UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2018

REDISEÑO DE UNA RED DE BIKE SHARING

CUEVAS COLLANTE, SIMÓN DAVID

http://hdl.handle.net/11673/42153

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Universidad Federico Santa María
Departamento de Industrias
Campus Santiago Vitacura
ICIPEV

Rediseño de una red de Bike Sharing

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial

Alumno: Simón Cuevas Collante

Profesor Guía: Víctor M. Albornoz Sanhueza

Profesor Correferente: Luis Acosta Espejo

Fecha entrega documento: 11 de abril, 2018

Revisión borrador: 30 de marzo, 2018 - Profesor V. Albornoz S.

Índice

Índice 2

Resumen Ejecutivo 4

Capítulo 1. Introducción 5

1.1 Motivación 5

1.2 Objetivo General 5

1.2.1 Objetivos específicos 5

1.3 Alcance 5

1.4 Estructura 6

Capítulo 2. Justificación del Problema 7

2.1 Uso de Bicicleta en la Región Metropolitana 7

2.2 Sistemas de Bike Sharing 9

2.3 Sistema de bicicletas públicas de Las Condes 9

Capítulo 3. Marco Teórico 11

3.1 Localización de Instalaciones 11

3.2 Problema de la P-Mediana 12

3.3 Problemas de Cobertura 14

3.3.1 Set Covering Problem 14

3.3.2 Maximal Covering Problem 16

3.4 Center Problem 17

3.5 Localización de Hubs 19

3.6 Clasificaciones de Hub Location Problems 21

3.7 Tipos de problemas de Hub Location 22

3.7.1 P-Hub Location Problem 22

3.7.2 P-Hub Median Location Problem 23

3.7.3 Hub Set Covering Location Problem 25

3.7.4 P-Hub Maximal Covering Location Problem 26

3.7.5 Hub location en ambientes competitivos 28

3.8 Problemas de localización y diseño de redes de Bike Sharing 29

Capítulo 4. Desarrollo 30

4.1 Modelo propuesto 30

4.1.1 Formulación 30

4.2 Determinación de Nodos candidatos 31

4.3 Determinación Nodos de origen/destino y cuantificación de la demanda 34

Capítulo 5. Resultados y análisis de sensibilidad 37

Capítulo 6. Conclusiones 40

Capítulo 7. Referencias 41

Resumen Ejecutivo

El presente trabajo muestra una potencial aplicación de un modelo de programación entera lineal como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en un proceso de planificación de la expansión de una red de Bike Sharing.

Para analizar el problema se utilizó un modelo de programación entera lineal ya existente en la literatura, que puede ser categorizado dentro de los P-Hub Maximal Covering Location Problem y se resolvió por medio del solver CPLEX.

El ejercicio se basó en la distribución actual de la red de bicicletas del sistema Bici Las Condes proponiendo una expansión de la red, por medio de la instalación de nuevos paraderos y la relocalización de otros desde su actual posición a una nueva. La demanda fue simulada a partir de los datos de viajes disponibles en la Encuesta de Origen y Destino del Ministerio de Transportes y las distancias medidas por medio de Google Maps. La situación inicial del modelo cuenta con 89 paraderos y una demanda cubierta de 2102 viajes, la cual puede crecer hasta los 2470 traslados atendidos con ciertas combinaciones de paraderos nuevos y paraderos relocalizados, según los resultados obtenidos.

Se determinó que la distribución actual de paraderos no es óptima, esto implica que la decisión de relocalizar o de ampliar el número de paradero sea apropiada en el espectro de variación analizado, dejando la decisión en función de los costos que implique cada opción. También se estudió el impacto de exigir a la red un mejor nivel de servicio por medio de una menor distancia de cobertura y se determinó que es infactible mantener o aumentar la cobertura con los nodos candidatos planteados y la demanda estudiada, así sea se agreguen paraderos posibles.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación

La elección del tema fue motivada por el interés del alumno por profundizar y aplicar a situaciones cotidianas alguno de los modelos de programación entera lineal estudiados en la asignatura de Gestión de Operaciones 2 y metodologías propias de la Investigación Operativa.

1.2 Objetivo General

Este trabajo tiene por objetivo aplicar un modelo de programación matemática para apoyar las decisiones de diseño relacionadas a la expansión o relocalización de paraderos del sistema de Bike Sharing en la comuna de Las Condes.

1.2.1 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo principal de esta memoria, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Definir área de estudio.
- Identificar la ubicación de los actuales paraderos actuales.
- Identificar nuevas ubicaciones dentro del área de estudio.
- Aproximar magnitud de flujos potenciales entre nodos.
- Identificar reglas y condiciones de funcionamiento del sistema.
- Identificar, modificar y resolver un modelo de programación entera lineal.
- Sensibilizar resultados obtenidos en la resolución del modelo para identificar el comportamiento de las variables.
- Obtener conclusiones respecto de la expansión propuesta.

1.3 Alcance

La memoria contempla la aplicación de un modelo de programación entera lineal desarrollado para localización de hubs. El modelo fue elegido a partir de una la revisión bibliográfica que se enfoca en problemas de localización de instalaciones y localización de Hubs.

Los datos de distancias fueron calculadas por medio de Google Maps mientras que se utilizó la distribución de manzanas del mapa cartográfico Precenso del INE.

1.4 Estructura

El siguiente apartado entrega una referencia sobre el uso de las bicicletas como medio de transporte en Chile y particularmente en la Región Metropolitana. Se basa en una revisión de prensa de publicaciones actuales para mostrar el aumento de interés por parte de la ciudadanía y el creciente esfuerzo de las autoridades por responder a dichas demandas. Por parte de los usuarios las solicitudes toman forma a través de la exigencia por mayor cantidad y calidad de infraestructura para desplazarse en bicicletas de manera segura y fácil.

A continuación se presenta una revisión sobre sistemas de Bike Sharing, o sistemas de bicicletas compartidas en español, en otras ciudades que los han implementado de manera exitosa, incluyéndolos como parte del sistema público de transporte urbano o alternativas privadas de uso masivo. Finalizando esta sección con una breve reseña respecto a los sistemas existentes en Santiago y particularmente Bici Las Condes, el cual se encuentra activo y pertenece exclusivamente a la comuna de Las Condes.

El tercer capítulo aborda la revisión bibliográfica sobre modelos matemáticos denominados Facility Location y en particular de un sub grupo llamado Hub Location, utilizado principalmente en el diseño de redes. Se tiene por finalidad entregar al lector un marco de referencia para entender posteriormente el modelo propuesto y el background científico existente que sustenta la aplicación propuesta del modelo.

Luego se introduce el modelo con el que se trabajará para la búsqueda de las localizaciones óptimas de los paraderos de bicicletas. Junto con eso se exhiben los resultados y el análisis de sensibilidad de dichos resultados.

Finalmente se entregan conclusiones respecto del análisis de sensibilidad, del aprendizaje obtenido al trabajar con los tópicos elegidos y otras propias de realizar un proyecto de título.

Capítulo 2. Justificación del Problema

2.1 Uso de Bicicleta en la Región Metropolitana

El uso de la bicicleta con fines recreativos y de transporte es cada vez más común en la Región Metropolitana. Si el año 2012 según la encuesta de Origen y Destino realizada en la capital, diariamente se movían alrededor de 747 mil ciclistas, el 2017, en base a la estimación de un experto en la materia la cifra en promedio superaría el millón de usuarios por día[1].

Para mantener la tendencia actual en el mayor uso de la bicicleta como medio de transporte, también es necesario que crezca la infraestructura disponible, tanto ciclovías como estacionamientos, declara el mismo experto. Según algunos artículos de prensa la Intendencia Metropolitana declaró al finalizar el año 2016 que Santiago contaba con aproximadamente 280 kilómetros de ciclovías repartidos por la ciudad, los que incluso podrían ser más en la actualidad porque se siguen desarrollando proyectos de este tipo en diferentes comunas, pese a que algunos no cumplen con los estándares recomendados por el Ministerio de Urbanismo, según reclaman organizaciones ciudadanas[2]. Destaca entre las obras recientemente inauguradas, el tramo "Mapocho Pedaleable", tanto por lo innovador que resulta para la ciudad este nuevo uso de la cuenca del río, como por el respaldo que tuvo por parte de diferentes organizaciones ligadas al uso de las bicicletas[3].

---

[1] http://www.radiozero.cl/noticias/zero-emision/2017/03/mapocho-pedaleable-y-mas-de-300-kilometros-de-ciclovias-como-santiago-se-podria-convertir-en-amsterdam-de-latinoamerica/

[2] http://www.24horas.cl/nacional/bicicletas-santiago-podria-ser-la-amsterdam-de-latinoamerica-en-30-anos-2323683

[3] http://www.pedaleable.org/mapocho-pedaleable/

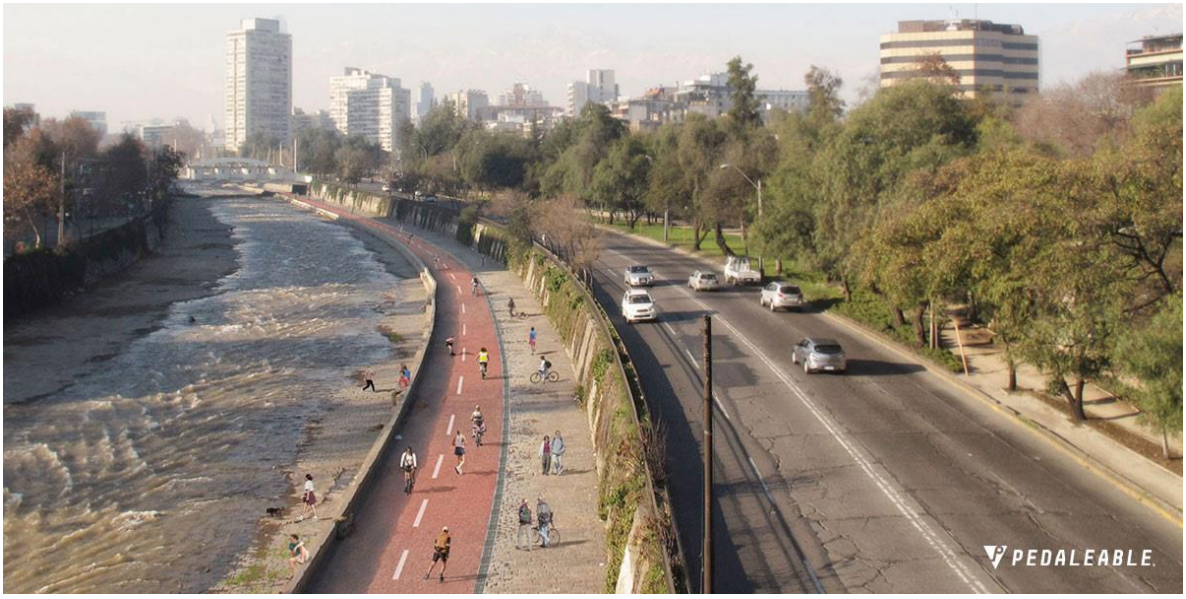

Ilustración 1. Tramo de la maqueta del proyecto final Mapocho Pedaleable, que incluye ciclovías y un paseo peatonal. Fuente:

Pese a lo anterior, aún se observa un déficit en términos de la disponibilidad de estacionamientos. El año 2016 el Ministerio de Vivienda y Urbanismo decretó que tanto las construcciones públicas como privadas deben tener un estacionamiento de bicicletas por cada 2 de autos, pero según "Biciestacionamientos - Estudio ciudadano sobre cumplimiento de normativa en edificios públicos y privados de uso público"[4], desarrollado por la Asociación de Defensa del Consumidor Bicicultura, muchos edificios aún no cumplen la norma en relación a cantidad de estacionamientos, mientras que de los que si la cumplen, existen muchos que no están acorde a los estándares exigidos. Adicionalmente, el mismo estudio revela que muchos usuarios creen que una mayor presencia de estacionamientos podría hacer que más personas se sumen al uso de bicicletas para tramos cortos.

A lo anterior vale agregar que en la actualidad está en discusión en el Congreso Nacional, la Ley de Convivencia Vial, que modifica la actual Ley de Tránsito, generado una serie de exigencias y derechos nuevos para ciclistas.

[4] http://www.elmostrador.cl/cultura/2017/03/13/aumenta-el-uso-de-la-bicicleta-en-santiago-pero-no-hay-donde-estacionar/

2.2 Sistemas de Bike Sharing

El concepto de Bike Sharing nació en 1965 en Ámsterdam, Holanda y consiste en el uso compartido de bicicletas. En la actualidad ya son más de 1440 sistemas que están activos en todo el mundo y alrededor de 220 ciudades están planificando implementar algún proyecto de esta naturaleza, según el Bike Sharing World Map[5]. Ciudades como Barcelona, Berlín, Buenos Aires, Ciudad de México y Paris cuentan en la actualidad con sistemas de este tipo. Los hay con diferentes alcances, objetivos y tecnologías, por ejemplo algunos son administrados por entidades públicas, otros son implementados y gestionados por empresas privadas que obtienen una ganancia por ponerlos a disposición de una comunidad, municipio o incluso una ciudad, hasta otros que son ofrecidos directamente como un servicio llevado a cabo por privados.

El uso de bicicletas no genera impacto medioambiental directamente y al incluirlo como parte de las alternativas que manejan los planificadores de transporte público, se observa descongestionamiento de zonas con alta demanda, entregando a los usuarios una opción para recorrer distancias cortas de manera rápida, autónoma y económica.

Estos sistemas permiten a los usuarios retirar y devolver bicicletas en los paraderos del sistema, generalmente ofrecen un tiempo de uso gratuito y posterior a ese lapso se cobran tarifas relativamente bajas por fracciones adicionales de tiempo de uso. De este modo se pone a disposición de los usuarios una bicicleta solo por el tiempo que la requieren y se soluciona el problema de disponibilidad de estacionamientos.

Se observan diferencias en el tipo de tecnología implementada para las estaciones y en las bicicletas, los sistemas de inscripción, la organización que los administra y su alcance.

Actualmente en Santiago, conviven dos sistemas, Bike Santiago y Bici Las Condes. El primero abarca las comunas de Estación Central, Independencia, La Florida, Lo Barnechea, Lo Prado, Macul, Maipú, Ñuñoa, Providencia, Recoleta, San Joaquín, San Miguel, Santiago y Vitacura, mientras que el segundo solo cubre la comuna de Las Condes.

La ubicación de los paraderos juega un rol importante dentro de la planificación de un sistema de Bike Sharing, dado que la distancia entre la estación de regreso de la bicicleta y el destino

2.3 Sistema de bicicletas públicas de Las Condes

El sistema de bicicletas públicas de la comuna de Las Condes vigente desde el año 2014 a la fecha, denominado *Bici Las Condes,* pretende entregar a los vecinos y quienes trabajan en la comuna,

[5] Sitio web que reúne información de sistemas de Bike Sharing a lo largo del mundo, es administrado por la consultora MetroBike. Esta consultora ha sido citada en diversos artículos de prensa estadounidense por manejar también el , con el mismo objetivo de centralizar y difundir información relativa a estos sistemas.

acceso a un modo de transporte que mejore su calidad de vida y sea amigable con el medio ambiente[6].

Las bicicletas pueden ser usadas gratuitamente por un lapso de 30 minutos desde el retiro y posterior a ese tiempo se cobran 0,04 UF por cada 30 minutos o fracción de uso adicional, y pueden ser devueltas en cualquier estación de la red. Además cabe destacar que existen dos tipos de planes de inscripción, anual y mensual, con un valor de 1,75 UF y 0,22 UF respectivamente.

Ilustración 2. Estación tipo del sistema. Fuente: Sitio Web Bici Las Condes.

El sistema tiene actualmente una red de 89 estaciones y 890 bicicletas. La Ilustración 2, muestra una estación típica del sistema, en la que se aprecia un tótem de atención al usuario y barras horizontales que contiene los estacionamientos. Cada tótem está formado por una pantalla y un lector de tarjetas. Esta tecnología permite al usuario retirar y regresar las bicicletas interactuando únicamente con el tótem. Por su parte las barras horizontales son módulos de tres estacionamientos cada uno y pueden ubicarse varias barras juntas, una al lado de otra, según las necesidades detectadas en cada paradero. Mientras que las bicicletas poseen 3 velocidades, luz delantera y trasera, un canasto y una campana.

El sistema es administrado por la empresa Clear Channel, que cuenta con concesiones similares en Barcelona (España), Ciudad de México y Zaragoza (España).

[6] https://www.bicilascondes.cl/es/servicio/que-es-bici-las-condes

Capítulo 3. Marco Teórico

3.1 Localización de Instalaciones

Los Problemas de Localización de Instalaciones, en inglés Facility Location Problems, consisten en encontrar una ubicación óptima para una o más instalaciones en función del objetivo y de las condiciones propias del escenario modelado. Un dato recurrente en estos problemas es el costo de cubrir una distancia entre un usuario o cliente y su instalación asignada. Este costo puede ser de carácter monetario, de distancia, de tiempo o incluso podría ser considerado como los riesgos asociados al recorrido.

Otras características relevantes en estos problemas son los conceptos de asignación y cobertura. Se dice que la demanda de un usuario ha sido asignada a una instalación, cuando los resultados del modelo determinan que resulta óptimo que dicha instalación sea la encargada de satisfacer a dicho cliente. Mientras que cobertura hace referencia a que se ubiquen instalaciones capaces de satisfacer la demanda de un usuario, a una distancia no mayor que un parámetro definido.

Tradicionalmente la aplicación de estos modelos se realiza sobre la base de un grafo finito, de tamaño abordable técnicamente, compuesto por nodos y por arcos. Los nodos representarán puntos de demanda o puntos de potencial ubicación de un oferente. Los arcos serán elementos que unen dichos nodos. El conjunto de nodos y arcos serán denominados red.

La demanda y la oferta pueden ser de naturalezas tan variadas como la necesidad de las personas de contar con colegios u hospitales, la necesidad de las autoridades por instalar estaciones de policía o bomberos que provean cobertura a los ciudadanos de un sector, o el interés de un privado por llegar a ciertos mercados.

Una breve reseña histórica sobre la aparición y el progreso es desarrollada a continuación, para luego comentar algunos los modelos de localización clásicos y con mayor cantidad de aplicaciones, presentándose se formulación genérica y con especial énfasis en explicar el sentido matemático de cada componente.

Facility Location ha sido un área considerablemente estudiada, pues sus aplicaciones están presentes en una amplia gama de decisiones de la vida humana desde tiempos lejanos y puntualmente se ha convertido en un apoyo relevante para la definición de estrategias de negocios (retail, aeronáutica, telecomunicaciones, logística, entre otros), el diseño de políticas públicas e incluso posee aplicaciones en robótica, por nombrar algunas de las dimensiones en las que está involucrada esta temática. (Drezner & Hamacher, 2002).

Las decisiones de localización generalmente son consideradas de tipo estratégicas dado el impacto de largo plazo que tienen. Tanto la adquisición de un terreno como la construcción o disposición de una instalación resultan habitualmente ser decisiones muy costosas para una organización, por

lo que es poco viable una modificación frecuente. Esta característica hace estas decisiones coexistan de manera inevitable con la incertidumbre asociada a cambios en la población, los mercados, el clima u otros fenómenos que puedan aparecer y afectar las ganancias de un negocio o la eficacia de una política pública.

Los primeros estudios formales sobre teoría de localización, identificados a inicios del siglo XX, están limitados a escenarios determinísticos y estáticos debido a la complejidad que representaba en un inicio la formulación y sobre todo la resolución de modelos que contemplaran la incertidumbre propia de la realidad. A partir de la década de 1960, es posible encontrar desarrollos en 3 líneas diferentes, según la forma en la que el modelo interactúa con la incertidumbre de los datos. Se observan modelos que responden a la forma tradicional, que omiten la incerteza y operan con datos estáticos y determinísticos. Otros modelos que usan datos de naturaleza estocástica, pero estática y por lo tanto se alimentan una vez, obteniéndose un único resultado que considera la probabilidad de ocurrencia de distintos valores para los parámetros. Finalmente hay algunos modelos que operan con datos de naturaleza dinámica, que implica recibir nuevos valores de carácter determinístico en cada periodo de resolución y computar resultados diferentes en cada periodo (Owen & Daskin, 1998).

Desde que el primer estudio de localización, en 1909, fue publicado por Alfred Weber, postulando un modelo para minimizar la distancia total entre un almacén y clientes, la mayor parte de los esfuerzos han sido puestos sobre los modelos de naturaleza estática y determinística. Estos tuvieron en 1964 un nuevo aire, luego de que Hakimi presentara una formulación genérica para problemas de localización de una o más instalaciones en una red, tanto para problemas de minimización de las distancias totales como para aquellos de minimización de la distancia máxima, entre los clientes o usuarios y su instalación más cercana. En la actualidad existe un conocimiento relativamente acabado sobre estas formulaciones de este tipo y gran parte de la atención se enfoca en métodos de resolución para los modelos clásicos que se presentan a continuación (Owen & Daskin, 1998).

3.2 Problema de la P-Mediana

El problema de la P-Mediana minimiza la distancia media recorrida, ponderada por la demanda, entre instalación(es) y foco(s) de demanda.

- Conjuntos

$I =$ Conjunto de nodos de demanda

$J =$ Conjunto de nodos de potenciales ubicaciones de instalaciones

- Parámetros

$h_i =$ Demanda del nodo $i \in$ I

$d_{ij} =$ Distancia entre el nodo de demanda $i \in$ I y la potencial instalación ubicada de $j \in$ J

$p=$ Número de instalaciones a localizar

- Variables

$$X_j = \begin{cases} 1, \text{si se localiza una instalación en el nodo } j \in \text{J.} \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, \text{si el nodo } i \in \text{I es atendido por la instalación del nodo } j \in \text{J.} \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$$

- Función Objetivo

$$Min \sum_{i\in \text{I}} \sum_{j\in \text{J}} d_{ij} h_{ij} Y_{ij} \quad (1)$$

- Restricciones

$$\sum_{j\in \text{J}} X_j = p \quad (2)$$

$$\sum_{j\in \text{J}} Y_{ij} = 1, \qquad \forall i \in \text{I} \quad (3)$$

$$Y_{ij} \leq X_j, \qquad \forall i \in \text{I}, j \in \text{J} \quad (4)$$

$$X_j \in \{0,1\}, \qquad \forall j \in \text{J} \quad (5)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\}, \qquad \forall i \in \text{I}, j \in \text{J} \quad (6)$$

La función objetivo (1) minimiza la distancia total recorrida. La interpretación de esta función varía según el contexto de aplicación. Si se considera en vez de distancia, el tiempo de recorrido, se puede decir que la función minimiza el tiempo de viaje de los usuarios a su instalación más cercana. En otro caso, donde la distancia recorrida es tomada como costo monetario, en el contexto de una cadena de suministros, se podría decir que este problema minimiza el costo operativo de la red de distribución.

Luego, (2) exige que se instalen p instalaciones de oferta. El número de instalaciones debe ser un número entero y puede tomar valores entre 1 e infinito. (3) corresponde a una restricción de asignación la que asegura que toda la demanda de un nodo sea asignada a alguna instalación. Al coexistir en la formulación (3) y (4) se determina que se trata de un modelo de asignación singular, es decir que la demanda de cada nodo se asigna a una sola instalación. Mientras que (4) exige que para asignar demanda a un nodo de oferta, este debe tener una instalación localizada ahí.

Finalmente (5) y (6) corresponden a restricciones de naturaleza de las variables, (5) dice que X es binaria, dado que no se pueden ubicar fracciones de instalaciones.

Un elemento interesante de este modelo está relacionado con el costo medio, distancia media o tiempo medio recorridos por los usuarios para llegar a las instalaciones, las cuales son considerados medidas de efectividad de una instalación. Así mismo, esta medición puede ser

ponderada por la demanda asociada de cada punto de demanda, esta medida es útil cuando la demanda tiene una prioridad igual, es decir, cuando es insensible al nivel de servicio.

Existe para las instalaciones consideradas como “deseables”, una relación inversa entre la efectividad de la instalación y la distancia promedio, pues menor distancia implicará mayor satisfacción (Church & Re Velle, 1974). Mientras que para las instalaciones indeseables, vertederos, fábricas, faenas ganaderas, por nombrar algunas, se dice que la relación es directa, ya que al crecer la distancia promedio disminuirá el malestar que provoca la instalación.

3.3 Problemas de Cobertura

La literatura reconoce aplicaciones en diversos contextos de la vida real para los Problemas de Cobertura, o Covering Problems en inglés, primordialmente usado para definir la ubicación de instalaciones de distintos tipos de servicios, tanto en proyectos públicos como privados, como podrían ser oficinas de correos, escuelas, hospitales y centro de salud, estaciones de bomberos, tiendas de retail, entre otros (Farahani, Asgari, Heidari, Hosseininia, & Goh, 2012).

En Facility Location se entenderá por Cobertura a la capacidad que tiene una instalación de satisfacer la demanda de los usuarios que se encuentran dentro de su área de atención, determinada habitualmente por un radio máximo. Expresado en otras palabras, un usuario estará cubierto siempre y cuando su instalación más cercana no esté a una distancia mayor que un parámetro dado. A dicha distancia máxima se le denomina en la literatura como distancia de cobertura o distancia de servicio máxima aceptable y el área que se forma al interior de la circunferencia con centro en la instalación, se le denomina área de cobertura

Existen modelos donde la cobertura responde de forma binaria, vale decir que el bienestar no varía según la cercanía del usuario a la instalación, sino que el mismo grado de satisfacción es asociado a todos los usuarios que estén dentro del radio de cobertura. Así mismo existen otros con cobertura gradual que atribuyen un grado de satisfacción distinto a los usuarios dentro del radio de cobertura.

Schilling (Schilling, Jayaraman, & Barkhi, 1993) determinó la existencia de dos tipos de problemas de cobertura, Cobertura Total y Máxima Cobertura. El primer tipo minimiza el costo requerido para abrir las instalaciones necesarias requeridas para satisfacer toda la demanda en el área de estudio, mientras que el segundo grupo maximiza la cantidad de demanda que se puede atender dado un número de instalaciones fijo e definido exógenamente al problema.

3.3.1 Set Covering Problem

El Set Covering Problem (SCP) o Problema de Cobertura Total en español, minimiza el costo de instalar los establecimientos necesarios para otorgar cobertura total a la demanda, es decir, que minimiza el costo fijo de la red. Al contemplar cubrir toda la demanda, no es necesario considerarla en la formulación.

- Conjuntos

$I =$ Conjunto de nodos de demanda

$J =$Conjunto de nodos candidatos para ubicaciones de instalaciones

- Parámetros

$S =$ distancia de cobertura

$c_j =$ Costo fijo de establecer una instalación en el nodo $j \in$ J

$a_{ij} = \begin{cases} 1, \text{si la distancia entre el nodo candidato } j \in \text{J y el nodo } i \in \text{I no es mayor que } S. \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$

- Variables

$X_j = \begin{cases} 1, \text{si se loaliza una instalación en el nodo } j \in \text{J.} \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$

- Función Objetivo

$$Min \sum_{j \in J} c_j X_j \tag{7}$$

- Restricciones

$$\sum_j a_{ij} X_j \geq 1, \qquad \forall i \in \text{I} \tag{8}$$

$$X_j \in \{0,1\}, \qquad \forall j \in \text{J} \tag{9}$$

La función objetivo (7) minimiza el costo fijo de abrir las instalaciones necesarias para cubrir la demanda. (8) corresponde es una restricción del tipo satisfacción de demanda, pues exige que cada nodo de demanda tenga al menos una instalación oferente que la abastezca. Al mismo tiempo es una restricción que solo permite abrir instalaciones en nodos candidatos que estén dentro del radio de cobertura de algún nodo de demanda, siendo coherente con el objetivo de la minimización del gasto en apertura de instalaciones. Finalmente (9) define la naturaleza binaria de la variable X_j.

Existe una formulación alternativa que simplifica la resolución computacional del problema, pues se realiza un trabajo de clasificación de nodos previo a la resolución, con lo que el modelo enfrenta un conjunto inicial más acotado. La alternativa omite el parámetro a_{ij} y utiliza un conjunto adicional N_i, denominado habitualmente vecindad del nodo de demanda i, modificando la formulación de la restricción (8), sin cambiar el rol que cumple en la formulación esta restricción.

- Conjuntos

$N_i =$ Conjunto de nodos de oferta candidatos $j \in J$ que están a una distancia menor o igual a la distancia de cobertura del nodo $i \in$ I.

- Restricciones

$$\sum_{j \in N_i} X_j \geq 1, \qquad \forall i \in \text{I} \qquad (8.a)$$

3.3.2 Maximal Covering Problem

El Maximal Covering Location Problem (MCLP), o problema de máxima cobertura en español, es usado cuando existen recursos limitados, los que no alcanzan para materializar la solución del Set Covering Problem, y por ende no es factible diseñar una red que atienda la totalidad de la demanda. El tomador de decisiones define un número fijo de establecimiento que pueden ser abiertas y el rol del modelo es determinar las localizaciones que ofrecen la mayor cobertura factible. Desde la primera formulación, desarrollada por Church y Revelle (Church & Re Velle, 1974) y que es presentada a continuación, han aparecido variantes y extensiones que no fueron abordadas en esta revisión.

- Conjuntos

$I =$ Conjunto de nodos de demanda

$J =$Conjunto de nodos de potenciales ubicaciones de instalaciones

- Parámetros

$S =$ Distancia de cobertura

$h_i =$ Demanda del nodo candidato $i \in$ I

$p =$ Número de instalaciones a localizar.

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, \text{si la distancia entre el nodo } i \in \text{I y el nodo candidato } j \in \text{J no es mayor que } S. \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$$

- Variables

$$X_j = \begin{cases} 1, \text{si se localiza una instalación en el nodo j} \in \text{J.} \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$$

$$Z_i = \begin{cases} 1, \text{si el nodo de demanda } i \in \text{I está cubierto.} \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$$

- Función Objetivo

$$Max \sum_{i \in I} h_i Z_i \quad (10)$$

- Restricciones

$$\sum_{j \in J} X_j \leq p \quad (11)$$

$$\sum_{j \in J} a_{ij} X_j \geq Z_i, \qquad \forall i \in I \quad (12)$$

$$X_j \in \{0,1\}, \qquad \forall j \in J \quad (13)$$

$$Z_i \in \{0,1\}, \qquad \forall i \in I \quad (14)$$

La función objetivo (10) máxima la demanda atendida. La restricción (11) limita el número de instalaciones que se puede abrir a *p*. Luego (12) asegura que solo se abran instalaciones que estén dentro del ratio de cobertura, pero a diferencia de (8), ya no exige satisfacer la demanda de todos los nodos de *i*, indicado qué nodos de demanda serán satisfechos, por medio de la variable Z_i.

Dada la forma de la función objetivo se privilegiarán los nodos que poseen mayor demanda. (13) y (14) definen la naturaleza de las variables en cuestión.

Igual que en el SCP, para el MCLP existe una formulación alternativa que no modifica el resultado del problema, pero si disminuye la complejidad de resolución, utilizando el mismo conjunto N_i y se describe a continuación.

- Conjuntos

$N_i =$ Conjunto de nodos candidatos $j \in J$ que están a una distancia menor o igual a la distancia de cobertura del nodo $i \in I$.

- Restricciones

$$\sum_{j \in N_i} X_j \geq Z_i, \qquad \forall i \in I \quad (12.a)$$

3.4 Center Problem

El P-center Problem, se enfoca en localizar *p* instalaciones de forma que se minimice distancia máxima entre los nodos de demanda y los nodos de oferta, sujeto a satisfacer toda la demanda de la red.

Si se trata de un problema en el que solo se pueden localizar instalaciones sobre los nodos, se dice que se trata de un Vertex P-center Problem, mientras que si se pueden localizar instalaciones en cualquier punto del modelo se dirá que corresponde a un Absolut P-center Problem. Dado el interés de este trabajo, la descripción a continuación corresponde al primer tipo indicado.

- Conjuntos

$I=$ Conjunto de nodos de demanda

$J=$Conjunto de nodos de potenciales ubicaciones de instalaciones

- Parámetros
- Parámetros

$S =$ Distancia de cobertura

$d_{ij} =$ Distancia entre el nodo $i \in$ I y el nodo candidato $j \in$ J

p= Número de instalaciones a localizar

$a_{ij} = \begin{cases} 1, \text{si la distancia entre el nodo } i \in \text{I y el nodo candidato } j \in \text{J no es mayor que } S. \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$

- Variables

$X_j = \begin{cases} 1, \text{si se localiza una instalación en el nodo } j \in \text{J.} \\ 0, sino. \end{cases}$

$Y_{ij} = \begin{cases} 1, \text{si el nodo de demanda } i \in \text{I está cubierto por el nodo } j \in \text{J.} \\ 0, sino. \end{cases}$

$D=$ Distancia máxima entre un nodo de demanda y su instalación más cercana

- Función Objetivo

$$Min\ D \tag{15}$$

- Restricciones

$$\sum_{j \in J} X_j = p \tag{16}$$

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} \geq 1, \qquad \forall i \in I \tag{17}$$

$$X_j \geq Y_{ij}, \qquad \forall i \in I, j \in J \tag{18}$$

$$D \geq \sum_{j \in J} d_{ij} Y_{ij}, \qquad \forall i \in I \tag{19}$$

$$X_j \in \{0,1\}, \qquad \forall j \in J \tag{20}$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\}, \qquad \forall i \in I, j \in J \tag{21}$$

La función objetivo (15) minimiza el valor de D, variable de decisión calculada endógenamente por este modelo y que reemplaza al parámetro S, que en los modelos presentados anteriormente es exógeno. Mientras que (16), (17) y (18) son idénticas a (2), (3) y (4), (19) es un elemento nuevo

que define a *D* como la distancia más grande que exista en toda la red, entre un nodo de demanda y su instalación más cercana.

El amplio espectro de aplicación de los Facility Location Problems ha permitido el desarrollo de extensiones y aplicaciones. Tal es el caso de los Hub Location Problems, descritos en el apartado siguiente, lo cuales tomaron fuerza a partir de los años 90's y se han ganado un espacio especialmente en el diseño de redes de telecomunicaciones y de transporte. La particularidad de los Hub Location Problems que los aleja de los modelos presentados anteriormente, radica en la aparición del concepto *hub* y en la forma en cómo se entienden la demanda y la cobertura.

3.5 Localización de Hubs

Un problema de localización de esta naturaleza tiene por objetivo definir la ubicación de instalaciones denominadas "hub" y la asignación de demanda a cada instalación ubicada al menor costo posible, la composición de dichos costos dependerá de la aplicación y el contexto. Los hubs son instalaciones que cumplen un rol especial y ofrecen beneficios particulares para el transporte entre puntos de una red, además se busca asignar viajes a las instalaciones y a las rutas disponibles. Según la literatura, aproximaciones a estos modelos surgieron en los años 60's con Hakimi y Goldman, sin embargo la primera formulación matemática reconocida fue propuesta por O'Kelly en su publicación en 1986, que se enfoca en transporte de pasajeros de aerolíneas. Hoy es factible encontrar en la literatura un sinfín de investigaciones sobre métodos de resolución para este tipo de modelamiento debido a su complejidad, así como aplicaciones en el diseño de redes de transporte y redes de telecomunicaciones. Para efectos de la presente memoria son de interés las aplicaciones relacionadas con transporte, donde el interés principal está en los costos de transporte y los elementos que componen los flujos habitualmente serán pasajeros o productos, mientras las instalaciones a ubicar suelen ser terminales de transbordo entre distintos medios de transporte, centro de distribución o puntos de acopio.

En Hub Location el concepto de demanda se relaciona con la necesidad de traslado desde un origen a un destino, a los elementos que se mueven de un nodo a otro se les denomina flujos. Estos problemas habitualmente se definen sobre un grafo compuesto por dos tipos de elementos, nodos y arcos, por lo que se dice que es un grafo del tipo G(N,A). Donde N es el conjunto de nodos y A es el conjunto de arcos. Hay dos clases de nodos, una que representa exclusivamente orígenes y destinos y la otra que además puede representar a las potenciales ubicaciones para los hubs. Los arcos por su parten tienen por función conectar a los nodos y representan las vías habilitadas para el paso de los elementos que viajan. Los resultados obtenidos en términos de localización de hubs y asignación de demanda a cada hub instalado se denominan red de hubs.

"Hub" hace referencia a instalaciones que dentro del modelamiento pueden cumplir cualquiera de los siguientes roles, *Concentrar*, *Dispersar* o *Conectar*. Cuando actúa con el rol de *Concentrar* significa que recibe flujos provenientes de diversos orígenes, los agrupa y los envía por un mismo arco. En cambio, el rol de *Dispersar* tiene el efecto opuesto, es decir, que recibe flujos que viajan

por un mismo arco, los separa y envía en diferentes arcos. Mientras que el rol de *Conectar*, implica que hub solo transfiere los flujos de un arco a otro. Un mismo hub puede actuar con diferentes roles para diferentes flujos. Además, sin importar el rol que tenga cada hub, este puede ser un punto inicial, intermedio o final en la ruta.

La evolución en el tiempo, a partir de la formulación propuesta por O'Kelly, se orientó hacia una serie de trabajos que Drezner denomina como "primera generación", estos aportaron a la comprensión de los sistemas compuestos por hubs y se caracterizaron porque en su mayoría apuntaban a la minimización de los costos de transporte y costos fijos de instalación. Una característica en esta etapa fueron la inclusión de al menos un hub en todas las rutas de origen a destino y la inclusión del factor de descuento en el costo asociado a recorrer los arcos ubicados entre hubs, esto último tiene dentro de sus más importantes consecuencias, que la ubicación óptima de los hubs forme un grafo completo, o dicho de otro modo, un circuito cerrado de hubs. En términos de la dificultad de resolución de estos problemas, el mismo Drezner indica que para problemas con una dimensión de 50 nodos de origen y destino con 5 hubs, podrían obtenerse resultados satisfactorios en tiempo razonables (Drezner & Hamacher, 2002)[7].

El foco para el desarrollo posterior a la primera generación estuvo precisamente en dar un enfoque más realista a las formulaciones, ya fuera por medio de ampliar el tamaño de los problemas y la creación de estrategias para su resolución o la integración en un mismo modelo las decisiones de localización de hubs y las decisiones de diseño de redes. Para la integración de ambos tipos de decisiones algunos investigadores modificaron de distintas maneras el supuesto del factor de descuento, complejizaron los movimientos permitidos a los flujos al interior de la red e incluyeron el concepto de nivel de servicio a través de limitaciones al número de paradas o tiempo de traslado.

Respecto de los costos como los descuentos, se puede señalar que estos son definidos en términos de tiempo, dinero, distancia, riesgo u otro elemento considerado al momento del diseño de la red. Habitualmente se representa el costo unitario de recorrer el arco con c_{ij}, donde i y j representan el nodo que da inicio al arco y j el nodo donde finaliza. Así mismo el descuento unitario se representa por α_{ij}.

De igual forma que en los problemas clásicos de localización, en este contexto existe un grupo de problemas enfocados en la cobertura que alcanza la red de instalaciones respecto de la demanda existente (con variantes de cobertura total o cobertura máxima). Campbell (Campbell, 1994) introduce tres criterios para indicar que un par de nodos de origen y destino (i,j) está cubierto por el par de hubs ubicados en los nodos (k,m), estos se presentan a continuación:

[7] Esta referencia corresponde a un libro publicado en el año 2002 y la capacidad de los computadores ha crecido notoriamente desde dicha fecha.

- El costo de ir desde el nodo i al nodo j, pasando por hubs ubicados en los nodos k y m, no supera un valor especificado.
- El costo de cada tramo que compone la ruta para ir desde el nodo i al nodo j, pasando por hubs ubicados en los nodos k y m, no supera un valor especificado.
- Tanto el costo del tramo origen-hub como el del tramo hub-destino no superan un valor especificado.

3.6 Clasificaciones de Hub Location Problems

En la literatura es posible encontrar muchas variantes para este tipo de problemas, por lo tanto resulta útil clasificarlas para entender los elementos que cambian entre una y otra variante. A continuación se presenta la clasificación realizada por Farahani (Farahani et al., 2012) que lista 8 criterios para ordenar los modelos:

- Dominio de la solución

Si los hubs pueden ser localizados sobre cualquier nodo de la red, decimos que el dominio de la solución es la red, en cambio sí solo pueden localizados sobre nodos específicos se habla de un dominio discreto. Si las instalaciones se pueden ubicar en cualquier punto del grafo, el dominio se denomina continuo.

- Criterio

Los criterios pueden variar entre Min-max y Min-sum. Min-max busca minimizar el máximo costo de transporte entre todos los flujos nodos de origen y nodos de destino. Min-sum apunta a minimizar tanto de los costos de instalar hubs como a los costos derivados de la asignación de flujos (transporte). Los modelos que maximizan la cobertura, en la literatura son considerados casos particulares de formulaciones pertenecientes a los dos criterios ya mencionados.

- Origen de la determinación del número de hubs a localizar

La cantidad de hubs a instalar puede estar determinada por factores externos al modelo como el presupuesto u otros, en este caso se dice que el número de hubs está determinado de forma exógena. Mientras que si uno de los elementos que el modelo debe resolver es el número de hubs a instalar, hablamos de una determinación endógena.

- Número de hubs a localizar

El problema está formulado para ubicar un solo hub o varios simultáneamente.

- Capacidad de los hubs

La capacidad de los hubs que se desea instalar puede ser limitada, capacitated en inglés, o ilimitada, uncapacitated en inglés.

Respecto del concepto de capacidad es importante puntualizar que en hub Location esta puede ser aplicada no solo como un límite de capacidad a “procesar” en el hub, sino que también puede referirse a una limitación de flujo a pasar por un arco entre hubs o arcos entre un hub y un nodo sin hub (o al revés).

- Costo de localizar los hubs

Existen variantes del problema que modifican los supuestos relacionados con el costo de colocar instalaciones. Unas consideran que la instalación de un hub no tiene costo, otras consideran que la instalación hubs tiene costo fijo para todos. Así también hay algunos autores que han considerado que el costo de poner una instalación varía entre una y otra ubicación potencial.

- Asignación de la demanda a los hubs

Como se señaló anteriormente uno de los elementos que se desea resolver es la asignación, donde la asignación corresponde a definir qué flujos pasarán por qué hub. Esto puede resolverse de dos formas, enviando todo el flujo proveniente de un mismo origen por un solo hub o a través de hubs diferentes. Cuando todo el flujo se envíe por un solo hub, se denomina asignación singular o single allocation en inglés. Por otra parte, si el flujo se asigna a dos o más hubs, se denomina asignación múltiple o multiple allocation en inglés.

- Costo de viaje entre nodos sin hub y nodos con hub

El costo puede ser fijo, variable o ser igual a cero.

Todas estas definiciones dependerán de la naturaleza del problema, de consideraciones exógenas que influyan sobre el funcionamiento de una potencial aplicación, o de criterios no técnicos de diseño, entre otros factores.

3.7 Tipos de problemas de Hub Location

Posterior a entender los criterios en los cuales pueden variar los modelos existentes, es posible diferenciarlos con claridad para posteriormente identificar los que mejor se adapten a cada problema. En distintas revisiones bibliográficas presentes en la literatura (Alumur & Kara, 2008), se han encontrado los siguientes modelos:

3.7.1 P-Hub Location Problem

Este problema considera la instalación de p hubs, todos iguales entre sí y dicha cantidad es determinada de forma exógena. Considera los supuestos de single allocation, criterio Min-sum, el dominio solución es la red y todos los nodos de origen y destino deben estar conectados a un hub. Además considera que cualquier flujo entre dos nodos de origen y destino, deben pasar al menos por un hub y máximo por dos. Esta versión no considera capacidad ni costos de instalación. El

objetivo de este modelo es la minimización de costos de transportes de la red, es decir, sus costos variables.

Los parámetros, variables y formulación matemática de este problema se presentan a continuación:

- Conjuntos

$N =$ Conjunto de todos los nodos

- Parámetros

$c_{ij} =$ Costo unitario de transporte desde el nodo de origen $i \in N$ y el nodo de destino $j \in N$

$h_{ij} =$ Demanda de flujos con origen en el nodo $i \in N$ y destino en el nodo $j \in N$.

$\alpha =$ Factor de descuento unitario asociado a la utilización de un arco ubicado entre hubs. Con $0 \leq \alpha \leq 1$.

$p =$ Número de instalaciones a localizar.

- Variables

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, \text{si el nodo } i \in N \text{ es asignado al hub ubicado en el nodo } j \in N. \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$$

- Función Objetivo

$$Min \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} c_{ik} Y_{ik} \left(\sum_{j \in N} h_{ij} \right) + \sum_{k \in N} \sum_{i \in N} c_{ki} Y_{ki} \left(\sum_{j \in N} h_{ji} \right) + \alpha \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} h_{ij} c_{km} Y_{ik} Y_{jm} \quad (22)$$

- Restricciones

$$\sum_{j \in N} Y_{ij} = 1, \qquad \forall i \in N \quad (23)$$

$$\sum_{j \in N} Y_{jj} = P \quad (24)$$

$$Y_{ij} - Y_{jj} \leq 0, \qquad \forall i \in N, j \in N \quad (25)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\}, \qquad \forall i \in N, j \in N \quad (26)$$

3.7.2 P-Hub Median Location Problem

Propuesto por Campbell el año 1991, el P-hub Median Location Problem es también llamado multiple allocation P-HLP, dado que su formulación matemática y supuestos son similares a los del P-HLP, excepto en lo que respecta a la asignación, dado que en este caso se permite que el flujo de un origen pueda tomar varios caminos y pasar por diferentes hubs. Por esta razón, se define una

nueva variable de asignación. También se define una variable exclusivamente para determinar la ubicación de los hubs.

La minimización de costos de transporte sigue siendo la preocupación central en este trabajo.

Todos los conjuntos, parámetros y variables definidas en el punto anterior son válidos para este modelo, además se incluirán los siguientes elementos.

- Conjuntos

$N =$ Conjunto de todos los nodos

- Parámetros

$c_{ij}^{km}=$ Costo unitario de transporte desde el nodo de origen $i \in N$ hasta el nodo de destino $j \in N$, pasando por el arco ubicado entre los hubs instalados en los nodos $k \in N$ y $m \in N$, donde $c_{ij}^{km} = c_{ik} + \alpha c_{km} + c_{mj}$

$h_{ij} =$ Demanda de flujos con origen en el nodo $i \in N$ y destino en el nodo $j \in N$.

- Variables

$Z_{ij}^{km} = P$roporción del flujo que va desde el nodo de origen i ∈ N hacia el nodo de destino j ∈ N y pasa por los hubs ubicados en los nodos k ∈ N y m ∈ N

$X_k = \begin{cases} 1, si \text{ se instala un hub en el nodo } k \in N. \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$

- Función Objetivo

$Min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} c_{ij}^{km} h_{ij} Z_{ij}^{km}$
(27)

- Restricciones

$\sum_{k \in N} X_k = p$ (28)

$\sum_{k \in N} \sum_{m \in N} Z_{ij}^{km} = 1, \quad \forall i \in N, j \in N$ (29)

$Z_{ij}^{km} \leq X_m, \quad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N$ (30)

$Z_{ij}^{km} \leq X_k, \quad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N$ (31)

$Z_{ij}^{km} \geq 0, \quad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N$ (32)

$X_k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in N$ (33)

Los estudios realizados sobre resoluciones basadas en esta formulación muestran que el número de variables de asignación puede ser muy alto, aunque se observa mejores perspectivas cuando el problema es definido sobre un dominio discreto y se hace una selección previa de los nodos candidatos a recibir un hub. También se observa que el uso de formulaciones cuadráticas puede reducir el número de variables, pero estas pueden ocasionar otras dificultades en la resolución. Otras formulaciones, con 3 sub índices o poliédricas también se han desarrollado. En caso de aplicar metodologías de descomposición, como la relajación Lagrangiana o la descomposición de Benders, se recomienda partir del propuesto anteriormente.

En 1994, el mismo Campbell publicó una variante del P-Hub Median Location Problem que considera restricciones de capacidad para los hubs. Utiliza la misma formulación, agregando un parámetro, que representa la capacidad del hub ubicado en el nodo *k*, y la siguiente restricción:

- Parámetros

θ_k= Capacidad del hub ubicado en el nodo $k \in N$

- Restricciones

$$\sum_{m\in N}\sum_{i\in N}\sum_{j\in N} h_{ij}Z_{ij}^{km} + \sum_{s\in N}\sum_{i\in N}\sum_{j\in N} h_{ij}Z_{ij}^{sm} \leq \theta_k X_k, \qquad \forall k \in N \tag{34}$$

3.7.3 Hub Set Covering Location Problem

Este problema es enunciado de manera similar al P-Hub Median Location Problem, pero si considera un costo fijo por colocar un hub, además de que el número de instalaciones a ubicar se determina como parte del problema, es decir de manera endógena, debido a que esta formulación tiene por objetivo minimizar el costo fijo de la red, es decir el costo de abrir las instalaciones requeridas para cubrir toda la demanda existente.

Se utilizarán todos los conjuntos, parámetros y variables definidas hasta aquí, adicionalmente se presentan los siguientes elementos, dentro de los que destaca una variable y un parámetro relacionados con la cobertura.

- Conjuntos

$N =$ Conjunto de todos los nodos

- Parámetros

F_k= Costo fijo de instalar un hub en el nodo $k \in N$

$V_{ij}^{km} = \begin{cases} 1, \text{si los hubs en } k \in \text{N y } m \in \text{N cubren la demanda de viaje entre } i \in \text{N y } j \in \text{N.} \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$

- Variables

Z_{ij}^{km}= Proporción del flujo que sale desde el nodo de origen $i \in N$ hacia el nodo de destino $j \in N$ pasando por los hubs ubicados en los nodos $k \in N$ y $m \in N$.

$$X_k = \begin{cases} 1, \text{si se instala un hub en el nodo } k \in N. \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$$

- Función Objetivo

$$Min \sum_{k \in N} F_k X_k \quad (35)$$

- Restricciones

$$\sum_{k \in N} \sum_{m \in N} V_{ij}^{km} Z_{ij}^{km} \geq 1, \qquad \forall i \in N, j \in N \quad (36)$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_k, \qquad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N \quad (37)$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_m, \qquad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N \quad (38)$$

$$Z_{ij}^{km} \geq 0, \qquad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N \quad (39)$$

$$X_k \in \{0,1\}, \qquad \forall k \in N \quad (40)$$

3.7.4 P-Hub Maximal Covering Location Problem

Esta formulación tiene por objetivo la maximización de la demanda cubierta dado un número definido de hubs disponibles para localizar. La literatura define que este modelo es un caso particular del Hub Set Covering Location Problem, problema presentado anteriormente. También es posible relacionarlo con el P-Hub Median Problem dada la similitud entre sus formulaciones, con la distinción clara de que en este caso el número de instalaciones está definido exógenamente.

Dado que se maximiza cobertura con p instalaciones disponibles, no se considera el costo de localizar dichos establecimientos, pues esto no influye en la decisión. En estos casos la restricción presupuestaria está representada a través del parámetro p. Por otro lado la demanda si será considerada a través de un parámetro, de modo que la formulación tenga en consideración que zonas priorizar para la atención.

- Conjuntos

$N =$ Conjunto de todos los nodos

- Parámetros

h_{ij}= Demanda de flujos con origen en el nodo i ∈ N y destino en el nodo j ∈ N.

$V_{ij}^{km} = \begin{cases} 1, \text{si los hubs en } k \in N \; y \; m \in N \text{ cubren la demanda por viajes entre } i \in N \; y \; j \in N. \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$

$p =$ Número de instalaciones a localizar.

- Variables

Z_{ij}^{km}= Representa la proporción del flujo que sale desde el nodo de origen i ∈ N hacia el nodo de destino $j \in N$ pasando por los hubs ubicados en los nodos $k \in N$ y $m \in N$

$X_k = \begin{cases} 1, \text{si se instala un hub en el nodo } k \in N. \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$

- Función Objetivo

$$Max \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} h_{ij} V_{ij}^{km} Z_{ij}^{km} \quad (41)$$

- Restricciones

$$\sum_{k \in N} X_k = p \quad (42)$$

$$\sum_k \sum_m Z_{ij}^{km} = 1, \qquad \forall i \in N, j \in N \quad (43)$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_k, \qquad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N \quad (44)$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_m, \qquad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N \quad (45)$$

$$Z_{ij}^{km} \geq 0, \qquad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N \quad (46)$$

$$X_k \in \{0,1\}, \qquad \forall k \in N \quad (47)$$

La ecuación (41) corresponde a la función objetivo que maximiza la demanda cubierta por los hubs instalados. Luego, (42) establece que se deben instalar los *p* establecimientos planificados. Mientas que (43) dice que todo par origen destino *i-j* debe ser asignado a un par de hubs, además cumple la función de restricción de conservación de flujo.

Las restricciones (44) y (45) exigen que el flujo se asigne solo a aquellos nodos candidatos que tienen un hub instalado. Finalmente (46) y (47) definen la naturaleza de las variables. Nótese que si se define $Z_{ij}^{km} \in \{0,1\}$, el modelo se transforma en la versión de single allocation.

3.7.5 Hub location en ambientes competitivos

Si bien el problema que se desea resolver no contempla aspectos de competencia, el modelo de máxima cobertura presentado por Marianov (Marianov, Serra, & Charles ReVelle, 1984) es una interesante alternativa a utilizar en esta memoria. A diferencia del modelo anterior, presenta una variable adicional W_{km} y reduce los subíndices por los cuales está indexada la variable Z_{ij}, relacionada con el flujo, eliminando de paso el parámetro V_{ij}^{km}. Se agrega una restricción que define por separado cuántos hubs mantienen su posición, cuantos se reubicarán y cuántos se van a agregar.

- Conjuntos

$I=$ Conjunto de nodos de origen

$J=$Conjunto de nodos de destino

$\mathrm{K} =$ Conjunto de nodos candidatos

$K_0 =$ Conjunto de ubicaciones de los hubs iniciales

$N_{ij}=$ Conjunto de pares de nodos candidatos $k \in K$ y $m \in K$ habilitados para cubrir viajes entre el nodo de origen $i \in I$ y el nodo de origen $j \in J$.

- Parámetros

$h_{ij}=$ Demanda de viajes con origen en el nodo $i \in I$ y destino en el nodo $j \in J$.

$p_s =$ Número de instalaciones que mantienen su posición.

$p_r =$ Número de instalaciones que se reubican.

$p_n =$ Número de instalaciones que agregan .

$S =$ Distancia de cobertura

- Variables

$W_{km} = \begin{cases} 1, \text{si hay hubs instalados en las ubicaciones } k \in K \text{ y } m \in K. \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$

$Z_{ij} = \begin{cases} 1, \text{si la ruta entre los nodos } i \in I \text{ y } j \in J \text{ está cubierta por al menos un par de hubs.} \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$

$X_k = \begin{cases} 1, \text{si se instala un hub en el nodo candidato } k \in K. \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$

- Función Objetivo

$$Max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_{ij} Z_{ij} \quad (48)$$

- Restricciones

$$\sum_{k\in K} X_k = p_s + p_r + p_n \quad (49)$$

$$\sum_{k\in K_0} X_k = p_s, \quad (50)$$

$$W_{km} \leq X_k, \qquad \forall k \in K, m \in K \quad (51)$$

$$W_{km} \leq X_m, \qquad \forall k \in K, m \in K \quad (52)$$

$$Z_{ij} \leq \sum_{(k,m)\in N_{ij}} W_{km}, \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (53)$$

$$X_k \in \{0,1\}, \qquad \forall k \in K \quad (54)$$

$$Z_{ij} \in \{0,1\}, \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (55)$$

$$W_{km} \in \{0,1\}, \qquad \forall k \in K, m \in K \quad (56)$$

3.8 Problemas de localización y diseño de redes de Bike Sharing

Es posible encontrar aplicaciones de modelos de localización específicas para el diseño de redes de Bike Sharing. En el caso de Hob Location, se destaca la publicación de Ta-Hui Yang y Jenn-Rong Lin (Lin & Yang Ta-Hui, 2011), donde se genera una formulación matemática que considera restricciones de nivel de servicio. Este trabajo desea localizar las estaciones de bicicletas, indicar los lugares dónde construir las ciclovías y asignar las rutas a los usuarios. Para ello se considera que la red de Bike Sharing que se diseña estará integrada a otros medios de transporte público, principalmente para ser el vínculo con el origen y destino de los usuarios (problema de la última milla). Además dada la naturaleza del servicio, no considera rutas que visiten solo un paradero de bicicletas.

Otra aplicación interesante de destacar es la realizada por Marta Latorre (Latorre, Gutiérrez-Puebla, & García-Palomares, 2012), que utiliza dos modelos localización discreta en conjunto con una herramienta SIG para evaluar la ubicación óptima de paraderos de bicicletas en la ciudad de Madrid, España. La publicación analiza la situación por medio del problema de la P-Mediana y del Problema de Máxima Cobertura. Para el caso de Máxima Cobertura se usó una distancia de cobertura igual a 200 metros. Indistintamente del modelo usado para el análisis se trabajó con 5 escenarios diferentes según la cantidad de estaciones a localizar, 100, 200, 300, 400 y 500, conservando constante siempre la extensión del área a cubrir por el sistema. Los resultados son diferentes entre sí dependiendo del escenario y el modelo usado, pero el autor destaca que las soluciones alcanzadas por medio de Máxima Cobertura representan mayor interés para el trabajo realizado. Pese a esto se reconocen falencias en los resultados, como la aparición de espacios sin cubrir o la instalación de estaciones aisladas de la red. Finalmente se destaca que el número de estaciones es clave para aumentar la cantidad de demanda cubierta, este crecimiento en el total de estaciones trae asociado rendimientos marginalmente decrecientes en términos de cobertura.

Capítulo 4. Desarrollo

4.1 Modelo propuesto

A continuación se presenta la formulación matemática de un problema de máxima cobertura que apoya las decisiones de rediseño y expansión de un sistema de Bike Sharing. La situación inicial consiste en una red de paraderos que está operativa y por lo tanto posee paraderos ya instalados y en funcionamiento. El objetivo es determinar simultáneamente la localización de los paraderos que se pretende agregar al sistema y relocalización de los paraderos que deben moverse.

4.1.1 Formulación

Se utilizó el modelo de Hub location en Ambientes Competitivos, desarrollado por Marianov y Serra. Este modelo fue escogido, entre otras cosas por la mayor simplicidad de sus variables en términos de indexación, pues solo tiene variables indexadas por dos conjuntos, mientras que el P-Hub Maximal Covering cuenta con variables que corren sobre 4 conjuntos. Además el modelo para ambientes competitivos considera escenarios de expansión de un sistema en funcionamiento, característica que se adapta al escenario planteado en este trabajo.

Por simplicidad para la programación del modelo, se introdujo una variación respecto del original, utilizando dos vecindades, cada una indexada a un solo nodo de origen/destino, en vez de una única vecindad indexada a dos subíndices. A continuación se describe la formulación utilizada.

- Conjuntos

O = Conjunto de nodos de origen/destino.

$Viajes$ = Conjunto de pares ordenados, compuesto por dos nodos de origen/destino, donde el primero representa el origen y el segundo representa el destino del viaje.

H = Conjunto de nodos candidatos. Incluye tanto a los nodos que inicialmente albergan paraderos como las ubicaciones potenciales propuestas.

A = Conjunto de nodos que inicialmente albergan paraderos. $A \subseteq H$

N_i = Vecindad del nodo de origen destino $i \in O$. Agrupa a todos los nodos candidatos $k \in H$ que pueden servir al nodo i, pues i se encuentra dentro de su radio de cobertura.

- Parámetros

h_{ij} = Cantidad de viajes demandados entre el nodo de origen i y el nodo de destino j. $Par\ (i,j)\ \in Viajes.$

P_s =Número de paraderos que conservarán su posición actual.

P_r =Número de paraderos que se relocalizará.

P_n =Número de paraderos que se agregará al modelo.

d_{ik} =Distancia euclidiana entre el nodo $i \in O$ y el nodo candidato $k \in H$.

S = Distancia o radio de cobertura

- Variables

$$X_k = \begin{cases} 1, \text{si se instala un hub en el nodo candidato } k \in H \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$$

$$W_{km} = \begin{cases} 1, \text{si hay hubs instalados en el nodo candidato } k \in H \text{ y en el nodo candidato } m \in H \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$$

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1, \text{si se satisface la demanda de viajes entre el par de origen/destino } (i,j) \in Viajes \\ 0, \text{sino.} \end{cases}$$

- Función Objetivo

$$Max \sum_{i \in O} \sum_{j \in O} h_{ij} Z_{ij}$$

- Restricciones

$$\sum_{k \in H} X_k = P_s + P_r + P_n, \quad (57)$$

$$\sum_{k \in A} X_k = P_s, \quad (58)$$

$$W_{km} \leq X_k, \qquad \forall k \in H, m \in H \quad (59)$$

$$W_{km} \leq X_m, \qquad \forall k \in H, m \in H \quad (60)$$

$$Z_{ij} \leq \sum_{k \in N_i} \sum_{m \in N_j} W_{km}, \qquad \forall (i,j) \in Viajes \quad (61)$$

$$X_k \in \{0,1\}, \qquad \forall k \in H \quad (62)$$

$$Z_{ij} \in \{0,1\}, \qquad \forall (i,j) \in Viajes \quad (63)$$

$$W_{km} \in \{0,1\}, \qquad \forall k \in H, m \in H \quad (64)$$

El modelo indica qué paraderos nuevos deben abrirse, y cuando corresponda, también indicará cuáles deben ser relocalizados y a dónde, por medio de las variables X_k.

4.2 Determinación de Nodos candidatos

Como se indicó anteriormente, los nodos candidatos corresponden a ubicaciones potenciales en las que se puede instalar un paradero de bicicletas del sistema. Para definir los nodos candidatos se consideraron las recomendaciones de la Guía de Planificación de Bike Sharing de la ITDP (ITDP,

2013), organización sin fines de lucro dedicada a promover la sostenibilidad ambiental y las políticas de transporte justo en el mundo. Dicho documento recomienda que lo paraderos de bicicletas se sitúen en locaciones que cumplan con las siguientes características:

- Ser adyacentes a las paradas del transporte público masivo, ya que el sistema de bicicletas públicas cumple un rol complementario y facilita a los pasajeros la llegada a sus destinos.
- Idealmente ubicarse cercanos a ciclovías o a calles seguras y accesibles para las bicicletas.
- Estar cerca de o en esquinas, para que los usuarios se muevan en múltiples direcciones
- Localizarse en sitios con múltiples usos de suelo para tener actividad en distintos horarios. Esto asegura que las bicicletas serán utilizadas durante toda la jornada. La proximidad a lugares que atraigan a realizar diferentes tipos de actividades a lo largo del día incrementa la seguridad de los usuarios.
- No deben colocarse cerca de áreas de uso único tales como fábricas, pues estas zonas tienen menos actividades que llevar a cabo y reducen el número de visitantes al área. Áreas infrautilizadas, como un paso bajo nivel, pueden verse como puntos para estación debido al espacio que tienen, pero hay que considerar cuidadosamente el potencial de seguridad para los usuarios.

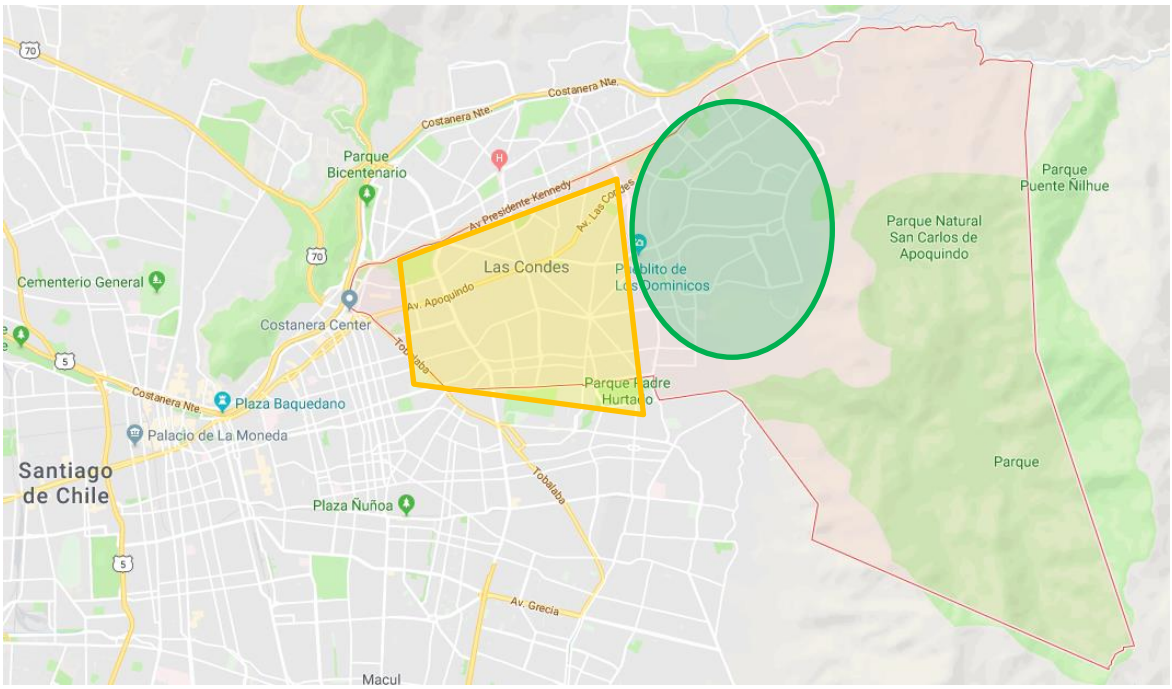

Ilustración 3. Límites geográficos de Las Condes. Fuente: GoogleMaps

Las características mencionadas fueron identificadas en diferentes puntos dentro del espacio hacia donde se desea expandir la red de bicicletas. En la ilustración 3, en color rosa se aprecian los límites de la comuna de Las Condes, en color amarillo se destaca la zona que actualmente cuenta con cobertura del sistema. En verde está señalada la zona que se proyecta para la expansión, en

ella se encuentran recintos o características que podrían asegurar, por sí solos o combinados, actividad a lo largo de todo el día:

- Centros de Salud: DIPRECA, clínica UC San Carlos de Apoquindo, consultorio Aníbal Ariztía, Clínica Las Condes.
- Centros comerciales: Mall Sport, Paseo Los Dominicos, supermercados de las principales cadenas.
- Centros de estudios: DUOC UC San Carlos de Apoquindo, Universidad de los Andes, Universidad Andrés Bello, Universidad del Desarrollo, una decena de colegios.
- Centros deportivos: Estadio San Carlos de Apoquindo, Estadio Municipal de Las Condes, Estadio San Jorge del Banco Estado, Club Palestino, Club Oriente.
- Centros cívicos: Centro Comunitario Padre Hurtado
- Sectores residenciales

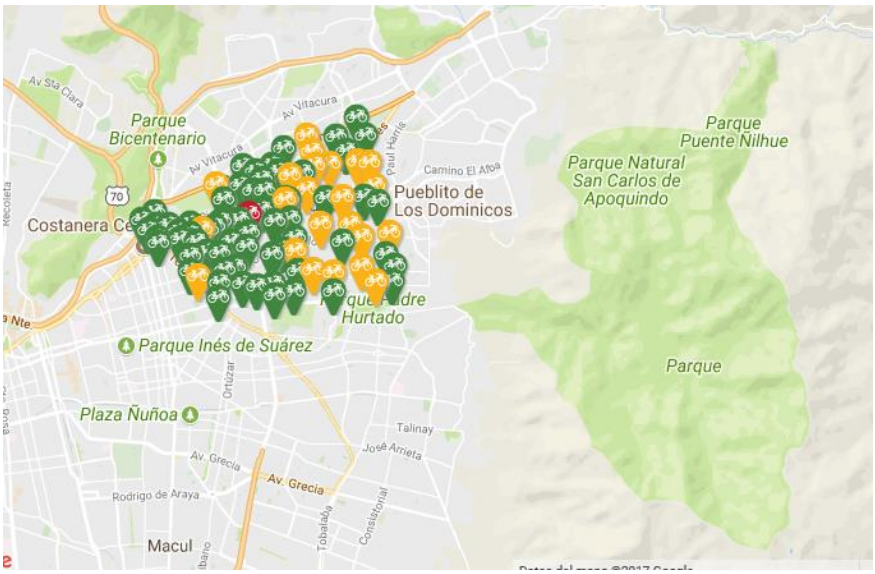

Ilustración 4. Los 89 paraderos existentes en el sistema Bici Las Condes. Fuente: Sitio web Bici Las Condes (https://www.bicilascondes.cl/es/mapa-de-estaciones).

La ilustración 4, que muestra la ubicación de los 89 paraderos actuales y su disponibilidad de bicicletas, corresponde al mapa de estaciones disponible en el portal web de Bici Las Condes que permite monitorear en línea el estado de la red. En verde se marcan los paraderos que tienen alta disponibilidad de bicicletas, en amarillo aquellos que tienen baja disponibilidad y en rojo aquellos que no cuentan con bicicletas.

Se definieron 21 nuevos nodos candidatos, los cuales se alojan mayormente en zona donde hoy no existen, mientras que solo un pequeño grupo se ubica entre los paraderos actuales. Esto implica que la expansión podría traer una expansión territorial y/o un aumento en la densidad de

paraderos en los sectores ya cubiertos. En la ilustración 5 es posible apreciar el universo total de paraderos propuestos. Desde el número 90 al 110, corresponden a estaciones nuevas propuestas.

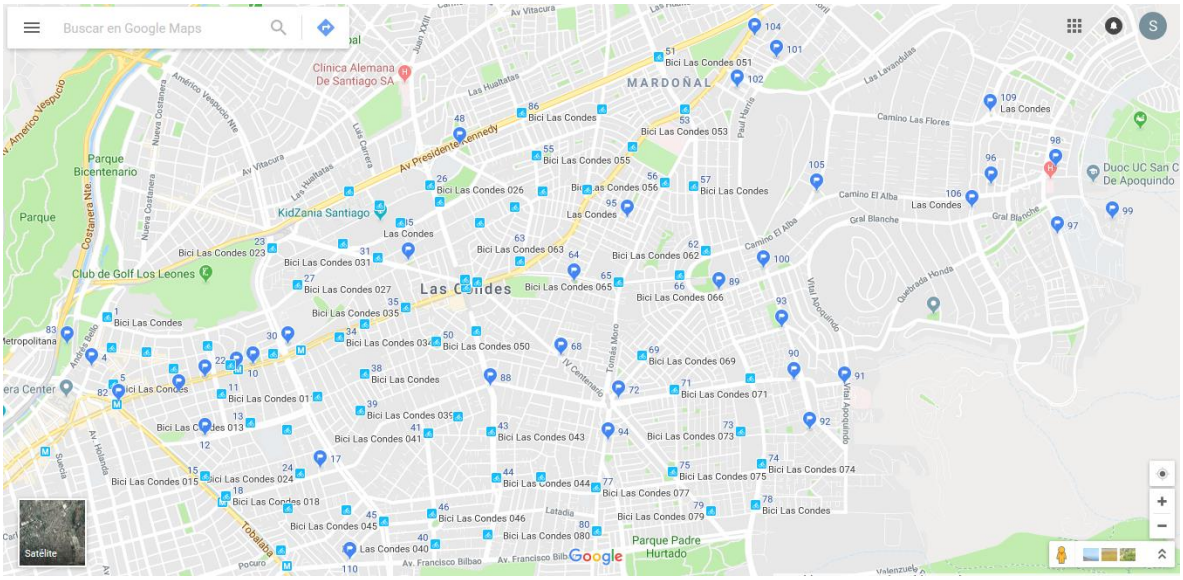

Ilustración 5. Nodos potenciales agregados. Fuente: Google maps.

4.3 Determinación Nodos de origen/destino y cuantificación de la demanda

Utilizando las recomendaciones de Drezner (Drezner & Hamacher, 2002), resulta útil agrupar puntos de demanda difusos en alguna unidad territorial mayor, para este trabajo los nodos de origen/destino fueron asociados al centro de manzanas. El territorio de la comuna fue dividido en manzanas siguiendo la distribución cartográfica para la Región Metropolitana del mapa Precenso 2016 disponible en el sitio web del INE[8].

El mapa del INE distribuye el territorio de cada comuna en distritos, los que son divididos a su vez en zonas. Finalmente las zonas están compuestas por manzanas. La ilustración 6 muestra la distribución territorial de la comuna, donde se aprecia que la comuna de Las Condes posee 16 distritos, cada uno compuesto por un número diferente de zonas, las cuales a su vez están divididas en un número distinto de manzanas, totalizando 1661 manzanas en toda la comuna. Finalmente se definió que el conjunto O tiene 1661 nodos.

[8] http://www.ine.cl/herramientas/galeria-de-mapas/cartografia-precenso-2016

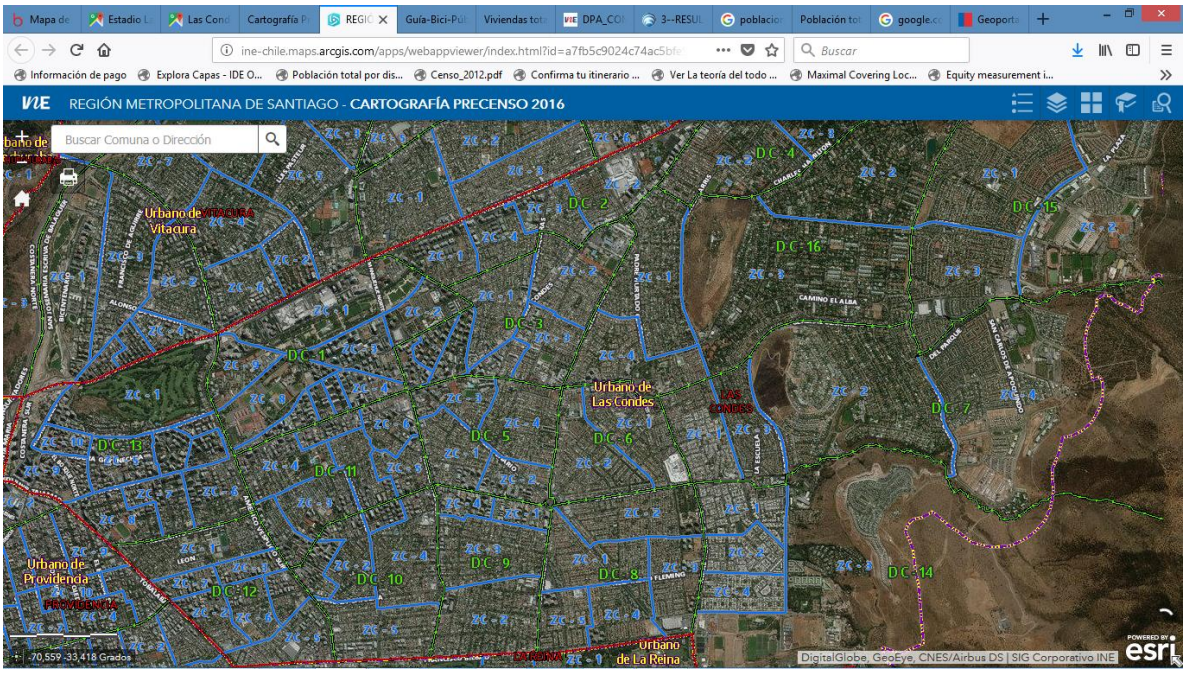

Ilustración 6. División de Las Condes en distritos y en zonas. Fuente: Mapa INE

Por otro lado, la demanda fue determinada a partir de los datos de la encuesta de Origen y Destino de 2012 para la región Metropolitana, realizada por la SECTRA[9], organismo perteneciente al Ministerio de Transportes del Gobierno de Chile. La Encuesta hace un levantamiento de información sobre los viajes que realizan los ciudadanos por medio de entrevistas seleccionando hogares, con lo que se obtienen datos de una muestra representativa que luego, por medio de un algoritmo, se transforma en información representativa de los viajes de la población. Para efectos prácticos, en esta memoria solo se consideraron los datos de la muestra, entendiendo que los datos no representan la realidad de la demanda ni son válidos para la toma de decisiones. En caso de que se desee una aplicación real, es necesario comunicarse con el Ministerio de Transportes para obtener el algoritmo o la información ya procesada sobre la estimación del número de viajes que se realizan dentro de la comuna.

La base de datos está compuesta por varias tablas que agrupan datos obtenidos de la encuesta y otros propios del estructurar el levantamiento, tales como la información de los hogares. Se utilizó la información únicamente de la tabla “Viajes”, que contiene el listado de todos los viajes registrados. Los datos de la tabla “Viajes” utilizados se describen a continuación:

[9] http://www.sectra.gob.cl/encuestas_movilidad/encuestas_movilidadb.htm

Nombre Campo	Tipo de dato	Descripción
Viaje	Número	Folio del viaje
ComunaOrigen	Número	Comuna de origen del viaje
ComunaDestino	Número	Comuna de destino del viaje
OrigenCoordX	Número	Coordenada X (UTM) de origen del viaje
OrigenCoordY	Número	Coordenada Y (UTM) de origen del viaje
DestinoCoordX	Número	Coordenada X (UTM) de destino del viaje
DestinoCoordY	Número	Coordenada Y (UTM) de destino del viaje

Tabla 1. Descripción de datos utilizados de la tabla "Viajes". Fuente: Base de datos Encuesta Origen Destino 2012 Santiago, http://www.sectra.gob.cl/encuestas_movilidad/encuestas_movilidadb.htm

Desde la tabla “Viajes” se utilizaron solo aquellos traslados con origen y destino dentro de la comuna, porque Bici Las Condes solo funciona en ese límite territorial. Una vez filtrados los movimientos dentro de la comuna, se buscaron las coordenadas de georeferenciadas de cada traslado en Google Maps y se asociaron al centro de la manzana más cercana. De este modo se obtuvo la demanda por viajes en cada punto de origen/destino.

Un análisis simple de los datos de demanda, determinó que de los 1661 nodos pertenecientes al conjunto O, solo 573 tienen demanda asociada, por lo tanto, para evitar sobrecargar el modelo con datos que no se usen, se redefinió el conjunto O con esos 573 nodos con demanda mayor a cero.

Capítulo 5. Resultados y análisis de sensibilidad

El modelo fue resuelto por medio del solver Cplex 12.8.0 mediante la carga del modelo en el software AMPL, autorizado su uso bajo el programa de licencias “New Graduates”.

Cabe destacar que dadas las condiciones iniciales planteadas, el máximo de paraderos que se puede abrir y reubicar simultáneamente es de 21, puesto que hay 110 nodos candidatos y 89 paraderos existentes, quedando solo 21 posiciones susceptibles de recibir un paradero nuevo o relocalizado. Se entiende que el modelo siempre asignará un paradero relocalizado a alguna de esas 21 posiciones disponibles y que nunca ubicará un paradero nuevo en alguno de los 89 lugares ocupados, pues al tratarse de un modelo estático, dicha posición no está disponible al iniciar la optimización.

El cuadro 1 resume los diferentes resultados de cobertura obtenidos con diferentes instancias de resolución. La cobertura de la red actual con los 89 paraderos en su posición original es de 2102 viajes. Al resolver el modelo con las condiciones de expansión planteadas, relocalizando 9 paraderos y agregando 9 más, los viajes cubiertos alcanzan los 2468, que representa un incremento del 17,4% de la demanda atendida respecto del caso original.

		Paraderos a relocalizar				
		12	9	6	3	0
Paraderos nuevos	12	--	2470	2468	2446	2420
	9	2470	2468	2446	2420	2382
	6	2468	2446	2420	2382	2324
	3	2446	2420	2382	2324	2244
	0	2420	2382	2324	2244	2102

Cuadro 1. Cantidad de viajes atendidos con diferentes combinaciones de paraderos a relocalizar y paraderos adicionales. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la instancia para 12 hubs relocalizados y 12 hubs adicionales no tiene valor para la función objetivo, eso se debe a que no es factible, pues solo hay un margen de 21 nodos candidatos disponibles.

Después de analizar diferentes combinaciones de valores de los parámetros P_n y P_r , se determinó que un mismo número de viajes cubierto se puede alcanzar por medio de diferentes combinaciones. Esto se debe a que existen paraderos que en su posición inicial no tienen demanda asignada y por lo tanto la relocalización no genera una pérdida de cobertura y agregará el mismo número de traslados satisfechos que la instalación de una nueva unidad.

Dado que el aporte a la función objetivo es independiente de la naturaleza del paradero, relocalizado o nuevo, se analizó el beneficio que entrega el total de elementos, vale decir $P_n + P_r$, en términos porcentuales respecto de la red actual, lo que se resume en el Cuadro 2.

$P_n + P_r$,	F.O. (viajes atendidos)	Variación respecto caso inicial
21	2470	17,5%
18	2468	17,4%
15	2446	16,4%
12	2420	15,1%
9	2382	13,3%
6	2324	10,6%
3	2244	6,8%
0	2102	0,0%

Cuadro 2. Resumen del cambio porcentual en la cobertura según el número total de paraderos movidos o adheridos a la red. Fuente: Elaboración propia.

Es factible determinar que el rendimiento del aumento de paraderos es marginalmente decreciente, lo cual es coherente con la lógica de priorización que tiene el modelo, donde los nodos candidatos con mayor demanda serán los primeros en ser ocupados para lograr una maximización de cobertura. Esto resulta en línea con lo planteado por Latorre (Latorre et al., 2012) sobre el rendimiento marginal decreciente en términos de cobertura que reportan los aumentos de estaciones a instalar.

Luego se realizó un análisis respecto de la distancia de cobertura. Modificaciones en este parámetro influyen en el nivel de servicio de la red, una disminución implica mejorar el nivel de servicio, pues los paraderos se localizarán a una menor distancia máxima de los nodos de origen y destino. Por el contrario un aumento de esta distancia implicaría un menor nivel de servicio, por lo tanto este caso no se revisó.

El Cuadro 3 resume los cambios en el total de viajes atendidos cuando la distancia de cobertura disminuye desde su valor inicial, 300 metros, a 250, 200 y 150 metros. En todos los casos se evaluó con las condiciones inicialmente propuestas, 9 relocalizaciones y 9 paraderos nuevos.

Distancia Cobertura (Mts.)	Viajes atendidos (N°)	Variación respecto caso inicial
300	2468	0%
250	1834	25,7%
200	987	60,0%
150	496	79,9%

Cuadro 3. Variación en el número de viajes atendidos con diferentes valores de distancia de cobertura. Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que la disminución de demanda cubierta no es lineal, siendo el cambio entre 200 y 250 metros el tramo más sensible, con casi un 35% de caída en la cobertura respecto del caso inicial, mientras que el menor cambio se aprecia en el rango entre 200 y 150 metros. Esto implica que una la mayor parte de los orígenes y destinos se encuentran entre los 200 y los 250 metros de

distancias de su hub más cercano, mientras que el rango entre 200 y 150 es el que menos agrupa dentro de los rangos estudiados.

Resulta interesante determinar cuántos paraderos adicionales son necesarios para alcanzar los 2468 viajes en cada distancia de cobertura. Para ello se resolvió el problema con distancia de cobertura igual a 250 metros, cero relocalizaciones y 21 paraderos nuevos, que corresponde al número máximo de estaciones que se pueden abrir. La función objetivo tomó un valor de 1834 para esta instancia, lo que implica que los paraderos adicionales no proveen aumentos de cobertura a la red actual, debido a que las ubicaciones potenciales están localizadas a una distancia mayor a los 250 metros de los nodos de origen y destino a los que podrían atender con el parámetro en cuestión igual a 300 mts.

Capítulo 6. Conclusiones

La exposición de las conclusiones se ordena en dos grupos, las que son propias del proceso de trabajo y las que se desprenden del análisis de resultados.

Primero, se desprende del proceso de trabajo que las herramientas tecnológicas del tipo Sistema de Información Geográfica podría resultar de mucha utilidad en la línea de ganar tiempo en las actividades de georeferenciación de la demanda, puesto que el volumen de datos con el que se trabajó es elevado y ubicar uno por uno los datos tomó tiempo importante. También resulta interesante contar con herramientas de simulación de datos y escenarios para enfrentar situaciones de inexistencia de datos o para ahorrar tiempo en el levantamiento de los mismos. Este desafío que queda pendiente para el alumno autor del trabajo, quien lo recoge con interés.

Luego, en relación con el análisis de resultados cabe destacar que al tratarse de un escenario inicial sub óptimo, vale decir que existen paraderos instalados que no tienen demanda asignada, la relocalización y la apertura de nuevas estaciones proveerán el mismo aumento de cobertura de nueva demanda hasta que todos los paraderos instalados tengan demanda asignada. Por lo tanto, en este caso, la decisión de instalar o relocalizar depende exclusivamente de los costos involucrados en cada operación.

Además de lo anterior, los análisis de variación de demanda cubierta para ambas variables, número de paraderos a mover/adherir y distancia de cobertura, muestran rendimientos marginales decrecientes, con lo que se abre la posibilidad de desarrollar medidas de evaluación financieras relacionadas a la cobertura mínima exigida para la expansión de la red, tanto en superficie cubierta como en nivel de servicio.

Capítulo 7. Referencias

Alumur, S., & Kara, B. Y. (2008). Network hub location problems: The state of the art. *European Journal of Operational Research*, *190*(1), 1–21. http://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.008

Campbell, J. F. (1994). Theory and Methodology Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research*, *72*, 387–405. http://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90318-2

Church, & Re Velle. (1974). The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*. http://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1974.tb00902.x

Drezner, Z., & Hamacher, H. W. (2002). *Facility Location Applications and Theory*. (Z. Drezner & H. W. Hamacher, Eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Farahani, R. Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseininia, M., & Goh, M. (2012). Covering problems in facility location: A review. *Computers and Industrial Engineering*. http://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.020

ITDP. (2013). The Bike Share Planning Guide, 152p. Retrieved from https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/ITDP-Bike-Share-Planning-Guide-1.pdf%5Cnhttps://trid.trb.org/view/1285628

Latorre, M., Gutiérrez-Puebla, J., & García-Palomares, J. C. (2012). Distribución espacial de estaciones de bicicletas públicas mediante modelos de localización óptima. *XV Congreso Nacional de Tecnologías de La Informacion Geográfica*, 19–21.

Lin, J. R., & Yang Ta-Hui, T. H. (2011). Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *47*(2), 284–294. http://doi.org/10.1016/j.tre.2010.09.004

Marianov, V., Serra, D., & Charles ReVelle. (1984). Location of Hubs in a Competitive Environment. *Canadian Medical Association Journal*, *130*(5), 557. http://doi.org/10.1016/j.chiabu.2011.09.001

Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, *111*(3), 423–447. http://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00186-6

Schilling, D., Jayaraman, V., & Barkhi, R. (1993). A review of covering problems in facility location. *Location Science*, *1*.