivado del uso de un modelo mixto de relocalización, que permite ahorrar entre 25 a 40% de los costos operacionales. Asumiendo, entre otras condiciones, la participación activa de usuarios que actúan como “operadores temporales” para redistribuir las BCFs.

El desempeño del algoritmo utilizado para evaluar las instancias y determinar la disposición espacial eficiente de estaciones se observa en la Figura 13. Ante las tres instancias se observa una rápida respuesta del modelo, que logra alcanzar la mínima distancia obtenida por la función objetivo en tiempos computacionales menores a 4 minutos para la mayoría de los casos estudiados.

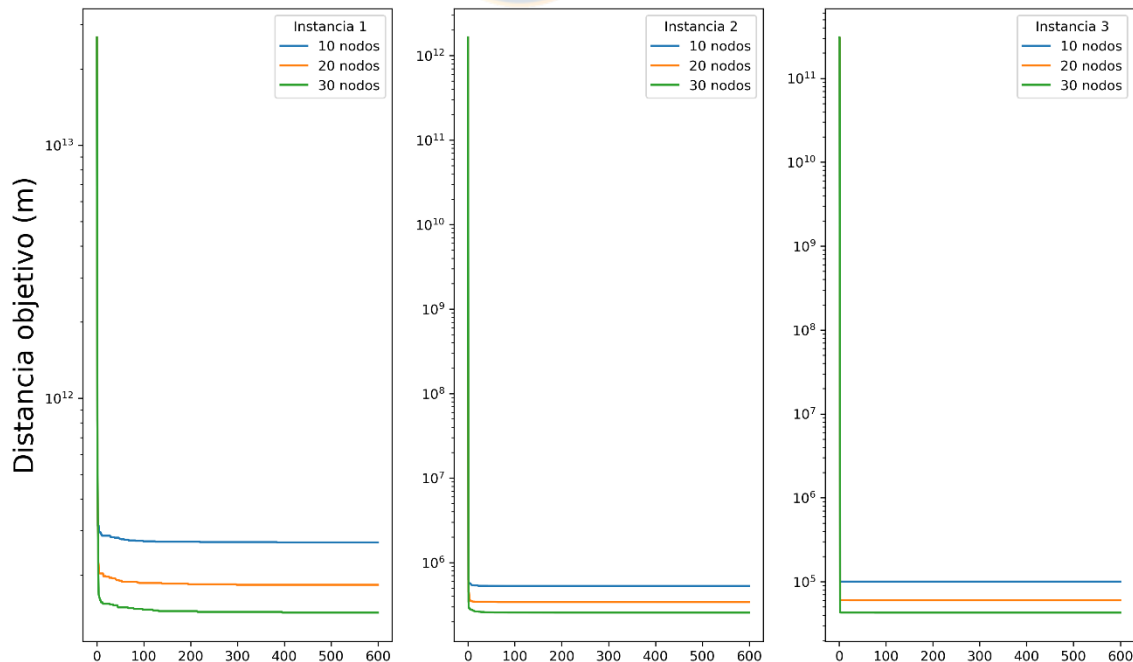


Figura 13. Desempeño del modelo matemático utilizado para minimizar la función objetivo.

Fuente: elaboración propia

Tabla 2: Comportamiento del modelo matemático propuesto

		Instancias de prueba								
		IN01			IN02			IN03		
		10 HUBS	20 HUBS	30 HUBS	10 HUBS	20 HUBS	30 HUBS	10 HUBS	20 HUBS	30 HUBS
Entradas (puntos de demanda)		4504			965			193		
Cantidad estaciones		10 HUBS	20 HUBS	30 HUBS	10 HUBS	20 HUBS	30 HUBS	10 HUBS	20 HUBS	30 HUBS
Recursos computacionales	Iteraciones para alcanzar mínima distancia	9.884	13.750	10.998	31.007	44.324	82.791	13.032	49.605	91.064
	Tiempo computacional	222	195	132	146	142	268	4	23	14
Cobertura de demanda	Estaciones	12,2%	22,7%	36,6%	16,2%	31,4%	44,6%	7,3%	21,8%	27,5%
	Participación de operador	40,2%	63,8%	78,7%	44,6%	70,0%	83,0%	31,7%	50,3%	55,4%
	Demanda desatendida	59,8%	36,2%	21,3%	55,4%	30,0%	17,0%	68,4%	49,7%	44,6%
Costo estimado relocalización*	Mediado por operador	\$ 150.956	\$ 221.582	\$ 226.973	\$ 32.805	\$ 44.587	\$ 44.356	\$ 5.639	\$ 6.584	\$ 6.464
	Mediado por camion relocalizador 1/2 jornada	\$ 491.417	\$ 491.417	\$ 441.209	\$ 441.209	\$ 428.656	\$ 421.125	\$ 421.125	\$ 416.104	\$ 413.315
	TOTAL modelo Mixto	\$ 642.373	\$ 712.999	\$ 668.182	\$ 474.014	\$ 473.244	\$ 465.481	\$ 426.764	\$ 422.688	\$ 419.779
	Costo relocalización sin operador	\$ 976.709	\$ 971.437	\$ 864.041	\$ 874.283	\$ 841.547	\$ 819.857	\$ 628.048	\$ 613.231	\$ 606.185

* Costo relocalización de puntos desatendidos mediante camiones de carga (inc. personal y combustible) considerando modelo Mixto e individual; Costo máximo pagado a operador por viaje: \$120;

4.5 Integración de la participación del usuario al modelo propuesto

4.5.1 Orientación de propuesta de integración

El diseño de una red de BCFs contempla, dentro de sus puntos críticos, la necesidad de contar con un plan efectivo de redistribución de bicicletas hacia zonas de alta demanda, orientado a aumentar la disponibilidad del servicio a los usuarios y, al mismo tiempo, a disminuir la dispersión de los vehículos, la carga de trabajo de los operarios y, por consiguiente, los costos relacionados con la relocalización. Con el modelo matemático propuesto en esta investigación se logra localizar las estaciones de forma eficiente en puntos de alta demanda, en un periodo de tiempo determinado, sin embargo, esta estrategia por sí sola no es suficiente para sustentar la viabilidad del servicio, que contrae intrínsecamente altos costos operacionales.

En base a lo anterior y a la evaluación de la demanda de viajes estudiada para la ciudad de Concepción, se propone la posibilidad de integrar la participación de usuarios del servicio como “operadores temporales” que contribuyan a mantener el equilibrio del sistema, ya sea descongestionando estaciones sobrepobladas, como también relocalizando vehículos dispersos hacia estaciones con déficit de bicicletas. La retribución al usuario se plantea en base a un descuento sobre el costo del servicio, que actualmente en Chile opera bajo un modelo de suscripción mensual, semestral o anual.

La empresa Mobike, por ejemplo, cifra el costo de servicio por US\$12,5 mensuales y USD\$50 de forma semestral. Por lo tanto, se sugiere establecer el incentivo al usuario al momento en que este recoge una bicicleta para su uso y fija el destino final e incentivarlo con un descuento en su suscripción, tal como diversos autores han demostrado que resulta eficiente (Ban & Hyun, 2019a; Fricker & Gast, 2016; Pfrommer et al., 2014; Reiss & Bogenberger, 2017; Singla et al., 2015). De este modo, se genera un descuento por viaje que se acumula en la cuenta del usuario colaborador y varía de acuerdo con el estado de balance del sistema, entregando mayores beneficios por colaborar sobre estaciones altamente desbalanceadas. Según Reiss y Boegenebrger (Reiss & Bogenberger, 2017), este descuento podría tomar rangos de entre un 10% por tramos de 500 metros, hasta un 30 a 60% en tramos que superan 1 km de viaje. Así también, en un modelo mixto en el cual participan a medio tiempo camiones de redistribución apoyados por colaboradores temporales, las zonas sugeridas pueden ser sitios de encuentro con estos vehículos, facilitando de este modo la disminución de la dispersión de bicicletas a través de la ciudad.

La factibilidad económica de implementar este sistema mixto queda demostrada, al menos de forma preliminar, al aproximar los costos de operación de redistribución para los resultados obtenidos desde la instancia IN02 con 20 estaciones (Tabla 2). En ella podemos estimar un ahorro de hasta un 44% en comparación con el costo calculado para la redistribución mediada únicamente por la empresa operadora, el cual contempla el uso de un camión de carga de

hasta 3000 kg, una jornada de 8 horas de trabajo de dos operadores (conductor + peoneta), pagando el sueldo mínimo a cada uno (\$338.128) y considerando solo el costo de combustible consumido por completar la ruta de distribución como costo variable. Según Singla (Singla et al., 2015) este valor de operación se acerca a un promedio de USD\$56 la hora, en condiciones reales de operación donde la carga de distribución es variable.

4.5.2 Propuesta de integración

Como se señaló en el Capítulo 3, se analizó la factibilidad de utilizar la Métrica de Desequilibrio/Reequilibrio (RIM), propuesta por Ban y Hyun (Ban & Hyun, 2019a) para calcular el estado de distribución de un sistema de bicicletas urbano en un intervalo definido de tiempo. Este indicador resulta indispensable para integrar un modelo de incentivo al usuario con el modelo matemático propuesto para la localización de estaciones, pues permite establecer el estado de balance de cada estación y apuntar directamente a aquellas que se encuentran muy congestionadas, o demasiado exhaustas.

El RIM estipula que el desbalance se pierde en una estación si el valor absoluto de bicicletas que ella contiene tiene alguna variación, lo que aplica tanto si se toma prestada una bicicleta de una estación exhausta, como si se deposita una bicicleta extra en una estación ya congestionada. Así, la desviación estándar de la cantidad insuficiente/sobrepasada de bicicletas en cada estación resulta en

una métrica extrapolable al estado de distribución del sistema y su balance general con respecto al conjunto de estaciones dispersas por la ciudad. Como base para calcular el desbalance, se considera la relación entre la capacidad Q de cada estación y la demanda que carga cada estación (q_i), parámetros que se vinculan con el modelo de programación matemática propuesto en la sección 3.2.1.

La fórmula para calcular el RIM es la siguiente:

$$\sum_{i=1}^N \begin{cases} 0, & (D_i \geq R) \\ \left(1 - \left(\frac{D_i}{R}\right)^2\right) * B_i, & (D_i < R) \end{cases} \quad (6)$$

Así, el RIM de cada estación se define entonces como la sumatoria de las ecuaciones de distancia D para cada estación i perteneciente al conjunto de estaciones N . El valor B es la varianza para el desbalance de bicicletas aparcadas en cada estación i . El valor R corresponde a la máxima distancia sobre la que se calcula el RIM y es definida por el operador para ajustar el sistema. Así, cuando la distancia D_i es mayor o igual a R , el valor del RIM es 0.

Según lo observado por Ban y Hyun (Ban & Hyun, 2019a), un valor bajo de R puede ayudar a resolver desbalances en regiones pequeñas de forma muy rápida, pero genera desbalances generales con el tiempo. Un valor de R alto, por otro lado, puede resolver desbalances generales, pero puede resultar ineficiente

resolviendo desbalances de bicicletas a nivel de estaciones contiguas. El cálculo de los distintos RIM que componen la región en estudio permite obtener un mapeo del estado del sistema y, por lo tanto, la diferencia entre los RIM de estaciones conjuntas ($dRIM$), puede utilizarse para determinar cuándo conviene movilizar una bicicleta de una estación con sobrepasada a una con déficit de bicicletas, cada vez que el valor de $dRIM$ es mayor que el límite de incentivo que se puede pagar al usuario-operador que acepta la oferta. Mantener un nivel bajo de RIM, por lo tanto, es un indicador de que el desbalance del sistema de bicicletas se ha manejado de manera estable.

Como el RIM se calcula a partir de los datos de uso de bicicletas desde las estaciones en el espacio de tiempo que es analizado el sistema, resulta también válido para un enfoque de análisis dinámico del sistema si se proporciona información en tiempo real.

Los parámetros de usuario que influyen directamente en el RIM son:

- i. Cantidad de incentivo apropiado (I_a)
- ii. Disponibilidad de participación (P_a)
- iii. Distancia dispuesta a transar (D_a)

El primer parámetro (I_a) indica el monto de incentivo apropiado que el usuario considera transable por la distancia extra que deberá recorrer. El segundo parámetro (P_a) indica si el usuario está dispuesto a tomar la oferta. El tercer parámetro (D_a) indica si la estación propuesta como objetivo se encuentra

a una distancia aceptable para que el usuario considere participar. Estos parámetros pueden ser obtenidos en una primera instancia desde encuestas aleatorias a usuarios frecuentes del sistema, para posteriormente parametrizarse según el comportamiento de los usuarios una vez que el sistema se encuentra en marcha. De este modo, podemos definir una propuesta de integración que sigue la lógica expuesta en el Pseudocódigo de la Figura 14.



Pseudocódigo propuesto para integrar participación del usuario

Inicio /cuando un usuario accede a la estación

IF usuario quiere rentar una bicicleta:

For otra estación en cada estación:

Da = Distancia entre estación inicial y una cercana

IF Da <= R (D_max):

dRIM = RIM de estación cercana – RIM estación inicial

IF dRIM > limite de incentivo:

recomendar estación / list.add(estación cercana)

IF estación recomendada no está vacía:

Buscar estación alternativa = la más cercana en list.recomendadas

IF random (0,1) < ratio de participación de estación alternativa:

Do rentar la bicicleta de estación alternativa sugerida

Else:

Do rentar bicicleta en estación inicial

Else:

Do rentar bicicleta en estación inicial

Else if usuario devuelve bicicleta:

For other station in every station:

Da = Distancia entre estación inicial y una cercana

IF Da <= R:

dRIM = RIM de estación cercana – RIS estación inicial

IF dRIM > limite de incentivo:

recomendar estación / list.add(estación cercana)

IF estación recomendada no está vacía:

Buscar estación alternativa = la más cercana en list.recomendadas

IF random (0,1) < ratio de participación de estación alternativa:

Do devolver bicicleta en estación alternativa sugerida

Else:

Do devolver bicicleta en estación inicial

Else:

Do devolver bicicleta en estación inicial

Figura 14. Pseudocódigo propuesto para integrar participación de usuario. Fuente: elaboración propia, adaptado desde (Ban & Hyun, 2019a)

CAPÍTULO 5 - DISCUSIÓN

La información levantada desde la base de datos entregada por SECTRA representa la línea basal más actualizada que existe en cuanto a caracterización de demanda de viajes para la comuna de Concepción. Esta actividad permitió definir y caracterizar tanto temporal como espacialmente, los puntos de demanda en que los usuarios requerían del transporte público para movilizarse, permitiendo retratar de forma gráfica dicha demanda en los resultados expuestos en la sección 4.2. Con ello, se pudo observar una marcada demanda concentrada en la ciudad de Concepción, localizada particularmente en sitios de interés legal, laboral, bancario, comercial, educacional y turístico, aspecto que resulta particularmente relevante al momento de diseñar una red de transporte compartido urbano que requiere establecer estaciones que recojan dicha demanda. Asimismo, se constataron momentos en el día donde se concentra la mayor cantidad de solicitudes, que en su mayoría confluían de forma concentrada sobre el sector céntrico de la ciudad.

A partir de esta información, se generaron y caracterizaron un conjunto de datos geo-referenciados en la sección 4.3 que posteriormente fueron encausados hacia el desarrollo de instancias de prueba que, finalmente, serían analizadas por el modelo desarrollado en este trabajo. Los principales desafíos sobrepasados en esta etapa tienen relación con el manejo y normalización de gran cantidad de información de demanda contenida en las bases de datos, que en su mayoría se

encontraba afecta a errores de digitación que generaban problemas de compatibilidad con los mecanismos propuestos para el análisis de datos. De todas maneras, las instancias generadas para probar el algoritmo que sustenta la resolución del modelo matemático fueron normalizadas efectivamente y la metaheurística detrás de esta conversión se encuentra disponible en el Anexo 1 del presente estudio.

En la sección 4.4 se presentó la evaluación del modelo de programación matemática que resuelve el problema de localización eficiente de estaciones de recogida para un sistema de bicicletas compartidas flotantes (BCFs). Este modelo se implementó de forma satisfactoria en lenguaje Python y entrega como resultado el índice de cada estación solicitada que, al ser ubicada en sitios particulares mediante la metaheurística desarrollada, minimiza la distancia total a recorrer entre los puntos de demanda que se dirigen sobre dichas estaciones, es decir, contribuye a maximizar la atención de la demanda que ocurre en una ventana de tiempo particular. Este procedimiento puede llegar a una solución certera en tiempos menores a 4 segundos, considerando instancias desde 193 a 4500 entradas. Estos tiempos resultan adecuados para que tomadores de decisiones dispongan de información relevante, orientada a evaluar el estado del sistema y eventualmente, podrían ser mejorados para poder responder con mayor rapidez a las demandas que ocurren de forma dinámica, como por ejemplo las observadas durante el análisis en tiempo real de la demanda.

La eficiencia del modelo es reflejada si comparamos la cobertura de demanda determinada para el conjunto de 25 estaciones seleccionadas a partir de la ubicación de zonas de alta demanda dentro de la ciudad de Concepción (Figura 9) versus, el conjunto de ubicaciones que entrega el modelo para la instancia IN02 (Figura 11). Así, en la primera condición se obtiene un 64,5% de demanda desatendida, mientras que, para las 20 estaciones obtenidas con el modelo, las estaciones desatendidas disminuyen al 30%. Esta diferencia se incrementa aún más cuando el modelo se fija en 30 estaciones, alcanzando un 17% de demanda desatendida. Aumentar el número de estaciones, sin embargo, no genera mayores beneficios en cuanto a la captura de demanda estudiada para la ciudad de Concepción, y eventualmente podría encarecer, el sistema de bicicletas compartidas.

Asimismo, se observó un potencial beneficio económico derivado de la utilización de un modelo mixto de relocalización (ver Tabla 2), que permite ahorrar entre 25 a 40% de los costos operacionales, si es que este servicio operase en Concepción tal como ocurre en otros centros urbanos de mayor experiencia en la utilización de éstos sistemas de movilidad compartida.

Finalmente, la sección 4.5 presenta una propuesta de integración del modelo propuesto con un modelo colaborativo que integra a los mismos usuarios del servicio para que colaboren temporalmente en el restablecimiento del equilibrio del sistema. Estos usuarios podrían contribuir en la captura de

demanda no satisfecha acercando bicicletas hacia esos puntos, a cambio de un descuento en su suscripción al servicio. El beneficio percibido variaría entre un 10 a 60% de descuento sobre cada viaje que el colaborador decida apoyar, cada vez que “negocia” dejar el vehículo en la ubicación recomendada por caminar una cierta distancia hacia el sitio donde originalmente se dirigía. Este modelo mixto ha sido estudiado en grandes centros urbanos que administran servicios de bicicletas compartidas (Ban & Hyun, 2019b; Reiss & Bogenberger, 2017), en los cuales ha logrado impactar positivamente al balance y sustentabilidad del Sistema. Así, en base a lo expuesto anteriormente, podemos inferir que un sistema como el propuesto sería factible de implementar en un futuro sistema de movilidad compartida instaurado en la ciudad de Concepción.

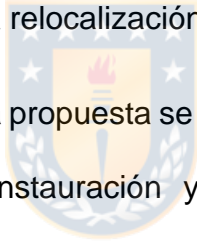


CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES

El modelo de programación matemática propuesto en esta investigación logra resolver, de forma eficiente y oportuna, el problema de relocalización de BCFs para el caso de la ciudad de Concepción.

Los resultados obtenidos permiten sustentar que, tras la implementación de un modelo mixto de relocalización, en el cual participan como operadores temporales los mismos clientes, se consigue un aumento sustancial en la cobertura del servicio, así como también la disminución de los gastos operacionales asociados a la relocalización de los vehículos.

En consecuencia, esta propuesta se convierte en el primer estudio general destinado a proyectar la instauración y uso de un sistema de bicicletas compartidas en la ciudad de Concepción y sus resultados deberían considerarse como base para futuros estudios que busquen mejorar la respuesta del modelo y su integración con las nuevas tecnologías que involucran el acceso a datos en tiempo real.



GLOSARIO

BCFs	:	Bicicletas Compartidas Flotantes
BRP	:	Bike Repositioning Problem
CO ₂	:	Dióxido de Carbono
OECD	:	Organisation for Economic Co-operation and Development
PDP	:	Pickup and Delivery Problem
NLNS	:	Nested Variable neighborhood search
VND	:	Variable Neighborhood Descent
SECTRA	:	Secretaría de planificación de Transporte
RIM	:	Rebalance / imbalance metric
dRIM	:	variación de Rebalance / imbalance metric

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcalde, I. (2018). *Connecting Cities | Ignacio Alcalde | TEDxUDEusto*.

<https://www.youtube.com/watch?v=XOXOzGiz5fQ>

Ban, S., & Hyun, K. H. (2019a). Designing a User Participation-Based Bike Rebalancing Service. *Sustainability*, 11(8), 2396. <https://doi.org/10.3390/su11082396>

Ban, S., & Hyun, K. H. (2019b). Curvature-based distribution algorithm: Rebalancing bike sharing system with agent-based simulation. *Journal of Visualization*, 22(3), 587–607. <https://doi.org/10.1007/s12650-019-00557-6>

Becker, H., Balac, M., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2019). Assessing the welfare impacts of Shared Mobility and Mobility as a Service (MaaS). *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, S0965856418311212.

<https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.027>

Bike Sharing Market to surpass USD 10 Billion by 2025: Global Market Insights, Inc.

(2019, agosto 20). [https://www.globenewswire.com/news-](https://www.globenewswire.com/news-release/2019/08/27/1906946/0/en/Bike-Sharing-Market-to-surpass-USD-10-Billion-by-2025-Global-Market-Insights-Inc.html)

[release/2019/08/27/1906946/0/en/Bike-Sharing-Market-to-surpass-USD-10-Billion-by-2025-Global-Market-Insights-Inc.html](https://www.globenewswire.com/news-release/2019/08/27/1906946/0/en/Bike-Sharing-Market-to-surpass-USD-10-Billion-by-2025-Global-Market-Insights-Inc.html)

Caggiani, L., Camporeale, R., Ottomanelli, M., & Szeto, W. Y. (2018). A modeling framework for the dynamic management of free-floating bike-sharing systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 87, 159–182.

<https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.01.001>

- Caggiani, L., & Ottomanelli, M. (2013). A Dynamic Simulation based Model for Optimal Fleet Repositioning in Bike-sharing Systems. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 87, 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.10.604>
- Car Sharing Market Statistics—2024 Industry Share Forecasts*. (2018, abril). <https://www.gminsights.com/industry-analysis/carsharing-market>
- CB Insights. (2019). *Micro Mobility Market & Companies | CB Insights*. Micro Mobility Market. <https://www.cbinsights.com/research/report/micromobility-revolution/>
- Chemla, D., Meunier, F., & Wolfler Calvo, R. (2013). Bike sharing systems: Solving the static rebalancing problem. *Discrete Optimization*, 10(2), 120–146. <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2012.11.005>
- Church, R., & ReVELLE, C. (1974). The maximal covering location problem. *PAPERS OF THE REGIONAL SCIENCE ASSOCIATION*, 32(1), 101–118. <https://doi.org/10.1007/bf01942293>
- Diario Concepción, D. (2019). *Ciclovías del Gran Concepción superan las 100 mil pasadas en sólo tres meses*. Diario Concepción. <https://www.diarioconcepcion.cl/ciudad/2019/03/31/ciclovias-del-gran-concepcion-superan-las-100-mil-pasadas-en-solo-tres-meses.html>
- Fricker, C., & Gast, N. (2016). Incentives and redistribution in homogeneous bike-sharing systems with stations of finite capacity. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 5(3), 261–291. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0053-5>
- Fulton, L., Mason, J., & Meroux, D. (2017). *Three Revolutions in Urban Transportation: How To Achieve the Full Potential of Vehicle Electrification, Automation, and Shared Mobility in Urban Transportation Systems Around the World by 2050*. 41.

- Ho, S. C., & Szeto, W. Y. (2014). Solving a static repositioning problem in bike-sharing systems using iterated tabu search. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *69*, 180–198.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.05.017>
- Ho, S. C., & Szeto, W. Y. (2017). A hybrid large neighborhood search for the static multi-vehicle bike-repositioning problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, *95*, 340–363. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.11.003>
- INVERS. (2018, diciembre 13). *5 Ways Shared Mobility will be Different in 2019 – INVERS*. <https://invers.com/news/5-ways-shared-mobility-will-be-different-in-2019/>
- ITDP. (2014). *Bike-Share Planning Guide*. <https://itdpdotorg.wpengine.com/wp-content/uploads/2014/07/ITDP-Bike-Share-Planning-Guide-1.pdf>
- Kadri, A. A., Kacem, I., & Labadi, K. (2016). A branch-and-bound algorithm for solving the static rebalancing problem in bicycle-sharing systems. *Computers & Industrial Engineering*, *95*, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.02.002>
- LEY-20285 20-AGO-2008 MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA*. (2008, agosto 20). Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional.
<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=276363>
- Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M., & Abd. Majid, M. Z. (2015). A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2 emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *43*, 843–862.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>

O'brien, O. (2020). *Bike Share Map*. Bike Share Map. <https://bikesharemap.com/#/3/-60/25/>

Pal, A., & Zhang, Y. (2017). Free-floating bike sharing: Solving real-life large-scale static rebalancing problems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80, 92–116. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.016>

Pfrommer, J., Warrington, J., Schildbach, G., & Morari, M. (2014). Dynamic vehicle redistribution and online price incentives in shared mobility systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(4), 1567–1578. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2303986>

Por qué 2030 es la fecha límite de la humanidad para evitar una catástrofe global—BBC News Mundo. (2018). <https://www.bbc.com/mundo/noticias-45785972>

Provo (movement)—Wikipedia. (s. f.). Recuperado 2 de enero de 2020, de [https://en.wikipedia.org/wiki/Provo_\(movement\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Provo_(movement))

Raviv, T., Tzur, M., & Forma, I. A. (2013). Static repositioning in a bike-sharing system: Models and solution approaches. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2(3), 187–229. <https://doi.org/10.1007/s13676-012-0017-6>

Regue, R. (2014). *Proactive vehicle routing with inferred demand to solve the bikesharing rebalancing problem*. 18.

Reiss, S., & Bogenberger, K. (2017). A Relocation Strategy for Munich's Bike Sharing System: Combining an operator-based and a user-based Scheme. *Transportation Research Procedia*, 22, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.016>

- Schaller, B. (2017, febrero). *UNSUSTAINABLE? The Growth of App-Based Ride Services and Traffic, Travel and the Future of New York City*.
<http://schallerconsult.com/rideservices/unsustainable.htm>
- Shaheen, S. A., & Cohen, A. P. (2007). Growth in Worldwide Carsharing: An International Comparison. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1992(1), 81–89. <https://doi.org/10.3141/1992-10>
- Shaheen, S., Chan, N., Bansal, A., & Cohen, A. P. (2015). *SharedMobility. A sustainability & Technologies Workshop. Definitions, Industry Developments, and Early Understanding*. TSRC, UC Berkeley.
- Shared-Use Mobility Center. (2019). *What Is Shared Mobility?* Shared-Use Mobility Center. <https://sharedusemobilitycenter.org/what-is-shared-mobility/>
- Shui, C. S., & Szeto, W. Y. (2018). Dynamic green bike repositioning problem – A hybrid rolling horizon artificial bee colony algorithm approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 60, 119–136.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.023>
- Singla, A., Santoni, M., Bartok, G., Mukerji, P., Meenen, M., & Krause, A. (2015). *Incentivizing Users for Balancing Bike Sharing Systems*. 7.
- Sun, Z., Li, Y., & Zuo, Y. (2019). Optimizing the Location of Virtual Stations in Free-Floating Bike-Sharing Systems with the User Demand during Morning and Evening Rush Hours. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 1–11.
<https://doi.org/10.1155/2019/4308509>

- Szeto, W. Y., Liu, Y., & Ho, S. C. (2016). Chemical reaction optimization for solving a static bike repositioning problem. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, 104–135. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.05.005>
- Vogel, P., Greiser, T., & Mattfeld, D. C. (2011). Understanding Bike-Sharing Systems using Data Mining: Exploring Activity Patterns. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 514–523. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.058>



ANEXOS

El código que permite implementar la metaheurística propuesta en esta tesis se encuentra en el archivo adjunto (Jupyter Notebook), disponible en el siguiente link:

https://github.com/cacorojasgon/Paper---Sustainability-2020/blob/main/Codigo_Tesis_CRGv3.ipynb.



