



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

Optimización de localización de bici-estacionamientos masivos con análisis  
multicriterio

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
MARTÍNEZ BELLO SAMUEL

TUTOR PRINCIPAL  
ESHTEP SEGURA PÉREZ  
Facultad de Ingeniería, UNAM

Ciudad Universitaria, CD. MX. octubre 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## **Jurado Asignado:**

**Presidente:** Dra. Rodríguez Vázquez Katya

**Secretario:** M. I. Wellens Ann Godelieve

**1er. Vocal:** Dra. Segura Pérez Esther

**2do. Vocal:** Dra. Huerta Barrientos Aida

**3er. Vocal:** Dr. Gómez Gallardo Wulfrano

CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO

### **Tutor de tesis:**

Dra. Segura Pérez Esther

---

## **Dedicatoria**

La dedicatoria de este trabajo va dirigida a:

Mi padre José Francisco Martínez Parada, mi madre Susana Bello Díaz y mi esposa Claudia Islas Vergara, quienes siempre me han apoyado de manera incondicional.

## **Agradecimientos**

Debo agradecer principalmente a mi tutora la Dra. Esther Segura Pérez y al jurado asignado que realizaron una revisión adecuada del trabajo, en verdad agradezco la retroalimentación; a los profesores de la maestría que me dieron las herramientas para poder realizar el trabajo; a mi compañero Jorge Martínez quien me acompañó en el camino.

Por último, aunque no escribo sus nombres, cada persona que he conocido a lo largo de mi vida, ha dejado una huella en mi vida que ha provocado la persona que soy, por ello se los agradezco.

# CONTENIDO:

Dedicatoria .....	IV
Agradecimientos.....	IV
Índice de figuras.....	XV
Índice de Tablas.....	XVII
Abstract.....	XVIII
Resumen .....	XIX
1. Protocolo de investigación .....	1
1.1. Problemática .....	1
1.2. Problema de investigación .....	3
1.3. Pregunta de investigación .....	3
1.4. Hipótesis .....	3
1.5. Objetivo general .....	3
1.6. Objetivos específicos .....	3
1.7. Alcances .....	4
1.8. Limitaciones .....	4
2. Revisión de literatura .....	5
2.1. La bicicleta como objeto de estudio .....	5
2.2. Los sistemas de préstamo de bicicletas .....	6
2.3. Factores que promueven o desincentivan el uso de la bicicleta .....	6
2.4. Revisión de problemas de localización de instalaciones .....	8
3. Análisis del uso de la bicicleta e infraestructura ciclista.....	11
3.1. Población de la Ciudad de México .....	11
3.2. Movilidad en la Ciudad de México .....	13
3.3. Caracterización de los usuarios de bicicleta.....	14
3.4. Beneficios del uso de la bicicleta.....	19
3.5. Los viajes intermodales y la intermodalidad .....	20
3.6. Infraestructura ciclista vial .....	21
3.6.1 Infraestructura vial en el mundo .....	22
3.6.2 Infraestructura ciclista vial en México .....	23
3.7. Sistemas de préstamo de bicicletas .....	23
3.7.1 Sistemas de préstamo de bicicletas en el mundo.....	24

3.7.2	El sistema de bicicletas públicas en México .....	25
3.8.	Biciestacionamientos .....	25
3.8.1	Biciestacionamientos de corto tiempo .....	26
3.8.2	Biciestacionamientos de largo tiempo .....	26
3.8.3	Biciestacionamientos de largo tiempo en Europa y Asia .....	28
3.8.4	Biciestacionamientos de largo tiempo en América .....	28
3.9.	La cultura ciclista en la Ciudad de México.....	30
4.	Marco teórico .....	31
4.1.	El problema de localización de instalaciones .....	31
4.1.1	Taxonomía de los problemas de localización .....	32
4.1.2	El problema de cobertura de conjunto (SCP) .....	33
4.1.3	El problema de Localización de máxima cobertura (MCLP) .....	36
4.1.4	El problema de localización de p-centro (center problems) .....	37
4.2.	Sistemas de información geográfica .....	38
4.2.1.	Elementos de los SIG.....	38
4.2.2.	Funciones de los SIG .....	39
4.2.3.	Estructuras especiales de los SIG (capas) .....	39
4.2.4.	Tipos de objetos en los SIG .....	40
4.2.5	Datos espaciales vectorial y raster .....	40
4.2.6.	Operaciones y análisis de los SIG .....	41
4.2.8.	Q-Gis .....	42
4.3.	Análisis de decisión multicriterio.....	43
4.3.1	Conceptos básicos del MCDA.....	43
4.3.2	Optimo de Pareto .....	44
4.3.3	Normalización de los criterios.....	44
4.3.4	La ponderación de los criterios.....	45
4.4.	Método PROMETHEE .....	46
4.4.1	Criterios de preferencia enriquecidos .....	46
4.4.2	Índice de preferencia.....	50
4.4.3	Ordenación de preferencias .....	50
5.	Metodología .....	53
5.1.	Recopilación de información .....	53
5.2.	Primera etapa del modelo de localización .....	54
5.2.2	Elección de alternativas .....	54

5.2.3 Selección de criterios .....	56
5.3. Procesamiento y análisis geoespacial.....	58
5.4. Segunda etapa del modelo de localización .....	60
5.4.1 Aplicación del método PROMETHEE.....	60
5.4.2 generación de escenarios .....	62
6. Resultados.....	63
6.1. Cálculo de los criterios para los escenarios y soluciones .....	63
6.2. Orden de preferencia PROMETHEE .....	63
6.3. Escenarios de acuerdo con la distancia mínima.....	65
6.4. Propuesta de solución actual .....	69
6.5. Análisis de Resultados.....	71
6.4.1 La zona con mayor orden preferencia .....	71
6.4.2 La zona menor orden preferencia .....	71
6.4.3 Comparación de soluciones .....	72
6.4.4 Comparativo MULTILOG 2019 versus propuesta de solución .....	74
7. Conclusiones y futuras investigaciones.....	77
7.1. Conclusiones .....	77
7.2. Futuras investigaciones.....	79
8. Apéndice.....	81
8.1. Infraestructura vial en EE. UU. ....	81
8.2. Infraestructura vial en América Latina .....	82
8.3. BSS de EE.UU.....	83
8.4. BSS de America Latina .....	87
8.5. Tablas adicionales .....	88
9. Referencias.....	94

## Índice de figuras

Figura 3.1 Pirámide poblacional de la Ciudad de México fuente y elaboración: INEGI .....	11
Figura 3.2 Grafica de pastel Ocupación por rama Elaboración propia con datos de la secretaria del trabajo y previsión social .....	12
Figura 3.3 Duración de un viaje por transporte en la Ciudad de México.....	13

Figura 3.4. Edades de los usuarios de bicicleta de la Ciudad de México, ...	14
Figura 3.5 Distrito de origen de los viajes en bicicleta. Elaboración propia con datos (INEGI,2017) .....	16
Figura 3.6. Grafica Tipos de lugares de origen y hora de salida, elaboración propia con datos de (INEGI,2017) .....	17
<i>Figura 3.7. Grafica de destinos y hora de partida, elaboración propia con datos de (INEGI, 2017).....</i>	<i>18</i>
figura 3.8. Otros transportes utilizados además de la bicicleta elaboración propia con datos de (INEGI,2017) .....	19
Figura 3.9 .....	20
figura 3.10. Etapas de un viaje intermodal fuente: (Pardo Carlos F, 2013).	20
Figura 4.1 Ejemplo red de conjuntos de coberturas elaboración propia basada en (Daskin, 2011).....	35
Figura 4.2. Representación raster y vectorial información obtenida en: <a href="https://images.app.goo.gl/h8z3YDW48yk36xC67">https://images.app.goo.gl/h8z3YDW48yk36xC67</a> .....	41
Figura 4.3 Criterio de preferencia usual .....	47
Figura 4.4 Criterio de preferencia U-shape .....	47
Figura 4.5.- Criterio V-shape .....	48
Figura 4.6 Criterio de preferencia por niveles.....	48
Figura 4.7.- Criterio de preferencia Lineal .....	49
Figura 4.8.-Criterio de preferencia gaussiano.....	49
Figura 5.1 Metodología general. Elaboración propia .....	53
Figura 5.2 Mapa de alternativas en la Ciudad de México. elaboracion propia en Qgis .....	56
Figura 5.3 Área de influencia. Elaboración propia mediante el software Qgis .....	59
Figura 5.4. Llenado de información de los criterios. ....	61
Figura 5.5. Información de alternativas. ....	61
Figura 6.1. Solución con distancia mínima de 2 kilómetros. elaboración propia en Qgis. ....	66
Figura 6.2.- Solución con distancia mínima de 3.5 Km. Elaboración propia en QGIS .....	67
Figura 6.3.Solución con distancia mínima de 5 km. Elaboración propia en QGIS.....	68
Figura 6.4. Propuesta de solución actual .....	70
Figura 6.5.- Porcentajes de los criterios por cada solución elaboración propia .....	73
Figura 6.6 solución Propuesta en MULTILOG 2019. Elaboración propia en Qgis .....	75
Figura 6.7.- Comparación de la solución presentada en el congreso MULTILOG y la solución actual. Elaboracion propia .....	76
Figura 8.1 Kilómetros de Ciclovías de las principales ciudades de EE. UU. Elaboración propia con datos de (BID,2015).....	81
Figura 8.2 Kilómetros de infraestructura en ciudades de América Latina Elaboración propia con información de (Rios,2015) .....	82

Figura 8.3. Comparación del número de bicicletas del 2014 con el 2019 en las ciudades de EEUU. elaboración propia con datos (Alliance for Biking & Walking, 2014; League of American Bicyclists, 2019) ..... 87

## Índice de Tablas

Tabla 4-1 Relaciones entre objetos Espaciales En un SIG obtenido de (Gómez Delgado y Barredo Cano 2005).....	40
Tabla 5-1 Distritos de la Ciudad de México y número de viajes en bicicleta	88
Tabla 5-2.Tabla de alternativas a bici-estacionamiento elaboración propia.	55
Tabla 5-3 Tabla de criterios elaboración propia.....	58
Tabla 6-1. Flujos de preferencia. Elaboración propia con datos obtenidos a través de Visual PROMETHEE .....	64
Tabla 8-1. Sistemas de préstamo de bicicleta (BSS) de EE. UU elaboración propia con datos de (Alliance for Biking & Walking, 2014) .....	84
Tabla 8-2. Número de bicicletas de las ciudades de EE. UU. elaboración propia con datos de (League of American Bicyclists, 2019) .....	86
Tabla 8-3 Medición de criterios .....	90

# Abstract

The bicycle is a transport that has many benefits to health and urban mobility, in recent years several cities have invested in cycling road infrastructure such as bicycle lanes, loan systems or bicycle parking. A key factor for the success of the infrastructure in particular of the bicycle parking lots is the correct location considering the population demand and their travel needs. In this work, a methodology based on a multicriteria model is proposed, and supported by a Geographic Information System, to locate garage-type bicycle parking lots in Mexico City, which will optimize the use of the service according to the following criteria: the population, the bicycle robberies, transportation stations, workplaces such as offices, workshops, factories, banking services. The results obtained will be compared and it will be analyzed how the distance between stations affects the criteria in different scenarios. A solution is proposed that is adapted to the situation of the year 2020 and that will compare this with different scenarios and a mono objective model. The solution proposed in this work shows that the greater the distance between the stations, the greater the area of influence and consequently there will be greater number of population and workplaces, however, interconnection is lost and as a consequence the quality of service deteriorates and users lose the ability to choose parking, it is also observed that greater distance between bicycle parking lots, alternatives move away from areas with more services such as hospitals, schools and shopping malls as well as stations and bus stops. Finally, the multi-objective model strengthens the model and considers areas that the mono-objective model has not considered because they are areas with little population but many services.

# Resumen

La bicicleta es un transporte que tiene muchos beneficios a la salud y a la movilidad urbana, en los últimos años diversas ciudades han invertido en infraestructura vial ciclista como ciclovías, sistemas de préstamo o biciestacionamientos. Un factor clave para el éxito de la infraestructura en particular de los biciestacionamientos es la correcta localización considerando la demanda poblacional y sus necesidades de viaje. En este trabajo se propone una metodología basada en un modelo multicriterio, y apoyado con un Sistema de Información Geográfica, para localizar biciestacionamientos tipo garaje en la ciudad de México los cuales optimizaran el uso del servicio de acuerdo con los siguientes criterios: la población, los robos de bicicleta, las estaciones transporte, los lugares de trabajo como oficinas, talleres, fabricas servicios bancarios. Los resultados obtenidos se compararán y se analizará como afecta la distancia entre estaciones a los criterios en distintos escenarios. Se propone una solución que se adecua a la situación del año 2020 y ese comparara esta con diferentes escenarios y un modelo mono objetivo, La solución propuesta en este trabajo muestra que a mayor distancia entre las estaciones mayor será el área de influencia y en consecuencia habrá mayor número de población y lugares de trabajo sin embargo se pierde interconexión y como consecuencia se deteriora la calidad del servicio y los usuarios pierden capacidad de elegir estacionamiento, también se observa que mayor distancia entre biciestacionamientos, las alternativas se alejan de zonas con más servicios como hospitales , escuelas y plazas comerciales además de estaciones y paraderos. Por último, el modelo multiobjetivo robustece el modelo y considera áreas que el modelo mono objetivo no ha considerado debido a que son áreas con poca población, pero un gran número de servicio

# 1. Protocolo de investigación

En la Ciudad de México, los viajes en bicicleta representan el 1.4% del total los viajes realizados. Esta situación representa un área de oportunidad en materia de movilidad y sustentabilidad, pues algunas de las ventajas que tiene este tipo de transporte son: emite cero emisiones de carbono, tiene beneficios a la salud y disminuye la congestión vial, entre otras.

Para promover el uso de la bicicleta se requieren de políticas e infraestructura que proporcionen seguridad y comodidad al usuario de este transporte; en el rubro de la infraestructura se encuentran los estacionamientos para bicicleta denominados biciestacionamientos, espacios cuya función principal es la de alojar la bicicleta en un lugar adecuado y seguro; en el caso de los estacionamientos con el modelo de *u invertida* o similares estos son útiles para los usuarios que requieren el servicio por un periodo de tiempo corto, por ejemplo, mientras realizan una compra en un pequeño comercio; sin embargo, si requieren dejar la bicicleta por un periodo de tiempo más extenso, por ejemplo, mientras se encuentran trabajando o realizan un viaje en el metro, entonces se requiere de un estacionamiento denominado de largo tiempo, que ofrece la posibilidad de salvaguardar la bicicleta de diversas amenazas, tales como, el robo, algunos daños causados por el clima, o bien, del vandalismo.

La Ciudad de México cuenta con el programa “Biciestacionamientos Masivos” que se integra de 5 estacionamientos cada uno con una capacidad de almacenamiento de 100 a 400 bicicletas, y que se encuentran ubicados dentro de los Centros de Transferencia Modal (CETRAM), esto con el objetivo de que las bicicletas se integren a otros medios de transporte. Este sistema ha demostrado ser eficiente en cuanto a la seguridad y comodidad que proporciona, sin embargo, la escasa cantidad de estos espacios tiene como resultado que solo una parte de la población tenga acceso a este servicio. De acuerdo a lo anterior, se distingue que se requieren construir más estacionamientos de este tipo.

## 1.1. Problemática

Durante 2007, en el Valle de México, el número de viajes en todos los transportes era de 21 millones y se incrementó a 34 millones para el año 2017; en el caso de los viajes realizados en bicicleta, de 0.9% se incrementó a 1.7% en el mismo periodo.

En el año 2007, en el Valle de México el número de viajes era de 21 millones y se incrementó a 34 millones para el año 201, en el caso de los viajes en bicicleta paso de representar el 0.9% a 1.7%. Esto representa un área de

oportunidad para el Gobierno Estatal y Federal para crear las políticas e infraestructura que aumente el porcentaje de uso de la bicicleta.

Dentro de los programas e infraestructura con que actualmente se cuentan son: “tu bici en el Metro”, el sistema de préstamos “Ecobici” y el programa de nombre “Biciestacionamientos masivos de la Ciudad de México”; este último inicia en el año 2014 y para el 2020, lo integran tres bici-estacionamientos masivos ubicados en la Raza, Pantitlán y Tláhuac y tres semi-masivos en La Villa, Periférico oriente y el Rosario. El objetivo del sistema es proporcionar un espacio seguro para el estacionamiento de las bicicletas, que promueva los viajes intermodales y que incluya a la bicicleta en el primer y último tramo de un viaje.

A continuación, se presentan datos que reflejan cual es la situación actual del sistema:

- La Encuesta Origen Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (EOD), (INEGI, 2017), presenta información de cuantos viajes se realizan según el transporte particionado en zonas denominadas distritos; de acuerdo con esta, en las zonas donde se encuentra un bici-estacionamiento se realizan el 12.51% de los viajes en bicicleta.
- Alrededor de 46 de 172 CETRAMS, tienen un bici-estacionamiento a menos de 5 kilómetros de distancia.
- El sistema brinda servicio a 6,345 usuarios en la ciudad de México, que representan menos del uno por ciento de los ciclistas en la ciudad.
- De 16 alcaldías que conforman la CDMX, solo Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Iztapalapa y Tláhuac cuentan con un biciestacionamiento
- Solo 3 de los 5 biciestacionamientos se encuentran a menos de 500 metros una ciclovía.
- Los distritos con mayor número de viajes motorizados con duración no mayor a 20 minutos son: Molino Tezonco, la Condesa Ciudad Universitaria, Central de Abastos y La Raza, siendo este último el único que cuenta con un biciestacionamiento.

Los datos anteriores muestran que a pesar de que existe un buen nivel de aceptación del sistema, este requiere de mayor inversión y más instalaciones. La administración del gobierno actual ha invertido en la construcción de infraestructura ciclista, como son: ciclovías, sistemas de préstamo de bicicletas y por supuesto, biciestacionamientos. De acuerdo con lo anterior, surgen preguntas como ¿cuáles son los criterios que el gobierno considera para construir un nuevo biciestacionamiento?, ¿cuáles son los principales orígenes y destinos de los usuarios de bicicletas?, ¿cuáles son los puntos donde un biciestacionamiento mejora la seguridad?, y, por último, ¿dónde ubicar nuevos biciestacionamiento a fin de maximizar el beneficio de la población, considerando sus necesidades de viaje?

## **1.2. Problema de investigación**

El problema de investigación del presente trabajo consiste en localizar los lugares estratégicos para la construcción de biciestacionamientos que junto con los ya instalados promuevan la interconexión y los viajes intermodales en los cuales se utiliza la bicicleta, que beneficien al mayor número de usuarios actuales y atraigan a nuevos usuarios.

## **1.3. Pregunta de investigación**

¿cuáles son los lugares indicados para construir biciestacionamientos que maximicen el uso del sistema a los usuarios actuales y potenciales, además de promover los viajes intermodales en los cuales se incluye a la bicicleta?

## **1.4. Hipótesis**

Se espera que, mediante un análisis de decisión multicriterio apoyado por la información geoespacial, se identifique que las mejores alternativas que satisfacen la demanda se encuentren en lugares dentro de la zona de Chapultepec, Centro, Metro Constitución de 1917 y Condesa.

## **1.5. Objetivo general**

Proponer una metodología para localizar biciestacionamientos tipo *garaje* mediante la optimización de un modelo multicriterio para satisfacer la demanda de los usuarios en la Ciudad de México.

## **1.6. Objetivos específicos**

- Realizar un análisis de la población usuaria de la bicicleta, para identificar las características de esta.
- Hacer una investigación documental de la infraestructura ciclista, como son, los estacionamientos masivos, los sistemas de préstamo de bicicletas y ciclovías. con la finalidad de identificar los atributos que incentivan el uso de la bicicleta.
- Investigar los modelos que permiten realizar la localización de estacionamientos para bicicleta, para contextualizar y robustecer el modelo de propuesta.
- Identificar lugares estratégicos en los cuales se pueden construir estacionamientos tipo *garaje*, para considerarlos como nodos potenciales para la localización.
- Identificar y definir los criterios que forman parte del modelo multicriterio.

## **1.7. Alcances**

Dentro de los alcances de la tesis se planea una investigación documental de la bicicleta como objeto de estudio.

Dentro del modelo multicriterio se toman a consideración: la población, los robos de bicicletas en la zona, los viajes motorizados con duración menor a 20 minutos, Las CETRAMS, las escuelas, comercios, hospitales y demás unidades económicas.

La metodología propuesta en esta tesis está diseñada para la ciudad de México, considerando la población, unidades económicas y demás mediciones en el periodo del 2015 al 2020.

Se consideran los Biciestacionamientos construidos desde el 2014 hasta los construidos en el año 2020 los cuales son: La Raza, La Villa, Pantitlán, Periférico Oriente, Tláhuac, Buenavista y el Rosario.

Se considera que los biciestacionamientos tiene un espacio de aproximadamente 400 bicicletas, característica de un Biciestacionamiento masivo de acuerdo la secretaria de movilidad de la Ciudad de México.

## **1.8. Limitaciones**

En este trabajo no se contemplan los costos ni las dimensiones de los biciestacionamientos.

La metodología se puede aplicar en un periodo posterior al 2020 con las debidas adecuaciones de información geoespacial y considerando nuevas instalaciones de biciestacionamientos

## 2. Revisión de literatura

Para esta investigación se realizó una revisión de la literatura, que se dividió en tres partes: en la primera, se realizó una investigación del objeto de estudio: la bicicleta en general; en la segunda, de los factores que motivan y desmotivan el uso de la bicicleta; y en la tercera, del problema de localización de instalaciones, tanto en lo referente a estacionamientos, biciestacionamientos y bicicletas, como a métodos de localización, lo anterior ya que el objetivo de esta investigación es la localización de nuevos biciestacionamientos para satisfacer la demanda de los usuarios en la Ciudad de México.

### 2.1. La bicicleta como objeto de estudio

Dentro de las primeras búsquedas de información y parte de la investigación documental, se usaron como palabras clave “bicicleta” “infraestructura ciclista” y “cultura ciclista”.

Los primeros documentos revisados fueron (Ríos et al., 2015), el cual muestra algunos lineamientos y ejemplos para fomentar lo que el autor llama política ciclo-inclusiva. El texto se divide en 4 partes: infraestructura, participación ciudadana, operación y aspectos normativos. La importancia de este documento radica en la información acerca de la infraestructura actual de diversos países de América Latina y el Caribe. También habla de cómo el tomador de decisiones puede mejorar los servicios de infraestructura ciclista, los cuales se basan en tres puntos: identificar, los servicios existentes, las áreas con mayor población y con mayor necesidad de servicios; evaluar, la posible implementación, la calidad de los servicios, el estado de las bicicletas existentes y el impacto de esquemas y diseñar, el plan de acción y las jornadas de mantenimiento.

Otro trabajo cuyo tema es la bicicleta es el del Centro de Estudios sobre Redes, Transportes, Urbanismo y Construcción Pública (CERTU) (2013). En el documento se señalan las características de una red vial para bicicletas y se propone la metodología para su creación, asimismo, trata de la intermodalidad y como integrar a la bicicleta con los demás medios de transporte, por ejemplo: llevar la bicicleta dentro del transporte o generar estacionamientos amplios y seguros y que satisfagan la demanda.

Otros artículos revisados fueron aquellos que mencionan los beneficios del uso de la bicicleta. Bauman et al. (2017), muestra que los sistemas de préstamo de bicicletas BSS, también conocidos como programas de bicicletas públicas, han mejorado la actividad física de la población y en consecuencia, la salud de la misma.

## **2.2. Los sistemas de préstamo de bicicletas**

Un tema importante dentro de la investigación que estaba sumamente relacionado con la bicicleta, fue el de los sistemas de bicicletas públicas o sistemas de préstamos de bicicletas (BSS bike shares systems). En los últimos años estos han adquirido gran importancia, por lo que se encontraron varios artículos que estudiaban los BSS. A continuación, se mencionan algunos de los temas analizados en dichos estudios:

- Dentro de las investigaciones enfocadas en BSS, se encuentran las que tratan acerca de los cambios en la modalidad del transporte (Pucher & Buehler, 2011).
- Los beneficios relacionados con el uso de la bicicleta y los BSS. Por ejemplo, Shaheen et al. (2010) señala algunos de ellos, tales como: la disminución de contaminantes, cambios en la movilidad y en la salud, por otro lado, Bauman et al. (2017), muestra que los BSS han mejorado la actividad física de la población y en consecuencia, su salud.
- Los factores que intervienen en el éxito de un BSS. Por ejemplo, Sun et al. (2018), estudia el caso del sistema Pronto y los posibles motivos que lo llevaron al fracaso.
- El diseño para un BSS (Jenn-Rong Lin, 2011), el cual trata acerca de un número de puntos que son candidatos para ser una estación del sistema y demandas de viajes estocásticas, de acuerdo a lo anterior, se quiere saber dónde construir estaciones y, asimismo, los caminos para que se integre con los demás sistemas de transporte. Para hacer el diseño se pensó en minimizar los costos que generan los viajes y en los costos de construcción.

## **2.3. Factores que promueven o desincentivan el uso de la bicicleta**

Se realizó una revisión de artículos cuya cuestión central fueran los factores que promueven o desincentivan el uso de la bicicleta, y el resultado fue el siguiente.

Winters M, et al. (2011) realizaron un estudio en la ciudad de Vancouver Canadá que mostraba los principales factores motivantes y disuasivos según el tipo de ciclista. Para ello, clasificaron a los ciclistas en potencial, ocasional, frecuente y regular.

Dentro de los factores motivantes se encontraron la facilidad de realizar el viaje en bicicleta, la distancia del trayecto (menor a 5 km), la ruta sin tráfico de vehículos, contar con un lugar seguro para dejar la bicicleta, el tiempo de recorrido es menor respecto a otros medios de transporte y si es posible viajar con la bicicleta en el tren, mientras que, entre los disuasivos fueron, la necesidad de cargar grandes bultos, la inseguridad de la ruta durante la noche, la lluvia, los vehículos que viajan a más de 50 km/h y los riesgos de colisión con un automóvil.

Se llegó a la conclusión de que, si bien no se tiene control de los factores del clima como la nieve, los caminos congelados o la llegada de la noche, si es posible realizar una correcta planeación de la ruta y mejorar la infraestructura.

Otra investigación que muestra los factores es la de Useche et al. (2019), cuyo objetivo es “examinar los factores alentadores y desalentadores clave percibidos por los ciclistas en el uso de este medio de transporte alternativo”. En este trabajo se estudió la relación que existe entre el motivo por el que se emprende viaje en bicicleta y las colisiones de los últimos 5 años.

En su metodología, se utilizó una muestra de 1,064 participantes de 20 ciudades alrededor del mundo. Dentro de los resultados que se muestran, se encuentra que, las principales razones que motivan un viaje son: el tiempo que se ahorran en un viaje, la salud, los costos, la comodidad, entre otros, en tanto que, las desmotivantes son los asaltos, la inseguridad, los riesgos de choque, la escasa cultura vial y el poco respeto que se tiene hacia los ciclistas, factores de clima, la falta de infraestructura adecuada y alguna enfermedad que impida usar la bicicleta.

Fernández-Heredia et al. (2014) realizan un caso de estudio en la Universidad de Madrid, para analizar los factores que pueden influir o inhibir el uso de la bicicleta. Algunos de los factores que los autores distinguen en su investigación que influyen en el uso de este medio de transporte son: la eficiencia, la flexibilidad, el económico, el ecológico, el saludable, el divertido, mientras que, entre los factores que inhiben el uso del mismo se encuentran: la distancia, el peligro, el orográfico, el clima, el vandalismo, las instalaciones y el confort.

Dentro de los resultados y conclusiones, los autores hablan de que existe una percepción distinta entre los habituales usuarios y aquellos que no tienen la costumbre de usar la bicicleta, también se concluye que los factores externos como: el peligro, el vandalismo y las instalaciones son percibidas como un factor de gran importancia para los usuarios. Por último, los autores recomiendan a la universidad crear políticas sobre usos de suelos que beneficien el paso a ciclistas y peatones, la construcción de estacionamientos seguros y cercanos al metro o los edificios.

## 2.4. Revisión de problemas de localización de instalaciones

Uno de los primeros trabajos que se revisaron fue el de Pérez-Fernández y Wilches-González (2018), quienes a través de la demanda conocida y la demanda potencial, diseñan un sistema de red de estacionamientos para bicicletas para la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia sede Tunja. Para la obtención de datos, se realizaron conteos y encuestas para medir lo que se denomina demanda potencial y demanda manifiesta. El diseño final contempla doce estacionamientos, cinco con diseño vertical y siete con diseño tipo árbol; asimismo, en algunos estacionamientos se enrejó el espacio para ofrecer mayor seguridad. La solución solo se basa en la información obtenida de las entradas y salidas y de las encuestas.

La metodología consta de tres pasos: el primero consiste en elegir las alternativas; para ello, se basaron en las trayectorias de los taxis argumentando que los viajes de los mismos proporcionan información más detallada y sofisticada, además, proporciona datos acerca del congestionamiento vial y la dinámica de los viajes; el segundo es determinar la posible demanda; para esto, se consideraron 4 tipos de lugares: estaciones de metro, centros comerciales, parques y viviendas. Para cada uno de esos lugares se tomó un radio para medir la población aledaña; para las viviendas se consideraron 200 metros, para las estaciones de trenes 100 metros y para los parques 300 metros; el tercero fue la solución. En él se utilizaron dos modelos: el modelo de P-mediana y un modelo de máxima cobertura MCLP; para ambos modelos se asignaron 40, 80 y 120 estaciones. Se observó que el modelo P-mediana, distribuía de mejor manera las estaciones, mientras que el MCLP, concentraba las estaciones en áreas centrales mejorando la eficiencia en cuanto a la demanda potencial; el autor concluye que ambos modelos son eficientes y que el tomador de decisiones deberá tomar en cuenta las políticas y propósitos.

J.-R. Lin, y T-H Yang Ta-Hui (2011) realizan un estudio en el cual proponen un modelo donde se busca localizar los posibles puntos de estación para bicicletas y ciclovías para integrar la bicicleta al sistema de transporte; para ello consideran la demanda de viajes estocástica de origen a destino, además de tres segmentos de viaje: el primer segmento, del punto de origen a la estación origen de préstamo de bicicletas (este viaje se realiza caminado), el segundo, el viaje en bicicleta de la estación donde toma la bicicleta hasta la estación donde la deja y el tercero, donde el usuario deja la bicicleta en la estación para dirigirse a su destino. Los autores mencionan la importancia de que el BSS esté integrado con otros sistemas de transporte, asimismo, señalan que, para que el sistema tenga éxito se debe considerar la cercanía entre las estaciones, donde se toma y donde se deja la bicicleta, además de un número suficientemente grande de estaciones y de bicicletas, por último, se considera el costo de tener que transportar bicicletas de ciertas estaciones

con poca demanda a otras las cuales tienen más demanda. Una vez planteado el modelo, dan un ejemplo con seis edificios corporativos, dos estaciones de transporte masivo, cuatro estaciones de autobús y once alternativas a considerar para las estaciones del sistema.

Por su parte, Jenhung Wang (2016) utilizaron los patrones de uso para localizar las estaciones que carecen de bicicletas o de espacios para aparcar y realizaron un análisis espaciotemporal mediante los Sistemas de Información Geográfica (GIS por sus siglas en inglés). El estudio ocupó la información de "YouBike" (un BSS de la ciudad de Taipéi). Los modelos espacio-temporales obtienen información del lugar de la estación (longitud y latitud), y cada cierto periodo de tiempo se hace un conteo de bicicletas disponibles y de espacios para aparcar; con esa información se clasifican las estaciones en cinco tipos los cuales son: "sin bicicletas", "pocas bicicletas", "normal", "pocos espacios" y "sin espacios"; para cada clasificación se asigna un color con la finalidad de que sea posible mapearlo en GIS; de esa forma, se localizan las estaciones y horarios en que no son eficientes. Dentro de las conclusiones a que los autores llegaron se encuentra: el análisis con el que se pueden localizar los lugares potenciales para futuras estaciones, la gran aportación del uso de los GIS y la eficiencia de los modelos espaciotemporales para la localización de estaciones de préstamo de bicicletas.

Otro trabajo en el cual se usan los sistemas de información geográfica para la localización de estaciones de BSS es el realizado por Zuluaga et al. (2018); en el estudio menciona que la localización de estaciones debe ser cercana entre las mismas, con el objetivo de facilitar los viajes; debe estar cerca de estaciones de otros transportes, con la finalidad de complementar el transporte y debe encontrarse en áreas residenciales, comerciales y culturales. Para obtener la localización óptima, usa una matriz de origen-destino; en esta, dando M puntos y N alternativas se toma un subconjunto de P alternativas y se realiza la suma de los costos, el objetivo será minimizar la suma de los costos y P. Por medio de ArcGIS, se geolocalizaron las alternativas, así como las actuales estaciones del BSS "Manizales en Bici", asimismo, también se geolocalizaron los usuarios del sistema.

Los resultados mostraron que la situación inicial, sólo el 20% de los usuarios estaban en el área de servicio del BSS, por lo que se calcula que se debe caminar en promedio 332 metros para poder hacer uso de la bicicleta. Con una primera solución que se propone, el 43% de los usuarios estarían en el área de cobertura y con la segunda solución (8 estaciones actuales y 36 nuevas), el 61%. El estudio logra identificar cuáles son las estaciones más importantes y también las alternativas que no cubren la zona de ningún usuario del sistema. Como parte de las conclusiones, los autores mencionan la importancia de mejorar la cobertura del sistema ya que los usuarios deben gastar mucho tiempo para poder llegar una estación.

Otro modelo que busca optimizar el servicio en una red de estaciones en un BSS en la ciudad de Coímbra, en Portugal. El trabajo realizado por Frade y

Ribeiro (2015), determina de manera síncrona la ubicación de las estaciones, así como su tamaño, el número de bicicletas para maximizar la demanda y el tamaño de la flotilla. Dentro de los datos utilizados esta la demanda del sistema, los costos fijos, los costos de mantenimiento, y de reubicación, presupuestos y capacidades.

El objetivo del problema fue maximizar la demanda y el retorno de la inversión; parte de las restricciones que se consideran son el valor presente de los costos netos para no superar el presupuesto, la demanda del sistema en los diferentes horarios, además de otras, tales como, la reubicación de bicicletas y el tamaño de la flotilla. Dentro de las soluciones se generaron 5 escenarios; ejemplo de uno de ellos es el que establece 12 estaciones con un total de 227 espacios, en el cual se requerirán 168 fletes y una inversión de 199,990 euros con un retorno anual de 202,874 euros.

Por su parte, Di Sun et al. (2020) simulan el impacto de un BSS en el tráfico de la zona; para efectuar esto, su metodología se divide en dos procesos; primero se obtiene mediante *gravity* la localización de estacionamientos, considerando el tipo de uso de suelo (zonas residenciales, parques, estaciones del metro y áreas comerciales); después, se simula el flujo y distribución del tráfico para la solución propuesta. El modelo planteó 19 alternativas y, de ellas, se designaron 13 como solución. El estudio concluye que la disminución de tráfico es significativa en algunas partes, pero que la velocidad de los vehículos no cambia; asimismo, que la metodología de localizar y simular da buenos resultados en la práctica.

Uno de los estudios de Samani et al. (2018), se considera de gran importancia para este trabajo, ya que integra tanto la localización multicriterio como los sistemas de información geográfica. En este, se propone la construcción de un estacionamiento público de autos en la ciudad de Teherán, Irán. La metodología se divide en tres procesos: el primero, es el uso de herramientas de análisis multicriterio, en particular AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Los autores argumentan que era necesario considerar diversos criterios tanto económicos, como sociales, técnicos, ambientales e incluso políticos y que estos podrían estar en conflicto sobre todo cuando se consideraban los puntos de vista de los actores involucrados (expertos, administradores y los usuarios); de acuerdo a lo anterior, los criterios utilizados fueron los siguientes: densidad poblacional, congestionamiento de tráfico, precios de tierra, las distancias a avenidas principales y a centros comerciales, hospitales o escuelas; el segundo, utilizo las *Geo-espacial networks services* (Redes Sociales Geoespaciales); en este caso, la información que se puede obtener de las redes sociales, así como de la participación ciudadana, es de gran importancia, por lo que el proyecto buscaba utilizar los SIG como una herramienta que hiciera participe a la comunidad; el tercero, utilizo un bot en la plataforma Telegram como interfaz para medir y asignar un peso a las alternativas según los actores que participarían en la toma de decisiones; el resultado fue que la solución tuvo un nivel de aceptación por parte de los expertos y de los ciudadanos entre el 65% y 85%.

### 3. Análisis del uso de la bicicleta e infraestructura ciclista

En este capítulo se abordan cuestiones relacionadas con la bicicleta, como son las características de la población usuaria, los viajes intermodales y la infraestructura; asimismo, se analizarán y mostrarán algunos ejemplos de la infraestructura ciclista que existe alrededor del mundo, haciendo énfasis en el caso de la Ciudad de México; por último, con la información analizada, se tratará de caracterizar la cultura ciclista de nuestra ciudad.

#### 3.1. Población de la Ciudad de México

La Ciudad de México cuenta con dos millones seiscientos sesenta mil hogares y una población de ocho millones ochocientos mil personas, de las cuales, ocho millones doscientos mil son mayores de seis años. La Figura 3.1 muestra la pirámide poblacional de la ciudad, donde el 47.4% son hombres y el 52.6% son mujeres; en ella también se observa que la población se concentra en los rangos de edades de 20 a 54 años, característica que predominará entre los usuarios de bicicleta.

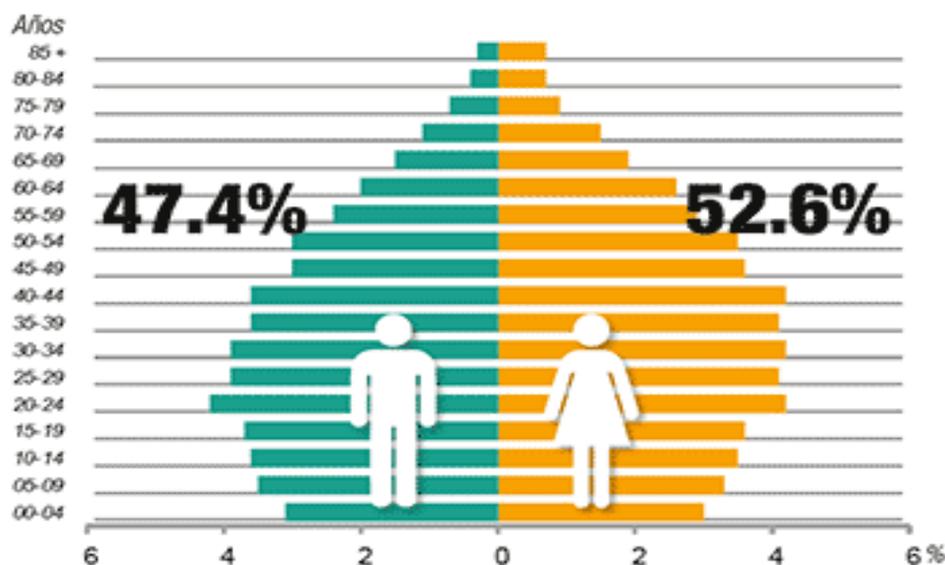


Figura 3.1 Pirámide poblacional de la Ciudad de México fuente y elaboración: INEGI

En la Ciudad de México, la Población Económicamente Activa (PEA) es de cuatro millones quinientas catorce mil personas; las ramas de actividades económicas de la población ofrecen un primer panorama acerca de los principales puntos de afluencia de esta en la ciudad. La siguiente gráfica muestra la ocupación por rama de actividad económica en las que se divide la PEA.



Figura 3.2 Grafica de pastel Ocupación por rama Elaboración propia con datos de la secretaria del trabajo y prevision social

Como se observa en la Figura 3.2, la principal actividad la rama de servicios con el 47%, seguido del comercio con el 20%, el 11% está en la industria manufacturera, el 7% en el gobierno u organismos internacionales, el 5 % en la construcción y el 1% en la industria de extracción y electricidad, por último, el 1% restante en actividades agropecuarias.

El lugar de trabajo de la actividad económica servicios principalmente es en oficinas y corporativos, para la segunda actividad el comercio el lugar de trabajo se encuentra en las grandes empresas comercializadoras, mercados establecidos o sobre ruedas, hasta las Pymes y MiPymes y para la tercer principal actividad, la industria manufacturera podría suponerse que el lugar para realizar la actividad son fábricas y talleres. Los lugares mencionados son destinos y orígenes de afluencia los cuales se analizarán para relacionar los destinos y orígenes de los usuarios de bicicleta.

### 3.2. Movilidad en la Ciudad de México

De acuerdo con los resultados de la encuesta origen destino (INEGI, 2017), el 44.2% de los hogares cuenta con un automóvil, el 5.3 % con motocicleta y el 14.6% con bicicleta, el 46.9% restante de los hogares no cuenta con ningún tipo de vehículo de transporte.

Se estima que, en la Ciudad de México en un día entre semana, se realizan un total 17.30 millones de viajes, los cuales se efectúan de la siguiente manera: 4.5 millones, caminado; 8.62 millones, en transporte público; 4.06 millones, en transporte privado (automóvil o motocicleta) y aproximadamente 240 mil viajes, en bicicleta; este último dato muestra el poco uso que se da a la bicicleta como medio de transporte.

Al comparar el uso del automóvil contra el de la bicicleta, se tiene que, se realizan 16.69 veces más viajes en automóvil que en bicicleta. En general, estos últimos representan el 3.3% del total de viajes, mientras que, otros transportes como microbús, automóvil, metro o taxi representan el 47.8%, 29.5%, 18.5% y 6.1% respectivamente del total.

En cuanto a la duración de los viajes, el Autobús tiene una duración promedio de 50.47 min, el automóvil de 40.98, el microbús de 40.39 min y el metro de 40.66 min siendo estos los de mayor duración mientras que los de menor duración son la motocicleta con 26.32min la bicicleta con 20.88 y caminar con 12.52 minutos, en la Figura 3.3 se muestran otros transportes además de los ya mencionados

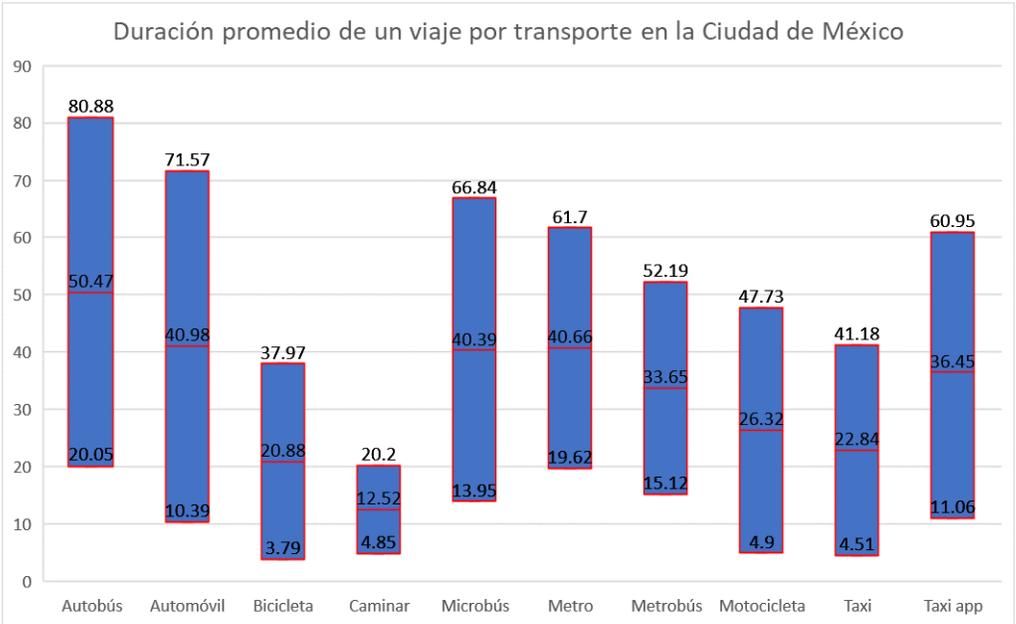


Figura 3.3 Duración de un viaje por transporte en la Ciudad de México. Elaboración Propia con datos de (INEGI, 2017)

En la Figura III.3 se observa que la bicicleta se utiliza para viajes cortos con una duración entre los 3 y los 20.2 minutos, mientras que, el automóvil se utiliza para viajes con una duración entre 10.39 y 71.57 minutos. El análisis de la duración de viajes realizados en los diferentes transportes abre la posibilidad de que una parte de los viajes que se realizan en 20 minutos o menos, se puedan efectuar en bicicleta.

Si se consideran tanto porcentajes como duración, en la Ciudad de México existe una preferencia por el uso de transporte motorizado en lugar de la bicicleta, aún en viajes con duración menor a 20 minutos.

### 3.3. Caracterización de los usuarios de bicicleta

A menudo se piensa que el uso de la bicicleta es para viajes cortos; incluso, no se ve a la bicicleta como un medio de transporte, sino como una forma de recreación, y si bien es cierto que un paseo en bicicleta es recreativo, existe una proporción de la población que ha hecho de la bicicleta su medio de transporte.

En esta sección, se muestran las características generales de la población usuaria de bicicleta, tomando como base para este análisis la encuesta origen-destino en Hogares del Encuesta Origen Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México 2017 (EOD) (INEGI, 2017).

Según la encuesta, el 73% de los usuarios son hombres y el 27% son mujeres; en cuanto a la edad, el 64.82% tiene entre 16 y 51 años; a continuación, se muestra la gráfica con los porcentajes por edad de los usuarios.

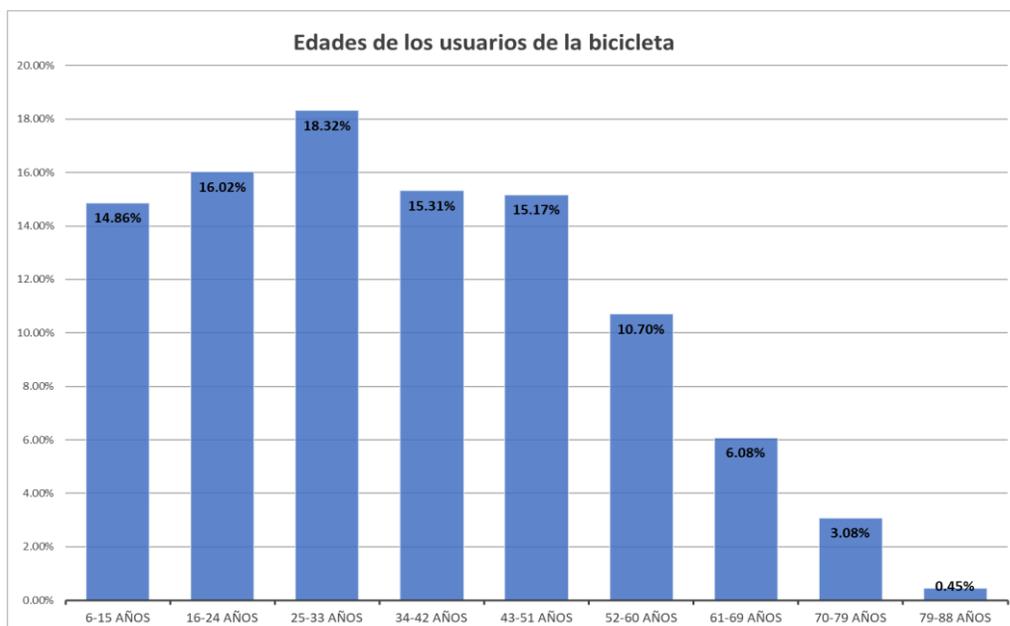


Figura 3.4. Edades de los usuarios de bicicleta de la Ciudad de México, Elaboración propia con datos de (INEGI,2017)

La Figura 3.4 muestra que los usuarios de bicicleta se encuentran principalmente en un rango de edad de 25 a 33 años, siendo su porcentaje de 18.32%; por otro lado, los grupos de 6 a 15 años, de 16 a 24, de 34 a 42 y 43 a 51, representan cada uno aproximadamente 15% del total; a partir de los 52 años, la tendencia al uso de este transporte disminuye, hasta un rango de edad de los 79 a 88 años, en donde es posible observar que, este grupo solo representa el 0.45% de los usuarios.

En cuanto al nivel de estudios, la mayor parte de los usuarios de bicicleta tiene primaria o secundaria, con 28.95% y 31.23%, respectivamente; le siguen el 20.09% con preparatoria; el 12.20% con una licenciatura o nivel profesional; el 2.25% con carrera técnica y bachillerato; el 1.09% con carrera técnica; el 1.75% de los usuarios cuentan con un grado de maestría o doctorado; los usuarios con preescolar son del 1.3% y, por último, la población usuaria de bicicleta con normal básica o sin estudios, representa el 0.70% y 2.25% del total, respectivamente.

Si se comparan estos datos con los porcentajes de edades, se aprecia que hay un porcentaje de personas que, a pesar de ser mayores a 15 años, solo tienen primaria o secundaria, ya que solo el 14% de la población tiene una edad entre 6 y 15 años, mientras que, el 60% de la población, tiene estudios máximos la primaria o secundaria.

En relación con el estrato sociodemográfico, de acuerdo con la encuesta, el estrato bajo representa el 1% de los usuarios; el medio bajo, representa el 73%; el medio alto es de 21% y el estrato alto es de 5%.

Ya que la Encuesta Origen Destino fue diseñada para la zona del Valle de México, a continuación, se muestran los porcentajes de viajes que se realizan en cada estado, según su origen; el 66% de los viajes inicia del Estado de México; el 31% son en la Ciudad de México; el 1.5% en Hidalgo, en tanto que, el 0.5% de los viajes tienen como origen lugares fuera de la zona metropolitana.

Para realizar el análisis en la Ciudad de México, se utiliza como unidad de medición el "Distrito", el cual fue utilizado en la encuesta y representa la zona de menor área; la Ciudad de México se divide en 85 distritos, en la Figura 3.5 se observa que el 80% de los viajes se origina en el 50% de los distritos.

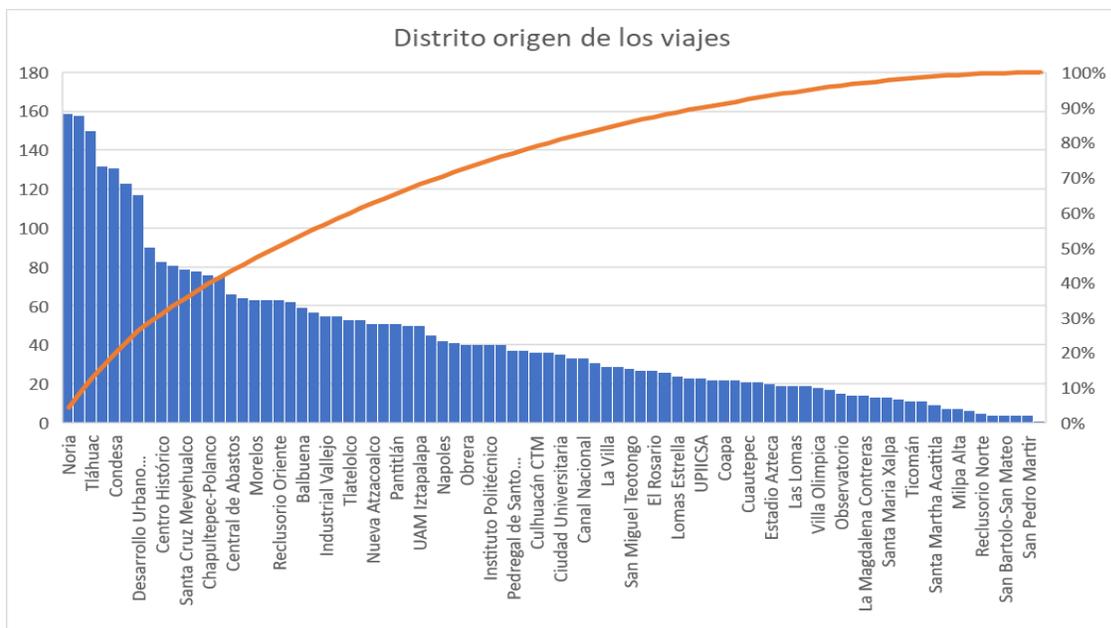


Figura 3.5 Distrito de origen de los viajes en bicicleta. Elaboración propia con datos (INEGI,2017)

Los distritos en los que se realizan el mayor número de viajes son: La Noria, San Felipe de Jesús, Tláhuac, La condesa, Mixquic, Santa Catarina, Desarrollo Urbano Quetzalcóatl, Tulyehualco, Centro Histórico, Tezozómoc, Santa Cruz Meyehualco, Palacio de los deportes, Chapultepec-Polanco, Buenavista Reforma, Central de Abastos, Bondojoito, Morelos, Tepepan, Reclusorio Oriente y el Molino Tezonco.

Es importante distinguir los distritos que actualmente cuentan con un biciestacionamiento; el distrito de Pantitlán, se realizan el 1.39% de los viajes en bicicleta; en la Raza, el 1.09%; en el distrito de La Villa, alrededor del 0.7%; en Periférico Oriente, ubicado dentro del distrito Desarrollo Urbano Quetzatlcoatl, el 3.1%, mientras que, en Buenavista, el 2.04% del total.

Lo anterior muestra que, la planeación del lugar donde actualmente se ubican los biciestacionamientos, no obedece a la demanda de los mismos, asimismo indica que, considerando que algunos biciestacionamientos fueron construidos antes de realizarse la encuesta, la promoción del uso de la bicicleta no es favorable. Se busca que los próximos biciestacionamientos tengan un mayor uso y promuevan el uso de la bicicleta.

Otra característica importante que se debe analizar de los viajes en bicicleta es, el propósito de viaje; la Figura 3.6 presenta los lugares donde se origina el viaje y la hora de partida.

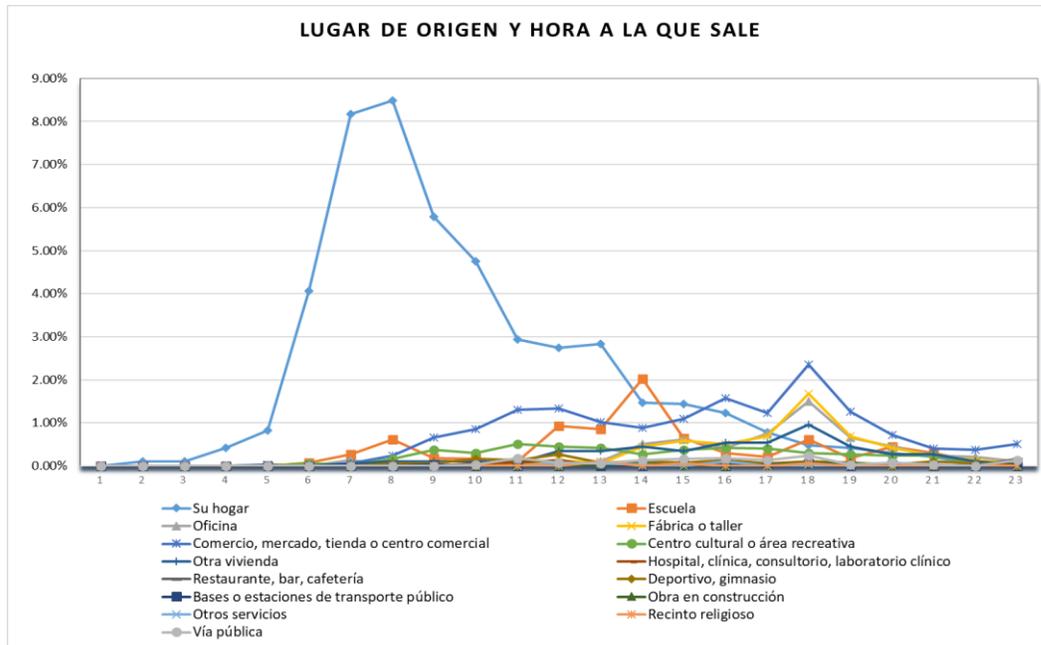


Figura 3.6. Grafica Tipos de lugares de origen y hora de salida. Elaboración propia con datos de (INEGI,2017)

En la Figura 3.6 se muestra que la mayor parte de los viajes se realizan a partir de las 5:00 a.m. hasta las 11:00 a.m. y su punto de partida es el hogar; a partir de las 5 p.m. hasta las 8 p.m., los viajes se inician principalmente de fábricas o talleres, oficinas, centros comerciales y otras viviendas; en el caso de las escuelas, hay tres intervalos de tiempo en los que se parte de ellas: de las 7 a.m. a la 9 a.m., de las 11 p.m. a las 3 p.m. y entre las 6 p.m. y las 10 p.m.

Un origen que sobresale son los centros recreativos o culturales: si bien este lugar no presenta horas pico, el número de salidas se mantiene casi constante a lo largo del día; esto puede deberse principalmente al uso de la bicicleta como un forma de recreacion y de realizar ejercicio.

En el caso de los destinos, por las mañanas serán los lugares de trabajo, mientras que por las noches, el hogar. A continuación, se muestra la gráfica con los destinos de un viaje en bicicleta a lo largo del día.

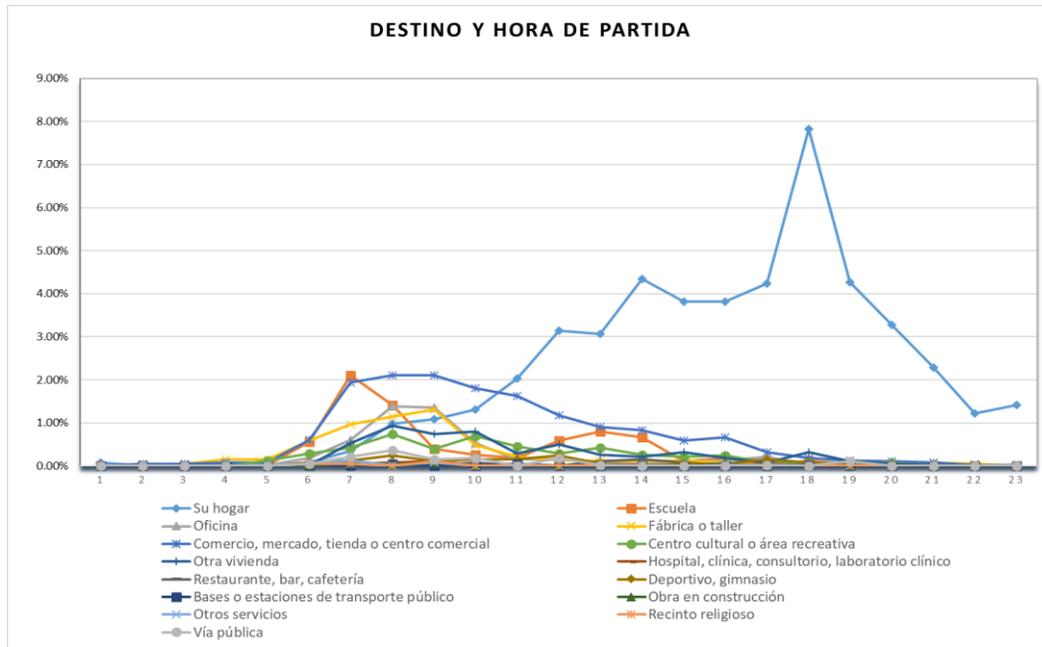


Figura 3.7. Grafica de destinos y hora de partida. Elaboración propia con datos de (INEGI, 2017)

En Figura 3.7 se muestra que el hogar es el principal destino de los usuarios principalmente en las noches, en tanto que, por las mañanas, los usuarios se dirigen principalmente a lugares de trabajo como fábricas, talleres, oficinas o comercios.

Por último, cuando se habla acerca de un viaje en bicicleta, en este se incluyen todos los viajes en los que se haya usado este tipo de transporte no importando que antes o después de usar este, se haya usado otro, o bien, se haya caminado; la Figura 3.8 muestra los tipos de transporte que más se usan junto con la bicicleta, excluyendo cuando el usuario camina o cuando los viajes se realizan de principio a fin en bicicleta.

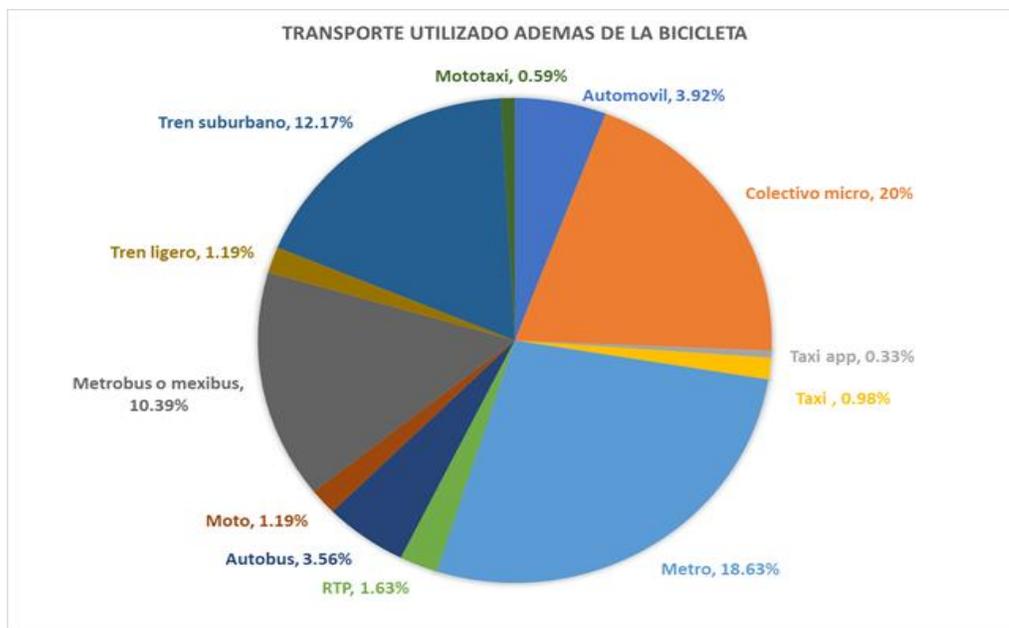


Figura 3.8. Otros transportes utilizados además de la bicicleta elaboración propia con datos de (INEGI,2017)

El transporte que más se usa junto con la bicicleta es el colectivo o microbus, con el 20% del total; el segundo, es el metro con 18.63%; el tercero, es el tren suburbano seguido del Mexibus o Metrobús con el 12.17% y el 10.39%, respectivamente; el motivo por el cual es posible que se use la bicicleta antes o después alguno de estos transportes, es que existe un lugar en donde se puede estacionar este vehículo, como pueden ser los biciestacionamientos de U invertida, postes, árboles o rejas; otra posibilidad es que el usuario haya viajado junto con la bicicleta en el transporte como es el caso del metro.

De no ser por estos lugares, que ya sean diseñados o improvisados y de las políticas, es que se puede usar en alguna parte del viaje la bicicleta. A este tipo de viajes en los que se utilizan diferentes transportes, se les conoce como viajes intermodales.

### 3.4. Beneficios del uso de la bicicleta

La bicicleta es un transporte que tiene diversos beneficios, tanto al medio ambiente como a la movilidad y a la salud tanto física como mental; es un medio de transporte que no tiene emisiones de carbono y su uso reduce la congestión de tráfico de vehículos motorizados.

Tiene beneficios para la salud y ayuda a la activación física; por ejemplo, de acuerdo al Consejo Americano del Ejercicio (*American Council Exercise ACE*), al usar la bicicleta, una persona de 54 kilos quema 5.5 calorías por minuto, mientras que, una de 63.5 kilogramos quemará 6,4 calorías en el mismo

tiempo; también (Alliance for biking and walking, 2016; Bauman et al., 2017) muestran que la actividad física en niveles de moderada a alta, se encuentra asociada a tasas bajas de obesidad y existe una relación inversa entre la tasa de personas que realizan el viaje a sus trabajos caminado o en bicicleta con respecto a la tasa de obesidad.

Faghih-Imani et al. (2014) ha encontrado que los niveles de estrés son más bajos en personas que caminan o usan la bicicleta debido a que el viaje produce una sensación de alivio comparado con otros tipos de transporte; por último, Bauman et al. (2017) realizan una revisión a manera de narrativa del como impacta el uso de la bicicleta en la salud; en dicho trabajo, se concluye que el aumento de la población ciclista también muestra un aumento en los niveles de salud.

### 3.5. Los viajes intermodales y la intermodalidad

Un viaje intermodal se realiza cuando, por ejemplo, una persona sale caminado de su casa para tomar un microbus que la llevará a la estación del metro más cercana y de ahí, a su oficina de trabajo; o bien, cuando sale en bicicleta a una estación de metro y después, utiliza el mismo. Algunas de las etapas que constituyen un viaje intermodal se muestran en la Figura 3.10.

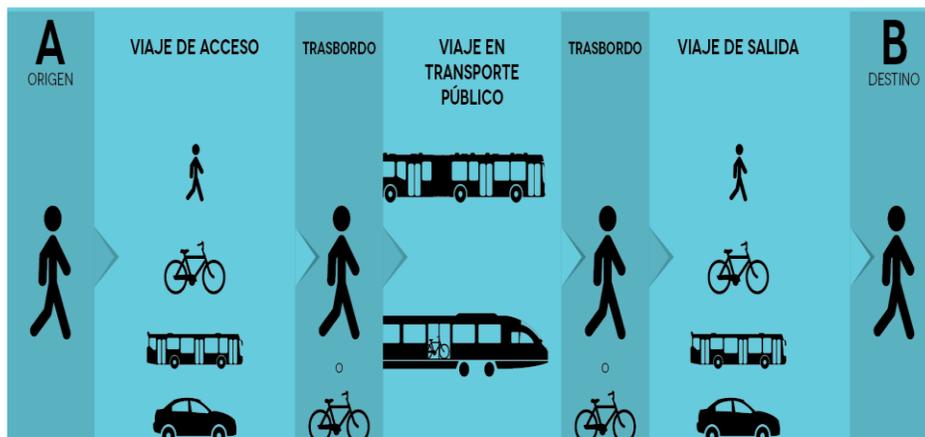


Figura 3.10. Etapas de un viaje intermodal fuente: (Pardo Carlos F, 2013)

Como se observa en la figura III.9, los viajes intermodales son aquellos en los que, para realizar el viaje, se utilizan distintos transportes en el recorrido. Parte de la ventaja de este tipo de viajes, es el uso de transportes menos contaminantes; también, que pueden ser más rápidos o de menor costo; la intermodalidad no solo es generar transportes intermodales, sino crear un sistema de transporte eficiente y asequible (Martínez, 2020).

En el caso de la intermodalidad con la bicicleta, Rios et al (2015) define la intermodalidad como “la posibilidad de utilizar más de un medio de transporte en un viaje, en este caso la bicicleta y transporte público. La implementación

de un sistema de intermodalidad implica la flexibilidad de poder entrar a un sistema de transporte público con una bicicleta propia (a un estacionamiento que haga parte del sistema de transporte o al vehículo de transporte público como tal) o, si es posible, utilizar un sistema de bicicletas públicas para completar el viaje y que preferiblemente tengan tarifa y modo de pago integrado. También puede referirse a la implementación de sistemas de bicitaxis como alimentadores de un sistema de transporte público.”

Para generar la intermodalidad, se crean políticas e infraestructura que aportan condiciones que promueven su uso y al mismo tiempo, rompen factores desmotivantes. El Banco Interamericano de Desarrollo (2017) menciona que, se debe identificar los sectores donde se requiere de la integración del transporte (principalmente de la bicicleta) y diseñar esquemas que den apertura a transportes sostenibles.

En ese sentido, la Ciudad de México, en particular, la Secretaría del Medio Ambiente SEDEMA, ha diseñado diversas políticas e infraestructura; por ejemplo, la red del metro permite el acceso con bicicleta los domingos y, a partir del 2019, también se permite de lunes a sábado después de las 10 de la noche; sustituyó los antiguos paraderos por Centros de Transferencia Modal CETRAMS, los cuales ofrecen mayor seguridad y mejor control de las rutas de transporte; ha diseñado un plan para construir ciclovías y estacionamientos para bicicleta durante la administración del 2018 al 2024.

### **3.6. Infraestructura ciclista vial**

De acuerdo con (BID, 2017; Ríos et al., 2015) la infraestructura ciclista consiste en las características físicas que apoyan el uso de la bicicleta, que no solo incluye los carriles destinados a este tipo de transporte, sino también, estacionamientos y otros servicios complementarios. La infraestructura sirve para mejorar las condiciones de seguridad de los ciclistas, tanto de su persona como de su bicicleta; asimismo, otorga cierta comodidad.

Algunos ejemplos de infraestructura ciclista son los sistemas de préstamo de bicicletas, *Bike Shares Systems* BSS, las ciclovías y los bici-estacionamientos; otro ejemplo de infraestructura es la que se encuentra dentro de las empresas o escuelas como son estacionamientos vinculados a casilleros, regaderas y vestidores destinados a aquellos empleados o estudiantes, respectivamente, que utilizan este medio de transporte.

Se entiende por infraestructura ciclista vial, al espacio para el tránsito de la bicicleta y que protege al ciclista del tránsito de automóviles y de otros vehículos, además, de ser ajeno al peatón: esta se puede clasificar en tres categorías, de acuerdo con (Crow, 2007):

1. **Verde o independiente:** aquellos carriles para la bicicleta independientes asociados a corredores verdes.

2. **Segregada:** referida a los carriles que están separados del paso vial de los autos cuando la velocidad máxima es de 30 km por hora y la circulación de automóviles es mayor a 2000 vehículos/día; en esta, la separación se traza con pintura; cuando la velocidad máxima es 50 km por hora sin importar el flujo vehicular, la segregación se hace mediante un separador físico.
3. **Compartida:** consistente en carriles de tránsito compartidos con bicicletas. Este tipo de infraestructura se encuentra usualmente en vialidades con velocidades máximas de 30 km/h y un volumen de circulación de automóviles relativamente bajo (menor o igual a 2000 vehículos/día).

Para que un diseño de la infraestructura vial, sea bueno, es necesario que cumpla con ciertas características; por ejemplo, Patlán, Velázquez & Cardona Medina (2019) afirman que “una estrategia integral de seguridad vial a nivel local debe sumar elementos de diseño vial urbano, regulación y correcta aplicación de la ley, cultura de la movilidad y gestión de la seguridad vial para avanzar hacia resultados positivos en la materia”. Así, una ciclo vía debe diseñarse para ser segura; cómoda para generar confort en el recorrido; ser coherente para establecer puntos de conexión entre el origen y el destino; ser directa, sin obstáculos o barreras urbanas para evitar que se recorran distancias mayores a las necesarias y ser atractiva, para integrarse adecuadamente al entorno urbano y ubicarse en sitios atractivos y seguros. CROW (2007) hace mención que la coherencia también debe ser con otras redes de transporte.

Debido a los beneficios que ofrece la bicicleta como transporte, los gobiernos, organizaciones e instituciones invierten recursos en la infraestructura vial de la cual, en el siguiente apartado, se mencionan algunos ejemplos y datos.

### 3.6.1 Infraestructura vial en el mundo

A continuación, se muestran algunos ejemplos de ciudades y su infraestructura vial ciclista.

EE. UU. tiene un gran número de ciudades que poseen una infraestructura vial, las cuales han realizado grandes esfuerzos por incluir a la bicicleta como un medio de transporte; dentro de los casos más destacados, se encuentra la ciudad de Nueva York con 1,160 km de infraestructura vial ciclista; otra ciudad que se distingue por esta razón es la ciudad de los Ángeles, con 1,373 km de este tipo de infraestructura.

Por su parte, Canadá también cuenta con un gran número de ciudades que poseen una robusta infraestructura ciclista; en este país destacan la ciudad

de Vancouver, Toronto y Montreal con 270 km, 855 km, 800 km de ciclovías, respectivamente.

A diferencia de EE. UU. y Canadá, los países de América Latina iniciaron el proceso de integrar a la bicicleta dentro del sistema de transporte en los últimos 10 años, razón por la que la infraestructura ciclista no es tan grande ni robusta; esto se debe en parte a la situación económica de los países que, en su mayoría, son subdesarrollados o en vías de desarrollo. De acuerdo con Ríos et al. (2015), la ciudad con más kilómetros de ciclovías en esta región, es Bogotá, Colombia, con 392 km; en segundo lugar, se encuentra Rio de Janeiro, Brasil, con 307 km, en tanto que, en tercer lugar, se ubica San Pablo, Brasil, con 270.7 km de esta infraestructura.

### 3.6.2 Infraestructura ciclista vial en México

En nuestro país, se tiene registro de que las ciudades de Guadalajara, Ciudad de México, Puebla, Querétaro, Zapopan y Monterrey, tienen ciclovías, sin embargo, solo se cuenta con información acerca de los kilómetros de las siguientes ciudades: la Ciudad de México que posee 128 km; Guadalajara, con 18.4 km; Monterrey, con 0.4 km; Puebla, con 5 km y La Paz, con 14 km (Ríos et al., 2015).

Dentro de los planes a futuro en la CDMX, está el proyecto Plan Bici 2019 de la Ciudad de México, el cual busca crear infraestructura de este tipo con las siguientes características: segura, complementaria, integrada, accesible y conectada; para ello, se planea invertir aproximadamente 201 millones de pesos para construir 85 km de esta infraestructura. De esta forma, se planea crear intermodalidad y se promoverá el uso de la bicicleta entre los habitantes de esta ciudad (SEMOVI, 2019).

## 3.7. Sistemas de préstamo de bicicletas

Además de la infraestructura vial, existen los sistemas de préstamo de Bicicletas, también conocidos como Sistemas de Bicicletas Públicas o BSS (por sus siglas en inglés Bikes Shares Systems); estos sistemas consisten en la renta de una bicicleta por un periodo de tiempo corto para viajar de una estación a otra.

Se tiene registro de que el primer sistema de esta clase fue en el año de 1965 en Ámsterdam, Países Bajos; este sistema era gratuito y no tenía estaciones, por lo que las bicicletas estaban en la calle y pasaban de mano en mano; debido al poco control, el vandalismo y robo de bicicletas se hizo presente.

Actualmente, los BSS cuentan con tecnología que les permite rastrear los recorridos; incluso, la tecnología hace posible la existencia de un BSS sin la necesidad de una estación ya que, por medio de una aplicación de celular, se pueden realizar diversas acciones, que van desde, encontrar una bicicleta, realizar el cobro, hasta desactivar los mecanismos de seguridad; sin embargo,

la falta de una estación genera molestias entre algunas personas, ya que, a falta de esta, los usuarios dejan las bicicletas bloqueando entradas y obstaculizando el tránsito peatonal.

En este sistema, la forma de pago es a través de una tarjeta de crédito, aplicaciones de celular, tarjetas electrónicas recargables o planes tarifarios. El periodo de uso va de la mano con el sistema de pago, los planes tarifarios y con tarjetas de crédito; a menudo, son periodos que van desde un mes hasta un año, mientras que, los pagos mediante tarjetas recargables y aplicaciones comúnmente son por el recorrido del viaje.

En los últimos 15 años, la popularidad de los BSS crecido alrededor del mundo y, en este sentido, se han realizado múltiples estudios e investigaciones acerca de ellos, que van desde los efectos y cambios en la modalidad del transporte (Buehler & Pucher, 2011), los beneficios relacionados con el uso de la bicicleta y los BSS (Parkes et al., 2013), artículos acerca de los factores que hacen a un BSS “exitoso” (D. Sun et al., 2020), el diseño para un BSS (Lin & Yang Ta-Hui, 2011) hasta la localización de estaciones para un BSS (García-Palomares et al., 2012; Park & Young Sohn, 2017).

### 3.7.1 Sistemas de préstamo de bicicletas en el mundo

En EE. UU, de manera similar que, en el caso de sus ciclovías, se tiene que, alrededor de 31 ciudades cuentan con un BSS, siendo un total de 21,440 bicicletas repartidas en 2,064 estaciones; se destacan, la ciudad de Nueva York, con 330 estaciones y un total de 6,000 bicicletas; Chicago con 300 estaciones y 2,700 bicicletas (1 bicicleta por cada 100 habitantes); y la ciudad de Washington DC, con 2930 bicicletas en 347 estaciones.

En América Latina, también se ha invertido en crear sistemas de préstamo de bicicletas; en el caso de Argentina, el proyecto de nombre “EcoBici”, es un sistema público y gratuito de uso de bicicletas, que actualmente cuenta con 400 estaciones y 4,000 bicicletas; en la ciudad de Medellín, Colombia, está el BSS llamado “EnCicla”, que surge en el 2011, y en la actualidad posee 90 estaciones y 1,680 bicicletas; mientras que, en la ciudad de Rio de Janeiro, Brasil, está Bike Rio, un sistema que al presente tiene 2,600 bicicletas en 260 estaciones.

### 3.7.2 El sistema de préstamo de bicicletas en México

El sistema denominado EcoBici de la Ciudad de México, surgió en febrero del 2010; en la actualidad, cuenta con 6,800 bicicletas en 480 estaciones que están distribuidas en 55 colonias y en el cual se han realizado 67 millones de viajes. El sistema tiene 4 tarifas: la de un día, con un costo de 108 pesos; el plan de 3 días, con un costo de 216 pesos; el plan de 7 días, con un costo de 360 pesos y el plan anual, con costo de 480 pesos; en todos los planes anteriores, los viajes deben ser menores a 45 minutos y en caso de excederse, se tiene una tarifa extra que depende del tiempo de demora. Una característica muy importante del BSS, es su tarjeta, con la cual se renta la bicicleta y que es la misma con la que se paga el transporte de Metro o Metrobús.

Otro sistema de bicicletas públicas es el del proyecto “Bicipuma”; este sistema solo abarca la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); el proyecto Bicipuma surgió en el año 2004 y a la fecha, cuenta con mil bicicletas y 14 estaciones: en este caso, el sistema es gratuito y de uso exclusivo para trabajadores administrativos, académicos, alumnos o exalumnos de esta universidad; a partir del año 2019, el préstamo se hace con un NIP que se obtiene mediante registro previo.

En caso de accidentes, este BSS, cuenta con el apoyo de ambulancias y servicios médicos de la universidad. El éxito del proyecto ha logrado que se planeen programas piloto en Juriquilla, León y Sisal y parte de él se debe a una correcta planeación y constante inversión en infraestructura; ejemplo de lo anterior es que, en 2007 se construyó el Bici Centro ubicado a un costado del metro Universidad; se construyeron 8 kilómetros de ciclovías que conforman el sistema y año con año se les proporciona mantenimiento; debido al constante uso de las bicicletas, se les da mantenimiento continuo y para ello, la institución cuenta con personal contratado que se dedica a la reparación de las unidades y por último, la adquisición de nuevas bicicletas (Romero L. , 2019; DGSGM, 2019).

El proyecto de Jalisco “MiBici”, surge en diciembre del 2014 con 2,500 bicicletas y 236 estaciones; actualmente, cuenta con 3,500 bicicletas y 274 estaciones distribuidas de la siguiente manera: 212 en el municipio de Guadalajara, 50 en Zapopan y 12 en Tlaquepaque. En fechas recientes, este BSS alcanzo los 10 millones de viajes.

## 3.8. Biciestacionamientos

Los biciestacionamientos pueden tener diversas formas y tamaños y obedecer a diferentes propósitos; por ejemplo: usar la bicicleta para ir al trabajo, ir al mercado o a algún comercio a comprar, para ir a la escuela, entre otros. La

ciudad de Toronto (2005) clasifica los biciestacionamientos en estacionamientos de corto y de largo tiempo con base a el tiempo que se utiliza el mismo.

### 3.8.1 Biciestacionamientos de corto tiempo

Este tipo de biciestacionamientos son diseñados para estacionar las bicicletas por un tiempo corto, por lo que están expuestos al robo o vandalismo; por lo general, tienen espacio para un número muy pequeño de bicicletas; el estacionamiento más conocido de este tipo es el de forma de U invertida, no obstante, hay muchos diseños de este tipo.

La Comisión Europea “*Promoting Cycling for Everyone as Daily Transport Mode*” (PRESTO por sus siglas en inglés), da recomendaciones que se deben considerar al momento del diseño de un biciestacionamiento de corto tiempo como son: que el diseño se adapte a cualquier tipo de bicicleta y que sea estable para no dañar la bicicleta, que sea práctico y fácil de usar, que sea fácil de mantener en buenas condiciones, un diseño robusto para evitar vandalismo o el deterioro acelerado por el clima; también es importante que este sitio cree cierta armonía y control en los espacios públicos, es decir, cuando no existe el bici-estacionamiento, las bicicletas son estacionadas o colocadas en lugares que obstruyen el paso o el uso de otros servicios.

Cabe destacar que los postes, pasamanos o árboles, no son considerados como estacionamientos, ya que no fueron creados o ubicados con esta finalidad e incluso hay ciudades en los que esta estrictamente prohibido estacionar la bicicleta en estos sitios, como es el caso de Ámsterdam, en donde, si se encuentra una bicicleta estacionada en un lugar no autorizado, esta se lleva a un depósito de bicicletas del Estado (Municipio de Amsterdam, 2019).

### 3.8.2 Biciestacionamientos de largo tiempo

Al contrario de los biciestacionamientos de corto tiempo, los de largo tiempo, son diseñados para que la bicicleta permanezca estacionada por un periodo de tiempo mayor a una hora; estos pueden ser casilleros individuales o colectivos, instalaciones supervisadas o con acceso restringido, de esta forma la bicicleta se encuentra más segura contra el vandalismo o cuestiones de clima. Este tipo de biciestacionamientos puede llegar a tener un costo, sobre todo, si se trata de casilleros individuales; la ventaja de un estacionamiento gratuito es la correlación positiva en el aumento del uso de la bicicleta. La ubicación de los biciestacionamientos de largo plazo es en plazas comerciales, escuelas, estaciones de transporte o Centros de Transferencia Modal.

Los biciestacionamientos de largo tiempo tienen diferentes características y sus tamaños pueden llegar a variar; a continuación, se mencionan ciertos puntos que pueden ayudar a una mejor clasificación de estos:

- **Tamaño o capacidad.** Los bici-estacionamientos de larga duración a menudo se consideran “masivos”, ya que tienen espacio para un gran número de bicicletas; sin embargo, lo que es masivo para México, no lo es para Holanda a razón de su cultura ciclista; por lo tanto, es mejor considerar el número exacto de capacidad.
- **Tipo de estructura.** Los biciestacionamiento pueden llegar ofrecer protección contra elementos como la lluvia o el sol, pero esto depende de las características propias de la estructura, ya que el biciestacionamiento puede estar al descubierto, o puede ser un lugar techado; en ocasiones, el bici-estacionamiento puede estar bajo tierra.
- **Seguridad.** Como se señaló al principio, los biciestacionamientos están diseñados para que la bicicleta permanezca por un periodo largo de tiempo, por ende, se requiere que las unidades estén protegidas; en este sentido, la seguridad que ofrecen este tipo de biciestacionamientos puede llegar a variar dependiendo de los mecanismos de vigilancia y de los sistemas de acceso; en algunos casos, se cuenta con personal de vigilancia, en otros, se utilizan cámaras; en algunos otros, la seguridad es aún mayor, ya que para tener acceso, se requiere de una tarjeta, un PIN o llave en el caso de casilleros, o bien, se cuenta con un sistema automatizado.
- **Costo o tipos de tarifa.** Pueden existir estacionamientos gratuitos, a menudo financiados por el gobierno o por el sistema de transporte como el metro, tren o autobuses; en otros casos, se pueden llegar a tener tarifas diarias, mensuales o anuales; hay casos en los que se da un servicio gratuito por determinado tiempo y después, cuenta con un costo por el tiempo adicional. El monto de la tarifa varía dependiendo el país, la ciudad y la calidad del servicio.
- **Acceso.** El acceso puede ser restringido o libre acceso; el tipo de acceso está relacionado con la seguridad y el costo, es decir, por lo general, los biciestacionamientos que cuenta con el acceso restringido tienen un costo y control de quienes ingresan al espacio, por lo que es posible que sufran menos actos de robo y vandalismo que los de libre acceso; también pueden existir sistemas de biciestacionamiento gratuitos con acceso restringido, para los cuales se requiere un registro previo; asimismo pueden existir sistemas con acceso restringido pero que no garantizan la seguridad contra el vandalismo o robo de la unidad.

### 3.8.3 Biciestacionamientos de largo tiempo en Europa y Asia

En la ciudad de Ámsterdam, en donde se ha apostado por el uso de la bicicleta como un medio de transporte, se ha creado infraestructura adecuada para estacionar las bicicletas. De acuerdo con el reporte (Municipio de Amsterdam, 2019; 2020) esta ciudad tiene 57 biciestacionamientos en los cuales se puede estacionar la bicicleta por 24 horas de manera gratuita; después de ese tiempo, se cobran 1.6 euros por día adicional; asimismo está la opción de una suscripción anual de entre 75 a 125 euros. Estos biciestacionamientos son de acceso libre; en cuanto a la seguridad, cuenta con sistemas de videovigilancia, pero, aun así, se llegan a contabilizar algunos casos de robo; por otro lado, la mayoría de estos espacios son lugares techados. Por otro lado, también las estaciones de tren de Ámsterdam tienen un servicio gratuito mediante un registro del transporte público, algunos de estos están bajo tierra (Municipio de Amsterdam, 2020).

Debido a que se cuenta con poco espacio en donde estacionar las bicicletas, en la ciudad de Tokio, Japón, se creó el sistema *Eco Cycle*, que, a través de un sistema automatizado, guarda las bicicletas bajo tierra; este moderno estacionamiento, puede llegar a almacenar hasta 204 bicicletas; debido a sus características, este sistema es considerado uno de los más modernos, seguros y atractivos del mundo.

Por otro lado, la ciudad de Copenhague, Dinamarca, cuenta con un gran estacionamiento en la estación central con espacio para 7,750 bicicletas; este espacio se encuentra al aire libre y tiene un segundo piso por encima de la zona donde aparcan los trenes, desde donde se puede comprar boletos para el tren o para las estaciones de autobús; además de lo anterior, cuenta con una pequeña zona comercial (Colville-Andersen, 2019).

### 3.8.4 Biciestacionamientos de largo tiempo en América

Canadá es un ejemplo de donde se pueden encontrar biciestacionamientos de largo tiempo; en este país, estos espacios se encuentran en estaciones de transporte de Vancouver y tiene un costo de un dólar canadiense, o bien, una tarifa mensual por 8 dólares canadienses; su acceso es restringido por lo que se requiere de una tarjeta con la cual se realiza el pago para acceder a los estacionamientos tipo garaje; asimismo, en algunas estaciones se puede rentar un casillero (translink, 2020).

En la ciudad de Bogotá, Colombia, el sistema de transporte de autobuses articulados “Transmilenio” cuenta con alrededor de 20 biciestacionamientos conocidos como “Cicloaparcaderos Transmilenio”. Con capacidad total para albergar 6,059 bicicletas, estos espacios tienen un horario de servicio de cinco

de la mañana a doce de la noche; el servicio es gratuito y solo se requiere ir a una estación, presentar la cédula de identificación y si se cuenta con él, él título de propiedad de la bicicleta; al momento de estacionar la bicicleta se pedirá mostrar la identificación y ésta persona será la única que podrá sacar la unidad del estacionamiento (Transmilenio S.A, 2020).

En la Ciudad de México existe el sistema de “Biciestacionamientos Masivos”. El sistema surgió en el año 2014 y el primer espacio de este tipo se instaló en la CETRAM de Pantitlán y contó con capacidad para 416 bicicletas; le siguió el biciestacionamiento de La Raza con 408 espacios; en el año 2017, se inaugura el biciestacionamiento de La Villa, con capacidad para 80 bicicletas, por lo que se le denomina semi-masivo; en el año 2019 se retoma el proyecto para construir biciestacionamientos en Periférico Oriente y Buenavista, con capacidad de 80 y 128 espacios, respectivamente. De acuerdo con el proyecto, a largo plazo se planea construir más espacios de este tipo.

Este sistema es gratuito y para utilizarlo, sólo se requiere de una tarjeta denominada intermodal, que se utiliza para ingresar al metro y metrobús, y hacer el registro de hasta dos bicicletas; las instalaciones están techadas y en cuanto a seguridad, hasta la fecha no se tienen reportes de robo, debido principalmente a su sistema de cámaras de vigilancia, al personal de seguridad y a contar con un sistema de acceso restringido, no solo al entrar, sino también al salir (SEMOVI, 2019).

El sistema de Biciestacionamientos masivos y semi masivos de la Ciudad de México, fue reconocido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), otorgándole el premio de las Ciudades Sustentables que otorga el Foro Global de Asentamientos Humanos, el cual es parte del programa ambiental de la ONU.

De acuerdo con los resultados de la encuesta por parte de la Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México, el 75% de los encuestados que usan los biciestacionamientos, reporta que no usaba la bicicleta como su primer medio de transporte en el transcurso del viaje; en este instrumento, también se señala que, el 93% de los usuarios piensa seguir utilizando el sistema; por último, la encuesta indica que el 86% de los encuestados usan el sistema al menos 5 veces a la semana (SEDEMA, 2018).

Se distingue que la mayoría de los casos de Biciestacionamientos de larga duración se encuentran cercanos a estaciones de transporte como trenes, metro, autobús etc.; esto posibilita la integración de la bicicleta a los otros medios de transporte con lo que se da la intermodalidad. Asimismo, la mayoría de los sistemas de bicicletas públicas y ciclovías están integrados a los demás sistemas de transporte; esto hace que el sistema tenga un crecimiento en diversos tipos de transporte y que estos no se contrapongan, sino que se conecten e interactúen mediante el flujo de pasajeros.

El diseño del bici-estacionamiento requiere de una correcta localización que satisfaga la demanda actual y que incentive a nuevos usuarios; para ello se

proponen algunos indicadores que midan el impacto y los factores que fortalecen y generan su uso; por ejemplo, Buehler (2012), realiza un estudio en la ciudad de Washington que muestra la correlación que existe del uso de la bicicleta contra las instalaciones del trabajo (bici-estacionamientos, regaderas y casilleros), las distancias de los viajes y las ciclovías en la ciudad; también Caulfield et. al. (2012) estudian las preferencias de infraestructura como factores que aumentan el nivel de confianza para en uso de este servicio; por su parte, Frade y Ribeiro (2015) mencionan que existen diferentes objetivos para localizar el estacionamiento, tales como, minimizar los costos de transporte, minimizar los costos totales o maximizar la cobertura y que, para cada objetivo, existirá un modelo matemático y una forma de solucionar el problema, por ejemplo, los problemas de p-mediana o problemas de máxima cobertura.

### **3.9. La cultura ciclista en la Ciudad de México**

Después de haber realizado un análisis de las características de la población usuaria y de haber presentado diversos datos de infraestructura ciclista en diversas ciudades alrededor del mundo, incluida la Ciudad de México, se concluye que, la población usuaria es mayoritariamente de sexo masculino, la edad ronda principalmente entre los 12 y los 50 años; los niveles de escolaridad principales son primaria y secundaria, seguidos en menor grado de bachillerato y licenciatura; de acuerdo al origen y destino de los viajes, se conjetura que la ocupación de los usuarios se divide principalmente en estudiantes, obreros y comerciantes, y en menor grado, por oficinistas.

En cuanto a la infraestructura, ésta fue construida principalmente en los últimos 10 años y se integra por tres principales proyectos: las ciclovías, el proyecto ECOBICI y el proyecto de Biciestacionamientos Masivos, mismos que tienen planes de crecimiento a futuro; otros datos importantes son que, en algunas zonas, las ciclovías carecen de integración con otros transportes; el Proyecto ECOBICI solo se concentra en el centro de la ciudad y algunas otras colonias populares y, por último, se cuentan con muy pocos biciestacionamientos, por lo que la cobertura del servicio es insuficiente.

De acuerdo a lo anterior, la ciudad aún está lejos de tener una gran población que usa la bicicleta como medio de transporte, sobre todo si se compara con ciudades como Nueva York, Tokio o Copenhague e incluso la ciudad de Bogotá; sin embargo, cabe señalar que en los últimos años, el uso de la bicicleta ha aumentado junto con los programas, sistemas y proyectos afines al uso de esta, por lo que se puede decir que la ciudad se encuentra en pleno proceso de integrar a la bicicleta como medio de transporte; es por esta razón, que es imprescindible seguir creando políticas e infraestructura que fortalezcan el uso de la bicicleta en las zonas donde ya se utiliza y que promueva el uso en zonas donde aún no se emplea como medio de transporte.

## 4. Marco teórico

En el capítulo IV se presenta la teoría, los modelos y las herramientas que hacen posible la localización del Bici-estacionamiento. Este se divide en tres secciones: la primera, contiene la teoría de la localización y el problema de localización de instalaciones; la segunda, el análisis multicriterio, que es una herramienta matemática que posibilita la toma de decisiones cuando no se tiene un único criterio; la tercera, aborda los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que son una herramienta tecnológica que ayuda a analizar y visualizar información geoespacial.

### 4.1. El problema de localización de instalaciones

Encontrar el lugar adecuado para ciertos fines como, por ejemplo: para construir una plaza comercial, ubicar escuelas dentro de una zona habitacional, tomar la decisión de donde construir una estación de tren o un aeropuerto, localizar una máquina dentro de una fábrica para mejorar la productividad, no es una tarea fácil; y se requiere considerar toda la información disponible para tomar la mejor decisión.

De acuerdo con Daskin M. generalmente los problemas de localización están enfocados en tratar de responder alguna de las siguientes preguntas:

- ¿Cuántas instalaciones se desea localizar? Esta pregunta se relaciona con la calidad y los costos del servicio, por ejemplo: ¿Cuántas instalaciones se requieren para satisfacer la demanda del servicio?, ¿cuántas instalaciones se requieren para minimizar los costos? Por lo tanto, número de instalaciones a localizar no está previamente determinado, este depende de la cobertura del servicio, la capacidad de cubrir la demanda y los costos.
- ¿Dónde debe ubicarse cada instalación? Esta es la pregunta más general y también la más empleada, ya que, la localización óptima de la instalación va de la mano con los objetivos y también la ubicación deberá cumplir con las limitantes como pueden ser políticas de la empresa, el espacio requerido para la instalación o cubrir una población en particular.
- ¿Qué tan grande debe ser cada instalación? El tamaño de la instalación da referencia a la calidad del servicio y la demanda que esta debe cubrir, ya que no es lo mismo satisfacer los requerimientos de minoristas que los de mayoristas.
- ¿Cómo se debe asignar la demanda de servicio de las instalaciones a cada instalación? En algunos casos la cobertura de demanda debe

atenderse entre varias instalaciones y por políticas de la empresa podría ser que cada instalación cubra determinada zona o determinado número de clientes, en otras ocasiones no importa quien cubra el servicio por ejemplo los vehículos de emergencia.

#### 4.1.1 Taxonomía de los problemas de localización

Los problemas de localización pueden ser muy diversos y podría decirse que cada problema es único debido a: los objetivos, las restricciones, la información disponible y la forma de solucionarlo, Daskin M. (2011) describe una taxonomía que continuación se presenta.

##### Plano versus red versus localización discreta

La forma de cómo y dónde se representa el modelo se clasifica en: en un plano, en una red o de forma discreta. La localización en un plano se puede realizar en cualquier punto, en este caso se pueden representar demandas distribuidas en el espacio como puntos coordinados  $(x, y)$ . En una red, la información como; los costos de los viajes, la ubicación de las alternativas y los clientes: son representados por nodos, aristas y pesos. La localización discreta permite que se usen diferentes métricas entre los puntos. La forma en que se plantea depende de la información que se tiene disponible y de cómo se puede manejar y visualizar.

##### Número de instalaciones a localizar

En algunos casos es necesario decir cuantas instalaciones se quiere ubicar, por ejemplo, en los problemas de la P-mediana o el problema de máxima cobertura. Existen otros como el problema de cobertura de conjuntos donde el número de instalaciones depende del objetivo de la solución, para aquellos en los que se puede especificar el número, el problema se clasifica en *single-facility* (una instalación) y *multiple-facility* (más de una instalación).

##### Problemas estáticos o Problemas dinámicos

En los problemas estáticos el tiempo no es un factor y solo se resuelve en un periodo de tiempo, en el caso de los problemas de localización dinámica el tiempo afectará los costos y otros parámetros, por ejemplo: el incremento de costos o disminución de la demanda en ciertas épocas del año, el tiempo de traslado en horarios específicos, los horarios laborales entre semana y fines de semana. En conclusión, en los problemas de localización dinámica no solo importa el dónde sino también el cuándo.

##### Sector privado Versus Sector público

El problema se trata de un proyecto para la industria pública o privada. La diferencia radica principalmente en los costos, en el sector privado; los costos de inversión y los beneficios se miden habitualmente en términos monetarios. En el sector público además se consideran: costos en relación con el impacto

ambiental, costos políticos y también los beneficios a la población. En ese sentido Daskin (2011) habla del caso de localizar servicios de emergencia y la dificultad para ponerle precio a una vida en términos monetarios.

Un objetivo versus múltiples objetivos.

La mayoría de los modelos se fija un solo objetivo, por ejemplo: maximizar el área, minimizar los costos o minimizar las distancias, sin embargo, en el mundo real los problemas tienen diferentes objetivos que obedecen a diferentes propósitos, en ocasiones estos pueden ser múltiples y además contraponerse.

Capacitado *versus* Instalaciones sin capacidad máxima.

Los modelos de máxima cobertura, P-mediana y P-centro por lo general no tienen un límite máximo en cuanto a capacidad, otros si tienen límites marcados.

Modelo de localización más cercana *versus* modelos de asignación de demanda.

La asignación de la demanda a una instalación específica puede distribuirse a la más cercana, siempre y cuando se trate de un modelo sin capacidad, para un problema con capacidad limitada es necesario dividir la demanda entre las diferentes instalaciones de servicio, para ello se requiere de restricciones con variables enteras que ayudan a la correcta asignación.

#### 4.1.2 El problema de cobertura de conjunto (SCP)

Dentro de los problemas de localización se encuentran los de cobertura, en el sentido general se busca que los clientes sean atendidos por una instalación de servicios, siempre y cuando el cliente este dentro un límite establecido, es decir, si la distancia entre el cliente y el servicio es menor a  $D$  entonces será atendido, a este número se le conoce como: área de cobertura, radio de cobertura o distancia de cobertura.

Schilling David A. et. al (1993) realizan una revisión de la literatura de los problemas de cobertura y presentan una clasificación del problema de cobertura de conjunto SCP (*set covering problem*) y el problema de localización de cobertura máxima, MCLP (*Maximal covering location Problem*).

El problema de cobertura de conjunto busca minimizar el costo, satisfaciendo un cierto nivel de cobertura. La formulación matemática es la siguiente:

*Sea:  $i$  = el índice de los nodos de demanda*

*$j$  = índice de las posibles soluciones o alternativas*

$x_j$  = una variable dicotomica que indica si se localiza el servicio  
en el punto  $j$

$D$  = Es la maxima distancia del servicio al cliente

$c_j$  = es el costo fijo de instalar el servicio en el punto  $j$

$a_{ij}$  = es una variable binaria auxiliar que sera 1 si

la distancia entre el cliente  $i$  y el punto  $j$  es menor a  $D$

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x_j &= \{0,1\} \quad \forall j \\ a_{ij} &= \{0,1\} \quad \forall i \quad \forall j \end{aligned} \quad (3)$$

De esta forma con la ecuación (1) se minimiza el costo de los servicios localizados, la ecuación (2) representa la serie de restricciones para que cada cliente  $i$  sea atendido por al menos un servicio  $j$ . Al posicionar el servicio en el lugar adecuado la distancia del servicio a los clientes será menor a  $D$ .

La distancia entre la nueva instalación y los puntos relevantes es el parámetro que se puede tomar en cuenta ya sea explícitamente cuando la distancia figura dentro de la función objetivo o implícitamente cuando se considera que hay un radio máximo donde se puede satisfacer la demanda este último es el caso de los problemas de cobertura.

Para ilustrar el SCP se toma como ejemplo el problema que se planteó en (Daskin, 2011) Considere la red de la Figura 4.1 donde cada nodo es un candidato para una instalación esta puede cubrir la demanda propia además de la de los nodos adyacentes que estén a una distancia menor a  $D=11$ .

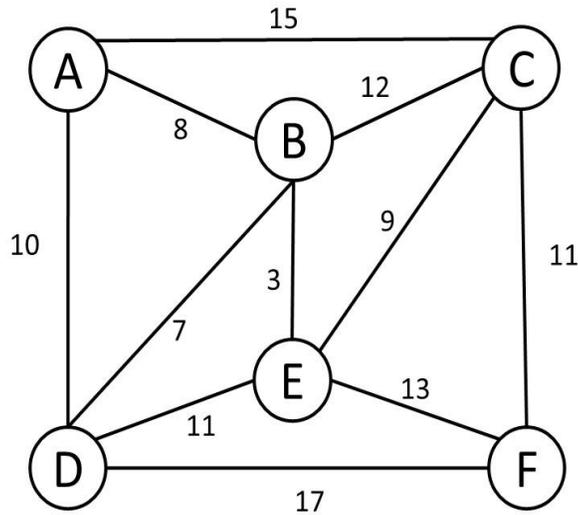


Figura 4.1 Ejemplo red de conjuntos de coberturas  
elaboración propia basada en (Daskin, 2011)

En la red cada conjunto se representa por un nodo, la distancia entre los conjuntos está representada por los arcos junto con los pesos. El objetivo del problema es cubrir todos los nodos con el menor número de instalaciones, las restricciones deben garantizar que cada nodo este cubierto por al menos una instalación, por lo tanto, el modelo matemático es el siguiente:

$$\text{Minimizar } Z = x_A + x_B + x_C + x_D + x_E + x_F \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & x_A + x_B + x_D \geq 1 \\ & x_A + x_B + x_D \geq 1 \\ & x_C + x_E + x_F \geq 1 \\ \text{Sujeto a: } & x_A + x_B + x_D + x_E \geq 1 \\ & x_C + x_D + x_E \geq 1 \\ & x_C + x_F \geq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

$$x_A, x_B, x_C, x_D, x_E, x_F \in \{0,1\} \quad (6)$$

### 4.1.3 El problema de Localización de máxima cobertura (MCLP)

El Problema de localización de máxima cobertura (MCLP por sus siglas en inglés) fue definido por Church y Reville (1974). El problema define una gráfica con nodos que representan las posibles localizaciones de una instalación o sitios donde se localiza la demanda y los arcos representan el viaje entre los nodos. En este modelo cada nodo puede llegar a tener una demanda distinta, a diferencia de SCP que tienen los nodos con la misma demanda. El problema matemático es el siguiente:

Sea:

$i =$  Nodos de demanda

$j =$  Nodos posible solución o alternativas

$d_{ij} =$  Distancia entre los nodos  $i$  y  $j$

$a_i =$  población a atender en el nodo de demanda  $i$

$p =$  número de instalaciones a localizar

$W_i =$  Conjunto de posibles soluciones que cubren el nodo  $i$

Se requiere, definir las variables de decisión las cuales serán dos tipos: para los nodos de demanda y la otra será para las alternativas.

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{si se selecciona el nodo } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{si se cubre la demanda del nodo } i \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

La modelación matemática queda de esta forma

$$\text{Maximizar } \sum_i a_i Y_i \tag{7}$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{j \in W_i} X_j - Y_i \geq 0 \quad \forall i \tag{8}$$

$$\sum_j X_j = p \tag{9}$$

$$\begin{aligned} X_j &= \{0,1\} \forall j \\ Y_i &= \{0,1\} \forall i \end{aligned} \tag{10}$$

Ya que se toman nodos de alternativas en el conjunto  $W_i$  esto hace que se cubra la demanda del nodo  $i$ , por lo tanto, la variable  $Y_i$  será distinta de cero y se sumara la demanda a la función objetivo (7); la ecuación (8) representa las restricciones donde se exige que si se cubre la demanda, al menos exista una instalación que la cubra; la ecuación (9) cuenta el número de alternativas que se pueden usar, por último, la ecuación (10) expresa que las variables de decisión solo puedan tomar valores entre cero o uno.

Como se puede apreciar la distancia no se presenta de forma explícita, sin embargo, esta se considera al momento de crear  $W_i$  pues las alternativas del servicio solo pueden cubrir la demanda si están a una distancia menor a  $D$ , es decir:  $d_{ij} \leq D$ .

El Problema localización de máxima cobertura cuenta con una gran variedad de instancias y aplicaciones reales, por ejemplo: el caso de (Hoffmann & Gómez, 2006) se requieren colocar antenas de transmisión en un espacio tridimensional, en ese estudio se requerían comprender el funcionamiento de las antenas como son las ondas de radio, la irradiación, directividad entre otros, a partir de esta información se desea posicionar una cantidad determinada de antenas para el mejor funcionamiento con respecto a los posibles puntos de recepción de la señal. Otros ejemplos de aplicación son la localización de servicios de ambulancias, estaciones de bomberos, clínicas y hospitales.

#### 4.1.4 El problema de localización de p-centro (center problems)

En este modelo el objetivo cambia y en lugar de buscar el mínimo número de instalaciones que cubran la demanda como en el modelo de cubierta de conjuntos o buscar maximizar la demanda satisfecha como en el problema de máxima cobertura, en este modelo el objetivo será disminuir la “distancia de cobertura” es decir, se busca que la distancia entre las instalaciones a construir y los puntos de demanda sea la mínima, otra forma de explicarlo es que el problema busca es minimizar la máxima distancia entre la demanda y la instalación por lo que se le conoce como minimax. El origen de este problema surge junto con el punto de Fermat debido a que fue el quien planteo el problema en una carta a Torricelli en 1659 (Weisstein, 1999) el problema en ese entonces buscaba encontrar un punto  $T$  que minimizara la distancia entre los vértices y dicho punto. En el caso de investigación de operaciones

el planteamiento resulta más complejo pues el número de instalaciones y la métrica juegan un papel importante.

## **4.2. Sistemas de Información Geográfica**

Los Sistemas de información Geográfica ( SIG) también conocidos como GIS (Geographical Information Systems por sus siglas en inglés), son conceptualizados de diferentes formas por ejemplo “bases de datos computarizadas que contiene información espacial” también se define como “tecnología informática para gestionar y analizar información espacial” (Bosque Sendra, 1997),sin embargo, un elemento que predomina dentro de las definiciones es el “dato espacial” o “datos espacialmente referenciados” que hacen alusión a un tipo específico de base de datos, las cuales tiene la característica de tener dentro de sus elementos la información geográfica espacial, este dato espacial es sobre el cual se realizan diferentes aplicaciones y análisis.

### **4.2.1. Elementos de los SIG**

Los sistemas de Información Geográfica están formados por 4 partes las cuales son: el hardware de la computadora que es la parte física, el software el programa o aplicación, los datos y Liveware o parte viva del sistema que es el usuario.

El primer elemento el hardware es donde se asienta el Sistema geográfico y van desde una computadora personal a una estación de trabajo además de tabletas, escáner, discos duros y demás unidades que ayudan a que el sistema se pueda desarrollar.

El segundo elemento el software que funge como el que realiza las operaciones y la manipulación de información (datos) en este punto existen diversos softwares todos con operaciones en común, sin embargo, cada uno tiene características particulares como: si es código libre o privado, la forma como leen los datos y como los almacenan y lo “amigable” que es con el usuario para la realización de operaciones.

El tercer elemento los datos, descritos como un elemento crucial del SIG, ya que siempre que se inicia un proyecto o investigación se debe contemplar la información que se tiene disponible, para el caso de los SIG esta información geográfica o información espacial se obtiene de censos, encuestas, archivos repositorios, mapas. En ciertos casos es necesario digitalizar la información mediante programas de vectorización para obtener un dato general que puede ser entendido por el software.

El Liveware representado por personas que se encargan del uso del SIG además de que toma la decisión de que software usar con base a la disposición de datos y las capacidades del hardware, también, es el elemento

que interactúa con el software para generar las operaciones y análisis de datos para que al final se obtengan resultados, soluciones y análisis.

#### 4.2.2. Funciones de los SIG

Se definen las funciones de los SIG a partir de las operaciones comunes que estos pueden realizar.

- La primera función es la entrada de datos en esta parte como se mencionó se requiere que la información sea adecuada para que ésta sea ingresada al SIG, por lo general los datos presentan distintos formatos como son: mapas analógicos, imágenes de sensores espaciales, fotografías aéreas, etc. Una vez ingresada se da un formato similar a toda la información, para un mejor manejo de ésta. “Las bases de datos de los SIG almacenan información de la ubicación de los rasgos en el espacio, pero también de los atributos de dichos rasgos” (Flamenco, 2002).
- La siguiente función es la gestión de datos. Es la parte concerniente a las adecuaciones de datos, es decir, como se organizan estos en la base de datos, a grandes rasgos los datos se pueden representar como puntos líneas o polígonos, la forma como se acoplan varía a lo largo de la historia, pero pueden ser ráster o vectores.
- La transformación y análisis de datos en esta parte de las funciones se encuentra el potencial operativo ya que proveen nueva información a partir de los datos ya existentes, en esta parte también se define como se utilizarán los datos, esto depende del problema que se desea resolver.
- La salida de datos o representación de datos, se refiere a las diversas formas en cómo se representan los análisis realizados por ejemplo una salida de datos puede ser un mapa, una tabla de información, simulaciones de vuelo o de transporte.

#### 4.2.3. Estructuras especiales de los SIG (capas)

Los datos espaciales de los SIG se pueden ver como mapas que contienen una parte de información específica de la superficie, esta representa un tema en específico, por ejemplo: la red vial, hidrografía, ocupación de suelo, precipitación. Al introducirse al SIG recibe el nombre de capa. Aronoff S. (1989) define las capas como “un conjunto de elementos geográficos lógicamente relacionados y sus atributos temáticos”, las capas ayudan a al

usuario a procesar la información y crear una estratificación de acuerdo con el tema y objetos espaciales.

#### 4.2.4. Tipos de objetos en los SIG

Los objetos espaciales son la representación en las capas esto tiene que ver con la gestión de datos, entonces las representaciones pueden hacerse mediante; puntos cero-dimensionales, líneas unidimensionales, áreas bidimensionales en un modelo de datos vectorial o en celdas, o en modelo ráster. Estos objetos están relacionados entre sí, por ejemplo, un punto puede ser relacionado con otro si son vecinos, otro ejemplo es un punto puede estar en una área o dos líneas se cruzan a continuación se muestra una tabla de esas relaciones.

*Tabla 4-1 Relaciones entre objetos Espaciales En un SIG obtenido de (Gómez Delgado y Barredo Cano 2005)*

Objetos	Puntos	Líneas	Áreas
Puntos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• es vecino de</li> <li>• es asignado a</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Está cerca de</li> <li>• Está en</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es centroide de</li> <li>• Está en</li> </ul>
Líneas		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cruza a</li> <li>• Se une con</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intercepta</li> <li>• Es límite de</li> </ul>
Áreas			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta dentro de</li> <li>• Es adyacente a</li> </ul>

Gómez Delgado y Barredo Cano (2005) plantean que “los objetos tienen preponderancia para la Evaluación Multicriterio (EMC) ya que dichos objetos representaran alternativas de selección dentro del enfoque, es así y tal proceso estará sujeto, o bien, tendrá que basarse en la selección, clasificación rechazo, etc. del conjunto de objetos espaciales”.

#### 4.2.5 Datos espaciales vectorial y raster

La digitalización de los datos en un SIG es mediante dos modelos el vectorial y el raster, la Figura 4.2 se puede observar un ejemplo de cómo el espacio geográfico se puede representar mediante estos formatos.

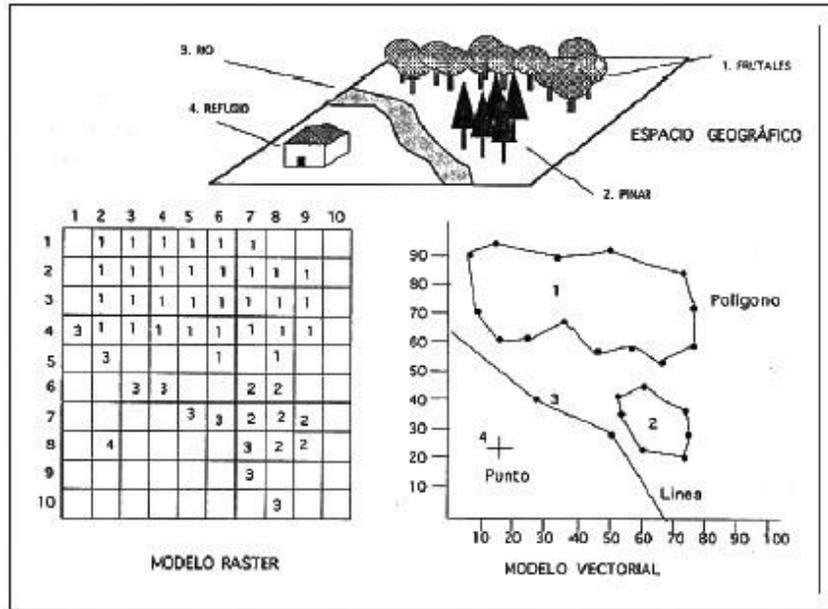


Figura 4.2. Representación raster y vectorial información obtenida en:  
<https://images.app.goo.gl/h8z3YDW48yk36xC67>

El modelo vectorial, la información es mostrada mediante líneas y puntos estableciendo un sistema de coordenadas (x, y) así cada objeto se puede localizar en su respectiva capa. Las áreas son representadas por las líneas que forman la frontera y esas líneas estarán a su vez descritas mediante las coordenadas (x,y) que corresponderán a los vértices del polígono, los puntos simplemente será una coordenada (x, y). en este modelo la asignación de atributos se realiza mediante una tabla asociada a cada capa.

En el modelo ráster el espacio está conformado por píxeles, estos píxeles establecen un orden mediante filas y columnas, en este modelo cada celda tiene un valor que distingue el tipo de información que representa, de acuerdo con (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005) “en el modelo ráster, los elementos están representados por un conjunto de píxeles o celdas pero que no tienen relaciones explícitas de topología ya que las regiones están definidas implícitamente por lo que los objetos no se reconocen a menos que se apique un algoritmo de detección de fronteras”.

#### 4.2.6. Operaciones y análisis de los SIG

Las operaciones que se pueden realizar en un SIG son diversas, a través del análisis es como se puede obtener provecho de estos. El análisis espacial es el cuantitativo de aquellos fenómenos que se manifiestan en el espacio, este será la forma en cómo se tratan a los datos y que resultados se obtienen. Por ejemplo: tomar un mapa para localizar cuerpos de agua, medir alturas o planificar una ruta para un paseo turístico, son operaciones que se pueden realizar en un SIG. Las operaciones se clasifican en 6 partes.

- Entrada de información. En esta sección se realiza la captura y lectura de información geoespacial en esta sección no hay análisis y solo se adecua la información al SIG.
- Mantenimiento recuperación y análisis de información temática. Las operaciones en las cuales a partir de diferentes fuentes de datos se obtiene un dato geoespacial, la recuperación de información de archivos, la lectura de atributos y el análisis de atributos.
- Mantenimiento recuperación y análisis de información espacial en esta parte se realizan operaciones de búsqueda de información de acuerdo con su origen espacial o geográfico, se une información de distintas fuentes espaciales para generar nuevas capas con nuevos atributos. y se dan formas de presentar la información espacial.
- Análisis integrado de datos espaciales y temáticos. Superponer capas, realizar conteos o mediciones de los datos, analizar vecindades analizar redes.
- Modelado cartográfico y espacial. Operaciones que ayudan a la creación de mapas en los cuales se presenta información específica.
- Salida de datos. Exportación de tablas de atributos, generación de bases de datos, generación de imágenes y generación de formatos para la información espacial.

#### 4.2.8.Q-Gis

De acuerdo con el manual de QGIS (2016) “QGIS es un sistema de información geográfica de código abierto. El proyecto nació en mayo de 2002 y se estableció como proyecto en SourceForge en junio del mismo año. Hemos trabajado duro para crear software SIG (que es un software propietario tradicionalmente caro) una perspectiva viable para cualquier persona con acceso básico a una computadora personal. QGIS se ejecuta actualmente en la mayoría de las plataformas Unix, Windows y OS X. QGIS se desarrolla utilizando el kit de herramientas Qt (<http://qt.digia.com>) y C ++. Esto significa que QGIS se siente ágil y tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI) agradable y fácil de usar.”

El objetivo de QGIS es ofrecer un SIG fácil de usar, que tuviera las funciones más comunes. el primer objetivo era proporcionar un software que visualizara datos geográficos, el software evoluciono a tal punto que mucha gente lo utiliza para el análisis de los datos, actualmente admite formatos Raster y datos vectoriales.

QGIS es un Software libre con código abierto lo que significa que cualquier persona tiene al código fuente y que se puede modificarlo libremente, además de ser gratuito.

### 4.3. Análisis de decisión multicriterio

En el ámbito de la toma de decisiones y la Investigación de operaciones, se busca la mejor opción dentro de las posibles alternativas, donde lo posible está delimitado a menudo por las restricciones. Lo mejor se establece mediante un criterio que es una función que relaciona a cada solución un valor, sin embargo, desde un punto de vista apegado más a la realidad no siempre se tiene un único criterio. por ejemplo; si se quisiera elegir entre dos compañías que ofrecen servicio de telefonía e internet, el costo del servicio no es el único criterio para decidir, también, la velocidad de internet, el número de quejas y la capacidad de respuesta cuando se presenta una falla, son contemplados para tomar la última decisión.

De acuerdo (Romero C. , 1996) el análisis de decisión multicriterio (MCDA) se puede ver como una herramienta racional y objetiva, tanto para comprender los procesos de decisión en la ingeniería de sistemas como para ayudar a los centros decisores a abordar la comparación de alternativas.

#### 4.3.1 Conceptos básicos del MCDA

Para poder entender el MCDA se requieren definir algunos conceptos básicos

- **Atributo.** Los atributos se refieren a los valores de determinado problema, es necesario que estos valores puedan medirse independientemente del decisor además de que puedan expresarse como una función de las correspondientes variables, por ejemplo, el costo o el peso son atributos.
- **Objetivo.** Los objetivos son direcciones de mejora de los atributos, se puede maximizar o minimizar como ejemplo, se puede minimizar el atributo costo.
- **Nivel de aspiración.** El nivel de aspiración representa un valor aceptable de logro para un atributo, por ejemplo: si se tiene como atributo el número de ventas de un producto, este se puede tener como nivel de aspiración.
- **Meta.** Una vez definido un nivel de aspiración se define la meta que es la representación matemática para lograr el nivel de aspiración, por ejemplo,  $f(x)=t$  donde  $t$  será el nivel de aspiración que debe obtener el atributo. En este parte cabe destacar que una meta es muy similar a una restricción, la diferencia radica en que la restricción se debe cumplir para que la solución sea factible mientras que en la meta se puede o no llegar al nivel de aspiración.
- **Criterio.** El concepto de criterio engloba los conceptos anteriores por lo que se dice que un criterio es un atributo, objetivo o meta que son de importancia para el centro de decisión.

### 4.3.2 Óptimo de Pareto

En 1938 el economista Wilfrido Pareto, formulo lo que hoy en día se conoce como óptimo de Pareto, según (Miller & Meiners, 1989) *“que cualquier cambio de situación afectaría a una economía sin perjudicar a otra. Es decir, las situaciones son eficientes, si al haber un cambio de esa situación, se beneficia a alguno, sin perjudicar a otro”*. Esto es, una asignación de recursos tal, que cuando se compara con cualquiera otra, las partes involucradas están por lo menos en iguales condiciones de lo que estaban antes y por lo menos una de ellas está mejor de lo que inicialmente estaba. El mismo autor manifiesta, que, si aumenta la utilidad de un individuo, sin que disminuya la utilidad de otro, aumenta el bienestar social de los individuos (ceteris paribus)”

El óptimo de Pareto permite distinguir situaciones óptimas y sub-óptimas. En el ámbito de la programación multicriterio el óptimo de Pareto se puede decir que: un conjunto de soluciones es eficiente si cumple con las restricciones y no existe otra solución factible que produzca una mejora en un atributo sin empeorar al menos otro atributo.

### 4.3.3 Normalización de los criterios

La normalización de los criterios no siempre es necesaria cuando se aplican métodos multicriterio, la normalización ayuda en los siguientes casos:

Cuando los criterios están medidos en diferentes unidades, por ejemplo, horas, kilogramos, unidades monetarias, etc. en una situación como esta la falta de normalización podría afectar la decisión, en otros casos la comparación de criterios sin normalización carece de sentido.

Cuando existe una relación entre diferentes criterios, y el rango de valores que estos pueden obtener pueden ser muy diferentes por lo que la solución puede estar sesgada.

Por último, la normalización de los criterios facilita al centro decisor la comparación de soluciones, naturalmente trabajar con indicadores normalizados hace más fácil las tareas de comparación en las decisiones que trabajar con los valores originales.

Para normalizar los criterios se exponen dos formas la primera consta de dividir el valor del criterio entre el intervalo, entendiendo ese intervalo como el valor absoluto del “mejor” valor menos el “peor” valor.

Por ejemplo, suponga que se tiene una serie de datos que miden la velocidad para normalizar se ocupa la siguiente formula

$$Velocidad = \frac{1300}{|2000 - 1000|} = 1.3 \quad (11)$$

En este caso como se muestra en la ecuación (11) la velocidad del i-esimo dato se normaliza al dividir su valor actual (1300) entre el valor absoluto del mejor (2000) menos el peor (1000).

Otra forma de normalizar es crear índices entre cero y uno, para ello se resta al mejor valor el del criterio y dividiendo entre el intervalo, en este caso el valor del índice será mejor como cuando esté más cerca de cero y será peor cuando esté más cerca de uno, en la ecuación (12) se puede ver cómo aplicar esta fórmula al ejemplo de la velocidad.

$$Velocidad = \frac{2000 - 1300}{|2000 - 1000|} = 0.7 \quad (12)$$

Por último, si al valor del criterio se le resta el peor valor y seguidamente se divide entre el intervalo se obtiene un nuevo índice normalizado el cual será mejor entre más cercano a 1 sea.

$$Velocidad = \frac{1300 - 1000}{|2000 - 1000|} = 0.3 \quad (13)$$

#### 4.3.4 La ponderación de los criterios

Los criterios muy a menudo tienen diferente relevancia para el centro decisor, por lo que es necesario determinar indicadores o pesos de las relevancias relativas al centro decisor. Por lo general la suma de los pesos de cada criterio es uno. Una forma de obtener los pesos de los criterios es ordenarlos del más importante al menos importante, el j-esimo el peso esta denotado por  $W_j$  y se calcula de la siguiente manera:

$$W_j = \frac{1/r_j}{\sum_{i=1}^n 1/r_j} \quad (14)$$

## 4.4. Método PROMETHEE

J.P Brans y Vinckle (1985) publican un método de análisis de decisión multicriterio PROMETHEE (*Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations*) este método está basado principalmente en el concepto clásico de preferencia al comparar dos alternativas  $a$  y  $b$  con respecto a un criterio se pueden dar las siguientes situaciones:

- **$aIb$**  :  $a$  y  $b$  son indiferentes
- **$aPb$**  :  $a$  es estrictamente preferida a  $b$
- **$bPa$**  :  $b$  es estrictamente preferida a  $a$

El método busca el enriquecimiento de la clásica estructura de preferencia y el enriquecimiento de la relación de dominancia. Supóngase que  $f(\cdot)$  es un criterio y sea  $a$  y  $b$  dos alternativas, la función de preferencia  $P(a, b)$ . Para poder indicar claramente las preferencias se definen como:

$$x = f(a) - f(b) \quad (15)$$

Suponiendo un criterio de maximizar, si  $f(a)$  es mayor que  $f(b)$  entonces  $a$  es preferible a  $b$  y se denota por  **$aPb$**  o también  $P(a,b)$  el otro caso  $f(b)$  es mayor  $f(a)$  y entonces se prefiere a  $b$  sobre  $a$  y solamente cuando  $f(a) = f(b)$  es indiferente.

### 4.4.1 Criterios de preferencia enriquecidos

En el caso de PROMETHEE existen 6 criterios generalizados para definir la preferencia el primero es el criterio usual, el cual es el previamente mencionado.

$$p(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \quad (16)$$

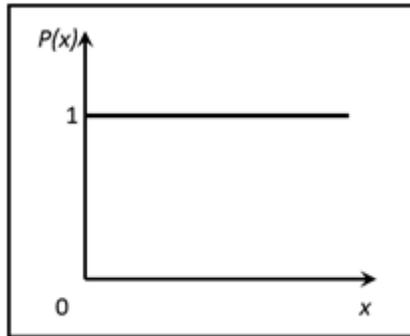


Figura 4.3 Criterio de preferencia usual

**Quasi criterio:** si  $x$  en valor absoluto es menor que  $j$  entonces se está en un intervalo de indiferencia también conocido como umbral de indiferencia, también conocido como **criterio U-shape**

$$p(x) = \begin{cases} 0 & x \leq j \\ 1 & x > j \end{cases} \quad (17)$$

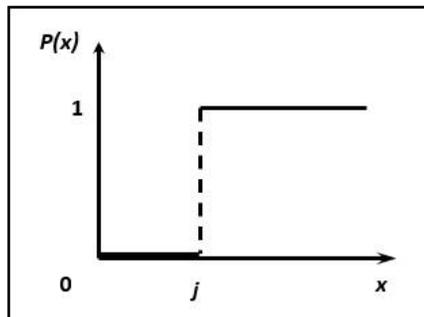


Figura 4.4 Criterio de preferencia U-shape

**Criterio V-shape.** El siguiente criterio se tiene un grado lineal de preferencia hasta llegar a un punto  $m$  en el cual se tiene una estricta preferencia, de esta forma se tiene una forma progresiva de ir midiendo la preferencia.

$$p(x) = \begin{cases} x/m & x \leq m \\ 1 & x > m \end{cases} \quad (18)$$

**Criterio por niveles.** El cuarto criterio se tienen niveles, mientras que no  $x$

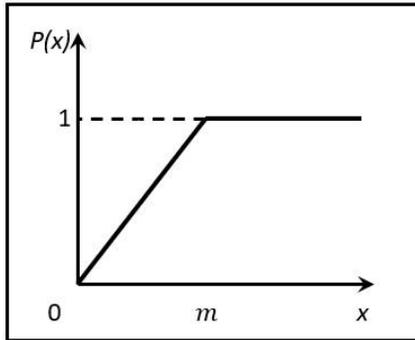


Figura 4.5.- Criterio V-shape

sea menor que  $q$  se tendrá indiferencia si  $x$  es mayor que  $q$  y menor que  $q + p$  se tendrá una preferencia débil y cuando  $x$  sea mayor que  $q + p$  se tendrá una estricta preferencia. En este caso puede crear más niveles de preferencia débil

$$p(x) = \begin{cases} 0 & x < q \\ 1/2 & q \leq x \leq q + p \\ 1 & x > q + p \end{cases} \quad (19)$$

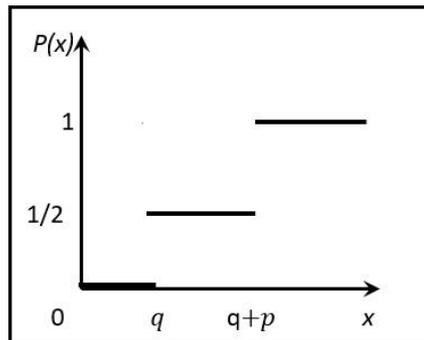


Figura 4.6 Criterio de preferencia por niveles

**Criterio de preferencia lineal** y área de indiferencia en este caso se considera que las alternativas son indiferentes mientras  $x$  no exceda el valor de  $s$ , además la preferencia crece progresivamente hasta que  $x$  valga  $r + s$ .

$$p(x) = \begin{cases} 0 & x < s \\ x - s/r & s \leq x \leq s + r \\ 1 & x > s + r \end{cases} \quad (20)$$

**Criterio gaussiano.** En este caso el grado de preferencia crece con respecto

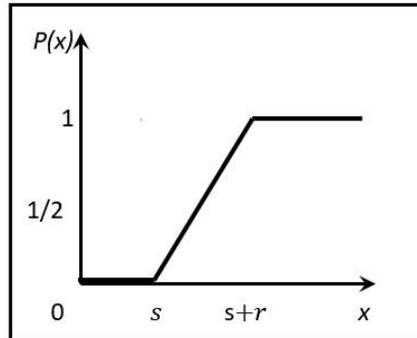


Figura 4.7.- Criterio de preferencia Lineal

A la desviación de  $x$ , para ello se requiere la desviación  $\sigma$  que se obtiene a partir del punto de inflexión de la curva normal.

$$p(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 - e^{-x^2/2\sigma^2} & x > 0 \end{cases} \quad (21)$$

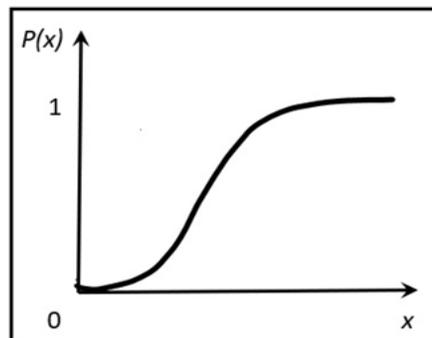


Figura 4.8.-Criterio de preferencia gaussiano

#### 4.4.2 Índice de preferencia

Para cada par de alternativas  $a, b \in K$  se define el índice de preferencia de  $a$  sobre  $b$  con respecto a todos los criterios y suponiendo que ya se definieron cuál de los seis casos de nivel de preferencia se elige.

$$\pi(a, b) = \frac{1}{k} \sum_{h=1}^k w_h P_h(a, b) \quad (22)$$

$$\sum_{h=1}^k w_h = 1 \quad (23)$$

De esta forma  $\pi(a, b)$  expresa en que grado y como la alternativa  $a$  es preferida a la  $b$  se puede medir la preferencia de  $a$  sobre  $b$  con respecto a cada uno de los criterios donde  $w_h$  es el peso que se le da al criterio  $h$ .

#### 4.4.3 Ordenación de preferencias

Una vez obtenido el índice de preferencia se pueden ordenar las alternativas de la más preferida a la menos preferida en esta parte se tienen un orden parcial mediante PROMETHEE I y un orden completo con PROMETHEE II.

Primero se define un flujo de superación positivo y un flujo de superación negativo

$$\phi^+ = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (24)$$

$$\phi^- = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (25)$$

La fórmula 23 representa el flujo de superación positivo en la cual se suma los índices a sobre las demás alternativas y divide sobre el número de alternativas menos uno, mientras que la fórmula 24 el flujo de superación negativo mide la preferencia de suma los índices de cada  $x$  sobre  $a$  y divide entre el número de alternativas menos uno.

De los flujos se obtienen las siguientes ordenaciones:

$$aP^+b \text{ si solo si } \emptyset^+(a) > \emptyset^+(b) \quad (26)$$

$$aP^-b \text{ si solo si } \emptyset^-(a) < \emptyset^-(b) \quad (27)$$

$$aI^+b \text{ si solo si } \emptyset^+(a) = \emptyset^+(b) \quad (28)$$

$$aI^-b \text{ si solo si } \emptyset^-(a) = \emptyset^-(b) \quad (29)$$

Por último, se obtiene el orden parcial para PROMETHEE considerando el caso

$$aP^{(I)}b \text{ si } \begin{cases} aP^+b \text{ y } aP^-b \\ aP^+b \text{ y } aI^-b \\ aI^+b \text{ y } aP^-b \end{cases} \quad (30)$$

$$aI^{(I)}b \text{ si } aI^+b \text{ y } aI^-b \quad (31)$$

$$aR^{(I)}b \text{ en otro caso} \quad (32)$$

PROMETHEE I ofrece el orden parcial ya que existen casos en los que no todas las alternativas son comparables, en general se puede decir que  $a$  es preferible a  $b$  si se cumple la ecuación 30.  $a$  es Indiferente a  $b$  si se cumple la ecuación 31. En los demás casos no será posible la comparación por lo que el orden es parcial, PROMETHEE II si puede realizar un orden total al solo considerar los flujos y obtener el siguiente flujo neto.

$$\emptyset(a) = \emptyset^+(a) - \emptyset^-(a) \quad (33)$$

Una vez establecido el flujo neto se tienen

$$aP^{(II)}b \text{ si y solo si } \emptyset(a) > \emptyset(b) \quad (34)$$

$$aI^{(II)}b \text{ si y solo si } \emptyset(a) = \emptyset(b) \quad (35)$$

En el caso de PROMETHEE II se debe tener cuidado al realizar las comparaciones pues los resultados obtenidos suelen perder información, además de ser menos realistas.

# 5. Metodología

Para lograr el objetivo de este trabajo se realizó un modelo de localización multicriterio este modelo se soluciona mediante el método PROMETHE, para designar alternativas y criterios, se procesó la información geoespacial mediante el software QGIS a continuación se muestra la metodología que se siguió para obtener los resultados.

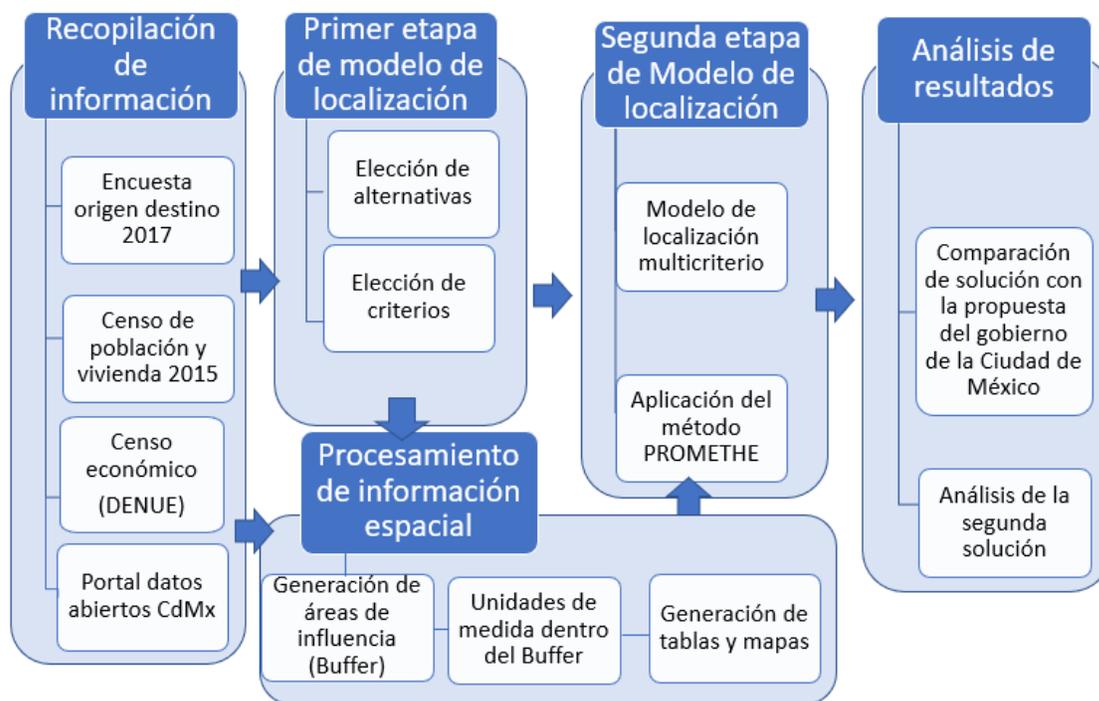


Figura 5.1 Metodología general. Elaboración propia

## 5.1. Recopilación de información

Para realizar un análisis de las principales características del usuario de bicicleta se utilizó la Encuesta Origen Destino del valle de México (INEGI, 2017) dentro de los datos más importantes están el número de viajes realizados en bicicleta junto con los orígenes y destinos, esta información ayuda a caracterizar a la población usuaria como su edad, estrato social, grado de estudios y motivos de viaje, también da un panorama espacial de donde se concentran los viajes en bicicleta. Se localizaron zonas donde se realizaban viajes motorizados con duración menor a 20 minutos pues se

considera que son puntos clave donde se puede cambiar el transporte motorizado por la bicicleta.

Se contabilizó el número de comercios, escuelas, hospitales y otras unidades económicas en la Ciudad de México el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (INEGI, 2018). Para contabilizar la población en la ciudad se utilizó el censo de población y vivienda (INEGI, 2016). Por último se obtuvo información geoespacial en el portal de datos abiertos de la ciudad de México (2016) para localizar CETRAMS y ciclovías de la Ciudad.

Con base en la información obtenida se designarán los posibles lugares donde se puede construir el bici-estacionamiento (alternativas), se establecerán los criterios utilizados además de asignarles una unidad de medida y un peso. Este proceso también se realiza para los bici-estacionamientos ya construidos

## **5.2. Primera etapa del modelo de localización**

Una vez recopilada la información se hizo un primer análisis para definir las alternativas donde se propone construir los bici-estacionamientos y se analizó que información era la disponible para designar los criterios a utilizar en el modelo de localización multicriterio.

### **5.2.1 Elección de alternativas**

En el año 2019 el Gobierno de la Ciudad de México estableció un plan para incentivar el uso de la bicicleta llamado Plan bici 2019, en este destacan la construcción de 35 km de ciclovías y la construcción de nuevos bici-estacionamientos: Buenavista, El rosario, Tláhuac que, junto con Periférico Oriente, La raza, La villa y Pantitlán formaran el sistema de bici-estacionamientos, estas propuestas son los primeros lugares en considerarse como alternativas.

Después se tomó a los distritos de la EOD-ZM-VM en los cuales se realicen más viajes en bicicleta, el lugar de construcción se designó el punto al más cercano, ya sea a una CETRAM, paradero o estación de transporte como Metrobús, Metro, tren ligero u otro. Los distritos con esa característica son: La Noria, San Felipe De Jesús, Tláhuac, La condesa, Mixquic, Santa Catarina, Desarrollo Urbano Quetzalcóatl, Tulyehualco, Centro Histórico, Tezozómoc, Santa Cruz Meyehualco, Palacio de los deportes, Chapultepec-Polanco, Buenavista Reforma, Central de Abastos, Bondonjito, Morelos, Tepepan, Reclusorio oriente y el Molino Tezonco.

Se consideraron como alternativas, algunos CETRAMS como es el caso de Metro Barranca del muerto, metro Constitución, Metro Ciudad Universitaria y Metro taxqueña ya que a pesar de no ser puntos donde se tenga registro de un gran número de viajes si representan puntos de gran afluencia de personas. A continuación, se muestran los puntos que se eligieron junto con el número de viajes reportado en la encuesta origen destino 2017.

Tabla 5-1.Tabla de alternativas a bici-estacionamiento elaboración propia

<b>ID</b>	<b>Nombre</b>	<b>Variable</b>	<b>Número de viajes en Bicicleta con origen en ese distrito</b>
1	La Noria	x1	159
2	Mixquic	x2	132
3	Condesa	x3	131
4	Metro Olivos	x4	123
5	Santa Catarina (Metro Nopalera)	x5	123
6	Centro histórico (Metro Pino Suarez)	x6	83
7	Tulyehualco	x7	90
8	Metro El Rosario	x8	27
9	Chapultepec	x9	76
10	Buenavista	x10	75
11	Central de Abastos	x11	66
12	Palacio de los deportes (Metro velódromo)	x12	78
13	Morelos (Metro Bondojito)	x13	63
14	Molino Tezonco	x14	62
15	Tepepan	x15	63
16	Metro Aculco	x16	66
17	Tláhuac	x17	150
18	Parque Santa cruz Meyehualco	x18	79
19	San Felipe De Jesús	x19	158
20	Metro Moctezuma	x20	59
21	Metro Periférico Oriente	x21	117
22	Metro Taxqueña	x22	36
23	Metro Ciudad Universitaria	x23	35
24	Metro La raza	x24	40
25	Metro Constitución	x25	79
26	Metro Pantitlán	x26	51
27	Metro Barranca	x27	12
28	La villa	x28	29

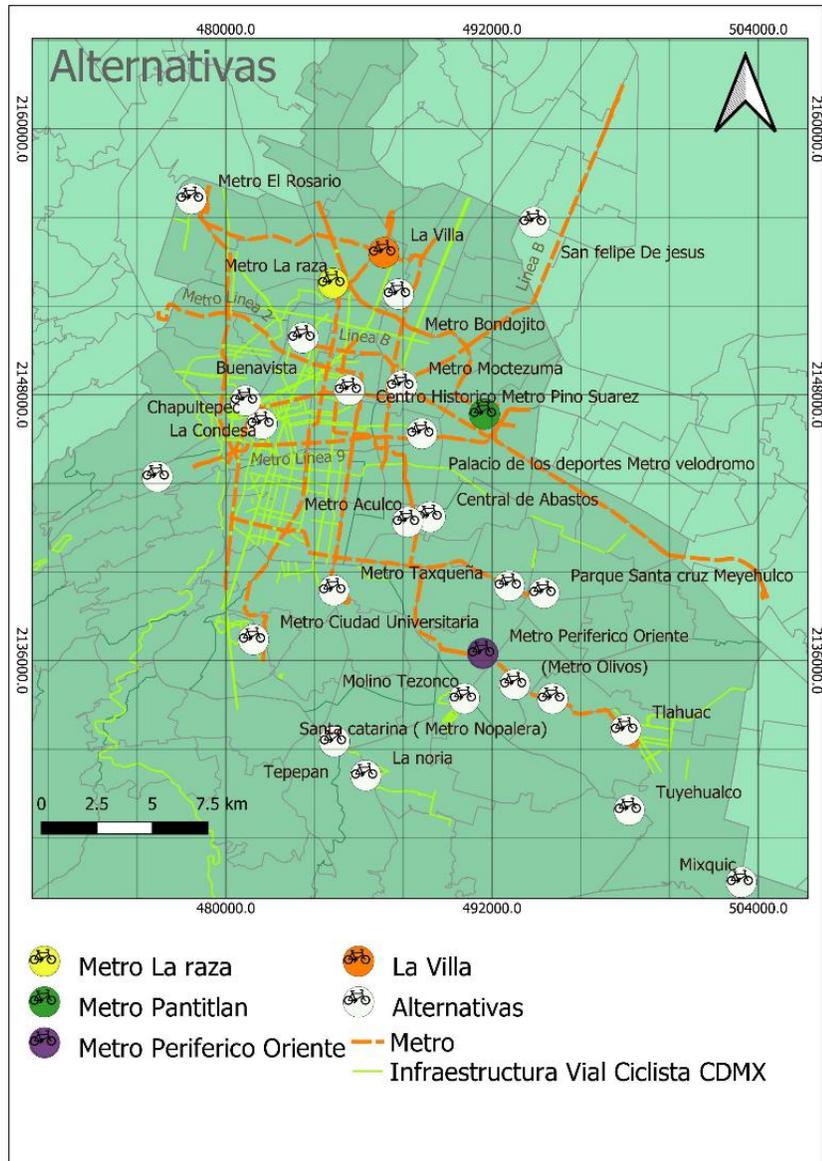


Figura 5.2 Mapa de alternativas en la Ciudad de México. elaboración propia en Qgis

### 5.2.2 Selección de criterios

Para el proceso de selección de criterios se realizó una revisión de literatura. (Bauman, Crane, Drayton, & Titze, 2017; Buehler, 2012; Heredia, Mozon, & Andrés Jara- Díaz, 2014) estudian cuales son los factores que los ciclistas perciben que afectan el uso de la bicicleta entre esos están los que alientan el uso como: la salud, acortar el tiempo de viaje, si la distancia es menor a 5 km o la existencia y calidad de la infraestructura ciclista, mientras los que desalientan son; el riesgo de robo, el riesgo de colisión, factores de clima, la falta de infraestructura y mala calidad, además de esos factores (Xing, Wang,

& Lu, 2020; Zuluaga, Escobar , & Younes, 2018) consideran los propósitos de viaje en particular los destinos a los que se dirigen los usuarios, dentro de estos factores se menciona que los hogares, las escuelas, los centros comerciales, parques y estaciones de otros transportes son los principales destinos. (Buehler, 2012) de manera implícita considera el destino de viaje hacia las oficinas los cuales se incrementan cuando las instalaciones cuentan con políticas e infraestructura ciclista. Por último, en la revisión de literatura relacionada a la localización de estacionamientos, el objetivo principal es maximizar la demanda que está relacionada con la población que reside en el área de estudio.

Ahora bien, para seleccionar los criterios se consideró medir estos dentro de un área de influencia de 5 km alrededor de cada alternativa, se designaron 5 km ya que según la EOD 2017 el tiempo promedio que se viaja en bicicleta es de 20 minutos y considerando una velocidad constante 15 km/h se esperaría que en 20 minutos un ciclista promedio este dentro del área para estacionar su bicicleta en la alternativa.

Para tomar en consideración el factor de intermodalidad se tomó en cuenta el número de CETRAMS dentro del área y se desea maximizar este criterio.

Para disminuir la percepción de riesgo de colisión se requiere que exista una ciclovía por lo que ese medirá la distancia más corta de la alternativa a una ciclovía, también dentro de la percepción de robo se utilizaron mapas creados por usuarios a los que han robado sus bicicletas y han generado un mapa comunitario en la plataforma Google maps”(*Mapa bicis robadas*, 2014; *No dejes Tu bici aquí!*, 2019) se contabilizarán los puntos dentro del área y se maximizara el criterio para localizar el estacionamiento en una zona que requiera más seguridad.

Para los criterios relacionados a los propósitos de viaje se contarán las unidades económicas: Comercios, escuelas, servicios bancarios y financieros, Corporativos, fábricas y talleres manufactureros, servicios de construcción y servicios de salud. Todos los datos se obtienen del mapa interactivo DENUÉ (2018), cada criterio se desea maximizar los puntos.

Los criterios de mayor importancia son: la población beneficiada, en este caso se cuenta la población dentro del área de influencia con los datos del censo de población y vivienda 2015, este es el criterio de mayor importancia ya que gran parte de los modelos de localización su principal objetivo es maximizar la población beneficiada dentro del área de influencia. El segundo factor de importancia se consideró aquellos viajes motorizados que pueden sustituirse por un viaje en bicicleta por lo que se realizó un filtro por origen y medio de transporte cuya duración fuera menor a 20 minutos, estos viajes representan usuarios potenciales que pudieran optar por el uso de la bicicleta para realizar parte de su viaje.

Por último, ya que se desea maximizar el área de influencia, para analizar y descartar alternativas con áreas intersecadas se calculó la matriz de

distancias con ayuda de Qgis y se generaron escenarios distintos, en el primero las distancia mínima entre las instalaciones debe ser mayor a 2 km, el segundo escenario la distancia será menor a 3.5 km y el tercer escenario a 5 km. EL motivo por el cual se generan escenarios es que no se tiene información precisa de cual debe ser la distancia adecuada entre las alternativas y de acuerdo a las investigación documental una mayor distancia aumentara el área de servicio y con ello la población beneficiada , mientras que una concentración de las instalaciones o menor distancia entre estas presupone una mejor interconexión y un mejor servicio.

La tabla 5.2 muestra los criterios, la fuente de datos, si criterio es de maximizar o minimizar, el orden de importancia y su peso.

ID	Criterio	Fuente de información	Minimizar o maximizar	Importancia	Peso (Wi)
1	Población	Censo población	Maximizar	1	0.322532
2	Viajes cortos motorizados	EOD	Maximizar	2	0.161266
3	Escuelas	DENUE	Maximizar	3	0.107510
4	Comercios	DENUE	Maximizar	4	0.080633
5	Industrias manufactureras	DENUE	Maximizar	5	0.064506
6	Servicios bancarios y financieros	DENUE	Maximizar	6.5	0.049620
7	Corporativos	DENUE	Maximizar	6.5	0.049620
8	Robos	Mapa Goggle maps	Maximizar	8	0.040316
9	CETRAMS	Datos abiertos CdMx	Maximizar	9.5	0.033950
10	Distancia mínima a ciclovías	Análisis geoespacial	Minimizar	9.5	0.033950
11	Constructoras	DENUE	Maximizar	11.5	0.028046
12	Servicios de salud	DENUE	Minimizar	11.5	0.028046

Tabla 5-2 Tabla de criterios elaboración propia

### 5.3. Procesamiento y análisis geoespacial

Una vez ingresadas las diferentes capas al software Qgis, el primer proceso es el cambio de coordenadas ya que estas pueden tener diversas representaciones, en este caso el que se utiliza es El sistema de coordenadas geográficas UTM (Universal Transverse Mercator por sus siglas en inglés) la cual es una proyección de la esfera en un cilindro. De esta forma la Tierra pasa ser de una esfera a un plano rectangular y esto ayuda a tener medidas

en metros, para el área geográfica de la ciudad de México se utiliza la representación UTM N14.

El siguiente paso es generar la capa de alternativas, primero se localizan los puntos en el software Google Earth y se genera un archivo KML, este archivo será una capa de puntos los cuales representaran las alternativas de los sitios donde se pretende construir los bici-estacionamientos, esta capa también debe ser guardada con la representación UTM N14. Una vez que la capa está conformada con las nuevas alternativas y los bici-estacionamientos ya construidos se les dio una simbología adecuada para poder identificarlos. Con la capa de alternativas se generó un buffer de 5km alrededor de cada alternativa este representa el área de influencia en donde los usuarios podrán hacer uso del servicio, el resultado se muestra

Figura 5.3.

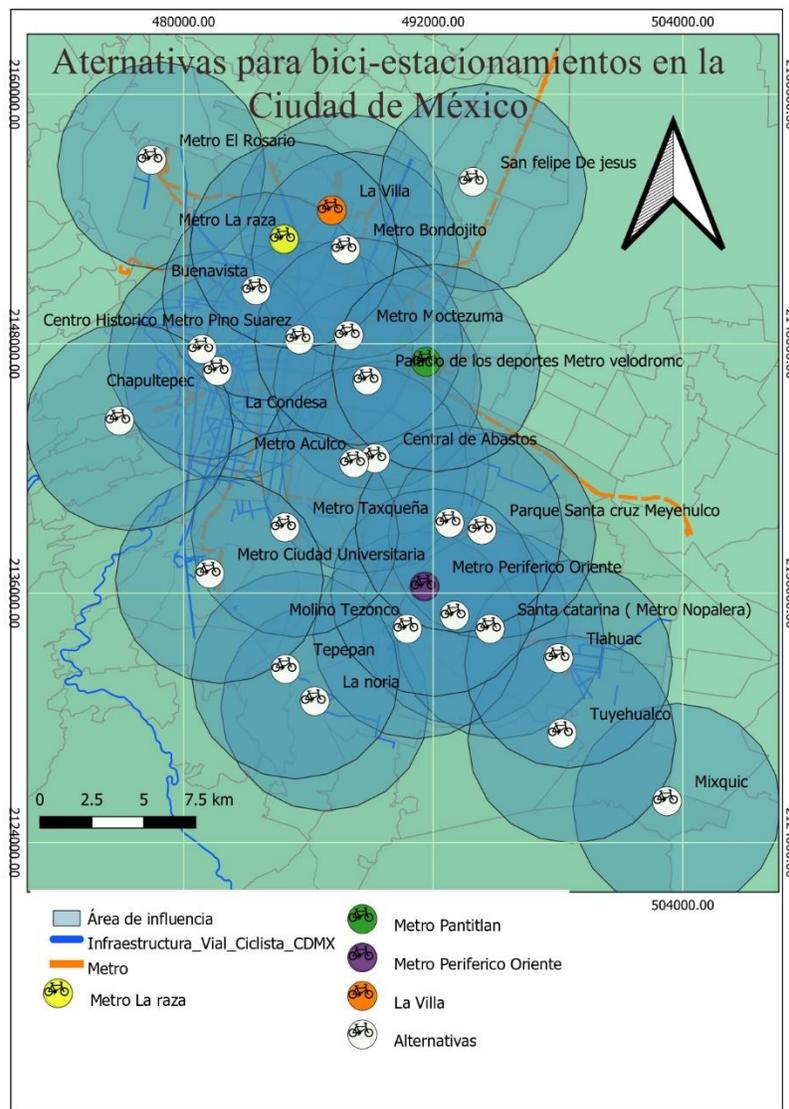


Figura 5.3 Área de influencia. Elaboración propia mediante el software Qgis

Ahora se procede a contar en cada área de influencia el número de puntos de los diversos servicios. Para ello se utiliza una herramienta de Qgis que ayuda a contar el número de puntos dentro de un polígono en este caso los polígonos serán las áreas de influencia y los puntos serán los diferentes criterios como son: comercios, escuelas, población, fábricas y talleres manufactureros, robos, empresas constructoras, servicios bancarios y financieros y servicios de salud. El resultado es visualmente la misma capa de polígonos, sin embargo, esta capa estará asociada una tabla que contiene la información del conteo de los puntos, esta se puede ver en el apéndice en la tabla de información.

## **5.4. Segunda etapa del modelo de localización**

### **5.4.1 Aplicación del método PROMETHEE**

Con el cálculo de los criterios se alimenta la tabla del Software PROMETHEE, el primer paso es generar los criterios, en cada caso se asigna su nombre y la escala de medición (un valor real, cualitativo o cuantitativo) también tiene la opción de dar una descripción. Una vez creados los criterios se procede a marcar su peso, si es un criterio de maximizar o minimizar y los criterios de preferencia, para este trabajo la mayoría de los casos son del tipo usual a excepción de la distancia ya que en este caso sería del tipo u-shape ya que no hay diferencia que la ciclovía este a una distancia de 10 metros pues esta diferencia puede significar solo el cruce de una calle. El interés real de considerar la distancia de la alternativa a la ciclovía es saber si existe una conexión de la infraestructura ciclista vial con el bici-estacionamiento por lo tanto se considera que es mejor asignar un valor de indiferencia si la distancia no es mayor a 10 metros.

Visual PROMETHEE Academic - Estacionamientos\_2.vpg (not saved)

File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help

Scenario:	Pobl...	Viaie...	Inter...	Escu...	Com...	indu...	Servi...	Cobo...	Robos	CET...	Dista...
Unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit
Cluster/Gr	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
<b>Preferen</b>											
Min/Max	max	max	min	max	min						
Weight	33.20	16.62	11.02	8.24	6.55	5.49	4.43	4.43	3.69	3.16	3.16
Preferenc	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	U-shape
Threshold		absolute									
- Q:		n/a	10.00								
- P:	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S:	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>Statistic</b>											
Minimum	78440.00	4278.00	1.00	60.00	28.00	20.00	5.00	0.00	0.00	0.00	15.71
Maximum	1282240.00	52304.00	8.00	1632.00	7698.00	1777.00	1030.00	49.00	544.00	15.00	5784.00
Average	874247.79	23411.79	3.75	863.79	2607.46	842.25	262.32	7.75	117.86	6.39	1340.41

Figura 5.4. Llenado de información de los criterios.

El siguiente paso es ingresar las alternativas, en esta parte se les asigna el nombre, descripción y categoría para este trabajo la categoría se asignó según la Alcaldía donde se ubican, el software también permite asignar un valor de latitud y longitud para generar un mapa sin embargo este proceso ya se realizó en Qgis por lo que no es necesario replicar el proceso. Después de crear las alternativas se llena la con la información respectiva a los criterios, el software marcara el mejor valor en color verde y el peor valor en color rojo.

Visual PROMETHEE Academic - Estacionamientos\_2.vpg (saved)

File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help

Maximum	1282240.00	36512.00	8.00	1632.00	7698.00	1777.00	1030.00	49.00	544.00	15.00	5784.00	673.00	1075.00
Average	874247.79	21165.42	3.75	863.79	2607.46	842.25	262.32	7.75	117.86	6.39	1340.41	139.96	378.00
Standard	346984.62	7043.56	1.86	414.73	2336.37	544.67	275.62	13.76	158.44	3.88	1429.19	180.07	265.00
<b>Evaluati</b>													
La Villa	1060420.00	17248.00	2.00	1.00	49.00	7.00	26.05	80.00	354.00				
La Noria	526392.00	19152.00	2.00	0.00	17.00	4.00	179.94	30.00	238.00				
Mixuic	78440.00	21000.00	1.00	0.00	0.00	0.00	5784.00	2.00	26.00				
La con...	1053300.00	36512.00	4.00	3.00	544.00	9.00	165.33	673.00	1075.00				
Metro ...	917999.00	12040.00	6.00	0.00	16.00	5.00	2788.41	15.00	198.00				
Metro ...	820242.00	23016.00	6.00	0.00	12.00	4.00	2282.51	14.00	168.00				
Metro ...	1282240.00	15400.00	8.00	1532.00	6545.00	1777.00	637.00	20.00	446.00	13.00	23.52	370.00	799.00
Tuveh...	266024.00	15400.00	2.00	210.00	137.00	79.00	22.00	0.00	1.00	1.00	2057.98	5.00	68.00
Metro ...	382581.00	21504.00	1.00	325.00	911.00	552.00	55.00	3.00	14.00	2.00	78.09	33.00	99.00

Figura 5.5. Información de alternativas.

También es posible ingresar todo el modelo mediante un archivo CSV delimitado por comas, esta forma de generar el modelo dentro del software es una mejor opción ya que la tabla obtenida en Qgis es un archivo CSV por lo que solo basta adecuar el archivo con la información de los criterios.

Una vez ingresada la información al software Visual PROMETHEE, este ofrece varias formas de representar los órdenes de preferencia el primero que se muestra es la tabla de flujo de superación positiva  $\emptyset^+$  y el flujo de superación negativo  $\emptyset^-$

Los flujos están ordenados de acuerdo con el orden de preferencia de PROMETHEE II, es decir están ordenados con respecto a Phi ( $\emptyset$ ). En el caso del orden parcial PROMETHEE I las únicas alternativas que no fueron comparables son metro Constitución con respecto al Metro Aculco, Metro Tasqueña con respecto a Santa Cruz Meyehualco y la indiferencia entre La Villa, metro Barranca y Pantitlán, por lo que todo el análisis se hará con respecto al orden de PROMETHEE II.

#### 5.4.2 generación de escenarios

Después de ingresar los datos a PROMETHEE se procede a generar los escenarios con diferentes distancias entre las alternativas. El proceso será elegir la mejor alternativa según PROMETHEE, después se elegirá la segunda mejor alternativa siempre y cuando la distancia entre estas sea mayor a la designada según el escenario (2, 3.5 y 5 km) de no cumplir se tomará la siguiente alternativa, así sucesivamente hasta tener 7 alternativas. Por último, se generará un último escenario que contemple los estacionamientos previamente construidos, el orden de preferencia PROMETHEE y una distancia mínima entre alternativas de 3.5 km

## 6. Resultados

### 6.1. Cálculo de los criterios para los escenarios y soluciones

Una vez obtenidas los escenarios y la solución para realizar el análisis de las soluciones es necesario el conteo de los criterios en el área, sin embargo, se debe tomar en cuenta las intersecciones de las áreas de influencia, esto con el fin de no contabilizar dos veces la población u otro criterio dentro del área. Calcular cada criterio en cada intersección puede llegar a tardar más de lo esperado, en este caso mediante el programa QGIS se disuelven las áreas de influencia en una sola área para eliminar las intersecciones y después realizar de nuevo el conteo de población y demás servicios que conforman los criterios, de esta forma el cálculo es más rápido, por el momento el proceso se debe hacer de forma manual por cada solución, si se quisiera realizar todas las posibles combinaciones de 7 bici-estacionamientos de 28 alternativas se tendría que realizar 1,184,040 procesos de disolver capas y 14,208,480 procesos de conteo para los criterios

### 6.2. Orden de preferencia PROMETHEE

Siguiendo este orden las 7 mejores opciones son: Metro Pino Suárez, Metro Moctezuma, La condesa, Buenavista, Palacio de los deportes, La raza y Central de abastos, los cuales están en las alcaldías: Venustiano carranza, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Iztacalco y Azcapotzalco.

Las peores opciones son: Metro Olivos, Metro Rosario, La noria, San Felipe de Jesus, Tláhuac, Mixquic y Tulyehualco que se encuentran en las alcaldías, Tláhuac, Xochimilco y Gustavo A Madero.

Tabla 6-1. Flujos de preferencia. Elaboración propia con datos obtenidos a través de Visual PROMETHEE

Multicriteria flows	Phi	Phi+	Phi-
Metro Pino Suárez	0.6175	0.8033	0.1858
Metro Moctezuma	0.5844	0.7899	0.2054
La condesa	0.5455	0.7721	0.2266
Buenavista	0.5236	0.7598	0.2362
Palacio de los deportes	0.5145	0.7545	0.24
La Raza	0.4743	0.7288	0.2545
Central de Abastos	0.4616	0.7274	0.2658
Metro Bondojito	0.4489	0.7219	0.2731
Chapultepec	0.314	0.6557	0.3417
Metro constitución	0.2339	0.6061	0.3722
Metro Aculco	0.2299	0.6115	0.3816
Santa cruz Meyehualco	0.0916	0.5316	0.44
Metro Tasqueña	0.0849	0.5402	0.4553
Ciudad Universitaria	0.0366	0.5163	0.4797
La Villa	0.0212	0.4983	0.4771
Metro Barranca del muerto	0.0052	0.4993	0.4941
Metro Pantitlán	-0.0417	0.469	0.5107
Molino Tezonco	-0.0746	0.4486	0.5232
Metro periférico oriente	-0.1632	0.4083	0.5714
Tepepan	-0.2382	0.3758	0.614
Metro nopalera	-0.3615	0.3042	0.6657
Metro Olivos	-0.4618	0.2539	0.7157
Metro Rosario	-0.4744	0.261	0.7354
La Noria	-0.4917	0.24	0.7316
San Felipe de Jesús	-0.516	0.2303	0.7463
Tláhuac	-0.7191	0.1242	0.8433
Mixquic	-0.8106	0.083	0.8936
Tulyehualco	-0.8348	0.0683	0.9032

En la Figura 6.1. Solución con distancia mínima de 2 kilómetros. elaboración propia en Qgis. se muestra un gráfico que muestra el orden completo

conforme la alternativa este más arriba será más preferible que las demás alternativas y entre más abajo será menos preferible.

### **6.3. Escenarios de acuerdo con la distancia mínima**

Si se toman las 7 alternativas mejor calificadas se aprecia en la figura 17 que estas en ocasiones comparten área en común, es por ello que se deben ir descartando alternativas que se intercepten, para ello se generaron 3 escenarios el primero se descartan alternativas si la distancia es menor a dos kilómetros la solución obtenida es: Metro Pino Suarez, Metro Moctezuma, Buenavista, Condesa, Palacio de los deportes, La raza y Central de Abastos.

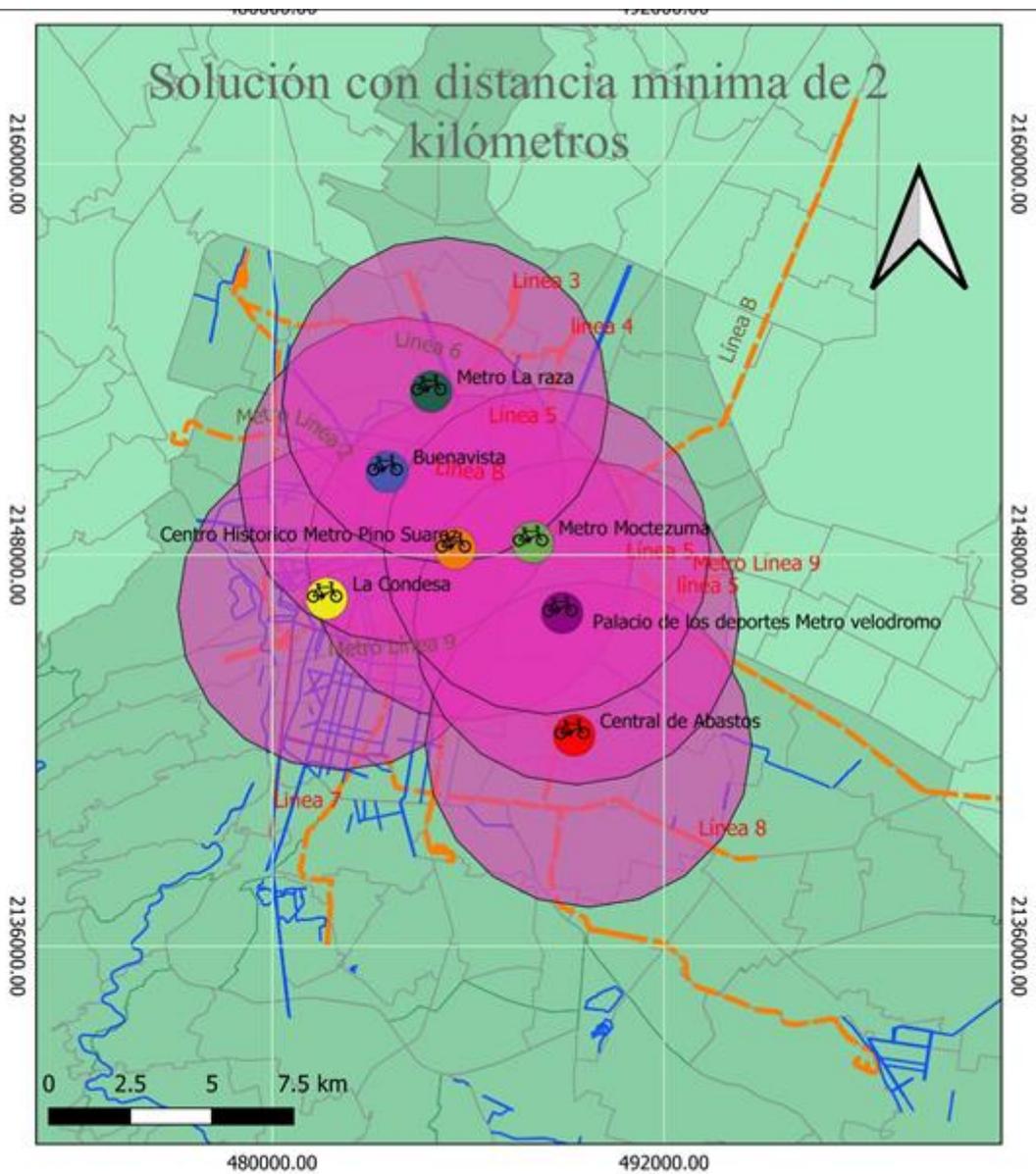


Figura 6.1. Solución con distancia mínima de 2 kilómetros. elaboración propia en Qgis.

El segundo escenario si la distancia es menor a 3.5 kilómetros, la solución obtenida es: Metro Pino Suarez, La condesa, Palacio de los deportes, La Raza, Central de abastos, Metro Constitución y Metro Tasqueña.

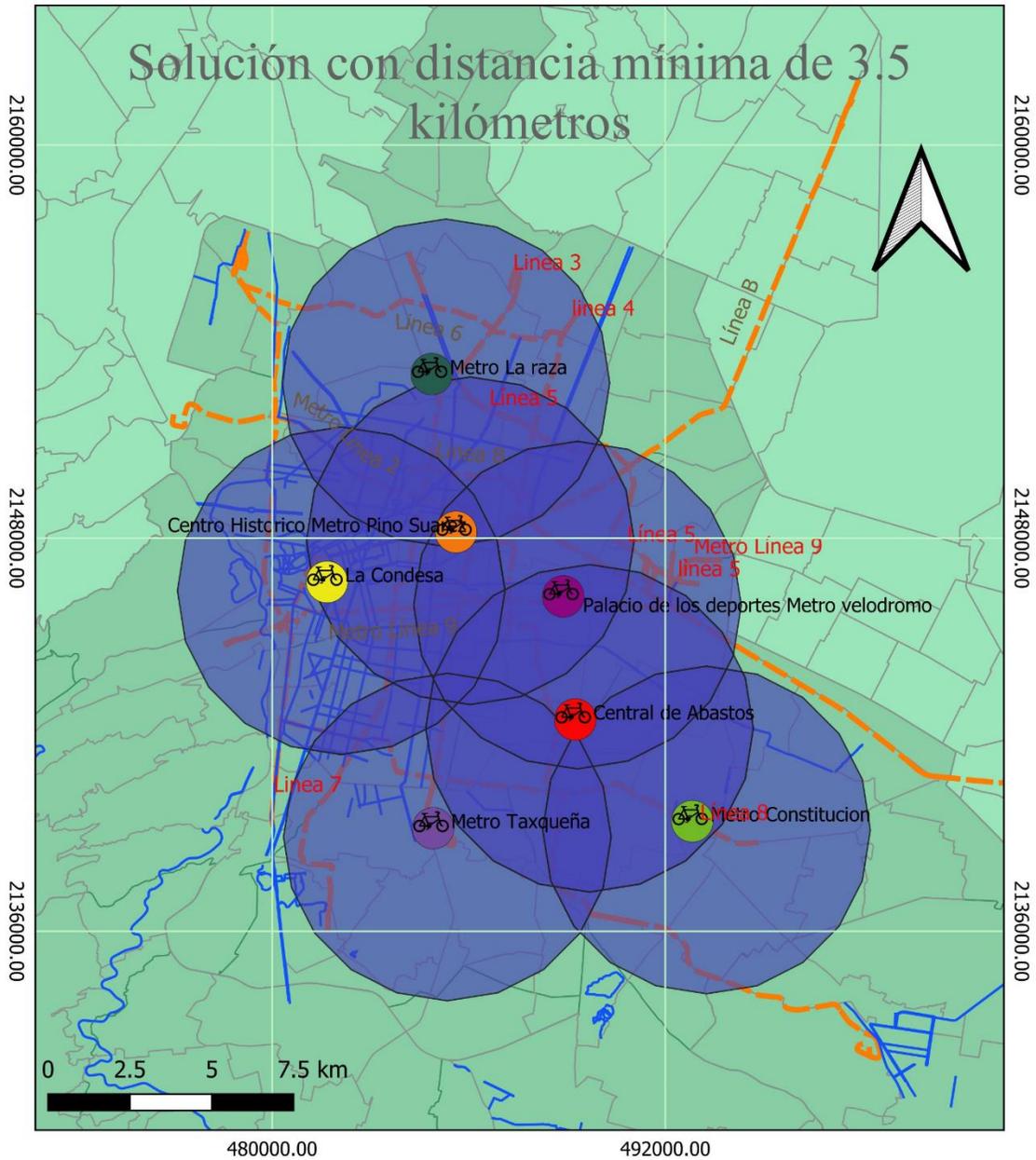


Figura 6.2.- Solución con distancia mínima de 3.5 Km. Elaboración propia en QGis

En el tercer caso si la distancia es menor a 5 kilómetros, la solución es: Metro Pino Suarez, Central de Abastos, Santa cruz Meyehualco, Metro Tasqueña, La Villa, Barranca del muerto y Metro Pantitlán.

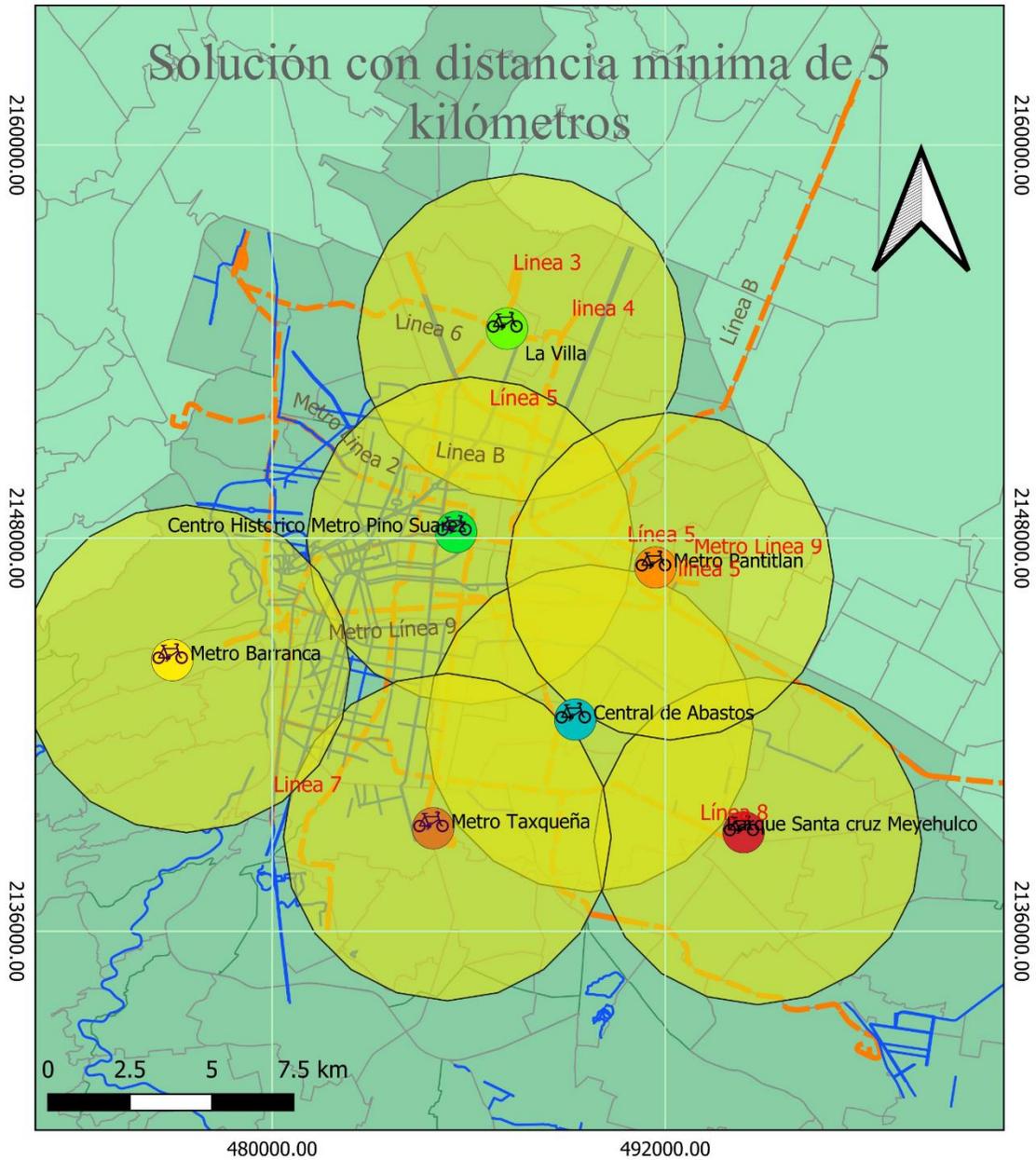


Figura 6.3. Solución con distancia mínima de 5 km. Elaboración propia en QGIS.

Como se aprecia en las figuras VI,1 VI,2, VI.3 el área de influencia que conforma toda la solución va creciendo conforme la distancia mínima, naturalmente las zonas donde se interceptan son menores, el motivo principal por el que se generan 3 distintas soluciones es porque como menciona Chung y Sohn (2017) en su modelo pueden existir soluciones con mejores distribuciones que otras sin embargo ambas soluciones son eficientes y dependen de la decisión del tomador de decisiones, también (Jenhung Wang, 2016) menciona que es muy importante el área de cobertura del sistema para

que más usuarios tengan acceso al sistema. Por otro lado J.-R. Lin, y T-H, (2011) hablan de la importancia de la distancia entre las estaciones en un BSS, a pesar que en este trabajo no se trata de un sistema de préstamo de bicicletas, la distancia entre los estacionamientos logra una mejor interconexión del sistema, por lo tanto una mayor distancia entre los estacionamientos generan una mayor área de cobertura pero menor conexión, mientras que una menor distancia entre los bici-estacionamientos genera más comodidad pues los usuarios realizan viajes más cortos. Por lo anterior se decidió presentar las tres diferentes soluciones.

#### **6.4. Propuesta de solución actual**

Se puede observar que, las soluciones presentadas anteriormente, difieren de lo que el Gobierno de la Ciudad de México ha realizado; este trabajo carece de sentido si no se realiza una propuesta que se adecue a la realidad y a la actualidad; por tal motivo, se decidió realizar una última propuesta acorde con los bici-estacionamientos ya construidos hasta el año 2020, los cuales son: La raza, La Villa, Pantitlán, Periférico Oriente, Buenavista, Tláhuac y El Rosario; a estos se agregaron los estacionamientos de La condesa, Central de Abastos y Taxqueña, los cuales son preferibles de acuerdo con el modelo PROMETHEE II y además se encuentran a una distancia mayor a 3.5 kilómetros con respecto de los estacionamientos ya construidos. La solución se representa en Figura 6.4.

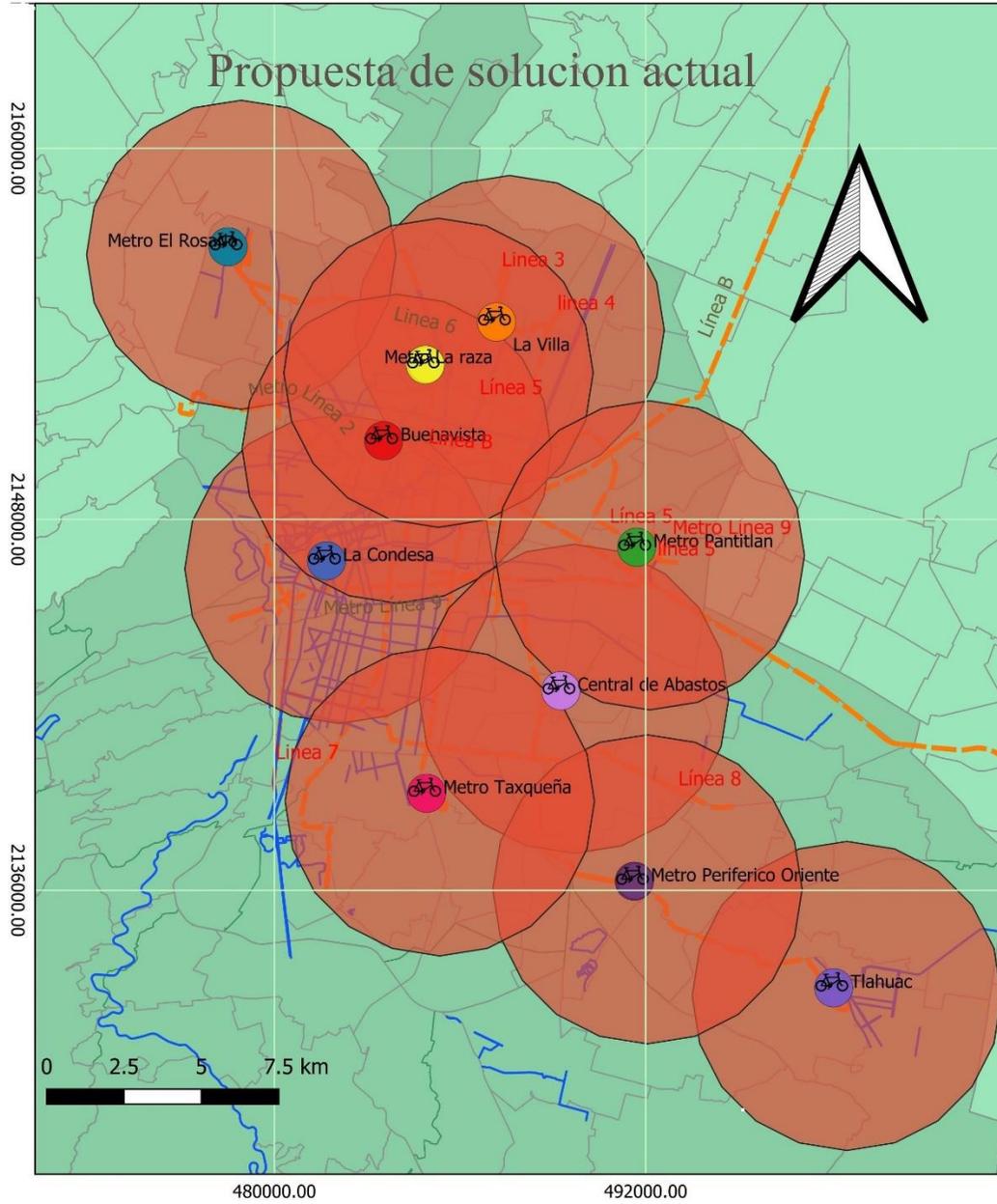


Figura 6.4. Propuesta de solución actual

## 6.5. Análisis de Resultados

Una vez obtenidas las soluciones, es necesario realizar un análisis; en este caso, se comenzará por analizar las zonas donde se encontraron las alternativas mejor y peor *calificadas*; a continuación, se medirán en porcentajes los servicios y población que están dentro del área de cobertura; por último, se comparará la solución propuesta en este trabajo con la del congreso MULTILOG 2019.

### 6.4.1 La zona con mayor orden preferencia

Las zonas mejor calificadas se encuentran en las alcaldías Cuauhtémoc, Iztacalco, Venustiano Carranza y Miguel Hidalgo; en la parte neutra, predominan las alternativas correspondientes a Iztapalapa y Coyoacán, mientras que, en las zonas peor calificadas se localiza a Xochimilco y la alcaldía de Tláhuac. Mediante los resultados de PROMETHEE logra visualizar que en la ciudad existen zonas que comparten características muy similares con respecto a los criterios medidos.

En la zona centro y norte de la ciudad, se concentran un mayor número de servicios como son escuelas, hospitales, mercados, plazas comerciales y comercios; amplias zonas de trabajo como fábricas, talleres, corporativos y oficinas; en esa zona, también el número de robos de bicicletas y CETRAMS es alto. Un ejemplo de lo anterior es el área del Metro Pino Suarez, lugar con mayor concentración de población, y en la Condesa, es la alternativa en la que se contabilizaron más comercios, escuelas, servicios de salud y también más robos de bicicleta; sin lugar a duda, la zona centro y poniente de la ciudad requiere del servicio de bici-estacionamientos promoviendo los viajes en bicicleta y mejorando la movilidad de la zona.

### 6.4.2 La zona menor orden preferencia

En contraste con la zona mejor calificada, se encuentra la zona sur oriente de la ciudad, correspondiente a las alcaldías Xochimilco y Tlahuac; en esta zonas, el número de servicios económicos es muy bajo; por ejemplo, la alternativa de Mixquic tiene el menor número de escuelas, servicios de salud, talleres; entre otros servicios; otras alternativas como son Nopalera, Tláhuac o Tulyehualco, cuentan con un número alto de población y de viajes motorizados pero con una cantidad menor de servicios; en esta zona, no se puede afirmar que no requieran de un servicio de biciestacionamiento, no obstante, es posible que se necesiten de otros servicios con una mayor prioridad como son hospitales, fuentes de trabajo, sistemas transporte masivo, etc;

Por otro lado, en contraste con Buenavista, donde se localizan 10 CETRAM, la alternativa de Tláhuac solo cuenta con uno. En conclusión, si bien podría existir un beneficio al tener un estacionamiento en estas zonas, también se requiere un diseño integral que considere la creación de caminos, transportes, fuentes de trabajo y otros servicios que pueden ser primordiales antes que el servicio de bici-estacionamiento.

### 6.4.3 Comparación de soluciones

Para realizar el análisis de las soluciones, es necesario el cálculo de los criterios en el área; sin embargo, se debe tomar en cuenta las intersecciones de las áreas de influencia; por ejemplo, si se toman como solución La Condesa y Chapultepec, estas alternativas se encuentran a una distancia de 1,284 metros una de la otra aproximadamente y comparten un 75% del área de influencia; sin embargo, calcular cada criterio en cada intersección puede llegar a tardar más tiempo del esperado; en este caso, mediante el programa QGIS, se disuelven las áreas de influencia en una sola área para eliminar las intersecciones y después, se realiza de nuevo el conteo de población y demás servicios que conforman los criterios, de esta manera, el cálculo es más rápido; no obstante, por el momento el proceso se debe hacer de forma manual por cada solución; si se quisieran realizar todas las posibles combinaciones de 7 biciestacionamientos de 28 alternativas, se tendrían que realizar 1,184,040 procesos de disolver capas y 14,208,480 procesos de conteo para los criterios.

La solución con distancia mínima de 2 kilómetros, cubre un área que cuenta con el 13.74% de la población, 25.57% de los viajes motorizados, 44.31% de los servicios educativos, 69.03% de los comercios, 62,69% de las fábricas y talleres de la industria manufacturera, 61.22% de las instalaciones de servicios bancarios y financieros, 48.48% de los corporativos y oficinas, el 75.93% de los robos de bicicletas reportados en los mapas interactivos de Google Maps, 66% de las CETRAMS, el 66.94% de las empresas dedicadas a la construcción y 51.96% servicios de salud, respectivamente del total de cada rubro.

La solución con distancia mínima de 3.5 kilómetros, cubre un área que cuenta con 17.17% de población aledaña, 31.21% de los viajes motorizados, 57.48% de los servicios educativos, 77.14% de los comercios, 73,18% de las fábricas y talleres de la industria manufacturera, 70.28% de las instalaciones de servicios bancarios y financieros, 49.49% de los corporativos y oficinas, el 87.85% de los robos de bicicletas reportados en los mapas interactivos de Google Maps, 76% de las CETRAMS, 74.05% de las empresas dedicadas a la construcción y 64.25% servicios de salud, respectivamente del total de cada rubro.

La solución con distancia mínima de 5 kilómetros, cubre un área que cuenta con 36.92% de población aledaña, 33.1% de los viajes motorizados, 63.55% de los servicios educativos, 75.27% de los comercios, 72,39% de las fábricas

y talleres de la industria manufacturera, 71.64% de las instalaciones de servicios bancarios y financieros, 61.62% de los corporativos y oficinas, el 88.09% de los robos de bicicletas reportados en los mapas interactivos de Google Maps, 78% de las CETRAMS, 74.74% de las empresas dedicadas a la construcción y 66.69% servicios de salud, respectivamente del total de cada rubro.

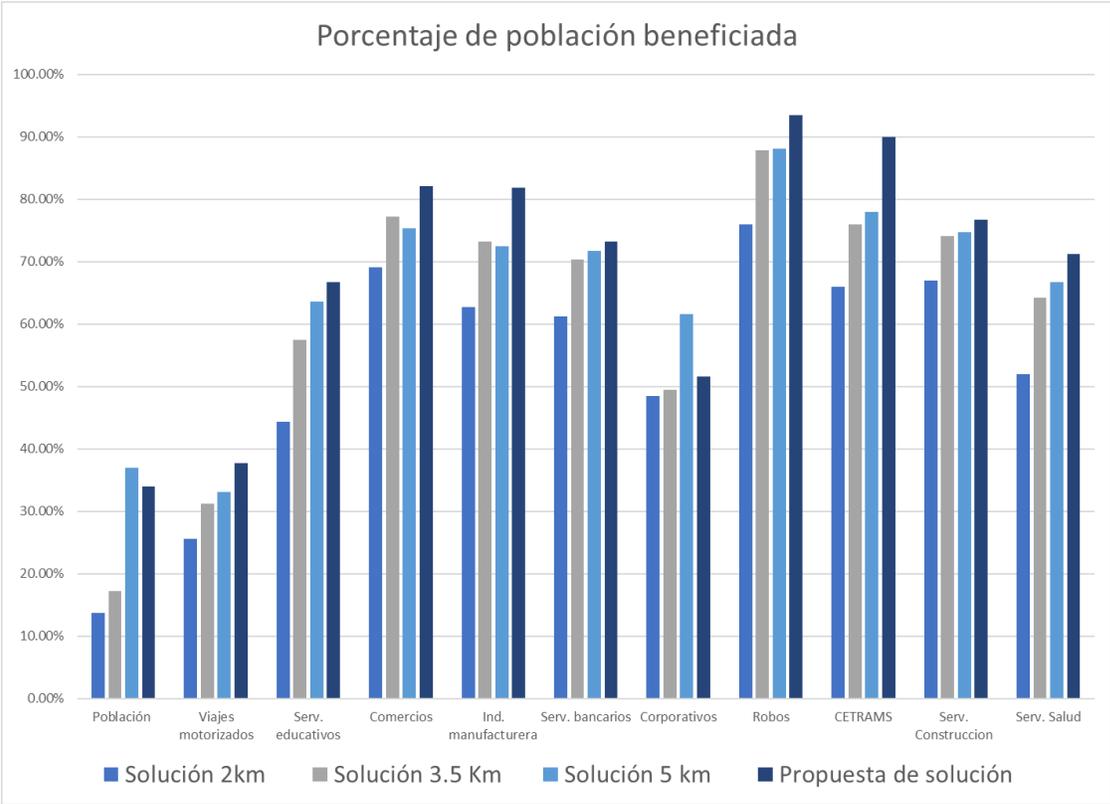


Figura 6.5.- Porcentajes de los criterios por cada solución elaboración propia

En la Figura 6.5 se observa que, a mayor distancia entre las alternativas, se tiene un mayor número de población y servicios, esto a pesar de que al aumentar la distancia se deben ir considerando alternativas que no son las mejor calificadas. En el caso de la solución con distancia mínima a 3.5 km y la de 5 km, el incremento es menor de un punto porcentual y en el caso del número de comercios o el número de talleres y fabricas manufactureras, es mejor la solución de 3.5 km; esto se debe a que, a mayor distancia, se irán seleccionando alternativas más alejadas del centro de la ciudad y aunque en principio se incrementa el área de cobertura dentro de estas, los criterios medidos son muy bajos.

Aunque en los mapas parece que la solución de 5 km es ampliamente mejor que la solución de 3.5 kilómetros, al comparar uno a uno los criterios, no se observa gran diferencia.

Para la solución que se propone, en la mayoría de los criterios hay un mayor porcentaje que la solución con distancia de 5 km, con excepción de los corporativos, ya que, con la solución propuesta, se plantean alternativas en la zona sur la cual tiene un menor número de edificios corporativos.

Esta situación siempre ha marcado un problema de movilidad ya que los grandes corporativos y trabajos de oficina se encuentran en la zona centro y poniente de la ciudad, mientras que, la población se encuentra en el oriente de la ciudad, además de un número de trabajadores originarios del Estado de México.

Como se aprecia en la Figura 6.5, la solución propuesta cubre un gran porcentaje de servicios que están dentro de la ciudad; por ejemplo, el 90% de los robos reportados se llevan a cabo dentro del área, por lo que los biciestacionamientos representan un beneficio; en el caso de los CETRAMS, al menos el 90% de estos tendrá un estacionamiento a menos de 5 km de distancia, por lo que se cumplirá que el sistema tenga conexión con los diversos sistemas de transporte.

#### 6.4.4 Comparativo MULTIOLOG 2019 versus propuesta de solución

En el año 2019 se creó un modelo de localización de máxima cobertura para el problema de biciestacionamientos; este fue presentado en el congreso MULTIOLOG 2019 (Martínez & Segura, 2019); en ese modelo se tomaron las mismas alternativas y un solo objetivo, el cual consistió en la población aledaña; las restricciones consideraban que se crearan 8 estacionamientos, dentro de los cuales se deben incluir las alternativas de La Raza, Pantitlán y Periférico Oriente; por último, se agregó una restricción que indicaba que, a lo más, se tuviera una alternativa por alcaldía. El modelo al ser un problema binario entero se resolvió mediante ramificación y acotamiento; la solución que se obtuvo en ese momento fue Buenavista, Central de Abastos, Palacio de los Deportes, Metro Moctezuma, Taxqueña, en adición con La Raza, Pantitlán y Periférico Oriente.

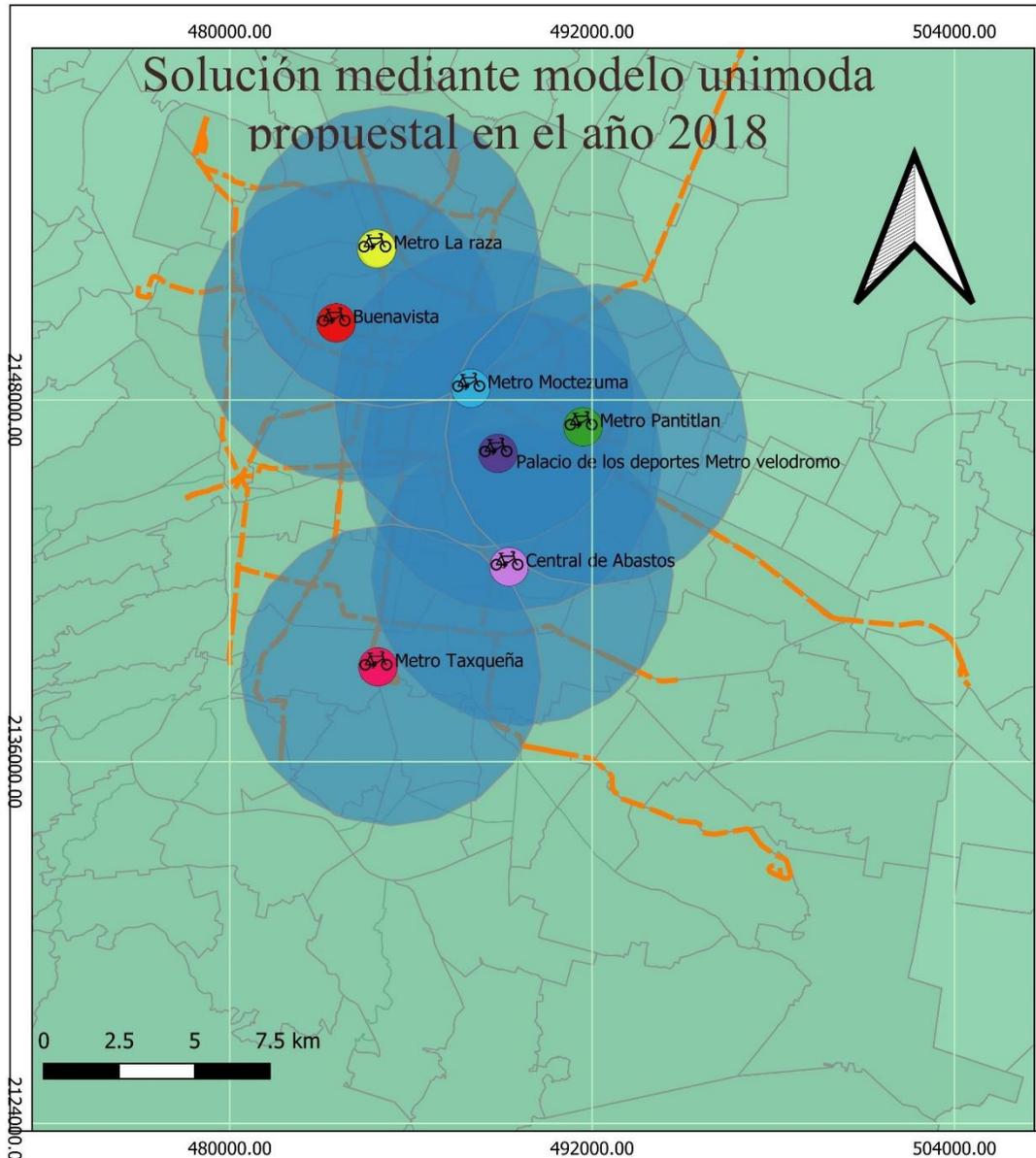


Figura 6.6 solución Propuesta en MULTIOLOG 2019. Elaboración propia en Qgis

Si se compara el modelo mostrado en la conferencia en el año 2019, a la solución propuesta en la presente investigación, se puede apreciar en la Figura 37, un aumento en los servicios que están dentro del área. Una diferencia importante son los criterios de corporativos, en donde la solución anterior varía de 31.31% a 51.52%; en los robos del 73.53% al 93.78% y en las CETRAMS de 72% a 90%; esto se debe a que, en el modelo propuesto, se consideran más criterios, de tal manera, el modelo puede verse enriquecido por los demás criterios ya que hay zonas con gran concentración de población, pero baja en servicios. Como ya se mencionó en análisis de zonas, la distancia

en el modelo presentado en 2019, también esta medida de forma implícita en las restricciones de alcaldías, pero no es una medida fija.

Asimismo, es importante distinguir el amplio trabajo realizado por el Gobierno de la Ciudad de México en los últimos 2 años, en los que ha construido estacionamientos en Tláhuac, metro Rosario y Buenavista; Ahora bien, pese a la diferencia en los conteos, se pueden apreciar coincidencias en las alternativas elegidas como son Central de Abastos y Taxqueña; también es posible apreciar que, la alternativa Moctezuma y Buenavista son preferibles sobre otras; de acuerdo con el orden PROMETHEE II, estas dos alternativas se omitieron en la solución propuesta ya que la distancia era muy cercana entre ellas y La Raza.

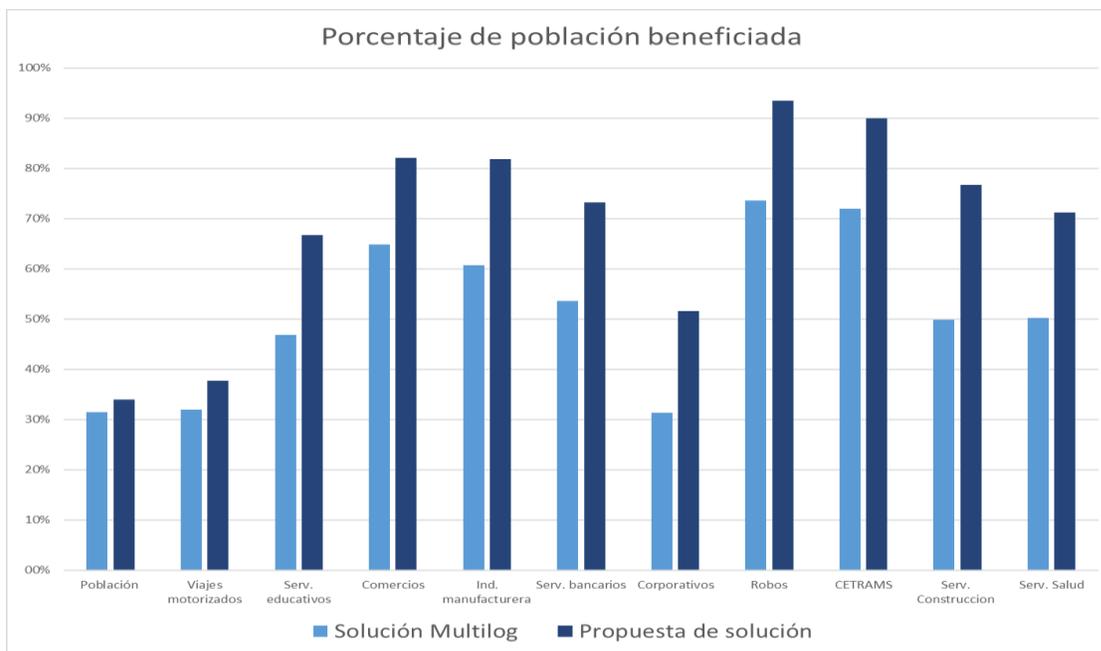


Figura 6.7.- Comparación de la solución presentada en el congreso MULTILOG y la solución actual. Elaboración propia

# 7. Conclusiones y futuras investigaciones

## 7.1. Conclusiones

En esta investigación se propone la localización de biciestacionamientos con base en un modelo multicriterio y se compara con un modelo de optimización; ambas propuestas se apoyan con una plataforma SIG.

Para el análisis multicriterio se consideraron factores económicos (número de unidades económicas y servicios), demográficos (población), de movilidad (viajes motorizados, distancia a ciclovías, número de CETRAMS), sociales (número de robos de bicicletas y propósitos de viaje) y se utilizó el software Visual PROMETHEE, el cual *ranquea* las alternativas de ubicaciones con base en criterios de orden de preferencia.

Una vez que el software PROMETHEE ranquea las alternativas, se considera la distancia entre las mismas (2 km, 3.5 km y 5 km) con el propósito de ampliar las zonas de cobertura en los diferentes criterios considerados, generando tres escenarios que no consideran los biciestacionamientos construidos; asimismo, se genera una cuarta solución, considerando los biciestacionamientos ya construidos hasta el 2020 y proponiendo 3 nuevos de ellos, con los factores mejor ranqueados y con distancia mínima a 3.5 km.

El primer escenario considera las alternativas mejor calificadas y una distancia mínima entre estas de 2 kilómetros; esta solución ubica las alternativas en las alcaldías Miguel Hidalgo y Cuauhtémoc, destacando las alternativas de Metro Pino Suarez y La Condesa; en esta zona se concentran un gran número unidades económicas, servicios y el mayor número de robos; en esta solución las alternativas tienen población, servicios en común y área de servicio que se intersecan.

El segundo escenario considera que las alternativas deben estar a una distancia mínima de 3.5 kilómetros; esta restricción genera un área mayor en comparación con el primero, por tal motivo se incrementa el número de población, unidades económicas y servicios. Además de las alcaldías Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo, se ubican alternativas en las alcaldías Iztacalco e Iztapalapa; esta solución presenta una buena interconexión al encontrarse las estaciones no tan alejadas unas de las otras.

El tercer escenario considera las alternativas con distancia mínima de 5 kilómetros; el área de cobertura es mayor, sin embargo, el conteo de los criterios incrementa en máximo 2 puntos porcentuales; esto se debe a que a mayor distancia se deben elegir alternativas que dentro PROMETHEE no son

las mejores calificadas, es decir, en el área donde esas alternativas dan servicio hay un menor número de población, servicios económicos y robos.

El cuarto escenario está basado principalmente en el segundo escenario, con la característica principal de que se adecua a los estacionamientos masivos y semimasivos que se han construido hasta el 2020 en la Ciudad de México; de esta manera, se logra seleccionar las alternativas mejor calificadas y que, a su vez, se complementan a las instalaciones actuales del sistema. Esta solución propone la construcción de los biciestacionamientos en La Condesa, Central de Abastos y Taxqueña, que se integrarán a La Raza, Metro el Rosario, Buenavista, Pantitlán, Periférico Oriente, Tláhuac y La Villa; este escenario tiene el mayor porcentaje de servicios, población y demás criterios dentro de su área de cobertura, además, cubre zonas dentro de las alcaldías de Iztacalco, Coyoacán y Miguel Hidalgo que el sistema actual no considera.

Este trabajo propone la localización de tres biciestacionamientos que complementan el servicio actual; la solución propuesta genera un área de cobertura mayor, en la cual se espera que el 33% de la población pueda tener acceso al servicio; asimismo, un gran número de lugares como centros comerciales, mercados, comercios, escuelas, talleres, fábricas y centros de salud se encontrarán más cerca del servicio de bici estacionamiento y además, el 90% de las CERTRAMS estarán dentro del área de servicio, por lo que se promoverán los viajes intermodales.

El modelo multicriterio proporcionó un enriquecimiento a la información obtenida y un panorama de como el sistema se integrará a los diferentes servicios e instalaciones de la zona; la búsqueda y el análisis de los factores que promueven y desincentivan el uso de la bicicleta ha mejorado la conceptualización del sistema, pues de acuerdo a estos, se comprende que la simple construcción de infraestructura no promueve el uso de la bicicleta; por tanto, la construcción de estos espacios, debe estar planeada de manera integral con los diferentes sistemas de transporte y diseñada con base en las necesidades del usuario como son la seguridad, comodidad, los costos y los motivos de viaje.

El proceso de análisis con soporte de un SIG ayuda a la interpretación visual de la solución; los SIG también simplifican varios procesos como son el cálculo de las distancias, el conteo y medición de los criterios, la eliminación de áreas intersecadas y la localización geoespacial de las alternativas (un aspecto importante que incluso Visual PROMETHEE tiene la capacidad de realizar). Por último, la representación de la solución mediante un mapa, permite al tomador de las decisiones una rápida interpretación y comprensión de esta.

Una aportación importante de esta investigación, es que la metodología propuesta puede aplicarse en escenarios futuros, que se ajustaran a los ya existentes con la finalidad de mejorar la demanda y el área de cobertura.

Otra contribución de la misma, consiste en la identificación de la zonas mejor y peor calificadas, ya que, a pesar de que no se tenía como objetivo marcar

estas áreas, el modelo multicriterio mostró que existen algunas ampliamente beneficiadas las cuales tienen diversos servicios a su alcance, en contraste, con otras que carecen de ellos; si bien la parte del sur de la ciudad puede considerarse como una zona agricultora y en algunos casos rural, es necesario revisar si estas áreas tienen acceso a servicios de gran importancia como son las escuelas, hospitales, servicios bancarios y transporte, identificando a este último como un foco rojo, pues de acuerdo al (INEGI, 2017), esta zona presenta un número significativo de viajes en bicicleta; de acuerdo a lo anterior, es posible que el uso de este medio de transporte se deba principalmente a la carencia de otros.

En cuanto a la zona mejor ranqueada, se debe poner atención en ella, pues al concentrar una mayor cantidad de servicios y áreas de trabajo, es posible que se generen problemas de movilidad dentro de la misma; asimismo, estas zonas tienden a presentar un mayor número de grandes construcciones como son edificios departamentales, corporativos y plazas comerciales, lo que genera la necesidad de más recursos tales como el agua.

## **7.2. Futuras investigaciones**

En esta investigación no se consideraron las dimensiones y tamaño de los biciestacionamientos; por esta razón, es necesario realizar un análisis en donde se pueda medir el impacto del tamaño de la instalación con respecto al área de cobertura y el uso de la bicicleta; para esto, sería necesario contar con información proveniente de los usuarios de los biciestacionamientos.

Un estudio a futuro consistirá en investigar cómo se puede integrar el BSS “Ecobici” al sistema de biciestacionamientos, además de la creación de una red de ciclovías que conecten el sistema de estacionamientos, con el propósito de integrar la infraestructura ciclista y, de esta manera, promover de forma eficiente el uso de la bicicleta.

Por último, la realización de una investigación estadística con el objetivo de identificar cuáles son las necesidades de los usuarios de bicicleta, además de sus percepciones en cuanto a políticas, infraestructura y demás factores que intervienen en el uso de la bicicleta.



# 8. Apéndice

## 8.1. Infraestructura vial en EE. UU.

El país de EE. UU. tiene un gran número de ciudades que cuentan con infraestructura ciclista a continuación se muestra la información que se tiene de manera más profunda que en el capítulo 3. La información de infraestructura vial de otras ciudades se muestra en la Figura 8.1.

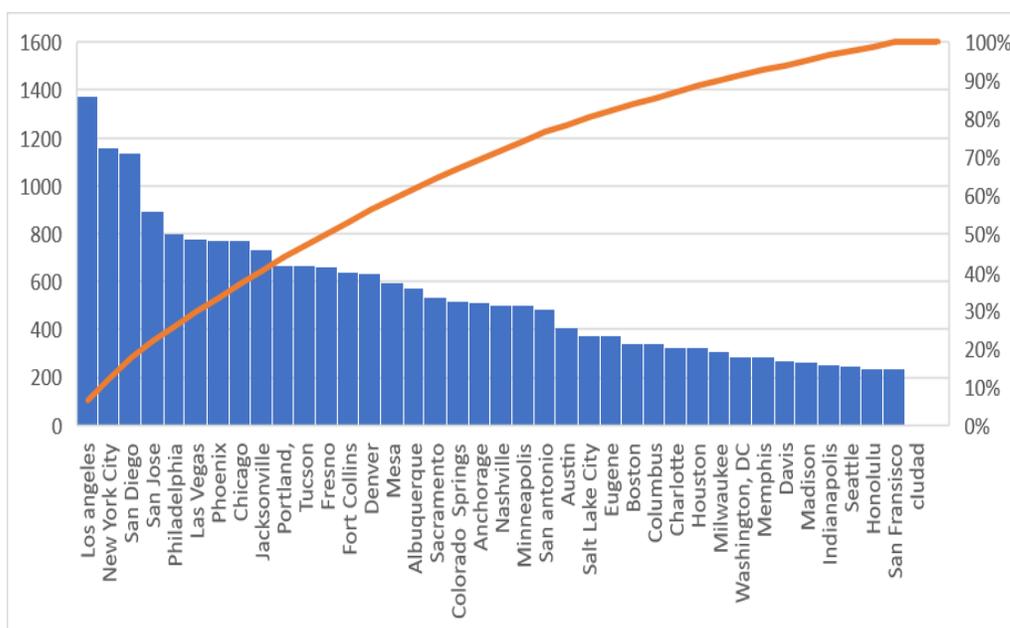


Figura 8.1 Kilómetros de Ciclovías de las principales ciudades de EE. UU. Elaboración propia con datos de (BID,2015)

Como se muestra en la Figura 8.1, el 80% de la infraestructura está en aproximadamente el 50% de las ciudades listadas, esto indica que; las diferencias entre las ciudades son menos significativas. También es importante destacar las 40 ciudades listadas tiene al menos 200 km de ciclovías.

Se tienen planes para incrementarla y en consecuencia aumentar la seguridad de los ciclistas, también, es parte de su plan para disminuir las emisiones de carbono de acuerdo con (Alliance for Biking & Walking, 2014) en Estados Unidos se tienen planes hasta el año del 2044 en donde se construirán alrededor de 36,332 km de ciclovías; algunas de las ciudades que planean

construir son: Los ángeles con 2,700 km, San Antonio con 2,800 km y la ciudad de Dallas con 2,085 km.

## 8.2. Infraestructura vial en América Latina

La infraestructura vial en las ciudades de América latina es mucho menor comparado con EE. UU. sin embargo, en los últimos años se ha realizado mayores inversiones en este rubro, la Figura 8.2 muestra la información de las ciudades de America Latina que cuentan con infraestructura vial.

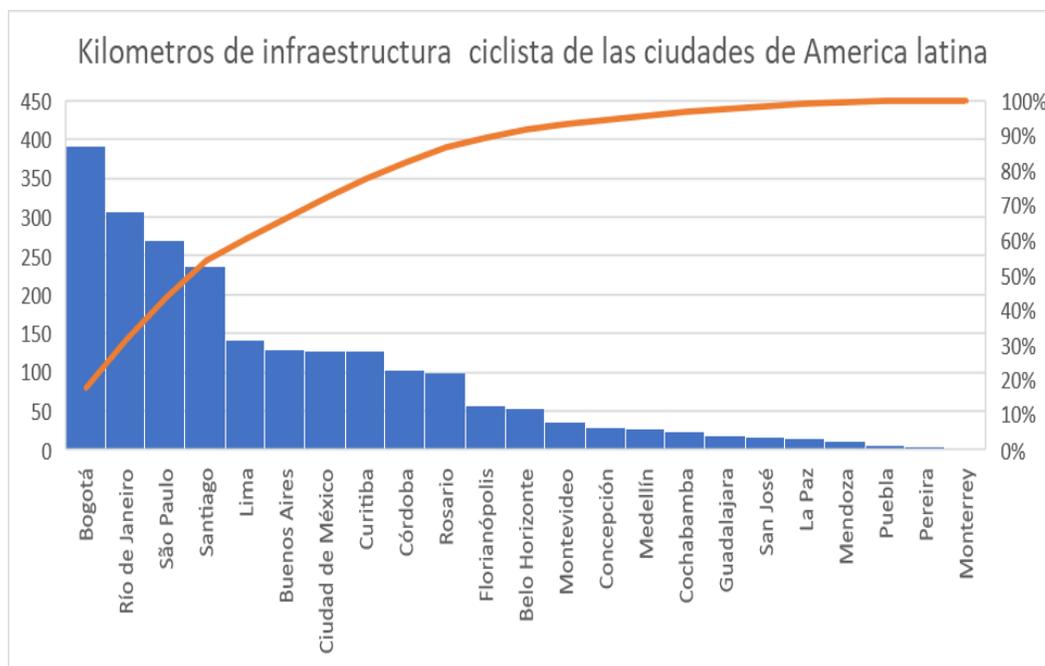


Figura 8.2 Kilómetros de infraestructura en ciudades de América Latina Elaboración propia con información de (Rios,2015)

Si se analiza la curva de porcentaje acumulado se observa que aproximadamente el 30% representan el 80% del total de kilómetros de Ciclovía, en este caso, la diferencia entre las ciudades con mayor infraestructura y las de menor infraestructura es mucho más marcada y de mayor contraste que la de EE. UU. por ejemplo: el caso de Colombia que tienen la ciudad de Bogotá con la mayor extensión de Ciclovía de América latina y Medellín que apenas cuenta con 26 km, o el caso de México que cuenta con la Ciudad de México con 128 km y la ciudad de Monterrey con 0.4 kilómetros, esto muestra que a pesar que existen ciudades en América latina

que han impulsado el uso de la bicicleta mediante políticas e infraestructura existen otras ciudades que aún no han iniciado con este proceso.

Dentro de los planes de Colombia se tiene planeado un corredor verde de 80 km con el proyecto llamado “la Picacha” y también se tiene planeado una ciclo-ruta en avenida Guayabal entre otros, todos estos son parte del “concurso de buenas prácticas en ciclo-infraestructura” (Sebastian, 2019)

### **8.3. BSS de EE.UU.**

Los sistemas de préstamo de bicicleta (BSS) han tenido gran éxito en los últimos años en el caso de estados unidos prácticamente 50 de sus ciudades más importante tiene un BSS, a continuación, se muestra la información que se conoce.

Tabla 8-1. Sistemas de préstamo de bicicleta (BSS) de EE. UU elaboración propia con datos de (Alliance for Biking & Walking, 2014)

<b>Ciudades</b>	<b>Nombre del BSS</b>	<b># estaciones</b>	<b># bicicletas</b>	<b># bicicletas por cada 100 mil habitantes</b>
Austin	Austin B-cycle	45	339	39
Boston	Hubway	140	1309	205
Charlotte	Charlotte B-Cycle	24	200	26
Chicago	Divvy	300	2,700	100
Cleveland	Zagster	8	40	10
Columbus	CoGo bike Share	30	300	37
Denver	Denver B-Cycle	84	709	112
Fort Worth	Fort Worth Bike Sharing	34	300	39
Houston	Houston B-cycle	29	225	10
Indianapolis	Pacer's Bike Share	25	250	30
Kansas City	MO Kansas City B-cycle	21	122	26
Miami	Citi Bike Miami	50	500	121
Milwaukee	BublR bikes	10	500	84
Minneapolis	Nice Ride	170	1,500	381
Nashville	Nashville B-Cycle	25	190	30
New York City	Citi Bike	330	6,000	72
Oklahoma City	Spokies	7	95	16
Omaha	Heartland B-cycle	26	57	13
San Antonio	San Antonio B-cycle	55	450	33
San Diego	Deco BikeShare	65	399	30
San Francisco	Bay Area Bike Share	35	350	42
San Jose	Bay Area Bike Share	16	150	15
Seattle	Pronto	50	500	79
Tulsa	Tulsa Townies	3	60	15
Washington, DC	Capital BikeShare	347	2,930	463
Anchorage	Univ of AK, Anchorage Green & Gold Bikeshare	1	25	8
Boulder	Boulder B. cycle	38	250	245

Chattanooga	Bike Chattanooga	33	300	174
Fort Collins	Fort Collins Bike Library	4	175	117
Madison	Madison B-cycle	39	315	131
Salt Lake City	GREENbike	20	200	105

Como se observa en la tabla existen un gran número de ciudades que cuentan con un BSS, en su mayoría estos sistemas son parte de empresas privadas como b-cycle o citi bike, hasta el año 2016 se tenían 31 ciudades con UN BSS que en total suman 21,440 bicicletas repartidas en 2,064 estaciones destacando la ciudad de Nueva York con el BSS “Citi Bike” el cual es uno de los más grandes, cuenta con 330 estaciones y un total de 6,000 bicicletas en términos de proporciones tiene 72 bicicletas por cada cien mil habitantes, la ciudad de Chicago tienen el BSS “Divvy” con 300 estaciones y 2,700 bicicletas(1 bicicleta por cada 100 habitantes) y la ciudad de Washington DC tiene el BSS de nombre “capital Bike Share” con 463 bicicletas por cada cien mil habitantes en 347 estaciones.

El reporte más reciente de *League of American Bicyclists* (2019) actualizo algunos datos de los BSS que existen en Estados Unidos, dentro de la información relevante esta la inclusión de Atlanta con 500 bicicletas, Albuquerque con 75, las vegas con 180, los ángeles con 1000 bicicletas repartidos en 65 estaciones y sacramento con 900 bicicletas. También se actualizo en algunos casos la información que se tenía del 2014 al 2019 en *Figura 8.3* se muestra dicha actualización

Tabla 8-2. Número de bicicletas de las ciudades de EE. UU. elaboración propia con datos de (League of American Bicyclists, 2019)

<b>Ciudades</b>	<b>nombre del BSS</b>	<b># estaciones</b>	<b># bicicletas</b>
Albuquerque	Pace Bike Share	15	75
Atlanta	Relay Bike Share	72	500
Las Vegas	RTC Bike Share	21	180
Long Beach	Long Beach Bike Share	60	400
Los Angeles	Metro Bike Share	65	1000
Louisville	LouVelo	28	305
Mesa	Grid Bike Share	113	854
Oakland	Ford GoBike	73	800
Philadelphia	Indego Bike Share	122	1200
Phoenix	Grid Bike Share		500
Portland, OR	Biketown	123	1000
Raleigh	Planned		300
Sacramento	Tower Bridge Bike Share	400	900
Tucson	Tugo Bike Share	36	330

en la que sobresale el caso de Miami que paso de tener 500 bicicletas a 1750 y el de Boston que paso de tener 1309 a 1800 bicicl

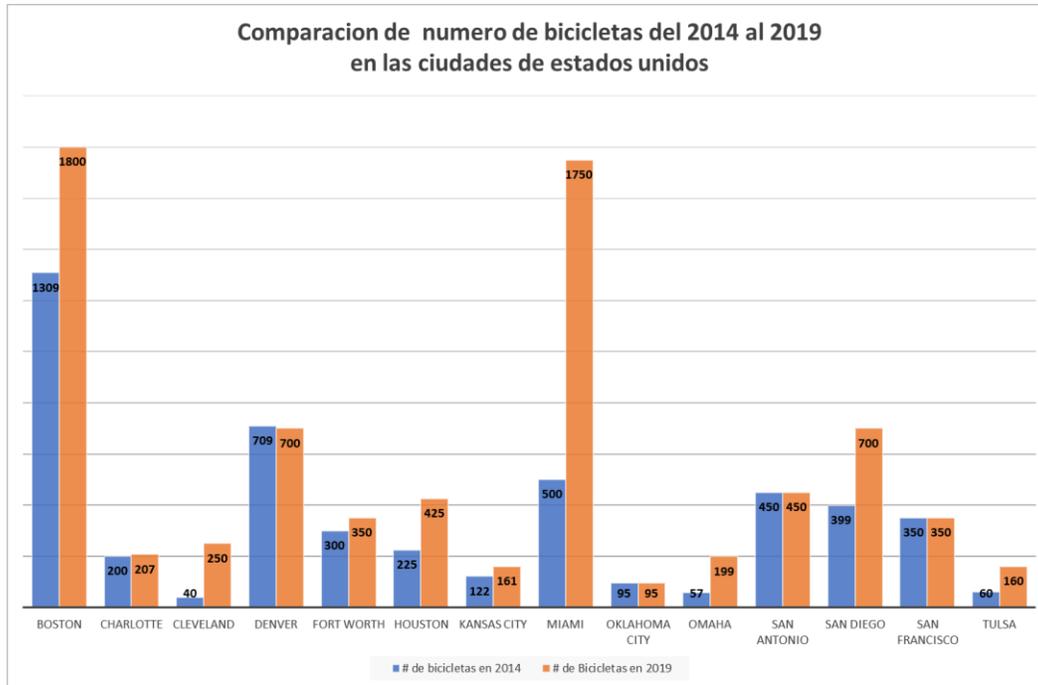


Figura 8.3. Comparación del número de bicicletas del 2014 con el 2019 en las ciudades de EEUU. elaboración propia con datos (Alliance for Biking & Walking, 2014; League of American Bicyclists, 2019)

El caso de la ciudad de Miami sobresale en la gráfica de la Figura II.12 ya que paso de 500 a 1750 bicicletas, otro caso que sobresale es el de la ciudad de Boston. el incremento de infraestructura ciclista a lo largo de los años es un indicio que la bicicleta va tomando posicionamiento como un transporte. En el caso de algunos BSS que mantienen el mismo número de bicicletas esto se debe a: los costos de mantenimiento, el poco éxito del sistema, el tamaño de la población usuaria o la poca cultura ciclista.

## 8.4. BSS de America Latina

En América Latina también se ha invertido en crear sistemas de préstamo de bicicletas El caso de Argentina el proyecto de nombre "EcoBici" el cual es un sistema público y gratuito de uso de bicicletas. Actualmente cuenta con cuatrocientas estaciones y 4,000 bicicletas el sistema tiene registrados a seiscientos mil usuarios y seis millones de viajes realizados junto con el BSS se ha integrado 250 km de ciclovías además de modernizar el sistema de

anclaje y las bicicletas para evitar vandalismo(Gobierno de la Ciudad De buenos Aires, 2019.)

Otro sistema de bicicletas públicas es el de la ciudad de Medellín llamado EnCicla el cual surge en el 2011 promovido por el área metropolitana, actualmente cuenta con 90 estaciones y 1,680 bicicletas además el proyecto viene acompañado de un plan maestro hasta el 2030 en el cual tiene como objetivo general *“desarrollar, fomentar y emplear la bicicleta como forma de transporte, mediante el fortalecimiento político, técnico e institucional, la educación y la promoción de su uso de manera que atienda adecuadamente la demanda actual y futura”* (Junta Metropolitana del Valle de, 2015)

En Brasil se tienen también un BSS, en la ciudad e Rio de Janeiro esta Bike Rio un sistema que busca incentivar el suso cotidiano el proyecto fue lanzado en el 2018 con apoyo del banco Itaú, el BSS comenzó con 60 estaciones y 60 bicicletas, actualmente tiene 2600 bicicletas en 260 estaciones. El BSS tiene tres tarifas; la tarifa de un día con costo de 8.80 reales que equivalen a 37 pesos mexicanos, la tarifa mensual de 20 reales y la tarifa anual de 160 reales el equivalente a 673 pesos. si se considera que el precio del transporte en Rio oscila entre los 3 reales y los 6 reales se podría decir que el precio por la tarifa de un día es elevado, pero es más accesible la tarifa mensual.(Bike Rio Itaú, 2018)

## 8.5. Tablas adicionales

Tabla 8-3 Distritos de la Ciudad de México y número de viajes en bicicleta

DISTRITO	Número de viajes en Bicicleta	DISTRITO	Número de viajes en Bicicleta
Noria	159	La Raza	40
San Felipe de Jesús	158	Instituto Politécnico	40
Tláhuac	150	Campestre Churubusco	40
Mixquic	132	Pedregal de Santo Domingo	37
Condesa	131	Nativitas	37
Santa Catarina	123	Culhuacán CTM	36
Desarrollo Urbano Quetzalcoatl	117	Viveros	36
Tulyehualco	90	Ciudad Universitaria	35
Centro Histórico	83	Portales	33
Tezozomoc	81	Canal Nacional	33

Santa Cruz Meyehualco	79	Juan Escutia	31
Palacio de los Deportes	78	La Villa	29
Chapultepec-Polanco	76	Parque Cerro de la Estrella	29
Buenavista-Reforma	75	San Miguel Teotongo	28
Central de Abastos	66	Vertiz Narvarte	27
Bondojito	64	El Rosario	27
Morelos	63	Reforma Iztaccihuatl	26
Tepepan	63	Lomas Estrella	24
Reclusorio Oriente	63	Moctezuma	23
El Molino Tezonco	62	UPIICSA	23
Balbuena	59	Nueva Industrial Vallejo	22
San Andrés Tetepilco	57	Coapa	22
Industrial Vallejo	55	Ejército Constitucionalista	22
Xotepingo	55	Cuauhtepic	21
Tlatelolco	53	Padierna	21
Escuadrón 201	53	Estadio Azteca	20
Nueva Atzacualco	51	San Juan de Aragón	19

Tabla 8-4 Continuación Distritos de la Ciudad de México y número de viajes en bicicleta

DISTRITO	Número de viajes en Bicicleta	DISTRITO	Número de viajes en Bicicleta
Deportivo los Galeana	51	Las Lomas	19
Pantitlán	51	Cuajimalpa	19
Del Valle	50	Villa Olímpica	18
UAM Iztapalapa	50	Zaragoza	17
Buenavista Iztapalapa	45	Observatorio	15
Napoles	42	Las Águilas	14
Panteones	41	La Magdalena Contreras	14
Obrera	40	Molinos	13
Olivar de los Padres-San Jerónimo	12	Santa María Xalpa	13
Ticomán	11	Reclusorio Norte	5
Tepeyac	11	Santa Fe	4

Santa Martha Acatitla	9	San Bartolo-San Mateo	4
Santa Lucia	7	Cerro del Judio	4
Milpa Alta	7	San Pedro Martir	4
San Lorenzo Acopilco	6	Aeropuerto	1

Tabla 8-5 Medición de criterios

ID	Nombre	población	Viajes Motorizados	# de alternativas con las que se intercepta
1	La Villa	1060420	17248	2
2	La noria	526392	19152	2
3	Mixquic	78440	21000	1
4	La Condesa	1053300	36512	4
5	Metro Olivos	917999	12040	6
6	Santa Catarina Metro Nopalera	820242	23016	6
7	Centro Histórico Metro Pino Suarez	1282240	14896	8
8	Tulyehualco	266024	15400	2
9	Metro El Rosario	382581	21504	1
10	Chapultepec	1013970	20216	4
11	Buenavista	1155100	19712	6
12	Central de Abastos	1152070	52304	4
13	Palacio de los deportes Metro velódromo	1171870	26152	6
14	Metro Bondoquito	1176940	22456	5
15	Molino Tezonco	923634	34776	4
16	Tepepan	712594	24696	2
17	Metro Aculco	1127970	21560	4
18	Tláhuac	440203	12040	3
19	Parque Santa cruz Meyehualco	1241870	15456	5
20	San Felipe de Jesús	383066	28952	1
21	Metro Moctezuma	1214320	23800	5
22	Metro periférico Oriente	1144850	4278	6
23	Metro Taxqueña	1064860	13048	3
24	Metro Ciudad Universitaria	665415	38696	2
25	Metro La raza	1060420	43512	4
26	Metro Constitución	1263800	18004	5
27	Metro Pantitlán	832764	26544	3
28	Metro Barranca	791358	28056	1

ID	# servicios educativos	# comercios	# talleres y fabricas manufactureras	# servicios bancarios y financieros	# Corporativos	Robos
1	1002	2119	868	105	1	49
2	504	787	208	116	0	17
3	60	28	20	5	0	0
4	1632	7698	1637	1030	43	544
5	534	553	560	35	0	16
6	479	448	479	35	0	12
7	1532	6545	1777	637	20	446
8	210	137	79	22	0	1
9	325	911	552	55	3	14
10	1550	6916	1616	995	49	494
11	1390	6936	1726	674	26	425
12	1047	2846	1296	230	1	43
13	1096	5376	1581	314	1	80
14	1138	4119	946	231	3	153
15	600	735	501	75	0	29
16	752	1103	298	173	3	24
17	1086	3002	1363	233	1	65
18	296	213	173	27	0	3
19	822	993	839	65	0	17
20	311	238	114	5	0	18
21	1170	4909	1501	331	4	201
22	753	804	709	74	0	26
23	1169	2244	762	323	4	143
24	1026	1933	389	430	12	120
25	1192	5084	1354	286	9	201
26	868	2077	944	122	0	22
27	792	1850	760	193	0	19
28	850	2405	531	524	37	118

ID	# CETRAMS	Distancia a ciclovias	# empresas de construccion	# de servicios de salud
1	7	26.0464	80	354
2	4	179.9456	30	238
3	0	5784.2215	2	26
4	9	165.3282	673	1075
5	5	2788.4138	15	198
6	4	2282.5102	14	168
7	13	23.5187	370	799
8	1	2057.9895	5	68
9	2	78.0942	33	99
10	8	113.6713	647	1031
11	10	15.7146	358	780
12	9	2279.0602	117	352
13	15	312.8992	124	413
14	10	749.6735	88	461
15	4	716.2163	20	240
16	4	244.0659	51	347
17	8	2659.9522	139	381
18	1	24.0487	5	92
19	4	1759.6536	23	242
20	0	3650.8929	7	78
21	12	715.8589	119	454
22	6	1979.4421	29	266
23	7	975.9700	183	496
24	7	107.5912	175	499
25	9	324.9160	141	493
26	5	1145.9436	31	285
27	11	277.5271	55	263
28	4	2219.4926	385	500



## 9. Referencias

- Alliance for biking and walking. (2016). *The Alliance for Biking & Walking BICYCLING & WALKING in the United States*.  
[www.BikeWalkAlliance.org/Benchmarking](http://www.BikeWalkAlliance.org/Benchmarking)
- Aronoff, S. (1989). *Gographical Information System: A management perspective*. WDL Publications.
- Bauman, A., Crane, M., Drayton, B. A., & Titze, S. (2017). The unrealised potential of bike share schemes to influence population physical activity levels – A narrative review. *Preventive Medicine, 103*, S7–S14.  
<https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2017.02.015>
- BID. (2017). Aprender de los Países Vecinos. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 50.  
<https://publications.iadb.org/en/publication/14070/aprender-de-los-paises-vecinos-experiencias-de-ciudades-de-america-latina-en-la>
- Bike Rio Itaú. (2018). *Tembici*. <https://bikeitau.com.br/bikerio/>
- Bosque Sendra, J. (1997). *Sistemas de información Geográfica* (2.º edición). Rial.
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A Preference Ranking Organisation Method. *Management Science, 647–656*.
- Buehler, R. (2012). Determinants of bicycle commuting in the Washington, DC region: The role of bicycle parking, cyclist showers, and free car parking at work. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 17*(7), 525–531. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.06.003>
- Buehler, R., & Pucher, J. (2011). *Analysis of Bicycling Trends and Policies in Large North American Cities: Lessons for New York* (Vol. 61, Issue 2).
- Caulfield, B., Brick, E., & McCarthy, O. T. (2012). Determining bicycle infrastructure preferences - A case study of Dublin. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 17*(5), 413–417.  
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.04.001>
- 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>
- City Of Toronto. (2005). *Guidelines for the Design and Management of Bicycle Parking Facilities*.
- CROW. (2007). *Design manual for bicycle traffic*.
- Daskin, M. S. (2011). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and*

*Applications*. John Wiley & Sons.

- Faghih-Imani, A., Eluru, N., El-Geneidy, A. M., Rabbat, M., & Haq, U. (2014). How land-use and urban form impact bicycle flows: Evidence from the bicycle-sharing system (BIXI) in Montreal. *Journal of Transport Geography*, 41(August 2012), 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.01.013>
- FAL. (2013). Los esquemas de ciclovías y la intermodalidad bicicletas y transportes públicos. *Boletín FAL*, 317, 1–11. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36103/1/FAL-317-WEB\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36103/1/FAL-317-WEB_es.pdf)
- Fernández-Heredia, Á., Monzón, A., & Jara-Díaz, S. (2014). Understanding cyclists' perceptions, keys for a successful bicycle promotion. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 63, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.02.013>
- Flamenco, A. (2002). *Sistemas de información geográfica*. Ecofronteras; El Colegio de la Frontera Sur.
- Frade, I., & Ribeiro, A. (2015). Bike-sharing stations: A maximal covering location approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 82(December 2014), 216–227. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.09.014>
- García-Palomares, J. C., Gutiérrez, J., & Latorre, M. (2012). Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach. *Applied Geography*, 35(1–2), 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.07.002>
- Gobierno de la Ciudad De buenos Aires. (n.d.). *Buenos Aires Ciudad*. Retrieved December 2, 2019, from <https://www.buenosaires.gob.ar/>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2016). *Portal de datos abiertos de la Ciudad de México*.
- Gómez Delgado, M., & Barredo Cano, J. I. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación de territorio*. Ra-Ma.
- Hoffmann, L. T., & Gómez, A. T. (2006). Desenvolvimento de um protótipo de um sistema de informação geográfica para abordagem do problema de localização de antenas. *Pesquisa Operacional*, 26(3). <https://doi.org/10.1590/s0101-74382006000300001>
- INEGI. (2016). *Censo de Poblacion Y Vivienda 2015*.
- INEGI. (2017). *Encuesta Origen destino del Valle De México EOD2017*. <https://www.inegi.org.mx/programas/eod/2017/>
- INEGI. (2018). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas*. <https://en.www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/>
- Junta Metropolitana del Valle de. (2015). *Plan maestro Metropolitano de la*

*Bicicleta del Valle de Aburrá.*

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.09.004>
- Mapa bicis robadas. (2014). Google Maps.
- Martínez Bello, S., & Segura Perez, E. (2019). Location of massive bike-parking in Mexico City with the use of GIS and integer programming. *Proceedings of the 2019 MULTILOG Conference*, 60.
- Martínez, M. F. (2020). *¿Qué es la intermodalidad urbana?* La Bicikleta. <https://labicikleta.com/la-intermodalidad-urbana/>
- Municipio de Amsterdam. (2019). *consejos para estacionar la bicicleta*. <https://www.amsterdam.nl/parkeren-verkeer/fiets/fietsenstallingen/>
- No dejes Tu bici aquí! (2019). Google Maps.
- Park, C., & Young Sohn, S. (2017). An Optimization Approach for the Placement of Bicycle-sharing stations to Reduce Short Car Trips: An Application to the City of Seoul. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 105(August), 154–166. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.08.019>
- Parkes, S. D., Marsden, G., Shaheen, S. A., & Cohen, A. P. (2013). Understanding the diffusion of public bikesharing systems: Evidence from Europe and North America. *Journal of Transport Geography*, 31, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.06.003>
- Patlán Velázquez, M., & Cardona Medina, N. S. (2019). *Ranking ciclociudades 2018*.
- Pérez Fernández, D. B., & Wilches González, M. Á. (2018). *Diseño de la red de estacionamientos para bicicletas en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia sede Tunja*. UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.
- Pucher, J., & Buehler, R. (2011). Analysis of Bicycling Trends and Policies in Large North American Cities: Lessons for New York. In *Journal of Electron Microscopy* (Vol. 60).
- QGIS Development Team. (2016). *QGIS User Guide*. <http://www.qgis.org>
- Ríos, R., Taddia, A., Pardo, C., & Natalia, L. (2015). Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: guía para impulsar el uso de la bicicleta. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 91(5), 1–38. <https://publications.iadb.org/es/ciclo-inclusion-en-america-latina-y-el-caribe-guia-para-impulsar-el-uso-de-la-bicicleta%0Ahttp://publications.iadb.org/handle/11319/6808>

- Samani, Z. N., Karimi, M., & Alesheikh, A. A. (2018). A novel approach to site selection: Collaborative multi-Criteria decision making through geo-Social network (Case study: Public parking). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/ijgi7030082>
- Schilling, D. A., Jayaraman, V., & Barkhi, R. (1993). A review of covering problems in facility location. *LOCATION SCIENCE*, 1(1), 52–55.
- Sebastian. (2019). *Conoce Los 5 Proyectos Que Están Transformando La Infraestructura Ciclista En Colombia*. Despacio.Org. <https://www.despacio.org/2019/08/14/conoce-los-5-proyectos-que-transformaran-la-infraestructura-ciclista-en-colombia/>
- SEMOVI. (2019). *Movilidad en Bicicleta 2019*.
- Shaheen, S. A., Guzman, S., & Zhang, H. (2010). Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia: Past, Present, and Future. *Transportation Research Record*, 2143(1), 159–167. <https://doi.org/10.3141/2143-20>
- Sun, D., Zhou, J., Wan, F., Sun, Z., & Gao, X. (2020). Optimization of bike-sharing parking spot layout based on usage requirements. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 11(1), 1–16. <https://doi.org/10.1142/S1793962320500075>
- Sun, F., Chen, P., & Jiao, J. (2018). Promoting public bike-sharing: A lesson from the unsuccessful Pronto system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 533–547. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.021>
- TRANSMILENIO S.A. (2020). *Transmilenio*. <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/146197/cicloparqueaderos/>
- Useche, S. A., Montoro, L., Sanmartin, J., & Alonso, F. (2019). Healthy but risky: A descriptive study on cyclists' encouraging and discouraging factors for using bicycles, habits and safety outcomes. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 62, 587–598. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.02.014>
- Weisstein, E. W. (1999). "First Fermat Point." *From MathWorld A Wolfram Web Resource*. <https://mathworld.wolfram.com/FirstFermatPoint.html>
- Winters, M., Davidson, G., Kao, D., & Teschke, K. (2011). Motivators and deterrents of bicycling: Comparing influences on decisions to ride. *Transportation*, 38(1). <https://doi.org/10.1007/s11116-010-9284-y>
- Zuluaga, J. D., Escobar, D. A., & Younes, C. (2018). A GIS approach based on user location to evaluate a bike-sharing program. *DYNA (Colombia)*, 85(204), 257–263. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67670>