

**Propuesta de un modelo para la localización de estaciones de bicicletas
compartidas en Guadalajara de Buga**

Diego Alejandro Durango Ibarra

Oscar Daniel Villarruel Posada

Universidad Del Valle,

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Industrial

Guadalajara de Buga

2025

**Propuesta de un modelo para la localización de estaciones de bicicletas compartidas
en Guadalajara de Buga**

Diego Alejandro Durango Ibarra

Oscar Daniel Villarruel Posada

Trabajo de grado presentado para optar por el título de ingeniero industrial

Director: M. Eng. Andrés Felipe Salazar Ramos

Universidad Del Valle,
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Industrial
Guadalajara de Buga

2025

Resumen

Este estudio propone un modelo para la localización de estaciones de bicicletas compartidas para la ciudad de Guadalajara de Buga. La propuesta responde a problemáticas urbanas actuales como la dependencia del transporte motorizado, el incremento del precio del combustible y la carencia de alternativas ecológicas de transporte.

Se realizó una caracterización de la demanda mediante un muestreo aplicado a través de encuestas dirigidas a la población de Guadalajara de Buga. A partir de los resultados se identificó que el 73% de los encuestados manifestó estar dispuesto a utilizar el sistema, lo que representa una demanda potencial de más de 72.000 usuarios. Posteriormente, se investigaron modelos de localización utilizados en estudios similares, seleccionando el modelo de cobertura Maximum Covering Location Problem (MCLP) por su capacidad de maximizar la cobertura geográfica con un número limitado de estaciones. Este modelo fue adaptado a las condiciones urbanas de Buga, integrando criterios técnicos como accesibilidad, sinergia con el entorno, espacio disponible y proximidad a puntos de interés.

A través de un proceso de evaluación multicriterio, se identificaron 33 ubicaciones candidatas para la instalación de estaciones, de las cuales el modelo seleccionó 15, logrando una cobertura del 84,4% sobre la demanda estimada. El modelo fue sometido a análisis de sensibilidad con escenarios alternativos, variando parámetros como la distancia de cobertura y la demanda potencial. Los resultados evidencian una alta estabilidad y robustez del modelo ante dichos cambios.

Palabras claves: Modelo, localización, asignación, sistema de bicicletas compartidas, movilidad.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	7
2.	Planteamiento del problema.....	8
3.	Justificación.....	10
4.	Objetivos	11
4.1	Objetivo General	11
4.2	Objetivos Específicos.....	11
5.	Marco teórico	11
5.1	Movilidad sostenible y urbana	11
5.2	Sistemas de bicicletas públicas	12
5.3	Herramientas para la localización de estaciones	12
5.4	Antecedentes nacionales e internacionales	12
5.5	Conexión con el problema de investigación	13
5.6	Análisis comparativo de antecedentes	13
5.6.1	Similitudes	13
5.6.2	Diferencias	13
6.	Caracterización de la información.	14
6.1	Prueba piloto	15
6.1.1	Resultados prueba piloto	16
6.2	Diseño de encuesta final.....	16
6.2.1	Metodología de distribución para las encuestas presenciales	17
6.2.2	Resultados encuestas	17
7.	Modelo matemático.....	21
7.1	Definición del modelo.....	21
7.2	Modelo de localización	23
7.2.1	Modelo base	23
7.2.2	Modelo final.....	25
7.2.3	Definición de Parámetros y variables.	27
7.3	Resultados del modelo de localización.	34
8.	Escenarios	35
8.1	Escenario 1	36
8.2	Escenario 2	36
8.3	Escenario 3	37

8.4	Escenario 4	38
8.5	Discusión de resultados y escenarios	39
9.	Conclusiones	41
10.	Anexos	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Incremento del precio de la gasolina	8
Tabla 2: Revisión literaria	22
Tabla 3: Ejemplo de valoración	28
Tabla 4: Valoración de puntos candidatos	29
Tabla 5: Comparación de escenarios.....	40

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1: En caso de existir el sistema ¿lo usaría?	18
Gráfico 2: Métodos de transporte más utilizado	19
Gráfico 3: Frecuencia de desplazamiento	19
Gráfico 4: Motivos por los cuales se desplazan las personas	20
Gráfico 5: factores más importantes al elegir método de transporte.....	21

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Mapa de las comunas de Guadalajara de Buga.....	14
Ilustración 2: Criterios de valoración de puntos candidatos	28
Ilustración 3: Mapeo de barrios y urbanizaciones en Guadalajara de Buga.	30
Ilustración 4: División de barrios y codificación	32
Ilustración 5: Ubicación de los centroides de los barrios y estaciones candidatas	33
Ilustración 6: Resultados de asignación del modelo	35
Ilustración 7: Escenario 1	36
Ilustración 8: Escenario 2.....	37
Ilustración 9: Escenario 3.....	38
Ilustración 10: Escenario 4.....	39

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Tamaño de muestra para poblaciones finitas	15
Ecuación 2: Modelo inicial	24
Ecuación 3: Modelo propuesto.....	26
Ecuación 4: Capacidad por Estación.....	31
Ecuación 5: Formula de Haversine	34

1. Introducción

La ciudad de Guadalajara de Buga enfrenta serios desafíos en cuanto a infraestructura de transporte público alternativo y amigable con el medio ambiente. La dependencia excesiva de vehículos motorizados, intensificada por el creciente costo del combustible, ha limitado las opciones de movilidad para sus ciudadanos y ha contribuido a problemas ambientales y económicos, entendiéndose esto, la implementación de un sistema de bicicletas públicas podría ofrecer una solución viable y beneficiosa, ya que la movilidad motorizada genera un impacto ambiental significativo y es necesario explorar alternativas sostenibles que contribuyan a mitigar estos efectos (Martínez-Ángel, 2018).

Los precios de la gasolina han experimentado un aumento significativo en los últimos años, este incremento no solo afecta a los conductores particulares, sino que también encarece el transporte público tradicional, incrementando los costos para los usuarios (Arenales, 2023). Por otro lado, un sistema de bicicletas compartidas ofrece una alternativa económica, reduce las emisiones de CO₂, y fomenta un estilo de vida más saludable (Sanmiguel-Rodríguez, 2023a).

La ciudad de Guadalajara de Buga, con su rica herencia histórica y arquitectura colonial bien conservada (Red turística de pueblos patrimonio, 2024), enfrenta limitaciones para establecer un sistema de transporte masivo debido a sus características urbanas. Sin embargo, un sistema de bicicletas compartidas podría integrarse más fácilmente en la infraestructura existente, requiriendo menos espacio en comparación con el transporte público colectivo. Este modelo de movilidad ha sido instaurado en ciudades colombianas como Barranquilla, Palmira, Bogotá, entre otras; demostrando que existen precedentes del sistema en el país, lo que podría permitir replicarse en Buga, siempre y cuando se diseñe adecuadamente, especialmente la etapa de localización, que es parte fundamental del correcto diseño de la red de movilidad.

Para la correcta instauración de un sistema de bicicletas compartidas en Guadalajara de Buga, es esencial una planificación estratégica de la ubicación de las estaciones debido a que una correcta localización es la que permitirá acercarse a el éxito del proyecto (Lin & Yang Ta-Hui, 2011). Esto implica un análisis detallado de factores sociodemográficos, patrones de movilidad y criterios de accesibilidad y seguridad. Una correcta localización de las estaciones no solo asegurará la mayor cobertura y uso del sistema, sino que también optimizará los recursos y maximizará los beneficios sociales y ambientales para la ciudad (Mix et al., 2022).

Por consiguiente, en el presente trabajo se plantea una propuesta de localización óptima de estaciones de bicicletas públicas para Guadalajara de Buga, partiendo de la formulación de un modelo matemático. Para ello, se lleva a cabo una caracterización inicial de la demanda potencial, información que debe servir como fuente para el desarrollo del modelo de localización y posteriormente determinar las ubicaciones más adecuadas bajo el criterio de maximización de cobertura.

2. Planteamiento del problema

Con una población estimada para el año 2024 de 132.659 habitantes en la ciudad de Guadalajara de Buga (Anuario Estadístico, 2023), la ciudad enfrenta la ausencia de infraestructura dedicada al transporte público alternativo y sostenible, lo que reduce las opciones de movilidad para sus ciudadanos. Esta carencia ha fomentado una alta dependencia del uso de vehículos particulares, principalmente aquellos que funcionan con combustibles fósiles. Como consecuencia, un amplio sector de la población se ve directamente afectado por el constante aumento en los precios del combustible, lo cual incrementa los costos de desplazamiento. Esta situación mencionada anteriormente se evidencia en la siguiente tabla, que presenta los precios históricos de la gasolina en los últimos seis años, elaborada con datos de Ecopetrol (Ecopetrol, 2024):

Tabla 1: Incremento del precio de la gasolina

Fecha	Gasolina Corriente Oxigenada (Alcohol carburante)	Variación porcentual
1-ene-19	7.616,07	0,00%
1-ene-20	7.900,61	3,74%
1-ene-21	8.349,77	5,69%
1-ene-22	10.101,25	20,98%
1-ene-23	13.729,39	35,92%
1-ene-24	14.973,00	9,06%

Fuente: Elaboración Propia con datos de Ecopetrol

La *Tabla 1*, evidencia un notorio crecimiento del precio de la gasolina, por diferentes motivos como lo son los estallidos sociales en el país, la recesión económica causada por la llegada de la pandemia a causa del COVID-19 y más recientemente una de las causas fundamentales del incremento en el precio de la gasolina en Colombia es el déficit en el Fondo de Estabilización de Precios de los Combustibles (Universidad de la Costa, 2024), dicho incremento repercute directamente en el costo del transporte público tradicional, como buses, busetas y taxis, así como en modalidades informales como los “mototaxis”, lo que a su vez afecta la movilidad y los gastos diarios de una parte considerable de la población (Arenales, 2023). La creación de un sistema de bicicletas públicas no solo ofrecería una alternativa de transporte más económica y ecológica, sino que también promovería un estilo

de vida saludable y la reducción de la huella de carbono, pues según estudios un bus podría contaminar alrededor de 750 gramos de CO₂/km, un automóvil 130 gramos de CO₂/km (Observatorio de servicios urbanos [OSUR], 2017) y una moto de cuatro tiempos con un cilindraje mayor a 150 Centímetros cúbicos emite 167 gramos de CO₂/km (Observatorio Ambiental de Bogotá, 2017), mientras que una bicicleta no tiene emisiones de CO₂, contribuye a una movilidad más limpia, promoviendo una imagen sostenible y amigable de la ciudad no solo para locales sino también para los constantes visitantes que recibe diariamente la ciudad al ser un centro turístico religioso muy importante en la región Vallecaucana (Cámara de comercio Buga, 2024).

Además, Guadalajara de Buga hace parte de las ciudades más reconocidas y con más historia del país, debido a que esta tiene una arquitectura colonial muy bien conservada, con edificaciones de amplio legado que datan del siglo XVII y XVIII, las cuales aún conservan su porte original (Red turística de pueblos patrimonio, 2024). Como resultado de estas condiciones, la infraestructura vial no cuenta con la capacidad suficiente para implementar un sistema de transporte masivo, el cual, si bien podría representar una alternativa innovadora de movilidad, enfrenta limitaciones físicas significativas. En este contexto, una opción más viable y adecuada es un sistema de bicicletas compartidas, ya que, de acuerdo con las regulaciones nacionales, las rutas destinadas al transporte público colectivo requieren un ancho mínimo de 3,2 metros, mientras que los carriles para bicicletas solo necesitan de 1,2 metros (Centro de Diagnóstico de Automotor del Valle Ltda., 2016), es decir que el ancho requerido de las ciclo rutas es aproximadamente 62,5% menor que el requerido por los carriles de transporte público colectivo (buses) lo cual hace que sea un sistema atractivo y viable para la ciudad de Guadalajara de Buga.

Sistemas de bicicletas compartidas ya se han instaurado con anterioridad en otras ciudades del país como lo son Barranquilla, Sincelejo, San Andrés o Montería (Grupo de Asuntos Ambientales y Desarrollo Sostenible, n.d.) o si se quiere tener un referente un poco más cercano dentro del mismo departamento tenemos el caso de la ciudad de Palmira la cual recientemente ha instaurado el programa Palmibici¹, por lo que esto marca una tendencia creciente para este modelo de movilidad pública en diferentes municipios del país, no obstante se ha evidenciado en la literatura la existencia de consecuencias debido a la falta de estudio destinado a la ubicación de los puntos, donde se ha encontrado que los sistemas de bicicletas compartidas solo pueden brindar beneficios cuando su red está diseñada adecuadamente, con el fin de captar usuarios y generar demanda como se menciona en el artículo (Mix et al., 2022).

Para el buen diseño de una red de transporte es importante tener en cuenta los diferentes factores que pueden alentar o disuadir a las personas a usar este método de transporte, estos factores pueden ir desde la cercanía de las estaciones de bicicleta con respecto al origen y destino del viaje, así como de otros factores importantes como lo pueden ser el tiempo de

¹ Palmibici: <https://palmibici.com.co/>

viaje, la seguridad, la comodidad o el interés visual como lo destacan (Hull & O'Holleran, 2014), y viéndose desde una perspectiva económica las decisiones de localización pueden tener grandes repercusiones financieras en las empresas, habitualmente localizar una o más instalaciones es un proceso costoso el cual debe ser justificado con resultados que dependen del éxito de esta localización, por lo general si se fracasa en dicha tarea, el dinero no es recuperable. Por otro lado, la importancia de la localización también radica en que esta podrá determinar la competitividad de la empresa en el mercado, pues una buena localización favorecerá a la empresa en el desarrollo de las operaciones efectuadas, por ende, las consecuencias de una mala localización también pueden no ser tangibles, como lo es el costo de oportunidad (Carro Paz & González Gómez, 2012).

De esto se puede entender que el diseño de la red de transporte para bicicletas puede ser beneficioso o perjudicial dependiendo del correcto o incorrecto diseño de este, por lo cual se llega a la pregunta clave, ¿cuál es la localización óptima para las estaciones de un sistema de bicicletas compartidas en la ciudad de Guadalajara de Buga, considerando la demanda potencial y las condiciones urbanas?

3. Justificación

Está claro que “las ciudades afrontan retos con respecto a la movilidad y desarrollo urbano” (López Guzmán et al., 2019) y en el caso a tratar de la ciudad de Guadalajara de Buga no es una excepción, una ciudad pequeña, de arquitectura colonial, de alto valor histórico pero carente de sistemas de movilidad que sirvan como alternativas al transporte tradicional como lo sería el uso de automóviles o motocicletas ya que no todas las personas cuentan con acceso a estos métodos de transporte y tienen que recurrir a otros medios como lo serían el uso de taxis diariamente lo cual resulta costoso para un gran porcentaje de población de la ciudad que se encuentra entre los estratos bajos y medios, otro método de transporte al cual suelen recurrir los locales es al de motocicletas informales o mejor conocidas como “mototaxis”, pero que no termina siendo una solución ya que muchas personas eligen este medio simplemente por un factor económico debido a su precio más bajo en comparación a los taxis pero no porque sea atractivo ya que suele ser considerado inseguro y genera desconfianza para ciertos grupos sociales como lo pueden ser mujeres, niños o adultos mayores (COLPRENSA, 2011).

Mencionado lo anterior se evidencia que existe una necesidad con respecto a la existencia de alternativas de movilidad en la ciudad de Guadalajara de Buga. Un sistema de bicicletas compartidas presentaría múltiples ventajas en términos de sostenibilidad y salud pública, además de ser accesible para la economía de los ciudadanos, resultaría atractivo tanto para locales que diariamente tienen la necesidad de desplazarse por la ciudad, como para la gran cantidad de turistas que la visitan (Cámara de comercio Buga, 2023) y deseen realizar viajes por los centros históricos o puntos de interés de la ciudad.

Asumiendo que este sistema se materializara en Guadalajara de Buga, hay que asegurar que esté diseñado adecuadamente con el fin de abastecer la demanda en el casco de urbano de la ciudad y permitir tener la mayor cantidad de usuarios posibles, para esto es clave que las estaciones de bicicletas estén ubicadas de forma estratégica, para ello es necesario identificar las variables, restricciones y demás elementos necesarios que nos permitan dar solución a este problema de localización, debido a que como se ha mencionado anteriormente una buena localización es la base que permitirá poder sacar todo el potencial posible de la ubicación y ayudará a crear una base sólida en la cual se podrá trabajar para alcanzar el éxito del proyecto.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Proponer la localización de las estaciones de bicicletas compartidas en la ciudad de Guadalajara de Buga.

4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la demanda de usuarios potenciales del sistema de bicicletas compartidas para la ciudad de Guadalajara de Buga.
- Diseñar un modelo matemático con el fin de que se ajuste a los parámetros establecidos para la Ciudad de Guadalajara de Buga.
- Evaluar la robustez del modelo de localización mediante pruebas de sensibilidad y escenarios alternativos.

5. Marco teórico

5.1 Movilidad sostenible y urbana

La movilidad sostenible se refiere al conjunto de políticas y prácticas de transporte que satisfacen las necesidades de desplazamiento actuales sin comprometer las de generaciones futuras. Este enfoque promueve modos de transporte que minimicen el impacto ambiental, el consumo energético y los costos sociales. En contextos urbanos, la movilidad sostenible ha ganado protagonismo debido a los problemas asociados al uso intensivo de vehículos motorizados, como la contaminación, la congestión y los accidentes(Martínez-Ángel, 2018).

En ciudades intermedias como Guadalajara de Buga, caracterizadas por una infraestructura limitada y un alto valor patrimonial, el desarrollo de sistemas de transporte masivo se ve restringido, lo cual refuerza la pertinencia de soluciones más flexibles, como la bicicleta.

5.2 Sistemas de bicicletas públicas

Los sistemas de bicicletas públicas compartidas se han consolidado como una alternativa de transporte urbano que contribuye a la movilidad sostenible. Estos sistemas permiten a los usuarios tomar una bicicleta en una estación y devolverla en otra, promoviendo trayectos cortos y reduciendo la dependencia del transporte motorizado (Sanmiguel-Rodríguez, 2023).

En Colombia, han sido implementados en ciudades como Bogotá, Medellín, Palmira y Barranquilla, con resultados diversos. El éxito de estos sistemas depende, entre otros factores, de una adecuada planificación, operación, y, especialmente, de una correcta localización de las estaciones (Ministerio de Transporte, 2025).

5.3 Herramientas para la localización de estaciones

El diseño de redes de los sistemas de bicicletas compartidas requiere herramientas metodológicas que permitan seleccionar ubicaciones óptimas para las estaciones. En la literatura se han empleado modelos como el Maximum Covering Location Problem (MCLP), el análisis multicriterio (AHP, GIS), programación entera mixta y simulaciones.

En particular, el modelo MCLP es adecuado para contextos urbanos con recursos limitados, ya que busca maximizar la cobertura de demanda dentro de una distancia predefinida (Castellanos Guerrero, 2016). Este modelo ha sido utilizado en ciudades como Montevideo (Morosi Tierno, 2018) y Bogotá (Vanesa et al., 2018), adaptándose a sus condiciones específicas. Adicionalmente, la evaluación multicriterio permite incluir factores cualitativos como accesibilidad, entorno urbano y seguridad.

5.4 Antecedentes nacionales e internacionales

En España, la Guía metodológica para la implantación de sistemas de bicicletas públicas (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007) ofrece un enfoque integral sobre los procesos técnicos, administrativos y operativos necesarios para implementar sistemas de bicicletas compartidas. Aunque su publicación data del año 2007, sigue siendo un referente en el diseño e implantación de estos sistemas, ya que recoge experiencias prácticas de diversos municipios españoles y europeos, abordando temas como criterios de localización, gestión del servicio, integración con otros modos de transporte y sostenibilidad económica. Este documento aporta elementos clave que pueden ser adaptados al contexto colombiano, permitiendo estructurar una propuesta fundamentada en experiencias exitosas, incluso si se requiere complementarla con literatura más reciente.

A nivel nacional, el Programa Nacional de Bicicletas Compartidas del Ministerio de Transporte resalta la importancia de adaptar estos sistemas a las condiciones locales. Trabajos como el de (López Guzmán et al., 2019), en Bogotá, o (Guerrero Galvis & Martínez Reyes, 2017), en Cúcuta, emplean enfoques que combinan encuestas, análisis de accesibilidad y modelos de localización para proponer ubicaciones óptimas.

5.5 Conexión con el problema de investigación

La ausencia de alternativas de transporte sostenibles en Buga y el impacto del alza en los combustibles motivan la búsqueda de soluciones de movilidad. La revisión teórica y empírica evidencia que la correcta localización de estaciones es un factor decisivo en la adopción de los sistemas de bicicletas compartidas. Por ello, el modelo propuesto se debe fundamentar en principios de accesibilidad, eficiencia y sostenibilidad, en concordancia con la literatura revisada.

5.6 Análisis comparativo de antecedentes

Al revisar los estudios previos, se hacen evidentes ciertos puntos en común que permiten entender mejor el camino recorrido por otras investigaciones y al mismo tiempo justificar la propuesta planteada en este trabajo. A partir de esta revisión, se contrasta lo más relevante en cuanto a enfoques, metodologías y resultados, con el objetivo de destacar tanto coincidencias como aportes diferenciales.

5.6.1 Similitudes

Una de las coincidencias más claras entre los estudios revisados es la importancia que se le da a la ubicación de las estaciones, aspecto que todos reconocen como clave para el buen funcionamiento de los sistemas de bicicletas compartidas. Además, la mayoría de modelos consideran dos variables fundamentales: la demanda potencial y la cobertura en términos de distancia. Aunque el nivel de profundidad y justificación teórica varía entre investigaciones, todos hacen uso de herramientas cuantitativas para sustentar sus propuestas.

5.6.2 Diferencias

A pesar de las similitudes mencionadas en párrafo anterior, también se pueden mencionar diferencias marcadas, un ejemplo de esto es que algunas de las investigaciones como el caso de Bogotá (López Guzmán et al., 2019), optan por métodos multicriterio de carácter subjetivo como lo es la metodología AHP, mientras que otros como el caso de Montevideo se inclinan por modelos matemáticos más estructurados, con criterios cuantificables y restricciones definidas.

Otra diferencia importante que vale la pena resaltar es que en el presente trabajo se incorpora en la metodología el realizar análisis de sensibilidad para evaluar la posibilidad de distintos escenarios, esta práctica no fue muy común en las investigaciones consultadas y se podría considerar un valor agregado importante. Por último, la mayoría de los estudios se centran en grandes ciudades, mientras que este estudio se centra en una ciudad intermedia y en donde no existe un sistema de bicicletas compartidas previo, lo que exige adaptar el enfoque metodológico al caso en particular de Guadalajara de Buga.

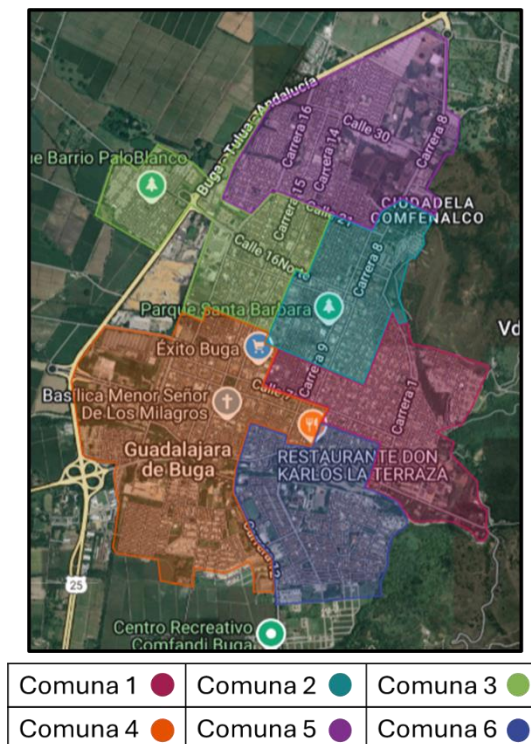
6. Caracterización de la información.

Como fuente para la caracterización de la información se usaron datos de la ciudad obtenidos de páginas como el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el Anuario Estadístico y demás fuentes virtuales verídicas. Por otra parte, también se recolectaron datos de forma manual de la ciudadanía mediante encuestas y el análisis de estas para obtener información de primera mano sobre los intereses y movilidad de la población en el interior de la ciudad.

Para el año 2024, se estima que la población de Guadalajara de Buga será de aproximadamente 132.659 habitantes, compuesta por 62.264 hombres y 70.395 mujeres, distribuidos en los diferentes sectores de la ciudad. Aunque Buga cuenta con una extensión total de 832 kilómetros cuadrados, este trabajo se centrará únicamente en el sector urbano, que abarca 17 kilómetros cuadrados, ya que es en esta zona donde se concentra la mayor parte de la población y, por tanto, la demanda potencial del sistema de bicicletas compartidas (Anuario Estadístico, 2023).

Profundizando en la zona urbana de la ciudad, esta cuenta con 6 comunas como se observa en la *Ilustración 1*, las cuales hasta el año 2024 cuentan con 61 barrios y urbanizaciones los cuales se pretenderán que sean beneficiados por el sistema, garantizando una cobertura a su gran mayoría en base a los criterios que se definirán más adelante.

Ilustración 1: Mapa de las comunas de Guadalajara de Buga



Fuente: Alcaldía Municipal - Mapa interactivo de Guadalajara de Buga.

6.1 Prueba piloto

En la búsqueda de dar cumplimiento al primer objetivo e identificar la situación actual de la ciudad con respecto a la movilidad y el interés por un sistema de movilidad alternativo, más específicamente el de bicicletas públicas compartidas se realizó una serie de encuestas empezando por una prueba piloto de aproximadamente 50 personas, con el objetivo de obtener los porcentajes de p y q de la (*Ecuación 1: Tamaño de muestra para poblaciones finitas*) Ecuación 1 tomada del libro Estadística y Muestreo (Bencardino, 2012):

Ecuación 1: Tamaño de muestra para poblaciones finitas

$$n = \frac{N * Z_a^2 * p * q}{(e^2 * N) + (Z_a^2 * p * q)} \quad (1)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra.

p = Probabilidad a favor

N = Tamaño de la población

q = Probabilidad en contra

Z = Nivel de confianza

e = Error de máximo admisible

Esta ecuación permite obtener la cantidad de personas necesarias a encuestar para que la información recolectada sea fiable y válida, con el fin de dar desarrollo a la investigación, además de ello, la prueba piloto brindó un primer acercamiento para evaluar la efectividad de la encuesta, determinar la tasa de respuesta, detectar sesgos y errores en el diseño, y obtener una retroalimentación de los encuestados.

La prueba piloto se realizó de dos maneras, las cuales fueron virtual y física con el objetivo de ampliar la cobertura de la muestra, ya que la encuesta virtual permite llegar rápidamente a personas en distintas ubicaciones y con distintos estilos de vida, mientras que la encuesta física puede usarse para personas que tal vez no tienen fácil acceso a internet o para obtener una respuesta mucho más real de las personas, además de esto se puede contrastar los resultados de ambos métodos para comparar o validar la información recolectada e identificar si existen diferencias significativas en las respuestas y evaluar la fiabilidad de los resultados, cabe recalcar que, para delimitar el trabajo y el público objetivo, se trabajó únicamente con la zona urbana de Guadalajara de Buga.

La encuesta virtual se realizó mediante formulario de Google, y se difundió por medio de un enlace a diferentes personas de la ciudad a través de distintos medios virtuales, mientras que,

para las encuestas físicas se imprimió dicho formato y se visitaron diferentes puntos de la ciudad donde se encuestó a cierto número de personas de forma presencial, es importante mencionar que el desarrollo de la prueba piloto se llevó a cabo durante el mes de septiembre del año 2024, para conocer las preguntas de la prueba piloto ver (*ANEXO 1. Encuesta piloto*).

6.1.1 Resultados prueba piloto

Una vez realizada la prueba con un total de 52 respuestas, de las cuales 37 fueron virtuales y 15 presenciales, se obtuvieron datos relevantes para el desarrollo del trabajo, tales como la proporción de gente que de existir un sistema de bicicletas compartidas lo usaría, siendo la respuesta del “Sí” la más votada con un 86,54%, por el contrario, el “No” solo obtuvo el 13,46%, estas respuestas se volverían nuestro “ p ” y “ q ” respectivamente de la (*Ecuación 1: Tamaño de muestra para poblaciones finitas*). Por otra parte, para delimitar aún más el público objetivo, se plantea que el sistema sea accesible para personas mayores de edad (18 años), tomando como referencia las políticas establecidas en los sistemas de Palmibici² y Tembici³ por lo cual, se descartó la proporción de gente de 0 a 17 años de edad, los cuales para el 2024 proyectan que sean del 25,28% (DANE, 2023) de modo que el tamaño de población para obtener el tamaño de muestra será de 99.123 personas, con un nivel de confianza (Z) del 95% que suele ser el más usado en la literatura, además, se plantea un error máximo admisible (e) del 5% a juicio de los autores del trabajo, para obtener resultados más concisos y precisos; lo anterior condujo a los siguientes resultados, utilizando la (*Ecuación 1: Tamaño de muestra para poblaciones finitas*).

$$n = \frac{99.123 * 1,96^2 * 0,8654 * 0,1346}{(0,05^2 * 99.123) + (1,96^2 * 0,8654 * 0,1346)} = 178,7$$

Con este resultado se puede concluir que el número de personas a encuestar es de 179 personas para poder obtener resultados que sean representativos de la población.

6.2 Diseño de encuesta final

Después de obtener el tamaño de la muestra, se reformuló la prueba piloto con el propósito de estructurar la versión definitiva de la encuesta, incorporando las preguntas clave que permiten recopilar información fundamental para el desarrollo del modelo matemático. Por esta razón, se plantearon preguntas tales como, el rango de edad, la ocupación y estrato socioeconómico, los cuales permitirán establecer cuáles son las características principales de

² Palmibici: <https://palmibici.labici.net/>

³ Tembici: <https://tembici.com.co/>

los interesados en el sistema, por otra parte, también se incluyeron preguntas acerca de medios de transporte, zonas de movilidad y frecuencias para determinar los patrones de movilidad de la población, para ver la encuesta ver el (*ANEXO 2. Encuesta final*).

6.2.1 Metodología de distribución para las encuestas presenciales

Con el fin de obtener datos confiables y evitar posibles sesgos, asegurando una distribución equitativa de los datos para la investigación y desarrollo del modelo, se planteó la siguiente metodología para la encuesta final.

Como primera medida se identificó que para el 2018 el acceso a internet en el municipio era de un 58,2% (DANE, 2022), con el pasar del tiempo se ha evidenciado un desarrollo económico en términos de conectividad, pues según un informe socioeconómico realizado en Guadalajara de Buga y sus áreas de influencia, se evidenció que de los 1541 entrevistados, el 91,88% contaba con acceso a internet, cabe aclarar que del total de encuestados el 70,80% eran de Guadalajara de Buga (Observatorio empresarial y económico de Buga (OEEB), 2023), dada esta información se consideró realizar la encuesta con una distribución del tamaño de muestra del 60% para las encuestas virtuales y 40% para las encuestas presenciales, por lo que trasladado a números se esperan como mínimo 107 respuestas virtuales y 72 presenciales.

Por otra parte, para garantizar la cobertura de las diferentes zonas urbanas de la ciudad, se planteó dividir de forma equitativa estas 72 encuestas por las 6 comunas de la ciudad, es decir 12 personas encuestadas por comuna, para ver el proceso de realización de la encuesta física véase el (*ANEXO 3. Material fotográfico encuesta física*).

En cuanto a las encuestas virtuales, se difundirán a través de redes sociales y otras plataformas digitales, asegurando su llegada a diversos grupos de personas, entre ellos se incluyen vecinos, trabajadores, estudiantes, familiares, conocidos, entre otros. Lo que permitirá alcanzar una amplia variedad de personas con diferentes ocupaciones y estilos de vida, buscando tener una participación representativa.

6.2.2 Resultados encuestas

Una vez finalizada la etapa de recolección de la información, se obtuvieron un total de **206 respuestas** (117 encuestas virtuales y 89 encuestas presenciales), de esta manera cumpliendo con el tamaño de la muestra mínimo el cual era de **179 personas**, estos datos describen las intenciones de los ciudadanos con respecto al sistema de bicicletas compartidas, además de brindar información sobre los usuarios, a continuación, se presentará y describirá los resultados obtenidos:

De forma general, se destaca que el 58% de las personas encuestadas fueron mujeres, mientras que el 41% fueron hombres y un 1% que prefirió no decirlo (*ANEXO 4. Genero de los encuestados*). La mayoría de los participantes se encontraban en el rango de edad de 18

a 25 años, mientras que los demás rangos presentaron proporciones similares con respecto al total de encuestados. Cabe resaltar que los rangos de edad menos representativos en los resultados de la encuesta corresponden a personas menores de 18 años, con un solo registro, (grupo que fue descartado como parte de la población objetivo), y a personas mayores de 65 años, con cuatro registros. (*ANEXO 5. Edad de los encuestados*).

En cuanto a la ocupación, el 40% de los encuestados eran trabajadores, el 30% estudiantes, el 21% independientes y el 9% se dedicaban al cuidado del hogar (*ANEXO 6. Ocupación de los encuestados*).

Respecto a la información socioeconómica, la mayoría de los encuestados pertenecían a los estratos 2 y 3, siendo este último el más repetitivo, les siguen los estratos 1 y 4 con una cantidad significativa de respuestas y por último los estratos 5 y 6 siendo estos los menos marcados por los encuestados (*ANEXO 7. Estrato socioeconómico de los encuestados*).

En la *Gráfica 1* se muestra el porcentaje de personas que considerarían usar o no el sistema en caso de existir, con esta información se buscará pronosticar una posible demanda a la hora de diseñar el modelo matemático para la red de bicicletas, con este dato se puede estimar que el 73% de la población de Guadalajara de Buga estaría dispuesto a usar el sistema.

Gráfico 1: En caso de existir el sistema ¿lo usaría?

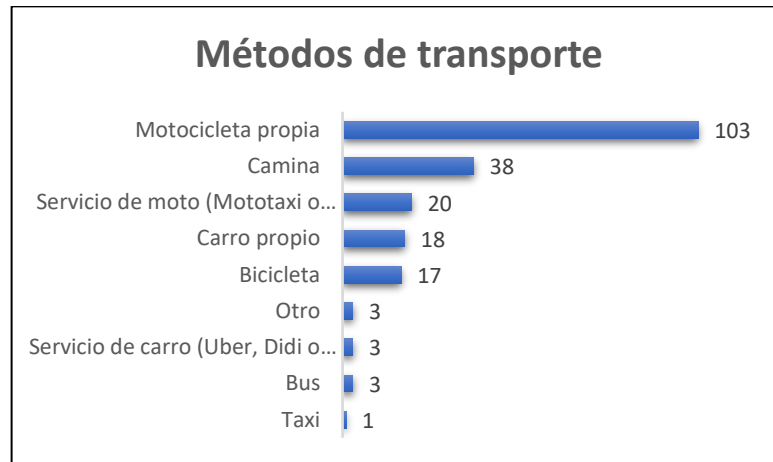


Fuente: Elaboración propia

En la *Gráfica 2* se observa cuáles son los métodos de transporte más utilizados por la población encuestada, un dato relevante si se tiene en cuenta que la motocicleta propia es, por amplio margen, el medio de transporte más frecuente. En segundo lugar, se encuentra el caminar, lo que puede sugerir que las personas realizan trayectos cortos o buscan evitar incurrir en costos de transporte. La tercera opción más seleccionada fue el servicio de moto, lo cual podría indicar una necesidad de contar con una alternativa rápida y flexible para desplazarse.

La pregunta que dio origen a estos datos fue: “¿Cuál es el medio de transporte que más utiliza usted en su día a día?”. Con esta interrogante se buscó identificar los principales medios de transporte empleados dentro de la zona urbana de Guadalajara de Buga, información que resulta útil para adaptar un sistema en función de las necesidades locales de movilidad.

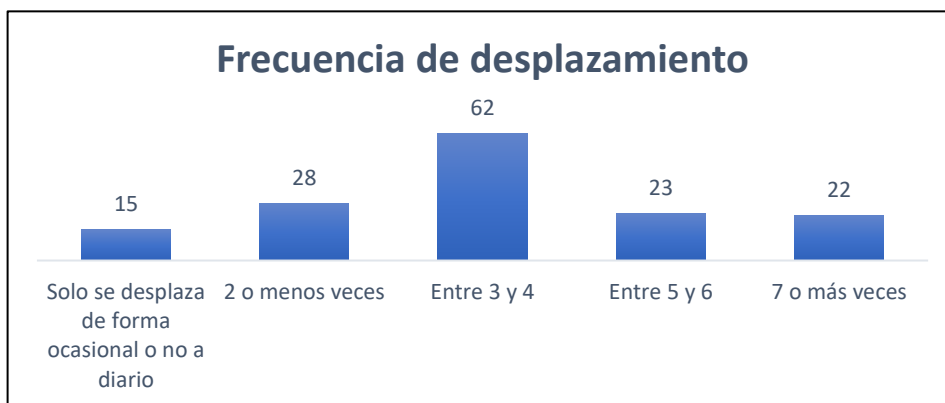
Gráfico 2: Métodos de transporte más utilizado



Fuente: Elaboración propia

La gráfica 3 surge a partir de la pregunta “¿Con que frecuencia se moviliza o realiza viajes en el interior de la ciudad al día?” el resultado nos indica la frecuencia de desplazamiento únicamente de las personas que marcaron afirmativamente el uso del sistema en caso de existir en la ciudad, información importante para tener en cuenta a la hora de realizar el modelo y buscar precisión en cuanto a las necesidades de desplazamiento de los posibles usuarios, pues nos permite conocer en número de desplazamientos diarios de la población urbana de Guadalajara de Buga.

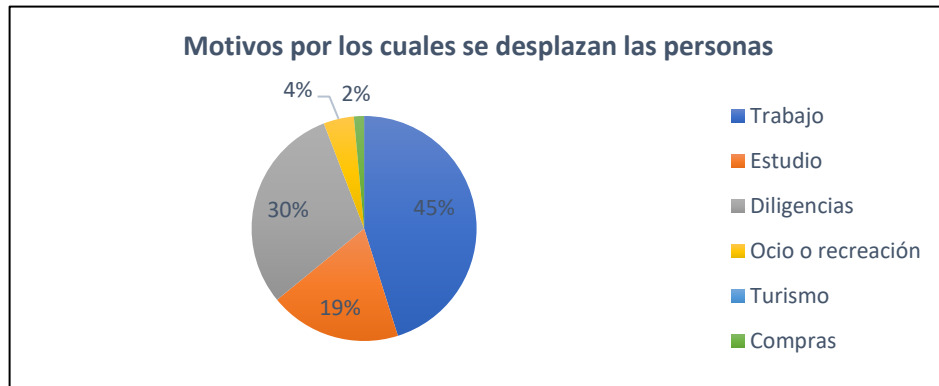
Gráfico 3: Frecuencia de desplazamiento



Fuente: Elaboración propia

En la *Gráfica 4* se aprecian los resultados de la pregunta “¿Con que motivo principalmente se moviliza usted en el interior de la ciudad?” la intención de esta pregunta fue conocer los motivos principales por los cuales las personas se desplazan en la ciudad, esto es un factor para considerar al momento de seleccionar posibles ubicaciones para las estaciones y su cercanía con respecto a zonas donde hay gran cantidad de empresas, centros educativos, bancos o similares.

Gráfico 4: Motivos por los cuales se desplazan las personas

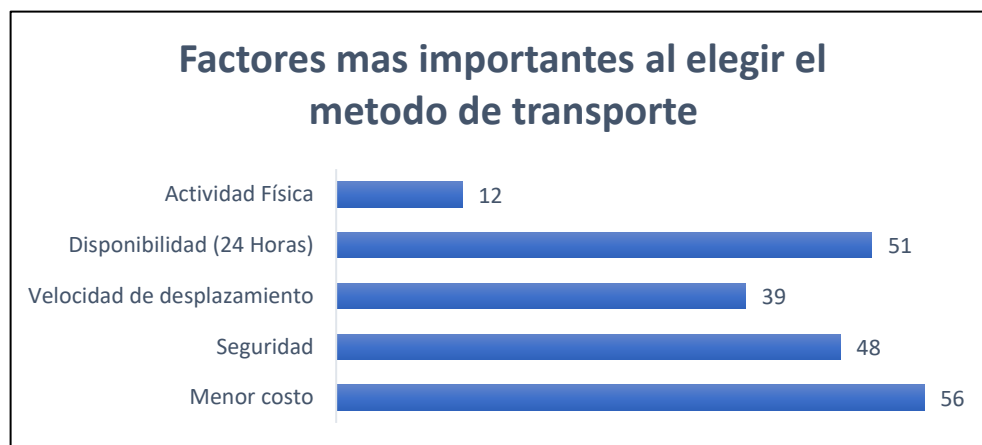


Fuente: Elaboración propia

En la *Gráfica 5* se evidencian los factores que eran los más importantes a la hora de elegir su método de transporte, siendo el de “Menor costo” el más elegido por los encuestados, seguido por el de “Disponibilidad (24 horas)”, por lo que se ajustan muy bien a el sistema de bicicletas compartidos, ya que es un sistema que se considera relativamente económico o algunos casos incluso gratis como lo es el sistema de Palmibici o el de EnCicla⁴ de la ciudad de Medellín, además este sistema suele operar en algunos sitios las 24 horas del día, perfecto para los que priorizan disponibilidad.

⁴ EnCicla: <https://encicla.metropol.gov.co/>

Gráfico 5: factores más importantes al elegir método de transporte



Fuente: Elaboración propia

Después de todo la información obtenida a través de las investigaciones y las encuestas se puede concluir que del público objetivo el cual era las personas mayores de edad que para el año 2024 se proyectaron que eran de 99.123 personas como se había mencionado anteriormente, se estima que serán usuarios potenciales el 73%, es decir 72.360 personas las cuales el 43% se movilizaran por motivos de trabajo y otro 19% por temas de diligencias, además, se proyecta que en promedio, los usuarios realizarán entre tres y cuatro desplazamientos diarios.

Como información adicional se destaca que se realizó una pregunta en específico a las personas que respondieron negativamente en cuanto a si utilizarían o no el sistema de bicicletas, se les pregunto la razón del porque no lo utilizarían y la respuesta más común fue porque ya contaban con vehículo propio, otras respuestas fueron que prefieren utilizar cualquier otro método de transporte en vez de la bicicleta, que no les gusta la bicicleta, que no saben utilizar la bicicleta o simplemente les parece inseguro (ANEXO 8. Razones por la cual se niegan a utilizar el sistema).

7. Modelo matemático

7.1 Definición del modelo

Como primera medida se procedió a consultar y realizar una revisión de la literatura, para determinar el modelo que mejor se adapte al objetivo planteado en este trabajo, después de esto se obtuvo la *Tabla 2*.

Tabla 2: Revisión literaria.

Título	Autor	Año	Ciudad	Objetivo General	Metodología o Modelo Usado
Diseño de una red de bicicletas públicas en la ciudad de Montevideo - Uruguay	Valentina Morosi Tierno	2018	Montevideo, Uruguay.	Modelar el problema de diseño de una red de bicicletas públicas en Montevideo, Uruguay y proponer diferentes soluciones para su implementación.	Se utilizó el enfoque de localización-asignación y se utilizaron herramientas como python y el software de optimización gurobi.
Propuesta de localización de las estaciones del sistema Palmibici para aumentar la cobertura del servicio público de bicicletas en el municipio de Palmira	Valeria Oliveros Muñoz y Jesselín Perdomo Gomez	2024	Palmira, Colombia.	Proponer la localización de las estaciones del sistema PALMIBICI que maximice una medida de cobertura del sistema público de bicicletas.	Modelo matematico de maximización de cobertura y medición de distancias a partir de un complemento de EXCEL.
Diseño de un modelo de macro-localización de plataformas para Diseño de un modelo de macro-localización de plataformas para bicicletas de servicio público en la ciudad de Bogotá. Caso de estudio zona centro	Laura Vanesa Carvajal Espitia - Ingrid Lorena Pinzón Capador	2018	Bogota, Colombia.	Diseñar un modelo de Macro Localización de Plataformas (estacionamiento) para bicicletas empleando técnicas de ingeniería (indicadores de rendimiento (GAP's), modelos de macro localización y análisis multicriterio) en la ciudad de Bogotá: caso de estudio zona centro	Modelo de macro localización o modelos de localización de instalaciones.
Propuesta de localización de plataformas para un sistema público de bicicletas de la UFPS en la ciudad de Cúcuta empleando técnicas de ingeniería	Julián David Ramírez, José David Díaz	2019	San José de Cúcuta, Colombia.	Proponer la localización óptima de plataformas (estacionamientos) para bicicletas en la ciudad de Cúcuta empleando técnicas de ingeniería.	Modelamiento matemático (centro de gravedad, carga-distancia, AHP) y técnicas de macro-localización; validación computacional.
Diseño de redes de movilidad en bicicleta utilizando técnicas de aproximación continua	Carolina Díaz, Luis F. Marmolejo	2023	Barcelona, España.	Proponer un modelo matemático para el diseño de redes ciclistas, incluyendo ubicación y tamaño de estaciones de bicicletas, considerando demanda espacialmente diversa.	Técnicas de aproximación continua y optimización por enumeración de cuadrícula; minimización de función objetivo que combina recursos y tiempos de viaje; validación con software MATLAB.
Localización óptima de estaciones de bicicletas públicas en función de la demanda potencial	Catalina Carrasco	2021	Santiago, Chile.	Proponer una metodología para la localización óptima de estaciones de bicicletas públicas considerando la demanda potencial.	Modelos de localización óptima de servicios y análisis espacial con GIS.
Modelos de optimización de la localización de bases de bicicletas públicas: un enfoque basado en Sistemas de Información Geográfica	Javier Gutiérrez Puebla, Juan Carlos García Palomares	2014	Santander, España.	Optimizar la localización de bases de bicicletas públicas según la demanda potencial.	Modelos de mínima impedancia (P-Median) y máxima cobertura con GIS.
Propuesta para implementación de sistema de bicicletas públicas para Bucaramanga	Angélica María Díaz Cárdenas	2020	Bucaramanga, Colombia	Proponer la ubicación de estaciones de bicicletas públicas en Bucaramanga.	Análisis multicriterio y herramientas GIS.
Optimizing the locations of bike-sharing stations: A GIS-based approach	Xiaoyue Cathy Liu et al.	2012	Salt Lake City, EE.UU.	Optimizar la ubicación de estaciones de bicicletas compartidas para maximizar la cobertura.	Modelos de máxima cobertura y análisis espacial con GIS.
A multi-objective optimization model for bike-sharing station planning	X. Lin, X. Yang, Y. Xu	2018	Nanjing, China.	Desarrollar un modelo multiobjetivo para la planificación de estaciones de bicicletas compartidas.	Programación multiobjetivo y algoritmos evolutivos.

Fuente: Elaboración propia

Después de la revisión de literatura se identificó que diversos trabajos han utilizado múltiples enfoques y modelos para la localización óptima de estaciones de bicicletas públicas, tales como modelos de localización con cobertura máxima, modelos de localización con cobertura parcial, análisis multicriterio mediante herramientas GIS, y programación multiobjetivo, entre otros. No obstante, el modelo Maximum Covering Location Problem (MCLP) se destaca por su capacidad para maximizar la cobertura de demanda con un número limitado de instalaciones (Castellanos Guerrero, 2016), lo cual se ajusta con el objetivo general de este trabajo. A diferencia de otros enfoques, el MCLP permite encontrar ubicaciones óptimas que beneficien al mayor número posible de usuarios, considerando restricciones reales como el número finito de estaciones a instalar. Esta ventaja lo hace especialmente adecuado en

contextos urbanos donde los recursos y el espacio son limitados, y se busca la mayor eficiencia en la cobertura de usuarios potenciales.

A partir de dicha información se planteará lo que será la base del modelo de MCLP, tomado de (Park & Sohn, 2017, como se citó en Morosi Tierno, 2018):

7.2 Modelo de localización

7.2.1 Modelo base

Subíndices y conjuntos

M	Conjunto de puntos de demanda, con índice $j = 1, \dots, m$
N	Conjunto de nodos candidatos a estación, con índice $i = 1, \dots, n$

Parámetros

μ_j	Cantidad de demanda en el sitio j
p	Número de instalaciones a localizar
D	Distancia límite dentro de la cual un sitio de demanda j puede ser cubierto por una instalación i
N_i	conjunto de nodos candidato a instalación i que se encuentran dentro del límite de distancia D del sitio de demanda j
d_{ij}	distancia euclidiana entre los sitios i y j

Variables de decisión

Y_j	1, si la demanda en el sitio j es satisfecha 0, en caso contrario
X_i	1, si se localiza una instalación en el nodo candidato i 0, en caso contrario

Modelación del problema

Ecuación 2: Modelo inicial

$$\text{Maximizar : } \sum_{i=1}^m \mu_j * Y_j \quad (2.1)$$

Sujeto a:

$$Y_j \leq \sum_{i \in N_j} X_i \quad \forall j \in M \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i = p \quad (2.3)$$

$$X_i, Y_j = (0,1) \quad \forall i \in N, j \in M \quad (2.4)$$

$$N_j = \{i \in M \mid d_{ij} \leq D\} \quad (2.5)$$

A continuación, la autora Morosi Tierno explica y detalla cada una de las ecuaciones:

La función objetivo (2.1) maximiza la demanda cubierta por las p instalaciones. La restricción (2.2) establece que la demanda del nodo i no puede ser cubierta a menos que haya una instalación en algún nodo j y que se encuentre dentro de su radio de cobertura. La restricción (2.3) impone que deben activarse p instalaciones. La restricción (2.4) declara que las variables del problema son binarias. Finalmente, la restricción (2.5) impone que la distancia entre un sitio de demanda j y una instalación i que satisfaga la demanda del sitio j es menor que D , que es la máxima distancia de un sitio de demanda a una estación. (Park & Sohn, 2017, como se citó en Morosi Tierno, 2018a)

Este modelo será la base para para la creación del modelo matemático que se usará para la localización de las estaciones de bicicleta en la ciudad de Guadalajara de Buga.

7.2.2 Modelo final

Se realizaron cambios en las notaciones y parámetros del modelo, se ajustó la función objetivo y se incorporaron nuevas restricciones. Estos cambios permitieron adaptar la formulación matemática a las necesidades específicas del estudio, obteniendo así la siguiente versión del modelo:

Conjuntos

M	Conjunto de puntos de demanda (Barrios), con índice $j = 1, \dots, m$
N	Conjunto de nodos candidatos a estación (Estaciones de bicicleta), con índice $i = 1, \dots, n$

Parámetros

B_j	Demanda del barrio j
d_{ji}	Distancia del barrio j a la estación i
D_{min}	Distancia mínima permitida entre estaciones de bicicleta
D	Distancia máxima permitida para la cual una estación podrá atender un barrio
$d_{min_{ik}}$	Distancia entre la estación i y la estación k
E	Número máximo de estaciones permitidas para abrir.
C	Capacidad máxima de demanda que puede atender una estación

Variables

X_i	1, si se abre la estación candidata i 0, en caso contrario
Z_{ji}	1, si el barrio j es atendido por la estación i 0, en caso contrario

Función objetivo

Ecuación 3: Modelo propuesto

$$\text{MAXIMIZAR } Z = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left(\frac{B_j}{1 + d_{ji}} \right) * Z_{ji} \quad (3)$$

Restricciones

$$d_{ji} * Z_{ji} \leq D * X_i \quad \forall j \in M, \forall i \in N \quad (3.1)$$

$$\sum_{i=1}^N Z_{ji} \leq 1 \quad \forall j \in M \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^M Z_{ji} \geq X_i \quad \forall i \in N \quad (3.3)$$

$$\sum_{j=1}^M B_j * Z_{ji} \leq C * X_i \quad \forall i \in N \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^N X_i \leq E \quad (3.5)$$

$$X_i + X_k \leq 1 \quad \forall i \in N, \forall k \in N, i < k \text{ y } d_{min_{ik}} < D_{min} \quad (3.6)$$

La función objetivo (3) busca maximizar la demanda cubierta ponderada con la distancia, esto debido a que en diferentes pruebas en la elaboración el modelo podía atender a barrios lejanos, no atendiendo en el que se encontraba situado, por lo que para darle una solución a esto se optó por dividir la demanda cubierta sobre la distancia, de modo que a mayor distancia de la estación, menor será la demanda ponderada que podrá atender, por otra parte esto hace que las estación se ubiquen cerca de las mayores zonas de demanda.

Por otro lado, las restricciones que se crearon y modificaron fueron las siguientes:

- La restricción (3.1) Garantiza que un barrio j solo sea cubierto por una estación i si la distancia entre ambos es menor o igual a la distancia máxima permitida (D).
- La restricción (3.2) define que un barrio j solo puede ser atendido máximo por una estación i .
- La restricción (3.3) evita que se abran estaciones j que no van a atender por lo menos un barrio i , debido a que no hay un costo de apertura definido.
- La restricción (3.4) asegura que la demanda total asignada a cada estación no supere su capacidad máxima permitida, esto se logra controlando que la suma de las demandas de todos los barrios atendidos por una misma estación i no exceda el valor permitido por C (dado que una estación puede atender múltiples barrios).
- La restricción (3.5) evita que se abran más estaciones i de las definidas en el parámetro (E).
- La restricción (3.6) garantiza que no se abrirán simultáneamente las estaciones i y k si su distancia es menor a la mínima permitida ($D_{\min}$), es decir, si la distancia entre ambas estaciones menor a ($D_{\min}$), solo se podrá abrir una de esas 2 estaciones. Por otra parte, la se agregó la condición ($i < k$) para que no evalué pares, debido a que se está trabajando con distancia euclidiana.

una vez se definió el modelo matemático se pasará a definir variables y datos necesarios para iniciar a correr el modelo con los datos de la ciudad.

7.2.3 Definición de Parámetros y variables.

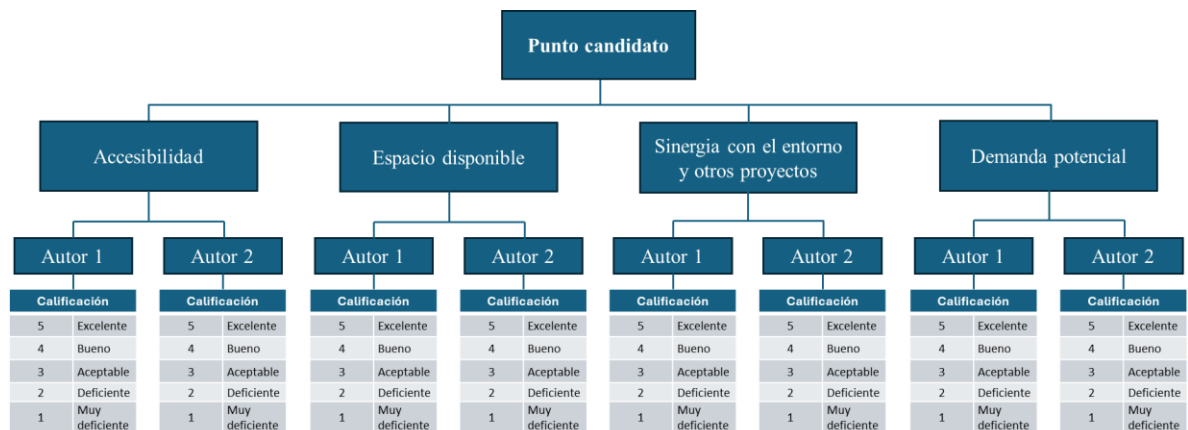
Previo a la ejecución del modelo, es imprescindible llevar a cabo un proceso de identificación y evaluación de las ubicaciones candidatas para la instalación de las estaciones de bicicletas compartidas en la zona urbana de Guadalajara de Buga. Estas estaciones deben ubicarse estratégicamente, de manera que faciliten la operación eficiente y sostenible del sistema. Por tanto, se establecieron criterios técnicos de selección basados en lineamientos recogidos en la Guía de Sistema de Bicicletas Compartidas (Ministerio de transporte, 2022) y son los siguientes:

1. **Accesibilidad:** Las estaciones deben ubicarse en puntos estratégicos con fácil acceso para peatones y ciclistas.
2. **Espacio disponible:** Se debe evaluar la disponibilidad de espacio suficiente sin afectar la circulación peatonal ni vehicular. Se priorizan áreas subutilizadas o que permitan una integración armoniosa con el entorno urbano, además se evaluaron según la tipología de zona, las cuales pueden ser: En calzada, En andén, En parques o plazas, En separador o virtuales. Para más información ver anexo (ANEXO 9. Tipología y dimensiones de estaciones).
3. **Sinergia con el entorno y otros proyectos:** Se busca complementar proyectos de movilidad sostenible, urbanismo y comercio local. La ubicación debe favorecer la conexión con ciclo vías, parques, universidades, centros de trabajo y zonas comerciales.

4. **Demanda potencial:** Para extraer estos sitios con demanda potencial se seleccionaron y calificaron de acuerdo con la cercanía a centros comerciales, paradas más importantes de autobús, terminales de autobús, parques y áreas de recreación (Park & Sohn, 2017, como se citó en Morosi Tierno, 2018a), adicional a esto se consideró la calificación en cercanía a vías principales y puntos de interés.

Una vez definidos estos criterios, se procedió a la evaluación de cada ubicación candidata. A cada sitio se le asignó una puntuación relativa en función del grado de cumplimiento de los criterios establecidos con el propósito de priorizar las ubicaciones con mayor desempeño técnico. La escala de valoración utilizada es la siguiente:

Ilustración 2: Criterios de valoración de puntos candidatos



Fuente: Elaboración propia

Cada autor para cada punto asignó una valoración del 1 al 5 como se evidencia en la *Ilustración 2: Criterios de valoración de puntos candidatos*, según los criterios descritos anteriormente, al final se sumó la puntuación total por cada autor, para así obtener un subtotal por autor, para obtener la calificación final se sumaron ambos subtotales y se dividieron entre 2, garantizando así que ambos resultados tuviesen el 50% de peso en la calificación final, este método de calificación se diseñó a partir de lo consultado en base a una simplificación del método AHP y Factores Ponderados. Para ver un ejemplo de cómo se hizo el proceso de calificación ver la *Tabla 3: Ejemplo de valoración*

Tabla 3: Ejemplo de valoración

Accesibilidad		Espacio disponible		Sinergia con el entorno y otros proyectos		Demanda potencial		Subtotal		Total
Autor 1	Autor 2	Autor 1	Autor 2	Autor 1	Autor 2	Autor 1	Autor 2	Autor 1	Autor 2	Resultado
5	4	5	4	5	4	5	4	5+5+5+5=20	4+4+4+4=16	(20+16)/2=18

Fuente: Elaboración propia

Este mismo procedimiento se aplicó a todos los puntos candidatos, con el objetivo de determinar su puntuación final. Para establecer una puntuación mínima que permitiera considerar un punto como estación candidata, se tomó en cuenta que la puntuación máxima posible es de 20 puntos y la mínima de 4, lo que genera un rango de 16 puntos, con el fin de hacer el proceso más equitativo, se definió que un punto debe obtener al menos 12 puntos para ser considerado candidato y este valor se calculó sumando al puntaje mínimo (4) la mitad del rango ($16 \div 2 = 8$), para un total de 12 puntos.

Tabla 4: Valoración de puntos candidatos

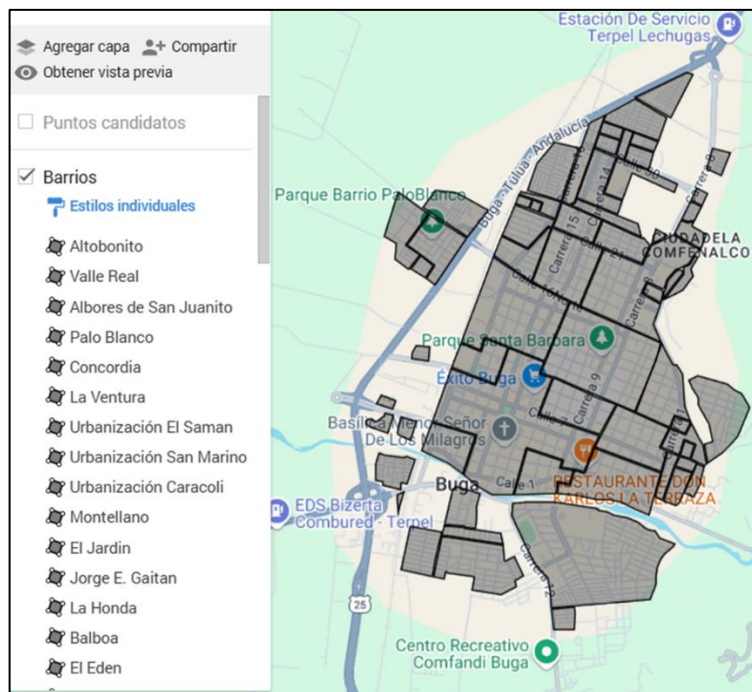
PUNTOS CANDIDATOS			Criterios								Total
PUNTOS	LONGITUD	LATITUD	Accesibilidad		Espacio disponible		Cercanía a puntos de interes		Demanda potencial		Suma
			Autor 1	Autor 2	Autor 1	Autor 2	Autor 1	Autor 2	Autor 1	Autor 2	
Pto 1	-76,291645	3,8928203	5	5	5	5	5	4	5	5	19,5
Pto 2	-76,288951	3,8951209	4	3	4	3	3	2	3	4	13
Pto 3	-76,286313	3,8997225	2	2	4	3	2	1	3	4	10,5
Pto 4	-76,290146	3,9003983	5	5	5	5	5	4	5	5	19,5
Pto 5	-76,291348	3,8936213	4	3	4	2	5	3	4	4	14,5
Pto 6	-76,288685	3,8967583	3	3	5	3	3	2	2	3	12
Pto 7	-76,293124	3,8990954	4	4	3	1	4	2	4	4	13
Pto 8	-76,295091	3,9037449	5	5	5	5	5	5	5	5	20
Pto 9	-76,293477	3,907334	5	5	5	5	5	5	5	5	20
Pto 10	-76,290983	3,9116567	4	4	5	5	4	3	4	4	16,5
Pto 11	-76,291167	3,9085954	3	2	4	3	3	2	3	3	11,5
Pto 12	-76,297805	3,9096406	5	4	5	5	5	4	5	4	18,5
Pto 13	-76,298318	3,9107702	3	4	3	1	3	2	3	2	10,5
Pto 14	-76,302672	3,9075415	4	4	3	1	4	2	4	2	12
Pto 15	-76,301865	3,9108416	4	3	5	4	3	3	3	3	14
Pto 16	-76,307221	3,9118423	3	3	5	5	4	4	4	5	16,5
Pto 17	-76,305692	3,9122826	4	4	5	5	4	4	4	5	17,5
Pto 18	-76,305991	3,9143109	3	2	5	5	3	2	2	3	12,5
Pto 19	-76,306644	3,9133195	4	3	5	3	3	3	4	5	15
Pto 20	-76,304412	3,902799	5	5	5	5	5	5	4	4	19
Pto 21	-76,302199	3,8995267	5	5	5	5	5	5	5	5	20
Pto 22	-76,302777	3,8976003	5	5	5	5	5	5	5	5	20
Pto 23	-76,310407	3,8997714	5	4	5	4	5	5	5	5	19
Pto 24	-76,306606	3,8968372	4	5	5	5	3	3	3	3	15,5
Pto 25	-76,306303	3,9008523	4	4	5	5	3	3	2	3	14,5
Pto 26	-76,30935	3,8943124	4	3	3	2	3	2	3	3	11,5
Pto 27	-76,304809	3,8929313	3	3	4	4	3	2	3	4	13
Pto 28	-76,307713	3,8914664	3	3	5	5	2	2	3	4	13,5
Pto 29	-76,303471	3,8890989	2	3	5	5	2	3	3	4	13,5
Pto 30	-76,301175	3,8909533	5	5	4	3	5	4	4	4	17
Pto 31	-76,292338	3,9189437	4	4	5	5	4	3	5	5	17,5
Pto 32	-76,293672	3,9152152	4	3	4	2	4	2	4	3	13
Pto 33	-76,296179	3,9125913	4	5	4	5	4	3	4	5	17
Pto 34	-76,29635	3,9156045	4	4	3	3	4	2	4	4	14
Pto 35	-76,289301	3,9143878	3	3	4	2	3	1	3	2	10,5
Pto 36	-76,298803	3,9170603	4	4	4	3	4	3	4	4	15
Pto 37	-76,300196	3,9136167	3	2	4	3	4	2	3	3	12
Pto 38	-76,296505	3,8874187	4	4	4	5	3	3	3	4	15
Pto 39	-76,296589	3,8928697	4	4	5	5	3	3	3	4	15,5
Pto 40	-76,293016	3,8899452	4	3	5	3	3	3	3	4	14
Pto 41	-76,30203	3,8946	5	5	5	5	5	5	4	4	19

Fuente: Elaboración propia

Después de la evaluación se descartaron los puntos (Punto 3, Punto 6, Punto 11, Punto 13, Punto 14, Punto 26, Punto 35, Punto 37), debido a que obtuvieron una valoración final igual o inferior a los 12 puntos, quedando así con un total de 33 puntos candidatos para la localización de estaciones de bicicleta.

Para obtener la demanda de los barrios se mapeo a la ciudad de Guadalajara de Buga, dicho mapa se delimito por los barrios y urbanizaciones de la ciudad, mediante la aplicación web My Maps⁵, obteniendo así el mapa de la *Ilustración 3*.

Ilustración 3: Mapeo de barrios y urbanizaciones en Guadalajara de Buga.



Fuente: Elaboración propia.

Después de mapear los barrios, se procedió a definir la capacidad de las estaciones de bicicleta, para ello se exporto el mapa elaborado en My Maps a la aplicación de ArcGIS Pro⁶, para conocer así el área total abarcada por todos los barrios Mapeados de la ciudad, dando así un resultado de 6,6 Km² y se estima que la proporción de personas que habitan la zona urbana de Guadalajara de buga son el 85,4% en base a datos del Anuario estadístico de Guadalajara de Buga (Anuario Estadístico, 2023), por lo que para el año 2024, se estimó una población de 113.296 habitantes, lo que daría una densidad poblacional aproximada de 17,282 Personas/ Km².

⁵ My Maps: https://www.google.com/intl/es-419_co/maps/about/mymaps/

⁶ ArcGIS Pr: <https://www.arcgis.com/index.html>

Posteriormente se definió la distancian máxima para la cual se podría atender a la población y según las diversas fuentes consultadas en *Tabla 2* y la Guía de Sistema de Bicicletas Compartidas (Ministerio de transporte, 2022) sugieren una distancia entre 250 y 500 metros, por lo que para este trabajo se optó por definir una distancia de 400 metros de cobertura, a su vez se recomienda que la distancia mínima entre estaciones sea de entre 300 y 400 metros (Morosi Tierno, 2018), por lo que se definió en 300 metros.

Posteriormente, se definió la capacidad máxima de demanda que podría atender cada estación, la cual se estimó por medio de la densidad poblacional y el área de cobertura como se recomienda en la Guía de Sistema de Bicicletas Compartidas (Ministerio de transporte, 2022) y el Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo (Yanocha et al., 2018), A partir de estas recomendaciones y considerando las características demográficas de Guadalajara de Buga, se definió una estimación promedio de habitantes por kilómetro cuadrado, y se calculó cuántas personas podrían encontrarse, en promedio, dentro del área de influencia de una estación, la cual sería de 300 metros debido a que es la distancia que se definió para este trabajo como máxima entre estaciones, obteniendo así la siguiente ecuación:

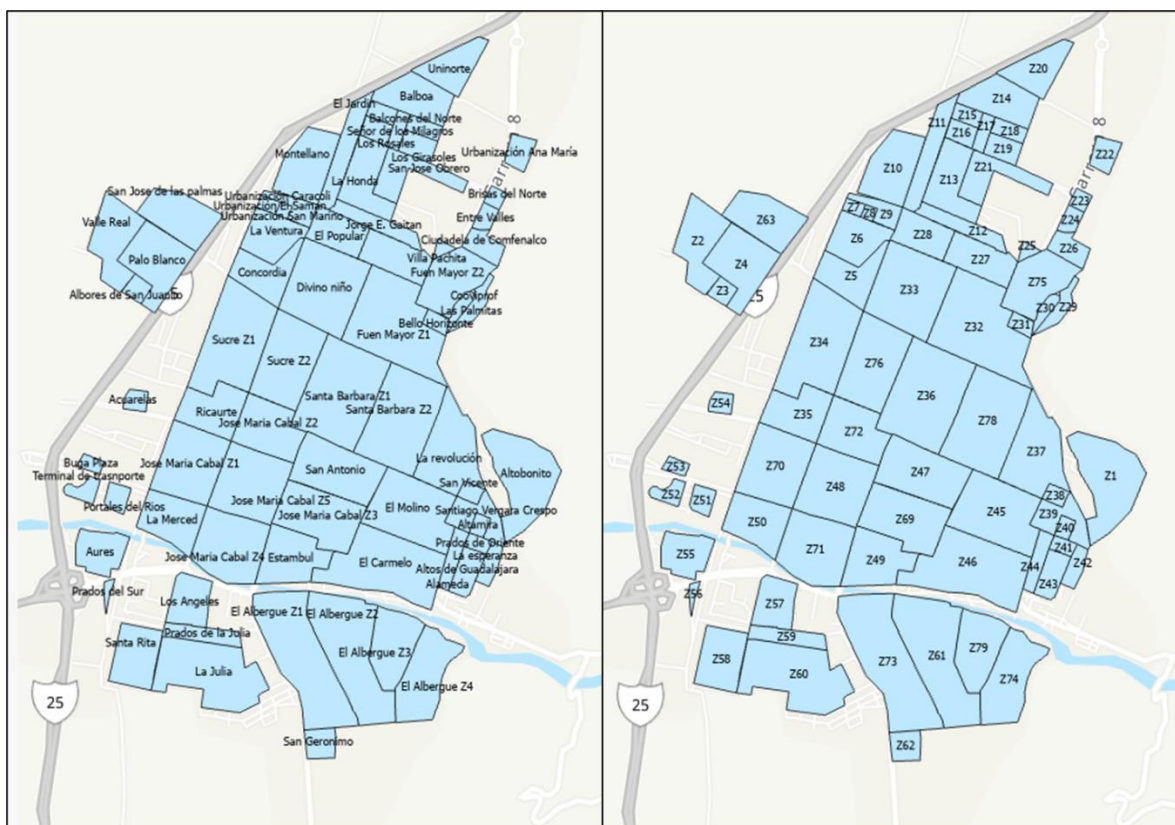
Ecuación 4: Capacidad por Estación

$$\text{Capacidad por estación} = \text{Densidad poblacional} * \pi r^2 \quad (4)$$

La *Ecuación 4* da como resultado 4858 habitantes dentro del área de influencia de la estación, el cual llevó a establecer un valor referencial de 5.000 habitantes como capacidad máxima por estación.

Luego se procedió a estimar la población de cada barrio mediante la densidad poblacional y el área de cada barrio, haciendo esto se evidencio que habían barrios que su población era mayor a la capacidad de cada estación, por lo que se dividieron algunos de forma que el modelo los pudiese tomar en consideración para la localización de las estaciones de bicicletas, los barrios que se dividieron fueron el Fuen Mayor, Sucre, Santa Barbara, José María Cabal y el Albergue, esta división se realizó mediante ArcGis Pro y a su vez se codificaron los barrios para que se vieran con mayor claridad en el mapa, como se observa en Ilustración 4, después de esto, se obtuvieron las nuevas áreas del mapa, con las cuales se logró estimar la demanda de cada barrio, para ver cada codificación correspondiente y la cantidad de habitantes por barrio ver el (*ANEXO 10. Área estimada y habitantes por barrio*). Por otra parte, para la estimación de los visitantes a través de la terminal de transporte se consultó el promedio de personas diarios que llegaron en el 2024, este dato se obtuvo del Portal logístico de Colombia (Ministerio de Transporte, 2025).

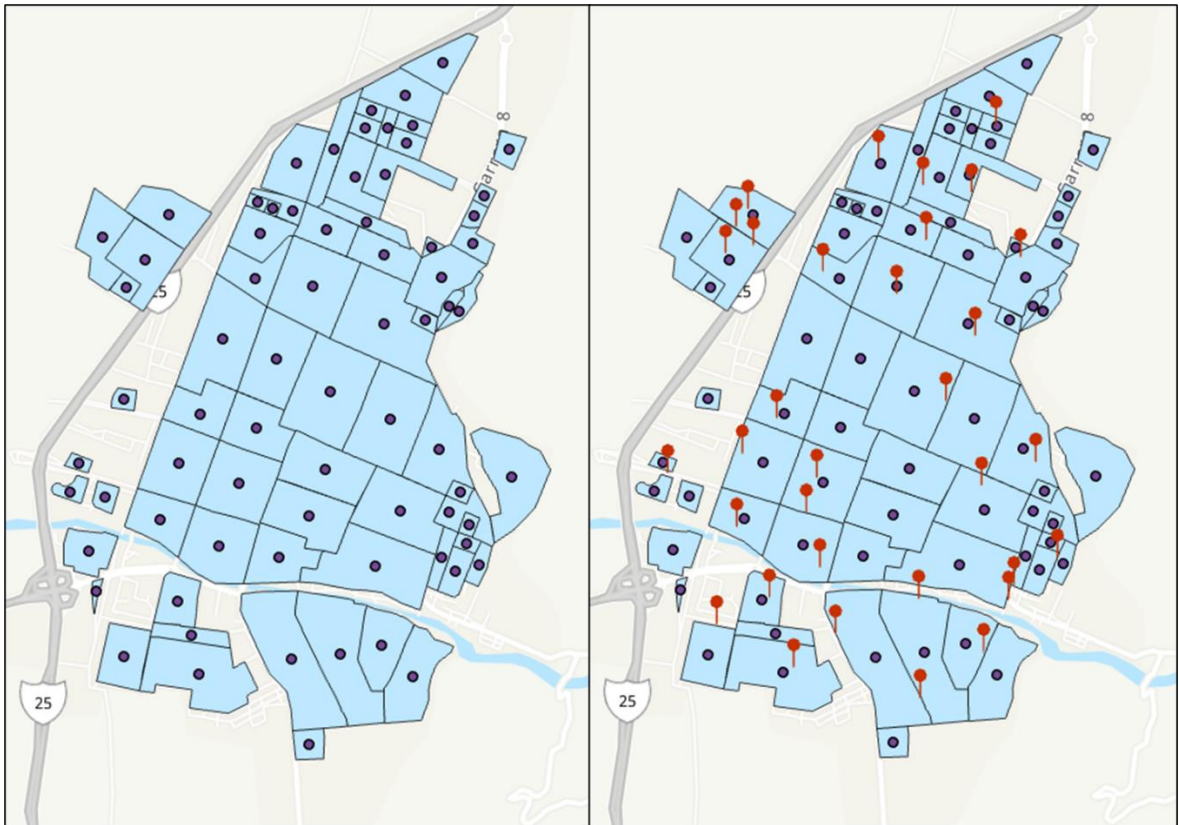
Ilustración 4: División de barrios y codificación



Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente se calculó el centroide de cada barrio que será la referencia para la matriz de distancias entre barrios y estaciones, y se ubicaron las estaciones candidatas en el mapa como se observa en la *Ilustración 5*, que también servirán para la matriz anteriormente mencionada y la matriz de distancias entre estaciones de bicicletas.

Ilustración 5: Ubicación de los centroides de los barrios y estaciones candidatas



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, se determinó la cantidad de estaciones máximas que el modelo podría abrir, se calculó mediante la demanda potencial para el sistema la cual fue 72.360 habitantes, divididos sobre la capacidad por cada estación que se estimó como 5000 personas, dando como resultado aproximadamente 15 estaciones, por lo cual este será el máximo de estaciones que se podrán abrir. Luego, se procedió a construir la matriz de distancias entre barrios y estaciones de bicicletas, y la matriz de distancias entre estaciones de bicicleta, como se ven en el (*ANEXO 11. Matriz de distancias de centroides a puntos candidatos*) y en el (*ANEXO 12. Matriz de distancias entre puntos candidatos*) respectivamente, para el cálculo de las distancias se consideraron distancias euclidianas debido a que en áreas urbanas con altos números de calles e intersecciones las distancias euclidianas no difieren mucho de las de línea recta, por lo que se toma como válida esta simplificación (Morosi Tierno, 2018), y para hacer el cálculo de estas se hicieron mediante la *Ecuación 5: Formula de Haversine*.

Ecuación 5: Formula de Haversine

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (4)$$

Donde ϕ representa la latitud en radianes y λ representa la longitud en radianes, por lo que para trasladar esas coordenadas a radianes se hizo mediante al formula de Excel “RADIANES”, y así se lograron crear las matrices de distancias para el modelo matemático.

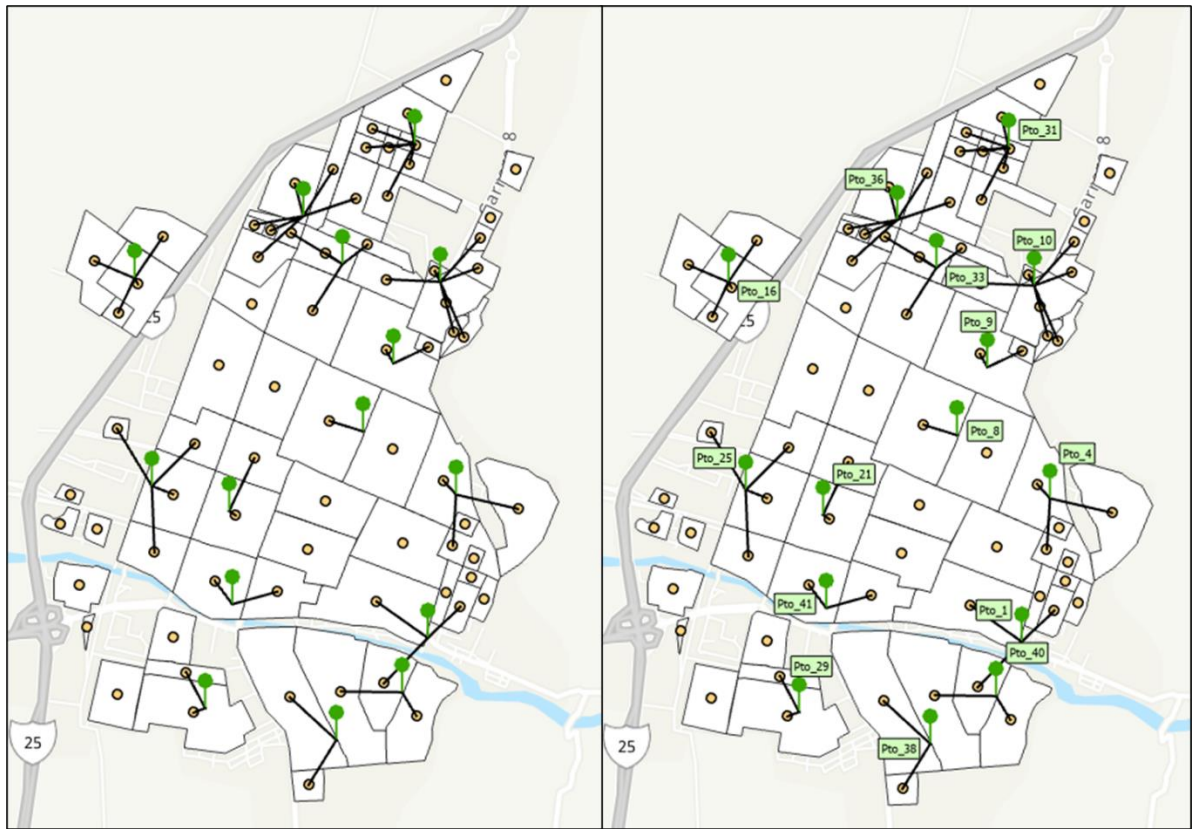
7.3 Resultados del modelo de localización.

Para dar solución a este modelo se realizó mediante la aplicación de AMPL IDLE⁷ la cual es un lenguaje de alto nivel para describir y resolver problemas matemáticos de optimización, para ello se diseñaron 3 documentos, los cuales son el modelo, los datos y los comandos de solución, los cuales se pueden consultar en los (*ANEXO 13. Código del modelo matemático*) y (*ANEXO 14. Solucionador del modelo matemático y exportación de datos*), respectivamente.

Posteriormente al diseño del modelo y darle solución, se obtuvo los barrios que están siendo atendidos por las estaciones abiertas, la distancia entre el barrio y la estación, y por último la demanda atendida, la cual se puede ver en el (*ANEXO 15. Resultado del modelo*), en base a dicha tabla se mapearon los resultados obtenidos por el modelo en la *Ilustración 6*.

⁷ AMPL: <https://ampl.com/>

Ilustración 6: Resultados de asignación del modelo



Fuente: Elaboración propia.

En la *Ilustración 6* y en la tabla del (*ANEXO 15. Resultado del modelo*) se evidencia que una vez se dio solución al modelo, este determinó que se abrirían 15 estaciones de bicicletas, las cuales cubrirán a 51 barrios y/o Urbanizaciones, dando así una cobertura estimada de 61,072 usuarios potenciales, por lo cual, si se considera que el modelo se diseñó para 72,360 usuarios potenciales, se puede concluir que las localizaciones obtenidas lograrían dar cobertura a un 84,40% de los usuarios. Este resultado se alcanzó con base a las variables y parámetros establecidos, por lo cual se evaluarán diferentes escenarios para determinar cómo afecta el desarrollo y solución del modelo.

8. Escenarios

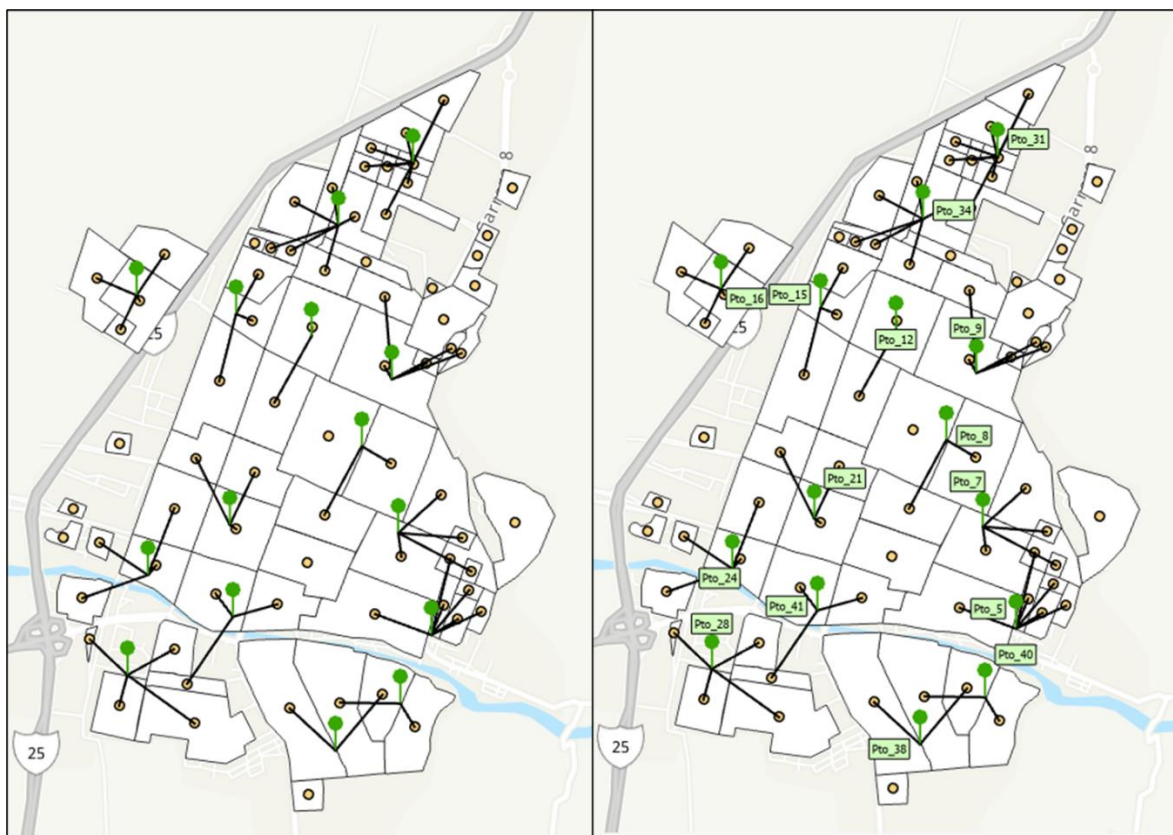
Para definir los escenarios se modificarán las variables que puedan variar en un contexto real como lo puede ser la variación de la cobertura de las estaciones de bicicletas y la demanda potencial (Aguirre Plaza & Cañas Rivera, 2024), por lo cual se presentan los siguientes escenarios:

8.1 Escenario 1

Para este escenario se plantea el incremento de la distancia de cobertura de las estaciones, que como se mencionó con anterioridad según revisiones de la literatura se establece entre los 250 y 500 metros, por lo cual se evaluara el modelo con una distancia de 500 metros que es la distancia máxima recomendable para el diseño de estos modelos (Ministerio de transporte, 2022), con el propósito de conocer qué tan sensible es el modelo a la variación de la distancia de cobertura.

El resultado del modelo con este cambio reveló que se podría brindar cobertura a 70,823 personas, lo que representa un porcentaje de 97,88% de cobertura sobre los usuarios potenciales determinados, Cubriendo un total de 58 barrios y/o urbanizaciones, como se observa en la Ilustración 7 y en el (ANEXO 16. Resultado del escenario 1).

Ilustración 7: Escenario 1



Fuente: Elaboración propia.

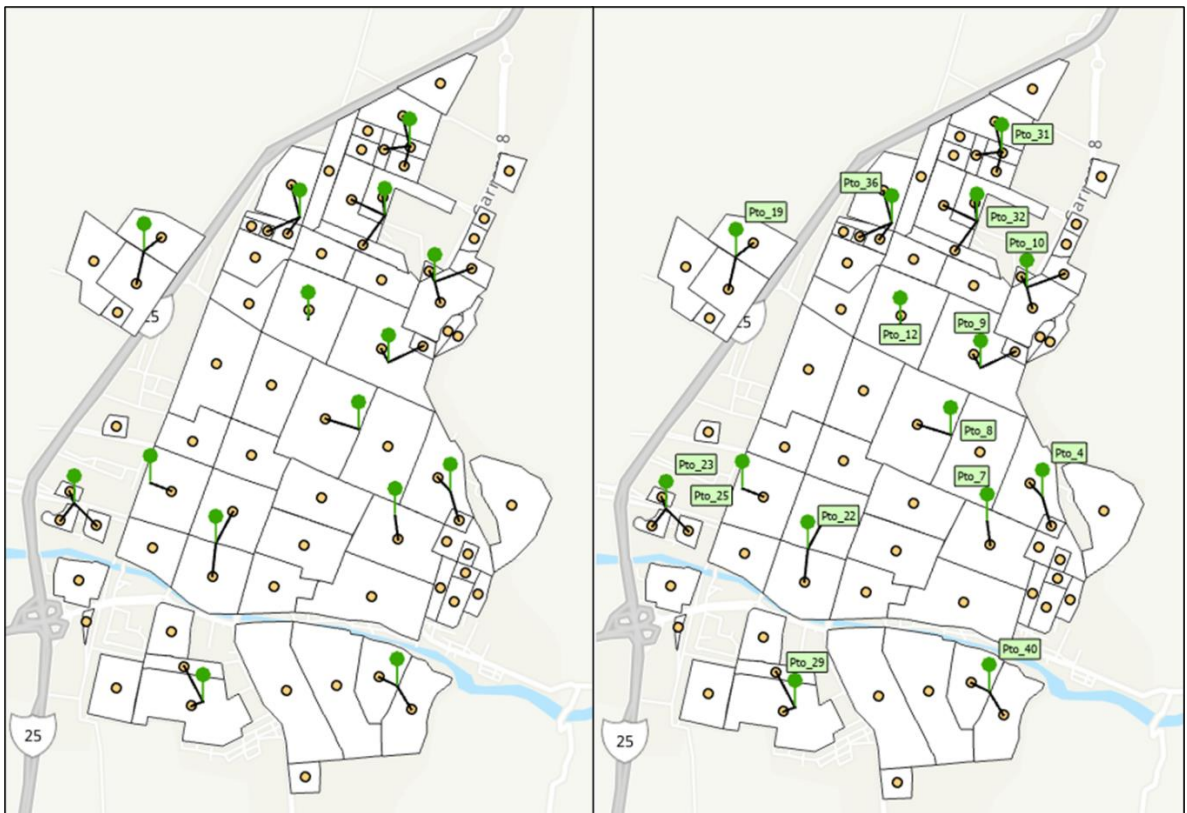
8.2 Escenario 2

Para el segundo escenario se planteó el efecto contrario al primer escenario, debido a que se reducirá la distancia de cobertura a la mínima recomendada según la revisión de la literatura, la cual es de 250 metros (Ministerio de transporte, 2022), esto debido a que, si una persona

se encuentra a menos de 250 metros de una estación, es dos veces más probable que se vuelva usuario del sistema, con relación a los usuarios que se encuentren más lejos (Morosi Tierno, 2018).

Se obtuvo que con esta distancia de cobertura el modelo lograría atender a 40,084 personas, por lo que representaría un porcentaje de cobertura de 55,40%, respecto a los usuarios potenciales definidos, cubriendo a 32 barrios con 15 estaciones de bicicletas abiertas, como se observa en la Ilustración 8 y en el (ANEXO 17. Resultado del escenario 2).

Ilustración 8: Escenario 2



Fuente: Elaboración propia.

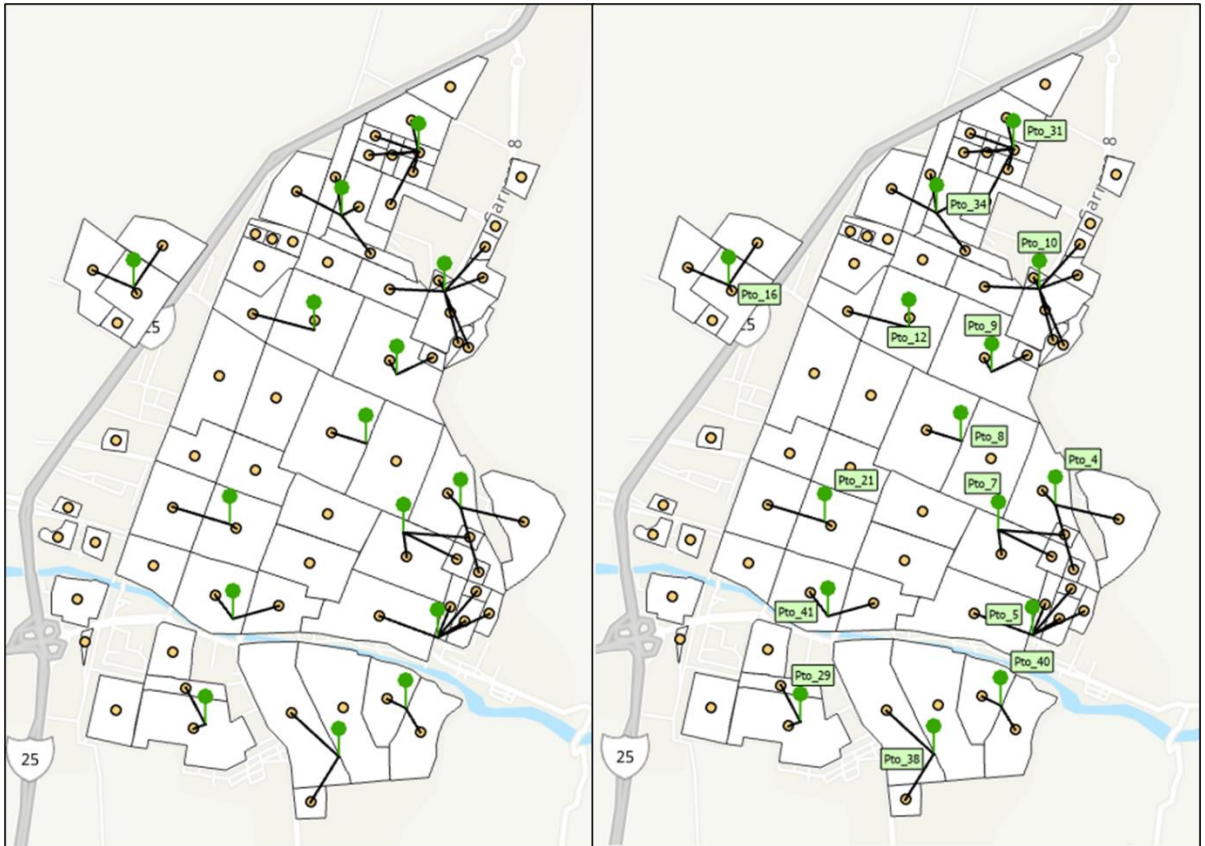
8.3 Escenario 3

Para el tercer escenario, se consideró la posibilidad de un aumento en la demanda potencial del sistema. Para ello, se incrementó en un 10% la demanda inicialmente estimada, con el objetivo de analizar cómo este crecimiento afectaría el comportamiento y desempeño del modelo de localización de estaciones.

Se obtuvo que se daría cobertura a 63,387 personas, lo cual se traduce en un porcentaje de cobertura del 77,18% respecto a la nueva demanda potencial y un 87,60% respecto a la originalmente estimada, atendiendo a 47 barrios y/o urbanizaciones con un total de 15

estaciones de bicicletas abiertas como se observa en la *Ilustración 9* y en el (ANEXO 18. Resultado del escenario 3).

Ilustración 9: Escenario 3



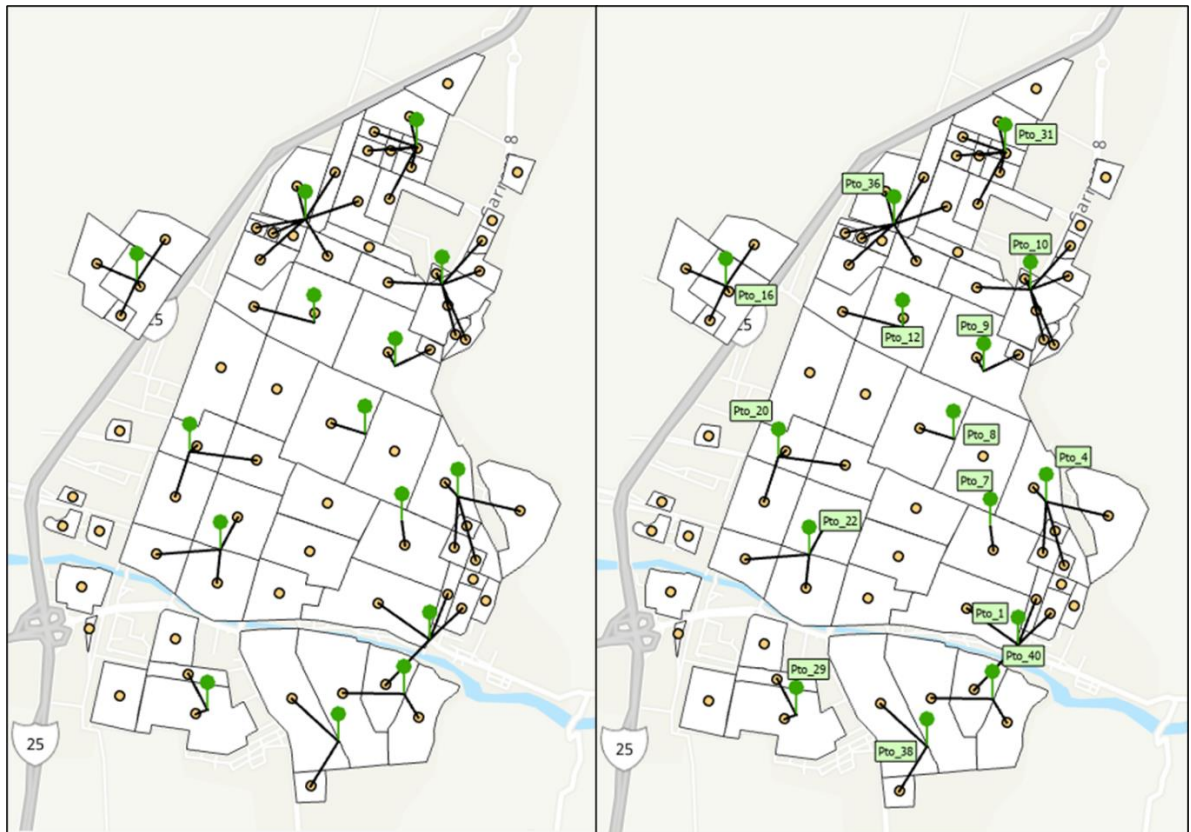
Fuente: Elaboración propia.

8.4 Escenario 4

Para el cuarto escenario, se contempló la posibilidad de una disminución en la demanda potencial del sistema. Para ello, se redujo en un 10% la demanda originalmente estimada, con el fin de analizar cómo se ve afectado el modelo ante una situación contraria a la planteada en el escenario anterior.

Se obtuvo que se daría cobertura a 54,019 personas, lo cual se traduce en un porcentaje de cobertura del 86,70% respecto a la nueva demanda potencial y un 74,65% respecto a la originalmente estimada, atendiendo a 52 barrios y/o urbanizaciones con un total de 15 estaciones de bicicletas abiertas como se observa en la *Ilustración 10* y en el (ANEXO 19. Resultado del escenario 4).

Ilustración 10: Escenario 4



Fuente: Elaboración propia.

8.5 Discusión de resultados y escenarios

Para generar la discusión de resultados se detalla la información en la *Tabla 5* donde se observa la comparación de los resultados del escenario inicial y los 4 escenarios alternativos, en la cual se evidencia que al aumentar la distancia de cobertura la demanda cubierta será mayor, debido a que las estaciones abarcaran más zonas, lo cual se ve reflejado en el escenario 1 con un porcentaje de 97,88% de cobertura, no obstante, esto puede ser contraproducente debido a que los usuarios más lejanos a las estaciones están menos predispuestos a hacer uso de ellas (Morosi Tierno, 2018).

Por otra parte, se evidencia que, al disminuir la distancia de cobertura, la demanda cubierta disminuirá, lo que implica que la demanda cubierta es proporcional a la distancia de cobertura, evidenciando así que el sistema es consistente, debido a que, al disminuir dicha distancia, el sistema abarcará menos zonas y menos población, como se observa en el escenario 2, en el cual se genera un porcentaje de cobertura del 55,40%.

Para los escenarios 3 y 4, en los cuales se modificó la demanda potencial estimada, se evidenció un comportamiento opuesto en los niveles de cobertura. En el escenario 3, el

aumento del 10% en la demanda provocó una disminución en el porcentaje de cobertura, alcanzando un 77,18%, debido a que el sistema debía cubrir una mayor cantidad de usuarios. Por el contrario, en el escenario 4, al reducirse en un 10% la demanda potencial, el sistema logró incrementar su porcentaje de cobertura respecto al nuevo total de usuarios potenciales.

Tabla 5: Comparación de escenarios

Escenarios	Distancia de cobertura (m)	Demanda	Barrios cubiertos	Demanda Cubierta	% Cobertura	Estaciones
Escenario inicial	400	73%	51	61072	84,40%	15
Escenario 1	500	73%	58	70823	97,88%	15
Escenario 2	250	73%	32	40084	55,40%	15
Escenario 3	400	83%	47	63387	77,18%	15
Escenario 4	400	63%	52	54019	86,70%	15

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación de escenarios demuestra que el modelo presenta un comportamiento consistente frente a los cambios en las variables y condiciones planteadas, manteniendo resultados coherentes y alineados con los objetivos del estudio. Al comparar los resultados de los escenarios alternativos con el escenario inicial, se observa que 8 de las 15 estaciones seleccionadas inicialmente se mantienen constantes con respecto al primer escenario. En los escenarios restantes, el número de coincidencias fue de 9, 11 y 11 estaciones, respectivamente como se puede observar en el (ANEXO 20. *Comparativa de estaciones abiertas*). Esto evidencia una alta estabilidad en las decisiones del modelo, lo cual refuerza su robustez ante variaciones en los parámetros de entrada.

9. Conclusiones

En este estudio se encontró que, el 73% de la población mayor de 18 años estaría dispuesta a utilizar un sistema de bicicletas compartidas, lo que se traduce en un estimado de 72.360 usuarios potenciales, lo que demuestra una alta aceptación del sistema, estos resultados permitieron avanzar a las siguientes etapas del trabajo.

Se investigaron diversos modelos de localización utilizados en estudios similares, lo que condujo a la selección del modelo cobertura “Maximum Covering Location Problem” (MCLP). Este modelo fue adaptado a las características específicas de Guadalajara de Buga y a los requerimientos específicos del trabajo, convirtiéndose en la base para el desarrollo del modelo de localización final. A partir de una preselección de 41 puntos estratégicos, los cuales al ser evaluados bajo múltiples criterios extraídos de la literatura se determinó continuar con 33 puntos candidatos para el modelo, el cual dio lugar a la apertura de 15 estaciones de bicicletas, las cuales permitirían cubrir 61.072 personas distribuidas en 51 barrios, lo que representa una cobertura del 84,40% respecto a la demanda potencial, por lo que se podría decir que el modelo es capaz de adaptarse a la realidad de la ciudad siendo replicable en contextos futuros para la misma.

Se llevó a cabo una simulación de escenarios alternativos con el fin de evaluar la consistencia del modelo frente a variaciones en algunos de sus parámetros clave, específicamente la distancia de cobertura y la demanda potencial, los resultados obtenidos evidencian que el modelo mantiene un comportamiento estable y coherente, sin desviaciones significativas respecto al escenario inicial, lo que refuerza su robustez y aplicabilidad práctica en la planificación de un sistema de bicicletas compartidas para la ciudad.

Por último, se recomienda que en futuras aplicaciones de esta metodología se profundice en el proceso de preselección y evaluación de estaciones candidatas, idealmente con el acompañamiento de profesionales especializados en planeación urbana o sistema de transporte con el fin de garantizar una mayor precisión en los resultados obtenidos. Asimismo, se sugiere que investigaciones posteriores consideren la estimación del número óptimo de bicicletas por estación como un parámetro adicional, ya que este factor podría influir significativamente en los niveles de cobertura del sistema de bicicletas compartidas.

Referencias

- Aguirre Plaza, K. D., & Cañas Rivera, L. M. (2024). *Propuesta de configuración de red para la disposición de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) en la ciudad de buga*.
- Anuario Estadístico. (2023). *ANUARIO ESTADÍSTICO DE GUADALAJARA DE BUGA 2022*.
- Arenales, J. V. (2023). *El alza en los precios de la gasolina podría impactar solo al transporte de última milla*. <https://www.larepublica.co/economia/el-alza-en-los-precios-de-la-gasolina-podria-impactar-solo-al-transporte-de-ultima-milla-3534823>
- Bencardino, C. M. (2012). *Décima tercera edición Estadística y muestreo*. www.FreeLibros.org
- Cámara de comercio Buga. (2023). *Buga, primer lugar en índice de competitividad turística 2023 - CCBuga*. <https://www.ccbuga.org.co/buga-primer-lugar-en-indice-de-competitividad-turistica-2023/>
- Cámara de comercio Buga. (2024). *Buga ahora forma parte de la Red Mundial de Turismo Religioso - CCBuga*. <https://www.ccbuga.org.co/buga-ahora-forma-parte-de-la-red-mundial-de-turismo-religioso/>
- Carro Paz, R., & González Gómez, D. (2012). *LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES. Universidad Nacional de Mar Del Plata*.
- Castellanos Guerrero, D. A. (2016). *MODELO MCLP: CONSIDERACIONES A MÚLTIPLES COBERTURAS*.
- Centro de Diagnóstico de Automotor del Valle Ltda. (2016). *APÉNDICE F-CRITERIOS DE DISEÑO PARA BICI-CARRILES*.
- COLPRENSA. (2011). *Mototaxismo: ¿Un problema de inseguridad?* <https://www.eluniversal.com.co/suplementos/facetas/2011/09/25/mototaxismo-un-problema-de-inseguridad/>
- DANE. (2022). *La información del DANE en la toma de decisiones regionales Cali-Buga-Valle del Cauca*.
- DANE. (2023). *DANE - Proyecciones de población*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- Ecopetrol. (2024). *GLP y Combustibles Líquidos*. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/multisitios/comercial/es/precios/precios>

os-historicos/glp-combustibles-liquidos!/ut/p/z1/nZJda4MwFIZ_Sy-8nDIJpI27S5yldh9W6YfNzdDhUsGaYt1k_35CGSyjWNm5S3ieczhvgiRKkayzz1Jlb anrrOrPezl9jfiCYeZAxAhjELsrb0b9UIA7QzsTCLzHOcQLOt-stzQQiYPkGP-FTD0cOnjF1sKH2F-69On5AbjA43wwioNliKAAQUT-4__uNM4fAORw-x2SgyOw8xcwI04IGQb6KG4BPyOGXuHKHmbMtxZdIqkqnV_-FK9zyhSSTfFeNEVjFzT99aFtT-d7Cyzous5WWquqsN_00YJrykGfW5SaJDodN32lUIZleCfzr45PJt9seQ7O/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/

Grupo de Asuntos Ambientales y Desarrollo Sostenible. (n.d.). Programa Nacional de Bicicletas Compartidas Grupo de Asuntos Ambientales y Desarrollo Sostenible Ministerio de Transporte. *Ministerio de Transporte*.

Guerrero Galvis, R. A., & Martinez Reyes, D. A. (2017). *BICICLETA, BICIUSUARIO, CICLOESTACIÓN, SBP, LOGÍSTICA*.

Hull, A., & O'Holleran, C. (2014). Bicycle infrastructure: can good design encourage cycling? *Urban, Planning and Transport Research*, 2(1), 369–406. <https://doi.org/10.1080/21650020.2014.955210>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Guía metodológica para la implantación de sistemas de bicicletas públicas en España Guía metodológica para la implantación de sistemas de bicicletas públicas en España E F I C I E N C I A Y A H O R R O E N E R G É T I C O*.

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>

López Guzmán, Ó. D., Otavo Pajarito, J. C., Rolón Amaya, A. F., & Suarez Sandoval, J. S. (2019). Trabajo de grado bicicletas javeriana. *Pontificia Universidad Javeriana*.

Martínez-Ángel, J. D. (2018). Motorized mobility, environmental impact, alternatives and future prospects: Considerations for the área metropolitana del valle de aburrá. *Revista de Salud Publica*, 20(1), 126–131. <https://doi.org/10.15446/rsap.V20n1.57038>

Ministerio de transporte. (2022). *Guía Bicicleta Compartida*.

Ministerio de Transporte. (2025). *Operación en las terminales de transporte*. <https://plc.mintransporte.gov.co/Estad%C3%ADsticas/Pasajeros-Modo-terrestre/Operaci%C3%B3n-en-las-terminales-de-transporte>

Mix, R., Hurtubia, R., & Raveau, S. (2022). Optimal location of bike-sharing stations: A built environment and accessibility approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 160, 126–142. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2022.03.022>

- Morosi Tierno, V. (2018a). *Diseño de una red de bicicletas públicas en la ciudad de Montevideo - Uruguay*.
- Morosi Tierno, V. (2018b). *Diseño de una red de bicicletas públicas en la ciudad de Montevideo - Uruguay*.
- Observatorio Ambiental de Bogotá. (2017). *Motos, las que más producen emisiones de CO2* » Observatorio Ambiental de Bogotá. <https://oab.ambientebogota.gov.co/motos-las-que-mas-producen-emisiones-de-co2/>
- Observatorio de servicios urbanos [OSUR]. (2017). *Contaminación y transporte público - OSUR*. <https://www.osur.es/2017/03/27/contaminacion-y-transporte-publico/>
- Observatorio empresarial y económico de Buga (OEEB). (2023). *SEGUNDO-BOLETIN-SOCIOECONOMICO-2023*. <https://www.ccbuga.org.co/wp-content/uploads/2023/12/Boletin-socioeconomico-Guadalajara-de-Buga-y-su-area-de-Influencia-2023.pdf>
- Red turística de pueblos patrimonio. (2024). *Guadalajara de Buga | RED TURÍSTICA DE PUEBLOS PATRIMONIO*. <https://redturisticadepueblospatrimonio.com.co/es/pueblos/guadalajara-de-buga>
- Sanmiguel-Rodríguez, A. (2023a). Barriers and incentives for mobility in a bike-sharing system in a Spanish municipality. *MHSalud*, 20(2), 1–13. <https://doi.org/10.15359/mhs.20-2.6>
- Sanmiguel-Rodríguez, A. (2023b). Barriers and incentives for mobility in a bike-sharing system in a Spanish municipality. *MHSalud*, 20(2), 1–13. <https://doi.org/10.15359/mhs.20-2.6>
- Universidad de la Costa. (2024). *Aumento del precio de la gasolina en Colombia: causas y consecuencias* | Blog CUC. <https://virtual.cuc.edu.co/blog/aumento-precio-gasolina-colombia>
- Vanesa, L., Espitia, C., Lorena, Í., & Capador, P. (2018). *Diseño de un modelo de macro-localización de plataformas para bicicletas de servicio público en la ciudad de Bogotá. Caso de estudio zona centro*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_industrial
- Yanocha, D., Mason, J., Patlán, M., Benicchio, T., & Alfred, I. (2018). *Guía de planeación del sistema de bicicletas compartidas*.

10. Anexos

ANEXO 1. Encuesta piloto

1. ¿Con que genero se identifica?
 - ☐ Hombre.
 - ☐ Mujer.
2. ¿Cuál es su rango de edad?
 - ☐ Menor de 18 Años.
 - ☐ De 18 a 25 Años.
 - ☐ De 25 a 35 Años.
 - ☐ De 35 a 45 Años.
 - ☐ De 45 a 60 Años.
 - ☐ Más de 60 Años.
3. ¿Cuál es su ocupación?
 - ☐ Estudiante.
 - ☐ Trabajador.
 - ☐ Independiente.
 - ☐ Se dedica al hogar.
4. ¿Cuál es su estrato socioeconómico?
 - ☐ Estrato 1.
 - ☐ Estrato 2.
 - ☐ Estrato 3.
 - ☐ Estrato 4.
 - ☐ Estrato 5.
 - ☐ Estrato 6.
5. ¿Cuenta usted con alguna condición de discapacidad o movilidad reducida?
 - ☐ Si.
 - ☐ No.
6. ¿Qué medio de transporte utiliza usted en su día a día?
 - ☐ Camina.
 - ☐ Bicicleta.
 - ☐ Camina y bicicleta.
 - ☐ Bus.
 - ☐ Taxi.
 - ☐ Motocicleta propia.
 - ☐ Motocicleta particular.
 - ☐ Carro propio.
 - ☐ Carro particular.
 - ☐ Otro.

7. ¿Con que motivo principalmente se moviliza usted en el interior de la ciudad?
- ☐ Estudio.
 - ☐ Ocio o recreación.
 - ☐ Trabajo.
 - ☐ Turismo.
 - ☐ Diligencias.
 - ☐ Compras.
8. ¿Qué factores considera usted más importante para elegir su método de transporte?
- ☐ Costo.
 - ☐ Seguridad.
 - ☐ Velocidad.
 - ☐ Disponibilidad (24 Horas).
 - ☐ Actividad Física.
9. De existir un sistema de bicicletas compartidas en la ciudad, ¿estaría usted dispuesto a utilizarlo para moverse?
- ☐ Si.
 - ☐ No.

Si su respuesta a la pregunta 9. fue "Si" por favor responda las siguientes preguntas a conciencia.

10. ¿Con que frecuencia se moviliza o realiza viajes en el interior de la ciudad al día?
- ☐ Solo se desplaza de forma ocasional o no a diario.
 - ☐ 1 a 2.
 - ☐ 2 a 3.
 - ☐ 4 o más.
11. ¿Cuándo se moviliza normalmente cual suele ser el barrio o lugar de ORIGEN de su viaje?
- Respuesta abierta:
12. ¿Cuándo se moviliza normalmente cual suele ser el barrio o lugar de DESTINO de su viaje?
- Respuesta abierta:

Si su respuesta a la pregunta 9. fue "No" por favor responda las siguientes preguntas a conciencia.

13. ¿Por qué razón no le gustaría utilizar este sistema de movilidad?

- ☐ No le gusta utilizar bicicleta.
- ☐ Le parece inseguro.
- ☐ Ya cuenta con transporte propio.
- ☐ Prefiero utilizar otro medio de transporte
- ☐ Otros: _____.

ANEXO 2. Encuesta final

1. ¿Con que genero se identifica?

- ☐ Hombre.
- ☐ Mujer.
- ☐ Prefiero no decirlo.

2. ¿Cuál es su rango de edad?

- ☐ Menor de 18 Años.
- ☐ De 18 a 25 Años.
- ☐ De 26 a 35 Años.
- ☐ De 36 a 45 Años.
- ☐ De 46 a 55 Años.
- ☐ De 56 a 65 Años
- ☐ Más de 65 Años.

3. ¿Cuál es su ocupación?

- ☐ Estudiante.
- ☐ Trabajador.
- ☐ Independiente.
- ☐ Se dedica al hogar.

4. ¿Cuál es su estrato socioeconómico?

- ☐ Estrato 1.
- ☐ Estrato 2.
- ☐ Estrato 3.
- ☐ Estrato 4.
- ☐ Estrato 5.
- ☐ Estrato 6.

5. ¿Cuenta usted con alguna condición de discapacidad o movilidad reducida?

- ☐ Si.
- ☐ No.

6. ¿Qué medio de transporte utiliza usted en su día a día?

- ☐ Camina.
- ☐ Bicicleta.
- ☐ Bus.
- ☐ Taxi.
- ☐ Motocicleta propia.
- ☐ Servicio de moto (Mototaxi o similares).
- ☐ Carro propio.
- ☐ Servicio de carro (Uber, Didi o similares).
- ☐ Otro.

7. ¿Con que motivo principalmente se moviliza usted en el interior de la ciudad?

- ☐ Estudio.
- ☐ Ocio o recreación.
- ☐ Trabajo.
- ☐ Turismo.
- ☐ Diligencias.
- ☐ Compras.

8. ¿Qué factores considera usted más importante para elegir su método de transporte?

- ☐ Menor costo.
- ☐ Seguridad.
- ☐ Velocidad de desplazamiento.
- ☐ Disponibilidad (24 Horas).
- ☐ Actividad Física.

9. De existir un sistema de bicicletas compartidas en la ciudad, ¿estaría usted dispuesto a utilizarlo para movilizarse?

- ☐ Si.
- ☐ No.

Si su respuesta a la pregunta 9. fue "Si" por favor responda las siguientes preguntas a conciencia.

10. ¿Con que frecuencia se moviliza o realiza viajes en el interior de la ciudad al día?

- ☐ Solo se desplaza de forma ocasional o no a diario.
- ☐ 2 o menos veces.

- ☐ Entre 3 y 4.
- ☐ Entre 4 y 5.
- ☐ Entre 6 y 7
- ☐ Más de 7.

11. ¿Cuándo se moviliza normalmente cual suele ser el barrio o lugar de ORIGEN de su viaje?

Respuesta abierta:

12. ¿Cuándo se moviliza normalmente cual suele ser el barrio o lugar de DESTINO de su viaje?

Respuesta abierta:

Si su respuesta a la pregunta 9. fue "No" por favor responda las siguientes preguntas a conciencia.

13. ¿Por qué razón no le gustaría utilizar este sistema de movilidad?

- ☐ No le gusta utilizar bicicleta.
- ☐ Le parece inseguro.
- ☐ Ya cuenta con transporte propio.
- ☐ Prefiero utilizar otro medio de transporte.
- ☐ No sabe utilizar la bicicleta.
- ☐ Otros: _____.

ANEXO 3. Material fotográfico encuesta física

Un sistema de bicicletas compartidas es un servicio público o privado que permite a las personas alquilar bicicletas por períodos cortos de tiempo. Estos sistemas suelen estar ubicados en áreas urbanas y consisten en estaciones donde las bicicletas están disponibles para ser recogidas y devueltas.

Los usuarios pueden registrarse en el sistema, ya sea a través de una aplicación móvil, una tarjeta de miembro o en la estación misma. Una vez registrado, el usuario puede tomar una bicicleta de una estación, usarla para desplazarse y luego devolverla en cualquier otra estación del sistema. Estos sistemas están diseñados para facilitar la movilidad en las ciudades, reducir la congestión vehicular y promover un estilo de vida saludable y ecológico.

1. ¿Con qué género se identifica?

☐ Hombre

☐ Mujer

☐ Prefiero no decirlo

2. ¿Cuál es su rango de edad?

☐ Menor de 18 Años

☐ De 18 a 25 Años

☐ De 26 a 35 Años

☐ De 36 a 45 Años

☐ De 46 a 55 Años

☐ De 56 a 65 Años

☐ Más de 65 Años

3. ¿Cuál es su principal ocupación?

☐ Estudiante

☐ Trabajador

☐ Independiente

☐ Se dedica al hogar

4. ¿Cuál es su estrato socioeconómico?

☐ 1

☐ 2

☐ 3

☐ 4

☐ 5

☐ 6

5. ¿Cuenta usted con alguna condición de discapacidad o movilidad reducida?

☐ Sí

☐ No

6. ¿Cuál es el medio de transporte que más utiliza usted en su día a día?

☐ Camina

☐ Bicicleta

☐ Bus

☐ Taxi

☐ Motocicleta propia

☐ Servicio de moto (Mototaxi o similares)

☐ Carro propio

☐ Servicio de carro (Uber, Didi o similares)

☐ Otro

7. ¿Con qué motivo principalmente se moviliza usted en el interior de la ciudad?

☐ Estudio

☐ Ocio o recreación

☐ Trabajo

☐ Turismo

☐ Diligencias

☐ Compras

8. ¿Qué factores considera usted más importante para elegir su método de transporte?

☐ Menor costo

☐ Seguridad

☐ Velocidad de desplazamiento

☐ Disponibilidad (24 Horas)

☐ Actividad Física

9. De existir un sistema de bicicletas compartidas en la ciudad, ¿estaría usted dispuesto a utilizarlo para movilizarse?

Por favor responder esta pregunta con total sinceridad.

☐ Sí

☐ No

Si la respuesta a la pregunta 9 fue "Sí":

¿Con qué frecuencia se moviliza o realiza viajes en el interior de la ciudad al día?

☐ Solo se desplaza de forma ocasional o uno al día

☐ 2 o menos veces

☐ Entre 3 y 4

☐ Entre 4 y 5

☐ Entre 6 y 7

☐ Más de 7

¿Cuándo se moviliza normalmente, cuál suele ser el barrio o lugar de ORIGEN de su viaje?

¿Cuándo se moviliza normalmente, cuál suele ser el barrio o lugar de DESTINO de su viaje?

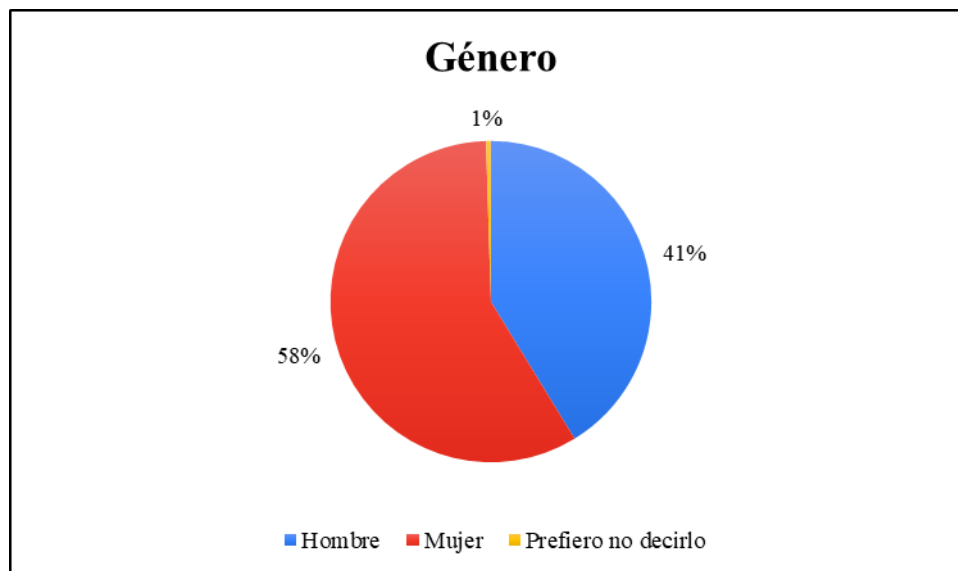
Si la respuesta a la pregunta 9 fue "No":

¿Por qué razón no le gustaría utilizar este sistema de movilidad?

- ☐ No le gusta utilizar bicicleta.
- ☐ Le parece inseguro.
- ☐ Ya cuenta con transporte propio.
- ☐ Prefiere utilizar otro medio de transporte.
- ☐ No sabe utilizar la bicicleta.
- ☐ Otros: _____

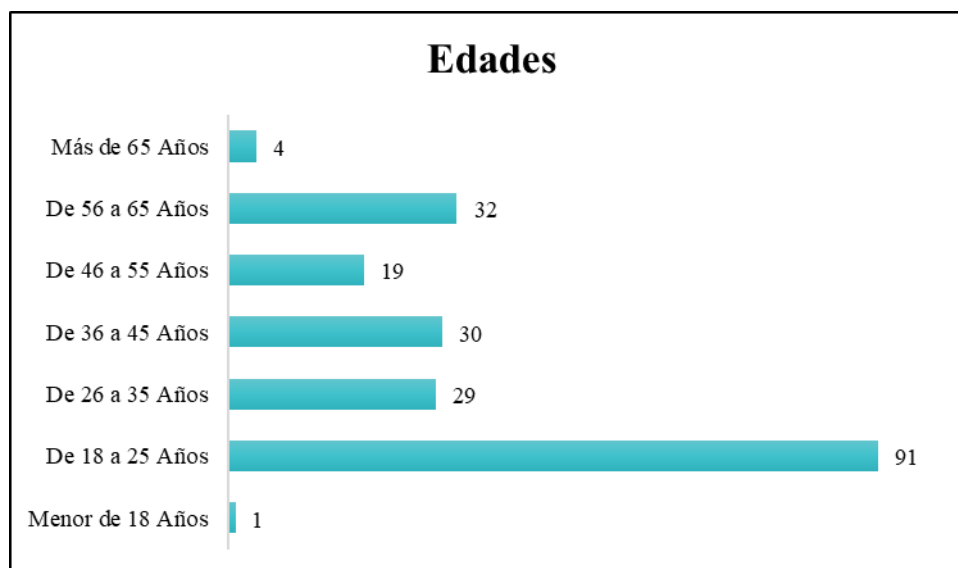


ANEXO 4. Género de los encuestados



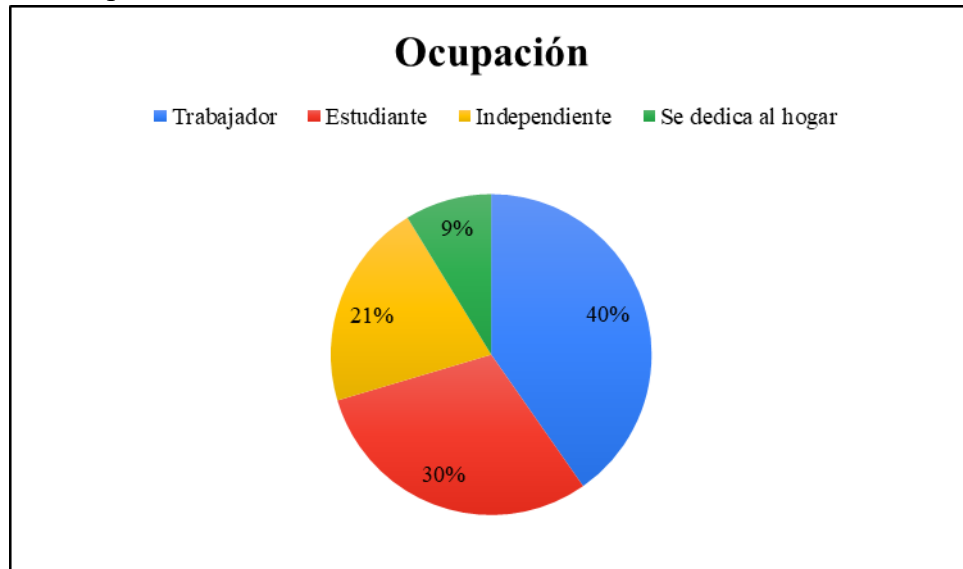
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5. Edad de los encuestados



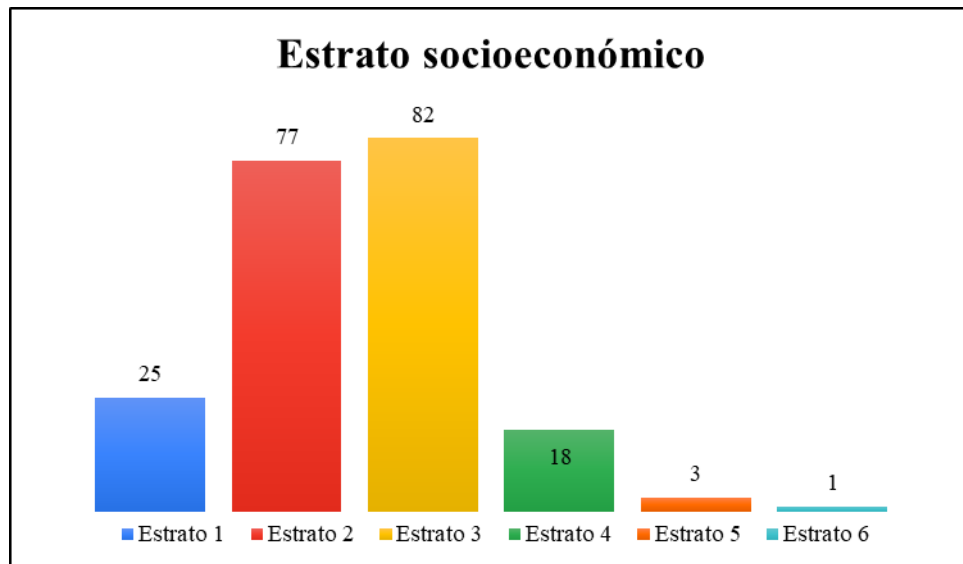
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 6. Ocupación de los encuestados



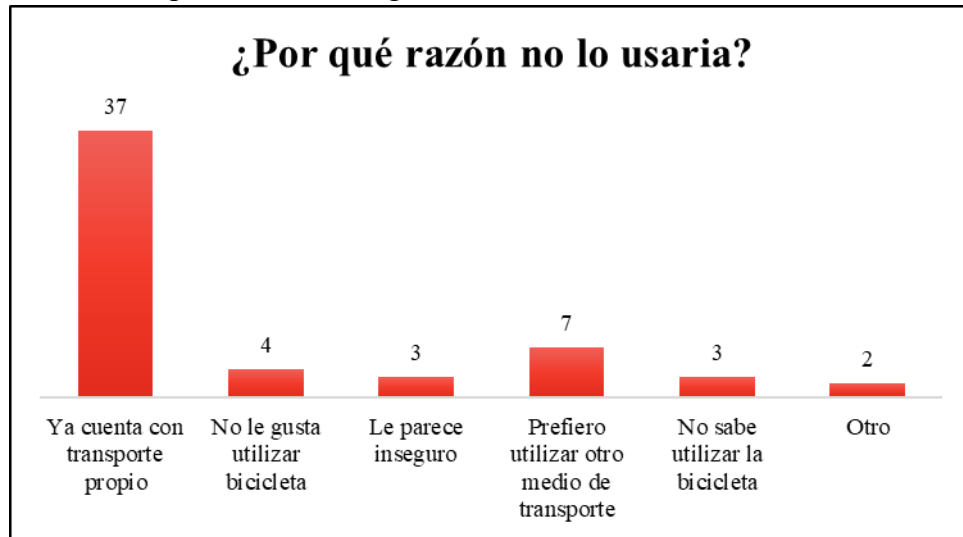
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 7. Estrato socioeconómico de los encuestados



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 8. Razones por la cual se niegan a utilizar el sistema

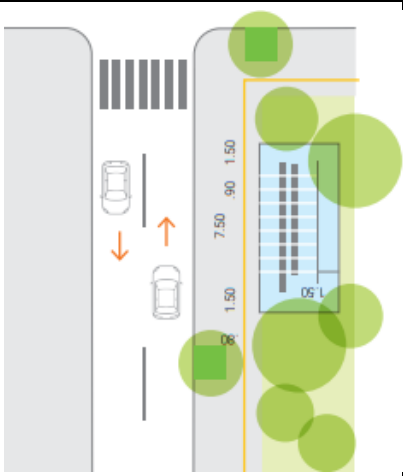
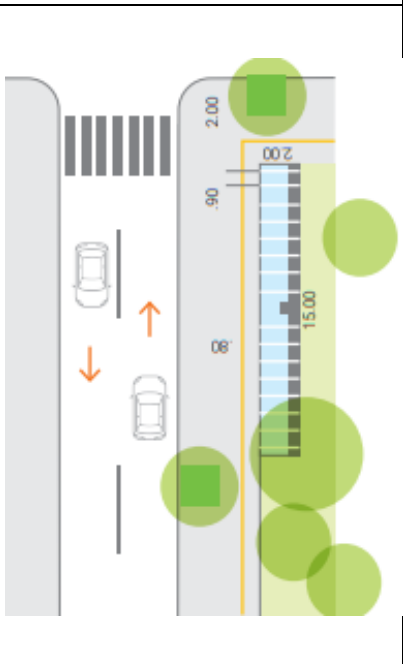


Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9. Tipología y dimensiones de estaciones

Tipología	Ubicación	Descripción	Dimensiones
Calzada	Cercanía a la esquina	La ubicación de la estación debe hacerse a 5.00 m de la intersección para garantizar la seguridad de las personas en bicicleta que salen de la estación. Esta tipología es recomendada en vías unidireccionales que permitan a las personas en bicicleta acceder a ella de manera más fácil y segura, evitando que realicen trayectos en contravía.	
	Zona de estacionamiento	Si la ubicación de la estación es en calzada o en lugares de estacionamiento vehicular, ya sea de manera regulada o permitida, se debe tener en cuenta la disposición de elementos de alerta y dejar un mínimo de 1.00 m de distancia entre la estación y el espacio vehicular.	

Andén	Franja de amoblamiento	La ubicación de la estación debe hacerse a 5.00 m de la intersección para garantizar la seguridad de las personas en bicicleta que salen de la estación. Esta tipología es recomendada en vías unidireccionales que permitan a las personas en bicicleta acceder a ella de manera más fácil y segura, evitando que realicen trayectos en contravía.	
	Antejardín	Si la ubicación de la estación es en calzada o en lugares de estacionamiento vehicular, ya sea de manera regulada o permitida, se debe tener en cuenta la disposición de elementos de alerta y dejar un mínimo de 1.00 m de distancia entre la estación y el espacio vehicular.	

Parques o plazas	Zonas verdes entre arboles	La ubicación en zonas verdes puede requerir de mayores adecuaciones e implicar un mayor costo, se recomienda buscar espacios más cercanos a la calzada que permitan un mejor acceso a personas a pie y en bicicleta.	
	Franja de amoblamiento en parques	Cuando las estaciones se ubiquen en parques, plazas o plazoletas y no se requiera ubicarlas entre los árboles sino en la franja de amoblamiento, se debe contemplar la circulación de las personas a pie y la ubicación del mobiliario del parque. Las estaciones no deben ubicarse demasiado lejos de la calzada.	

Fuente: Guía de Sistema de Bicicletas Compartidas (Ministerio de transporte, 2022)

ANEXO 10. Área estimada y habitantes por barrio

Codificación	Nombre	Área	Habitantes
Z1	Altobonito	0.17881138	3073
Z2	Valle Real	0.11214884	1927
Z3	Albores de San Juanito	0.01850274	318
Z4	Palo Blanco	0.12809884	2201
Z5	Concordia	0.08897195	1529
Z6	La Ventura	0.08292993	1425
Z7	Urbanización El Saman	0.00977106	168
Z8	Urbanización San Marino	0.00654745	113
Z9	Urbanización Caracoli	0.02969348	511
Z10	Montellano	0.11767648	2022
Z11	El Jardín	0.0735034	1263
Z12	Jorge E. Gaitan	0.04890514	841
Z13	La Honda	0.09933352	1707
Z14	Balboa	0.09520751	1636
Z15	El Eden	0.01742049	300
Z16	Los Rosales	0.02245649	386
Z17	Señor de los Milagros	0.01780612	306
Z18	Balcones del Norte	0.02047282	352
Z19	Los Girasoles	0.02942586	506
Z20	Uninorte	0.07791878	1339
Z21	San José Obrero	0.07703196	1324
Z22	Urbanización Ana María	0.02875326	495
Z23	Brisas del Norte	0.01193235	206
Z24	Entre Valles	0.0167165	288
Z25	Villa Pachita	0.00857444	148
Z26	Ciudadela de Comfenalco	0.03401005	585
Z27	María Luisa	0.08396138	1443
Z28	El Popular	0.07142225	1228
Z29	Las Palmitas	0.02597297	447
Z30	Coovprof	0.01508472	260
Z31	Bello Horizonte	0.01485294	256
Z32	Fuen Mayor Z1	0.25627448	4404
Z33	Divino niño	0.20945363	3599
Z34	Sucre Z1	0.22712798	3903
Z35	Ricaurte	0.09980493	1715
Z36	Santa Bárbara Z1	0.25386841	4362
Z37	La revolución	0.15908499	2734
Z38	San Vicente	0.01404352	242
Z39	Santiago Vergara Crespo	0.05663035	974
Z40	Altamira	0.01199653	207
Z41	Prados de Oriente	0.01304779	225
Z42	La esperanza	0.02351269	404
Z43	Altos de Guadalajara	0.03932915	676
Z44	Alameda	0.03064942	527
Z45	El Molino	0.18628328	3201
Z46	El Carmelo	0.23351219	4013
Z47	San Antonio	0.1543696	2653
Z48	Jose María Cabal Z5	0.16824852	2891
Z49	Estambul	0.11424294	1963
Z50	La Merced	0.10307607	1772
Z51	Portales del Ríos	0.02144087	369
Z52	Terminal de transporte	0.0209592	2370
Z53	Buga Plaza	0.01206498	208
Z54	Acuarelas	0.01681047	289
Z55	Aures	0.07080981	1217
Z56	Prados del Sur	0.0068014	117
Z57	Los Angeles	0.07029175	1208
Z58	Santa Rita	0.09643345	1657
Z59	Prados de la Julia	0.04260048	732
Z60	La Julia	0.21362402	3671
Z61	El Albergue Z2	0.23937435	4113
Z62	San Geronimo	0.03291245	566
Z63	San José de las palmas	0.1097514	1886
Z64	Jose María Cabal Z3	0.15148287	2603
Z65	Jose María Cabal Z1	0.16188637	2782
Z66	Jose María Cabal Z4	0.16138993	2773
Z67	Jose María Cabal Z2	0.11643336	2001
Z68	El Albergue Z1	0.26625132	4575
Z69	El Albergue Z4	0.13764939	2366
Z70	Fuen Mayor Z2	0.11458273	1969
Z71	Sucre Z2	0.17234085	2962
Z72	Santa Bárbara Z2	0.2273457	3907
Z73	El Albergue Z3	0.11223856	1929

Fuente: Elaboración propia

[illegible]

Fuente: Elaboración propia

[illegible]

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 13. Código del modelo matemático

Conjuntos

set M ;

Barrios

```
set N ordered;
```

Estaciones (con orden para restricciones de distancia mínima)

PARAMETROS

param B {M}; # Demanda en cada barrio

param d {M, N}; # Distancia de cada barrio a cada estacion

```
param dmin {N, N};      # Distancia entre estaciones candidatas
```

```

param D;          # Distancia máxima permitida para cubrir un barrio
param Dmin;       # Distancia mínima permitida entre estaciones
param E;          # Máximo número de estaciones a abrir
param C;          # Capacidad máxima de demanda que puede atender una estación

# VARIABLES
var X {i in N} binary;      # 1 si se abre estación i
var Y {j in M} binary;      # 1 si el barrio j es cubierto
var Z {j in M, i in N} binary;  # 1 si el barrio j es atendido por la estación i

# Funcion objetivo
maximize cobertura_total:
    sum {j in M, i in N} (B[j] / (1 + d[j,i])) * Z[j,i];    # Maximizar la demanda cubierta
    # poderada con la distancia

# Restricciones

# (1) Distancia valida entre barrio y estaciones
subject to cobertura_valida {j in M, i in N}:
    d[j,i] * Z[j,i] <= D * X[i];

# (2) un barrio solo puede ser atendido por 1 estacion
subject to unica_asignacion {j in M}:
    sum {i in N} Z[j,i] <= 1;

# (3) un barrio es atendido cuando tiene estacion
subject to cobertura_yz {j in M}:
    Y[j] = sum {i in N} Z[j,i];

# (4) capacidad maxima por estación
subject to capacidad_estacion {i in N}:
    sum {j in M} B[j] * Z[j,i] <= C * X[i];

# (5) maximo de estaciones a abrir
subject to max_estaciones:
    sum {i in N} X[i] <= E;

# (6) distancia mínima entre estaciones
subject to distancia_minima_estaciones {i in N, k in N: ord(i) < ord(k) and dmin[i,k] <
Dmin}:
    X[i] + X[k] <= 1;

# (7) no abrir estaciones que no atienden a ningún barrio
subject to debe_atender {i in N}:

```

$X[i] \leq \sum \{j \text{ in } M\} Z[j,i];$

ANEXO 14. Solucionador del modelo matemático y exportación de datos

```
option solver gurobi;
```

```
solve;
```

```
printf "Demanda total atendida: %.2f\n",
```

```
    sum {j in M} B[j] * Y[j];
```

```
#para poder exportar los datos a Excel en formato csv
```

```
printf "Barrio,estacion,Distancia,Demanda_Cubierta\n" > "asignaciones.csv";
```

```
for {j in M, i in N} {
```

```
    if Z[j,i] > 0.5 then {
```

```
        printf "%s,%s,%.2f,%d\n", j, i, d[j,i], B[j] >> "asignaciones.csv";
```

```
    }
```

```
}
```

ANEXO 15. Resultado del modelo

Barrio	Estacion	Distancia	Demanda Cubierta
Altobonito	Pto 4	38	2239
Valle Real	Pto 16	26	1405
Albores de San Juanito	Pto 16	22	232
Palo Blanco	Pto 16	4	1604
La Ventura	Pto 36	36	1039
Urbanización El Saman	Pto 36	29	123
Urbanización San Marino	Pto 36	21	83
Urbanización Caracolí	Pto 33	36	373
Montellano	Pto 36	20	1474
El Jardín	Pto 36	33	921
Jorge E. Gaitan	Pto 33	19	613
La Honda	Pto 36	33	1244
Balboa	Pto 31	18	1192
El Eden	Pto 31	26	219
Los Rosales	Pto 31	28	282
Señor de los Milagros	Pto 31	15	223
Balcones del Norte	Pto 31	1	257
Los Girasoles	Pto 31	12	369
San Jose Obrero	Pto 31	34	965
Entre Valles	Pto 10	35	210
Villa Pachita	Pto 10	7	108
Ciudadela de Comfenalco	Pto 10	24	427
Maria Luisa	Pto 10	32	1052
El Popular	Pto 33	12	895
Las Palmitas	Pto 10	35	326
Cooviprof	Pto 10	31	190
Bello Horizonte	Pto 9	23	187
Fuen Mayor Z1	Pto 9	9	3209
Divino niño	Pto 33	33	2623
Ricaurte	Pto 25	36	1250
Santa Barbara Z1	Pto 8	21	3179
La revolución	Pto 4	11	1992
Santiago Vergara Crespo	Pto 4	30	710
Altos de Guadalajara	Pto 1	27	493
El Carmelo	Pto 1	37	2924
Jose Maria Cabal Z5	Pto 21	5	2107
Estambul	Pto 41	28	1431
La Merced	Pto 25	39	1292
Acuarelas	Pto 25	40	211
Prados de la Julia	Pto 29	24	534
La Julia	Pto 29	7	2675
El Albergue Z2	Pto 40	36	2997
San Geronimo	Pto 38	31	413
San Jose de las palmas	Pto 16	29	1375
Jose Maria Cabal Z1	Pto 25	13	2027
Jose Maria Cabal Z4	Pto 41	17	2021
Jose Maria Cabal Z2	Pto 21	34	1458
El Albergue Z1	Pto 38	37	3334
El Albergue Z4	Pto 40	16	1724
Fuen Mayor Z2	Pto 10	13	1435
El Albergue Z3	Pto 1	37	1406

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 16. Resultado del escenario 1

Barrio	Estacion	Distancia	Demanda Cubierta
Valle Real	Pto 16	26	1405
Albores de San Juanito	Pto 16	22	232
Palo Blanco	Pto 16	4	1604
Concordia	Pto 15	11	1115
La Ventura	Pto 15	27	1039
Urbanización San Marino	Pto 34	43	83
Urbanización Caracoli	Pto 34	32	373
Montellano	Pto 34	30	1474
El Jardin	Pto 34	23	921
La Honda	Pto 34	11	1244
Balboa	Pto 31	18	1192
El Eden	Pto 31	26	219
Los Rosales	Pto 31	28	282
Señor de los Milagros	Pto 31	15	223
Balcones del Norte	Pto 31	1	257
Los Girasoles	Pto 31	12	369
Uninorte	Pto 31	42	976
San Jose Obrero	Pto 31	34	965
Maria Luisa	Pto 9	50	1052
El Popular	Pto 34	28	895
Las Palmitas	Pto 9	45	326
Cooviprof	Pto 9	40	190
Bello Horizonte	Pto 9	23	187
Fuen Mayor Z1	Pto 9	9	3209
Divino niño	Pto 12	5	2623
Sucre Z1	Pto 15	41	2844
Ricaurte	Pto 21	45	1250
La revolución	Pto 7	34	1992
San Vicente	Pto 7	38	177
Santiago Vergara Crespo	Pto 5	47	710
Altamira	Pto 7	49	151
Prados de Oriente	Pto 5	35	164
La esperanza	Pto 5	33	295
Altos de Guadalajara	Pto 5	18	493
Alameda	Pto 5	19	384
El Molino	Pto 7	14	2333
El Carmelo	Pto 5	36	2924
San Antonio	Pto 8	47	1933
Jose Maria Cabal Z5	Pto 21	5	2107
Estambul	Pto 41	28	1431
La Merced	Pto 24	7	1292
Portales del Rios	Pto 24	35	269
Aures	Pto 24	42	887
Prados del Sur	Pto 28	31	86
Los Angeles	Pto 28	32	881
Santa Rita	Pto 28	19	1208
Prados de la Julia	Pto 41	48	534
La Julia	Pto 28	49	2675
El Albergue Z2	Pto 40	36	2997
San Jose de las palmas	Pto 16	29	1375
Jose Maria Cabal Z1	Pto 24	43	2027
Jose Maria Cabal Z4	Pto 41	17	2021
Jose Maria Cabal Z2	Pto 21	34	1458
El Albergue Z1	Pto 38	37	3334
El Albergue Z4	Pto 40	16	1724
Sucre Z2	Pto 12	45	2159
Santa Barbara Z2	Pto 8	20	2847
El Albergue Z3	Pto 38	44	1406

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 17. Resultado del escenario 2

Barrio	Estacion	Distancia	Demanda Cubierta
Palo Blanco	Pto 19	20	1604
Urbanización San Marino	Pto 36	21	83
Urbanización Caracoli	Pto 36	12	373
Montellano	Pto 36	20	1474
Jorge E. Gaitan	Pto 32	22	613
La Honda	Pto 32	22	1244
Balboa	Pto 31	18	1192
Señor de los Milagros	Pto 31	15	223
Balcones del Norte	Pto 31	1	257
Los Girasoles	Pto 31	12	369
San Jose Obrero	Pto 32	11	965
Villa Pachita	Pto 10	7	108
Ciudadela de Comfenalco	Pto 10	24	427
Bello Horizonte	Pto 9	23	187
Fuen Mayor Z1	Pto 9	9	3209
Divino niño	Pto 12	5	2623
Santa Barbara Z1	Pto 8	21	3179
La revolución	Pto 4	11	1992
San Vicente	Pto 4	18	177
El Molino	Pto 7	14	2333
Jose Maria Cabal Z5	Pto 22	22	2107
Portales del Rios	Pto 23	19	269
Terminal de trasnporte	Pto 23	13	1727
Buga Plaza	Pto 23	8	152
Prados de la Julia	Pto 29	24	534
La Julia	Pto 29	7	2675
San Jose de las palmas	Pto 19	13	1375
Jose Maria Cabal Z1	Pto 25	13	2027
Jose Maria Cabal Z4	Pto 22	20	2021
El Albergue Z4	Pto 40	16	1724
Fuen Mayor Z2	Pto 10	13	1435
El Albergue Z3	Pto 40	12	1406

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 18. Resultado del escenario 3

Barrio	Estacion	Distancia	Demanda Cubierta
Altobonito	Pto 4	38	2547
Valle Real	Pto 16	26	1597
Palo Blanco	Pto 16	4	1824
Concordia	Pto 12	36	1267
Montellano	Pto 34	30	1676
El Jardin	Pto 34	23	1047
Jorge E. Gaitan	Pto 34	28	697
La Honda	Pto 34	11	1415
Balboa	Pto 31	18	1356
El Eden	Pto 31	26	249
Los Rosales	Pto 31	28	320
Señor de los Milagros	Pto 31	15	254
Balcones del Norte	Pto 31	1	292
Los Girasoles	Pto 31	12	420
San Jose Obrero	Pto 31	34	1098
Entre Valles	Pto 10	35	239
Villa Pachita	Pto 10	7	123
Ciudadela de Comfenalco	Pto 10	24	485
Maria Luisa	Pto 10	32	1196
Las Palmitas	Pto 10	35	371
Cooviprof	Pto 10	31	216
Bello Horizonte	Pto 9	23	213
Fuen Mayor Z1	Pto 9	9	3650
Divino niño	Pto 12	5	2983
Santa Barbara Z1	Pto 8	21	3615
La revolución	Pto 4	11	2266
San Vicente	Pto 7	38	201
Santiago Vergara Crespo	Pto 7	35	808
Altamira	Pto 4	39	172
Prados de Oriente	Pto 5	35	187
La esperanza	Pto 5	33	335
Altos de Guadalajara	Pto 5	18	561
Alameda	Pto 5	19	437
El Molino	Pto 7	14	2653
El Carmelo	Pto 5	36	3326
Jose Maria Cabal Z5	Pto 21	5	2396
Estambul	Pto 41	28	1627
Prados de la Julia	Pto 29	24	607
La Julia	Pto 29	7	3042
San Geronimo	Pto 38	31	469
San Jose de las palmas	Pto 16	29	1563
Jose Maria Cabal Z1	Pto 21	35	2306
Jose Maria Cabal Z4	Pto 41	17	2298
El Albergue Z1	Pto 38	37	3791
El Albergue Z4	Pto 40	16	1961
Fuen Mayor Z2	Pto 10	13	1632
El Albergue Z3	Pto 40	12	1599

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 19. Resultado del escenario 4

Barrio	Estacion	Distancia	Demanda Cubierta
Altobonito	Pto 4	38	1932
Valle Real	Pto 16	26	1212
Albores de San Juanito	Pto 16	22	200
Palo Blanco	Pto 16	4	1384
Concordia	Pto 12	36	962
La Ventura	Pto 36	36	896
Urbanización El Saman	Pto 36	29	106
Urbanización San Marino	Pto 36	21	72
Montellano	Pto 36	20	1272
El Jardin	Pto 36	33	794
La Honda	Pto 36	33	1074
Balboa	Pto 31	18	1029
El Eden	Pto 31	26	189
Los Rosales	Pto 31	28	243
Señor de los Milagros	Pto 31	15	193
Balcones del Norte	Pto 31	1	222
Los Girasoles	Pto 31	12	319
San Jose Obrero	Pto 31	34	833
Entre Valles	Pto 10	35	182
Villa Pachita	Pto 10	7	94
Ciudadela de Comfenalco	Pto 10	24	368
Maria Luisa	Pto 10	32	908
El Popular	Pto 36	26	772
Las Palmitas	Pto 10	35	281
Cooviprof	Pto 10	31	164
Bello Horizonte	Pto 9	23	161
Fuen Mayor Z1	Pto 9	9	2769
Divino niño	Pto 12	5	2263
Ricaurte	Pto 20	6	1079
Santa Barbara Z1	Pto 8	21	2742
La revolución	Pto 4	11	1719
San Vicente	Pto 4	18	153
Santiago Vergara Crespo	Pto 4	30	613
Altamira	Pto 4	39	131
Altos de Guadalajara	Pto 1	27	425
Alameda	Pto 1	29	332
El Molino	Pto 7	14	2013
El Carmelo	Pto 1	37	2523
Jose Maria Cabal Z5	Pto 22	22	1818
La Merced	Pto 22	38	1114
Prados de la Julia	Pto 29	24	461
La Julia	Pto 29	7	2308
El Albergue Z2	Pto 40	36	2586
San Geronimo	Pto 38	31	356
San Jose de las palmas	Pto 16	29	1186
Jose Maria Cabal Z1	Pto 20	28	1749
Jose Maria Cabal Z4	Pto 22	20	1744
Jose Maria Cabal Z2	Pto 20	40	1258
El Albergue Z1	Pto 38	37	2876
El Albergue Z4	Pto 40	16	1488
Fuen Mayor Z2	Pto 10	13	1238
El Albergue Z3	Pto 1	37	1213

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 20. Comparativa de estaciones abiertas

Escenario inicial	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Pto 4	Pto 16	Pto 19	Pto 4	Pto 4
Pto 16	Pto 15	Pto 36	Pto 16	Pto 16
Pto 36	Pto 34	Pto 32	Pto 12	Pto 12
Pto 33	Pto 31	Pto 31	Pto 34	Pto 36
Pto 31	Pto 9	Pto 10	Pto 31	Pto 31
Pto 10	Pto 12	Pto 9	Pto 10	Pto 10
Pto 9	Pto 21	Pto 12	Pto 9	Pto 9
Pto 25	Pto 7	Pto 8	Pto 8	Pto 20
Pto 8	Pto 5	Pto 4	Pto 7	Pto 8
Pto 1	Pto 8	Pto 7	Pto 5	Pto 1
Pto 21	Pto 41	Pto 22	Pto 21	Pto 7
Pto 41	Pto 24	Pto 23	Pto 41	Pto 22
Pto 29	Pto 28	Pto 29	Pto 29	Pto 29
Pto 40	Pto 40	Pto 25	Pto 38	Pto 40
Pto 38	Pto 38	Pto 40	Pto 40	Pto 38
Coincidencias	8	9	11	11

Fuente: Elaboración propia