

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
SEDE MANIZALES**

**ASUNTO:  
TESIS DE MAESTRIA**

**PROPONENTE:  
JUAN DAVID ZULUAGA GARCÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA – INFRAESTRUCTURA Y SISTEMAS DE  
TRANSPORTE**

**DIRECTOR DE TESIS:  
PHD. DIEGO ALEXANDER ESCOBAR GARCÍA**

**TITULO DE LA TESIS.  
PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DIAGNÓSTICO Y PLANIFICACIÓN  
URBANA DE UNA RED DE CICLORRUTAS. CASO ESTUDIO: MANIZALES.**

**AREA Y LINEA DE INVESTIGACIÓN:  
ANÁLISIS DE ACCESIBILIDAD TERRITORIAL.**

**2017**

## PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DIAGNÓSTICO Y PLANIFICACIÓN URBANA DE UNA RED DE CICLORRUTAS. CASO ESTUDIO: MANIZALES.

### Resumen

Los sistemas de bicicletas compartidas aparecen como una nueva alternativa para mejorar la movilidad urbana y disminuir los viajes en modos privados. En esta investigación se analiza el sistema de bicicletas públicas de la ciudad de Manizales, evaluando la cobertura del sistema a través de la ubicación de las estaciones de bicicletas respecto a los usuarios inscritos y a la población de la ciudad; a partir de este diagnóstico se realizan dos propuestas para mejorar el sistema. Los resultados muestran que actualmente el sistema beneficia solamente a la población de estrato alto; por otro lado se muestra que al aumentar el número de estaciones se mejora la cobertura y se podría aumentar el uso de la bicicleta.

Palabras Clave: Accesibilidad, Cobertura, SIG, Movilidad, Transporte.

## METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR THE DIAGNOSIS AND URBAN PLANNING OF BIKELANE NETWORKS. CASE STUDY: MANIZALES.

### Abstract:

Bike-sharing systems appear as a new alternative to improve urban mobility and reduce trips in private modes. In this research the bike-sharing system of Manizales is analyzed, evaluating the coverage of the system through the location of the stations of bicycles with respect to the registered users and to the population of the city; based on this diagnosis, two proposals are made to improve the system. The results show that the system benefits only the upper stratum population; On the other hand, it is shown that by increasing the number of stations the coverage is improved and the use of the bicycle can be increased.

Keywords: Accessibility, Coverage, GIS, Mobility, transport

# TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCION.....	7
1.1	LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO.....	8
1.2	EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE LA CIUDAD.....	9
1.3	SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE BICICLETAS PÚBLICAS. ....	11
2	MARCO TEORICO.....	14
2.1	HISTORIA DEL SISTEMA DE BICICLETAS PÚBLICAS.....	14
2.2	METODOLOGIA DE PLANEACIÓN E IMPLEMENTACIÓN.....	15
3	METODOLOGIA.....	18
3.1	ACTUALIZACIÓN DE LA RED.....	19
3.2	GEORREFERENCIACIÓN.....	19
3.2.1	GEORREFERENCIACIÓN DE LAS ESTACIONES.....	20
3.2.2	GEORREFERENCIACION DE LOS USUARIOS ACTIVOS EN EL SISTEMA.....	28
3.3	CALCULO DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN LA RED.....	30
3.4	PROPUESTAS PARA EL SISTEMA DE BICICLETAS.....	36
3.5	ANALISIS DE RED.....	40
3.5.1	ANALISIS DE LOS USUARIOS INSCRITOS AL SISTEMA.....	41
3.5.2	CALCULO DE LAS AREAS DE COBERTURA DEL SISTEMA.....	42
3.5.3	CALCULO DE LA ACCESIBILIDAD TERRITORIAL.....	43
3.5.4	ACCESIBILIDAD MEDIA INTEGRAL.....	43
3.5.5	ACCESIBILIDAD MEDIA GLOBAL.....	44
3.6	ANÁLISIS GEOESTADISTICO.....	46
3.7	CALCULO DE PORCENTAJE DE AHORRO.....	47
3.8	ANALISIS DE COBERTURA ESPACIAL.....	48
4	RESULTADOS.....	49
4.1	SITUACIÓN ACTUAL.....	49
4.1.1	ANALISIS DE LOS USUARIOS INSCRITOS.....	49
4.1.2	COBERTURA DE LAS ESTACIONES.....	50

4.1.3	ACCESIBILIDAD MEDIA INTEGRAL.....	52
4.1.4	ACCESIBILIDAD MEDIA GLOBAL.....	54
4.2	PROPUESTA 1.....	57
4.2.1	ANALISIS DE LOS USUARIOS INSCRITOS.....	57
4.2.2	COBERTURA DE LAS ESTACIONES.....	58
4.2.3	ACCESIBILIDAD MEDIA INTEGRAL.....	60
4.2.4	ACCESIBILIDAD MEDIA GLOBAL.....	63
4.2.5	PORCENTAJE DE AHORRO DE LA PROPUESTA 1.....	66
4.3	PROPUESTA 2.....	68
4.3.1	ANALISIS DE LOS USUARIOS INSCRITOS.....	68
4.3.2	COBERTURA DE LAS ESTACIONES.....	70
4.3.3	ACCESIBILIDAD MEDIA INTEGRAL.....	72
4.3.4	ACCESIBILIDAD MEDIA GLOBAL.....	74
4.3.5	PORCENTAJE DE AHORRO DE LA PROPUESTA 2.....	77
4.3.6	COMPARACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y LAS PROPUESTAS. 80	
5	CONCLUSIONES.....	85
6	REFERENCIAS.....	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del lugar de estudio. ....	8
Figura 2. Número de pasajeros movilizad	10
Figura 3. Número de pasajeros movilizad	10
Figura 4. Ubicación Geográfica de las est	12
Figura 5 Mapa de calor de la ciudad de	12
Figura 6. Metodología. ....	18
Figura 7. Red de Infraestructura de Tran	19
Figura 8. Ubicación de Estaciones del S	20
Figura 9. Estación 1. ....	21
Figura 10. Estación 2. ....	22
Figura 11. Estación 3. ....	23
Figura 12. Estación 4. ....	23
Figura 13. Estación 5. ....	24
Figura 14. Estación 6. ....	25
Figura 15. Estación 7. ....	26
Figura 16. Estación 8. ....	27
Figura 17. Capacidad de las estaciones.	27
Figura 18. Usuarios inscritos al sistema	29
Figura 19. Vías autorizadas para el trá	30
Figura 20. Velocidades con GPS. ....	33
Figura 21. Ubicación Geográfica de las	37
Figura 22. Ubicación Geográfica de las	39
Figura 23. Location-Allocation Problem	41
Figura 24. New Service Area.....	42
Figura 25. Accesibilidad media integral	44
Figura 26. Accesibilidad media global.	45
Figura 27. Location-Allocation problem,	49
Figura 28. Distribución de los usuarios	50
Figura 29. Área de Cobertura escenario	51
Figura 30. Distribución de la población	52
Figura 31. Accesibilidad Media Integral.	53
Figura 32. Porcentaje de cobertura. Si	53
Figura 33. Porcentaje de cobertura por	54
Figura 34. Accesibilidad Media Global.	55
Figura 35. Porcentaje de cobertura. Si	55
Figura 36. Porcentaje de cobertura por	56

Figura 37. Location-Allocation problema. Propuesta 1.....	57
Figura 38. Distribución de los usuarios realmente impactados por el sistema en la propuesta 1, por estaciones. ....	58
Figura 39. Área de Cobertura. Propuesta 1. ....	59
Figura 40. Distribución de la población por estrato. Propuesta 1. ....	60
Figura 41. Accesibilidad Media Integral. Propuesta 1. ....	61
Figura 42. Porcentaje de cobertura. Propuesta 1.....	61
Figura 43. Porcentaje de cobertura por estrato. Propuesta 1.....	62
Figura 44. Accesibilidad Media Global. Propuesta 1. ....	63
Figura 45. Porcentaje de cobertura. Propuesta 1.....	64
Figura 46. Porcentaje de cobertura por estrato. Propuesta 1.....	65
Figura 47. Porcentaje de ahorro de tiempo de viaje. Propuesta 1.....	66
Figura 48. Porcentaje de cobertura vs Porcentaje de Ahorro. Propuesta 1. ....	67
Figura 49. Porcentaje de cobertura vs Porcentaje de Ahorro, según el estrato socioeconómico. Propuesta 1. ....	68
Figura 50. Location-Allocation problema. Propuesta 2.....	69
Figura 51. Distribución de los usuarios realmente impactados por el sistema en la propuesta 2, por estaciones. ....	70
Figura 52. Área de Cobertura. Propuesta 2. ....	71
Figura 53. Distribución de la población por estrato. Propuesta 2. ....	71
Figura 54. Accesibilidad Media Integral. Propuesta 2. ....	72
Figura 55. Porcentaje de cobertura. Propuesta 2.....	73
Figura 56. Porcentaje de cobertura por estrato. Propuesta 2.....	74
Figura 57. Accesibilidad Media Global. Propuesta 2. ....	75
Figura 58. Porcentaje de cobertura. Propuesta 2.....	75
Figura 59. Porcentaje de cobertura por estrato. Propuesta 2.....	76
Figura 60. Porcentaje de ahorro de tiempo de viaje. Propuesta 2.....	77
Figura 61. Porcentaje de cobertura vs Porcentaje de Ahorro. Propuesta 2. ....	78
Figura 62. Porcentaje de cobertura vs Porcentaje de Ahorro, según el estrato socioeconómico. Propuesta 2. ....	79
Figura 63. Comparación de la situación actual y las propuestas.....	80
Figura 64. Comparación de la cobertura de población cubierta de la situación actual y las propuestas, hacia las estaciones de bicicletas caminando. ....	81
Figura 65. Comparación de la cobertura acumulada de población cubierta de las propuestas contra el porcentaje de ahorro en tiempo de viaje. ....	82

# 1 INTRODUCCION.

Con el constante crecimiento de la población y la tasa de motorización, ciudades alrededor del mundo han sido impactadas por diferentes problemas, como la congestión, accidentalidad, polución, entre otros; es por ello que actualmente, los planificadores urbanos necesitan impulsar el desarrollo de sistemas sustentables de transporte, (Tight et al., 2011) que se acoplen a las dinámicas propias de la ciudad.

La movilidad es uno de los aspectos que influye directamente en la calidad de vida de los habitantes, siendo éste un parámetro que evalúa la competitividad, eficiencia y equidad existente en una ciudad. A través de las experiencias de otras ciudades del mundo, se ha observado cómo el aumento desmedido de los vehículos automotores, sumado a una deficiente planificación del transporte público, ha contribuido a la generación de problemas que incluso atentan contra la salud de la población.

Según un estudio del Departamento Nacional de Planeación - DNP, el país está perdiendo 2% del PIB por trancones (Departamento Nacional de Planeación, 2015). Esta situación se ve reflejada en ciudades de gran envergadura, pero recientemente ciudades intermedias están presentando los mismos problemas de congestión de ciudades con economía creciente por la ausencia de políticas claras de transporte. Los países desarrollados han adoptado un conjunto de políticas, que promueven modos de transporte con menor costo ambiental, económico y social; uno de ellos es el uso de la bicicleta.

Los sistemas de bicicletas públicas han sido implementados desde la mitad del siglo XX, con el objetivo de aumentar los viajes realizados en este modo de transporte, reducir emisiones de gases, aumentar los ahorros financieros individuales, reducir la congestión y el uso de combustibles fósiles, beneficios a la salud de la población, promover la multimodalidad (Ricci, 2015; Shaheen, Guzman, & Zhang, 2010). El sistema básicamente ofrece un determinado número de dispositivos (bicicletas) dispuestos en estaciones controladas automáticamente o por personal capacitado. La persona que desea realizar el viaje accede a la estación y a través de una identificación (Tarjeta, huella, etc.) adquiere una bicicleta y es llevada a otra estación cercana al destino final.

A partir del concepto general del sistema de bicicletas públicas, se hace prioritario tener una adecuada planificación, ya que el éxito del sistema radica en tener el suficiente número de estaciones que abarquen la mayor cantidad de orígenes y destinos de las personas, penetrando en el mercado lo suficiente para ser una

opción más usada que los vehículos particulares, buscando complementar su funcionamiento con el sistema de transporte público.

En esta investigación, el sistema de bicicletas públicas de la ciudad de Manizales, llamada “Manizales en Bici” fue analizado a partir de las siguientes directrices: Se realiza un análisis de la cobertura efectiva del sistema actual respecto a los usuarios inscritos al sistema y la población en general; se obtienen los tiempos medios de viaje necesarios para acceder a las estaciones del sistema de bicicletas, y los tiempos medios de viaje registrados en el uso del sistema en la ciudad; los resultados se contrastan con la población de la ciudad según estratos socioeconómicos. A partir de los resultados, se generan dos propuestas para expandir el sistema y se analizan los beneficios a la población.

Una particularidad de la investigación, es la topografía tan abrupta con la que cuenta la ciudad, la cual inhabilita algunas zonas de la ciudad por estar conectadas con vías de altas pendientes longitudinales para el adecuado tránsito de las bicicletas convencionales. Sin embargo, en la actualidad se han observado sistemas que introducen las bicicletas asistidas eléctricamente que ayudan al pedaleo<sup>1</sup>. Por tal motivo no se hizo un análisis de las pendientes en la ciudad de Manizales y se asume que todos los puntos de la misma pueden ser alcanzados por las personas con ayuda de las bicicletas eléctricas.

## **1.1 LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO.**

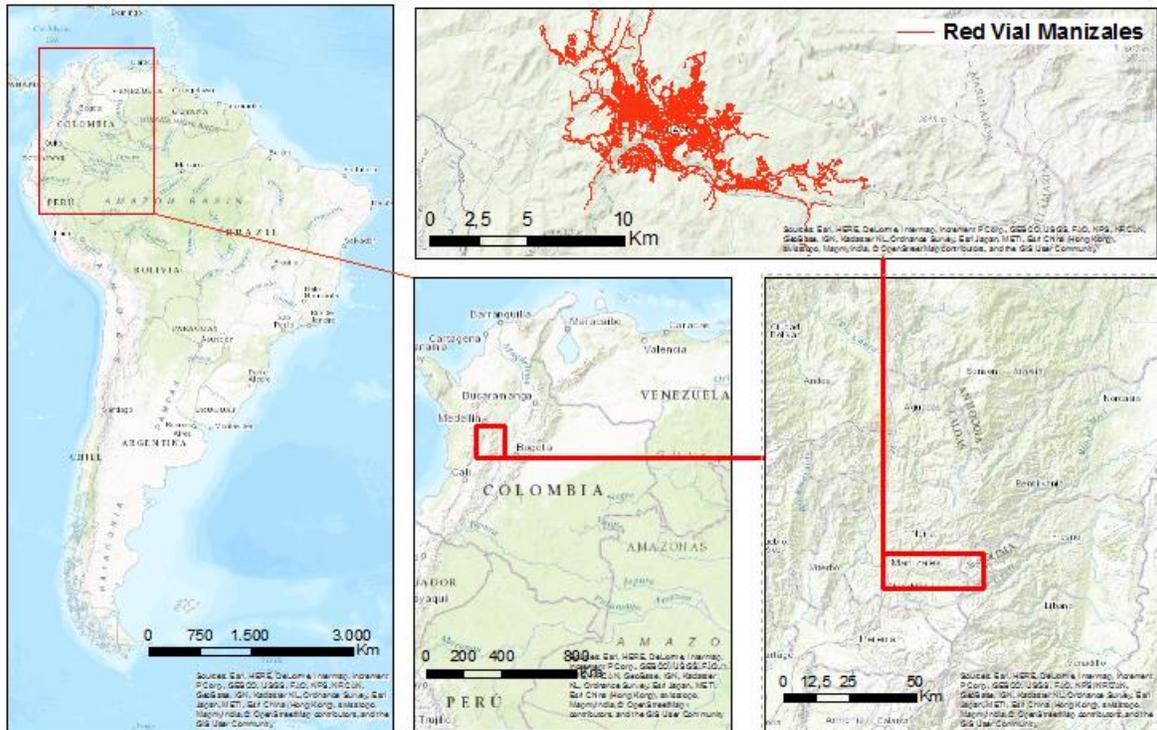
El caso de estudio se ubica en la ciudad de Manizales, capital del Departamento de Caldas, Colombia. La ciudad yace sobre la Cordillera Central de Los Andes; tiene una extensión de 508 km<sup>2</sup> (Gobernación de Caldas, FINAGRO, & Instituto Agustín Codazzi, 2016), cuenta con 749 km de redes de infraestructura para el transporte (“PMM, Plan Maestro de Movilidad para la ciudad de Manizales,” 2010). La principal característica de la ciudad, es que cuenta con una topografía abrupta lo que dificulta la movilidad sobretodo en modos de transporte autónomos, pero con el desarrollo de nuevas tecnologías, como es el caso de las bicicletas eléctricas, puede ser controlado.

El Departamento de Caldas es uno de los departamentos más pequeños de Colombia; está localizado en la región centro-occidental del país con coordenadas 5°06' Norte y 75°33' Occidente, alcanza una extensión de 7.888 km<sup>2</sup> (alrededor del 1.32% del territorio nacional) (Gobernación de Caldas et al., 2016). (Ver Figura 1).

Figura 1. Localización del lugar de estudio.

---

<sup>1</sup> <http://m.20minutos.es/noticia/3010353/0/gobierno-colau-propone-bicing-con-mas-bicis-electricas-cobertura-territorial/> (2017).



Fuente: Elaboración propia a partir de Arcgis Online.

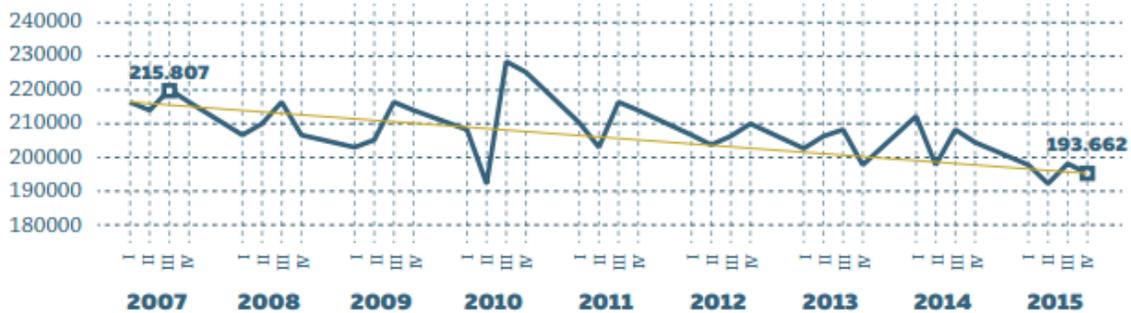
## 1.2 EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE LA CIUDAD.

Actualmente, el transporte público en Manizales, se compone de rutas cubiertas por buses y microbuses, cable aéreo y recientemente el sistema de bicicletas públicas. Pero debido a la falta de planificación para mejorar la cobertura y el servicio, las personas han migrado a modos de transporte poco sustentables como el carro y la moto. Por un lado, la cultura existente muestra que las personas ven la adquisición de un vehículo privado como sinónimo de mejoramiento en la calidad de vida, y que el uso de transporte público es para personas con bajos recursos. Por otro lado, el aumento en los costos de transporte y la disminución de la demanda ha generado que las tarifas sean costosas, el servicio se desmejore y las personas no vean el transporte público como una opción para movilizarse diariamente. En la Figura 2, se puede observar que el promedio diario de pasajeros en transporte público ha disminuido de 215.807 pasajeros a 193.662 pasajeros entre el 2007 y 2015.

La conjugación de todos esos problemas, se ha visto reflejada en el aumento de la tasa de motorización. Según Manizales Como Vamos, la tasa de motorización en Manizales por cada 1000 habitantes era de 340 en 2014, mientras que a nivel

nacional era de 233 para ese mismo año(Manizales Como Vamos, 2017). En la Figura 3, se observa el número de vehículos matriculados entre el año 2009 y 2015. Se resalta que entre el 2010 y 2015 hubo un aumento del 51% para carros y 99% para motos.

Figura 2. Número de pasajeros movilizados.



Fuente: Manizales Como Vamos, (2017)

Figura 3. Número de pasajeros movilizados.

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	VARIACIÓN 2014-2015	VARIACIÓN 2010-2015
Carros	44.193	48.242	53.454	58.217	61.392	67.436	72.742	8%	51%
Motos	29.919	34.838	40.830	48.319	54.756	61.910	69.187	12%	99%
Vehículos de pasajeros	2.008	2.083	2.149	2.292	2.363	2.440	2.505	3%	20%
Vehículos de carga	2.050	2.111	2.253	2.423	2.403	2.543	2.608	3%	24%
<b>Total</b>	<b>78.161</b>	<b>87.274</b>	<b>98.686</b>	<b>111.251</b>	<b>120.914</b>	<b>134.329</b>	<b>147.042</b>	<b>9%</b>	<b>68%</b>

Fuente: Manizales Como Vamos, (2017)

A pesar del panorama presentado anteriormente, Manizales es catalogada como la mejor ciudad con calidad de vida de Colombia, (Red Colombiana de Ciudades Como Vamos, 2015); el 80% de la población está satisfecha con el sistema de transporte (Manizales Como Vamos, 2015).

Respecto a modos no motorizados, Manizales registra un alto número de viajes realizados en bicicleta y caminata. El uso de la bicicleta ha crecido de 1% a 2% en 2015. Desafortunadamente, los viajes caminando han disminuido de 18% a 13%. (Manizales Como Vamos, 2015).

El sistema de bicicletas públicas fue puesto en servicio en el año 2015 con 135; 115 bicicletas distribuidas en 8 estaciones y 20 bicicletas como reserva, registrando 1025 viajes en el primer mes, y 2000 viajes en marzo de 2016.(Manizales Como Vamos, 2017)

### **1.3 SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE BICICLETAS PÚBLICAS.**

Actualmente en la ciudad de Manizales se encuentran en funcionamiento ocho (8) estaciones; en la Tabla 1 y Figura 4, se puede observar una lista y la ubicación geográfica de las estaciones del sistema.

Tabla 1. Estaciones en la situación actual.

<b>Estación</b>	<b>Ubicación</b>
E1	Cable
E2	Plaza 52
E3	Parque La Mujer
E4	Alfonso López
E5	Fundadores
E6	Parque del Agua
E7	Universidad Nacional Palogrande
E8	Milán

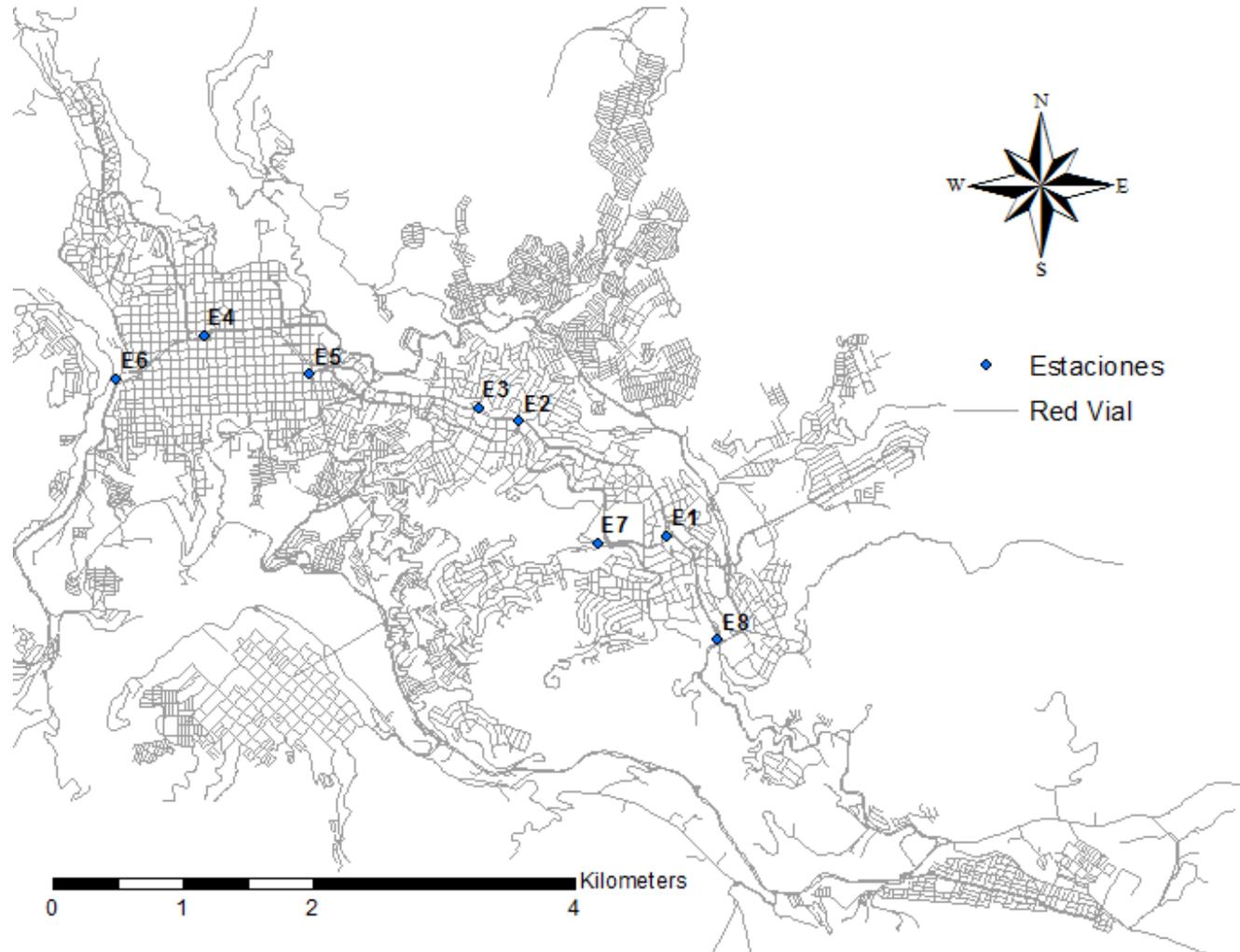
Fuente: Elaboración propia.

La planificación del sistema se basó en experiencias recogidas a través de los años por parte de un grupo de personas interesadas por lograr un cambio de paradigma en los habitantes de la ciudad, cambiando el vehículo particular como medio principal de movilidad por la bicicleta.

No se conoce algún tipo de estudio sobre la demanda de uso del sistema hasta el momento, sin embargo, existen herramientas como el software Strava, el cual nos muestra cómo es el comportamiento en el uso de la bicicleta en Manizales, por los diferentes corredores de movilidad.

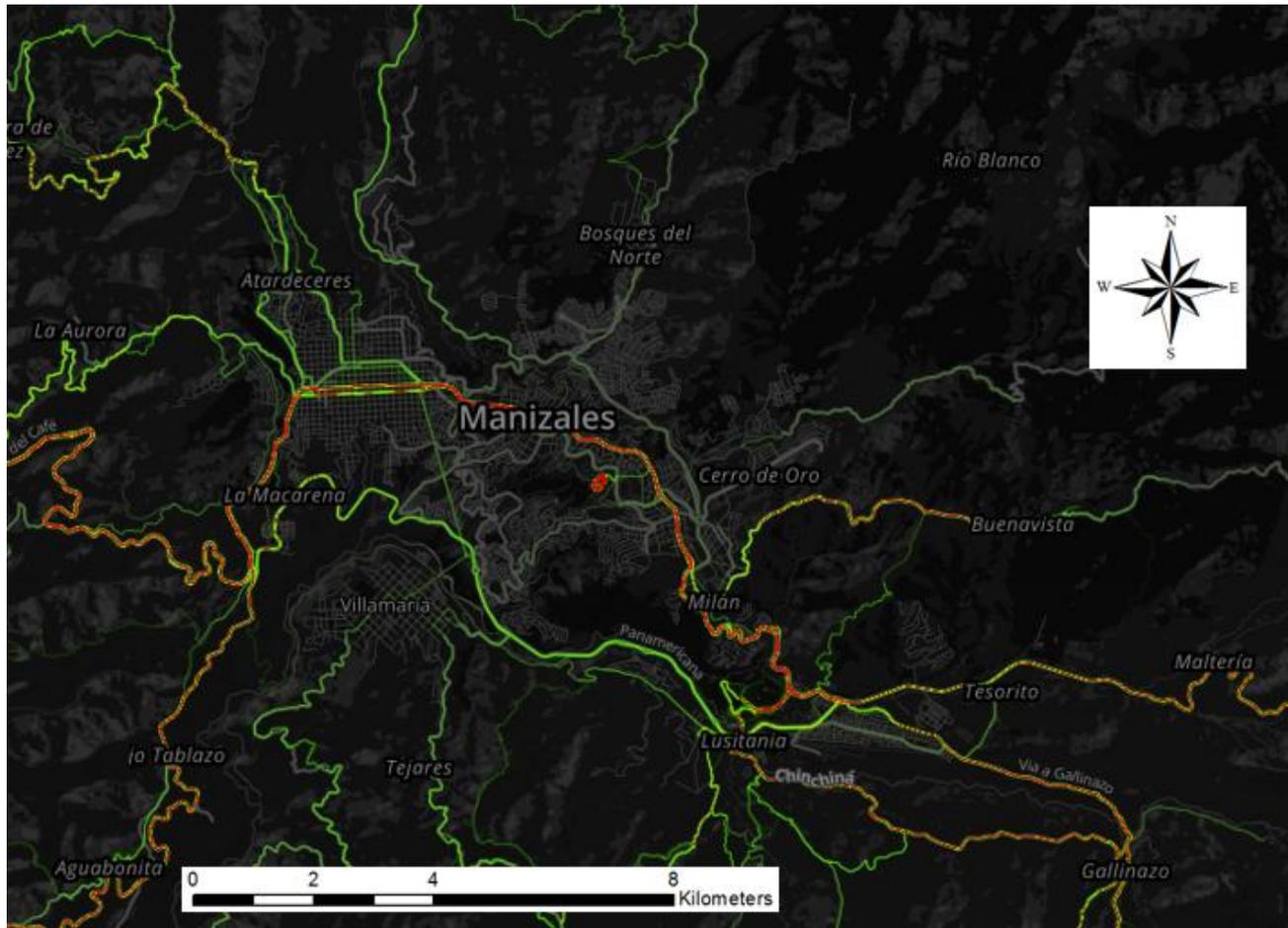
En la Figura 5, se observa el mapa de calor de la ciudad de Manizales. En color rojo se observan las rutas más usuales tomadas por los ciclistas, en verde las que se usan con menos frecuencias, y gris cuando no se utilizan. Se puede observar que la Avenida Santander es la ruta más usual para movilizarse en bicicleta y es la autorizada por la administración municipal como carril compartido.

Figura 4. Ubicación Geográfica de las estaciones en la situación actual.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 Mapa de calor de la ciudad de Manizales sobre el uso de bicicleta.



Fuente: Strava labs (14/06/2017) <http://labs.strava.com/heatmap/#6/-113.26904/27.64461/blue/bike>.

## **2 MARCO TEORICO.**

### **2.1 HISTORIA DEL SISTEMA DE BICICLETAS PÚBLICAS.**

Los sistemas de bicicletas públicas nacieron en el año 1965 en la ciudad de Amsterdam (P. Demaio & Gifford, 2004; P. J. Demaio, 2003), con el afán de luchar contra el consumismo y la contaminación del aire. El gobierno en ese tiempo veía con un gran potencial el uso de vehículos automotores, la ciudad había crecido el doble en un periodo corto de tiempo, y las calles ya no eran seguras para que los niños jugaran. Por tal motivo, un grupo de activistas llamado “Provo” buscaba una alternativa para que las personas no fueran apartadas por los vehículos, promoviendo el plan de “White bikes”, naciendo la primera generación de bicicletas públicas (Metrobike & DeMaio, 2009). El plan se trataba de usar una bicicleta para llegar al destino deseado y dejarla para que otra persona la usara. Fueron pintadas de color blanco para simbolizar la simplicidad e higiene, contrario al carro. El plan no fue bien visto y no tuvo el éxito esperado, ya que muchas bicicletas fueron dañadas y robadas. (“Story of cities #30: how this Amsterdam inventor gave bike-sharing to the world,” 2016)

Treinta (30) años después, la segunda generación de bicicletas públicas aparece en la ciudad de Copenhague. Se implementó un plan a larga escala llamado “Bicyklen”, la cual permitía a los usuarios obtener y dejar las bicicletas en estaciones reguladas a través del pago con una moneda. Sin embargo el sistema seguía sufriendo por el robo y daño de las bicicletas (Metrobike & DeMaio, 2009; Shaheen et al., 2010). Este problema fue solucionado un año después en la Universidad de Portsmouth en el Reino Unido, en el cual para prestar una bicicleta se debía usar una tarjeta magnética, la cual permitía ubicar las bicicletas cuando no fueran devueltas, introduciendo un primer bosquejo de la tercera generación de bicicletas. (Metrobike & DeMaio, 2009).

Para la tercera generación, se controla el sistema a partir de dispositivos de identificación, permitiendo el monitoreo a tiempo real de la capacidad de las estaciones y usuarios (Gauthie et al., 2013); sistemas como en Rennes, Francia, trabajaban con una tarjeta inteligente en el año 1998; posteriormente aparece Veló’v con 1500 bicicletas en Lyon (Büttner, Mlasowsky, & Birkholz, 2011), con el sistema de tercera generación más importante hasta el momento; alrededor de 15.000 usuarios inscritos y se registra en promedio en un día 6,5 usos por bicicleta. Dos años después, la ciudad de París lanza Vélib, la cual se ha expandido hasta 23.000 bicicletas (Metrobike & DeMaio, 2009).

La cuarta generación de bicicletas, aparece en Canadá en el 2009, enfocándose en dar una respuesta a la demanda y crear un sistema multimodal (Shaheen et al., 2010); se incluyen bicicletas eléctricas, las estaciones son más eficientes, trabajando con luz solar y siendo móviles para servir a la demanda dependiendo del comportamiento en el día, pantallas táctiles en estaciones para el autoservicio, innovaciones para la redistribución, entre otros.

Desde el año 1965 hasta el presente, se han generado sistemas en más de 1.188 ciudades alrededor del mundo con más de 2.294.600 bicicletas (Meddin, 2017), demostrando el impacto positivo que ha generado el uso de la bicicleta como modo alternativo de transporte, que tal vez no tenga actualmente el impacto deseado para ser más usado que el vehículo particular (Fishman, Washington, & Haworth, 2013), pero que demuestra que el futuro está en la movilidad con la bicicleta.

## **2.2 METODOLOGIA DE PLANEACIÓN E IMPLEMENTACIÓN.**

Las metodologías para implementar un sistema de bicicletas públicas son escasas, por un lado, los sistemas de bicicletas son relativamente recientes, lo cual no ha dado suficientes recursos investigativos para tener una metodología precisa, y por otro lado porque las características de movilidad de las ciudades son diferentes entre sí.

En los últimos años se han generado guías y metodologías, como el manual financiado por el proyecto OBIS (Büttner et al., 2011), y dos guías de planificación; una que se enfatiza en la experiencia americana (Evans & Moskowitz, 2012), y la segunda en la experiencia global (Gauthie et al., 2013). Según la Guía del ITDP, existen principalmente tres variables para evaluar una planificación óptima del sistema (Gauthie et al., 2013):

- Se debe tener una cobertura mínima de 10 km<sup>2</sup>, teniendo en cuenta que la influencia de una estación de bicicletas es de 500 metros a la redonda;
- El número de bicicletas por 1000 habitantes. Se ha estimado que entre 10 y 30 bicicletas por cada 1000 habitantes es un valor óptimo;
- La densidad de las estaciones. Se recomienda un valor entre 10-16 estaciones por kilómetro cuadrado

La cobertura espacial es un indicador relevante para analizar el contexto de un sistema de transporte (Magalhães, 2016); ayuda para el proceso de toma de decisiones, crear políticas, programas y planes para mejorar las condiciones de un sistema. Para evaluar la cobertura en un sistema de transporte, se han aplicado

diferentes metodologías; una de ellas, aunque poco usada, es el cálculo de la accesibilidad territorial.

La accesibilidad, desde el punto de vista geográfico, se define como una medida de la facilidad de comunicación entre un conjunto de actividades definidas o asentamientos humanos, usando uno o varios modos de transporte (Morris, Dumble, & Wigan, 1978); la definición más clásica de accesibilidad es la aportada por (Hansen, 1959) “... *the potencial of opportunities for interaction.*”. Los orígenes del término se remontan a los años 20' cuando se abordó en áreas como la teoría de la localización y el planeamiento económico regional (Batty, 2009), convirtiéndose en un *ELEMENTO PRIMARIO DE PLANIFICACIÓN URBANA*, mediante el cual se establecían criterios cuantitativos para la determinación del futuro uso de suelo, buscándose un mayor bienestar social mediante una adecuada planificación sectorial (Kibambe, L. et al: 2013). Los análisis de accesibilidad han venido en un crecimiento constante, donde cada vez existe mayor complejidad, en búsqueda de mejores estrategias de transporte y desarrollo (Geurs, Boon, & Van Wee, 2009). Es por ello que muchos autores se han atrevido a usarlo en diferentes ámbitos relacionados directamente con el transporte como tal, como exclusión social (Preston & Rajé, 2007), impactos en espacios económicos (Rietveld & Bruinsma, 2012), desempeño de un modo de transporte público (D. A. Escobar, Tapasco, & Giraldo, 2015), etc.

La accesibilidad es considerada como una importante variable de competitividad entre las regiones (Biehl, 1991), encontrando que las poblaciones más accesibles son las que han referido a través del tiempo un mayor éxito económico, existiendo investigaciones que buscan la relación entre accesibilidad y desarrollo económico (Ribeiro & Silva, 2011), identificándose que el mejoramiento de las infraestructuras de transporte les convierte en un elemento clave en la búsqueda de un mejor desarrollo y bienestar económico (Holl, 2007).

Existen diferentes tipos de análisis de accesibilidad que permiten abordar criterios relacionados con: distribución espacial de las actividades económicas (Fujita, Krugman, & Venables, 1999; Krugman, 1991); desarrollo económico (MacKinnon, Pirie, & Gather, 2008; Rietveld & Bruinsma, 2012; Rietveld & Nijkamp, 1993; Vickerman, Spiekermann, & Wegener, 1999); localización y prestación de servicios (Calcuttawala, 2006; Higgs, Langford, & Fry, 2012; Park, 2012); evaluar las ubicaciones óptimas de equipamientos (García-Palomares, Gutiérrez, & Latorre, 2012) (Suárez-Vega, Santos-Peñate, & Dorta-González, 2012), medir la equidad (Diego Escobar, Holguín, & Zuluaga, 2016) sostenibilidad (Cheng, Bertolini, & le Clercq, 2007; D Escobar, García, & Tolosa, 2013; Vega, 2011); agricultura y recursos naturales (Arcidiacono & Porto, 2010; Gellrich & Zimmermann, 2007);

Tassinari, Carfagna, Benni, & Torreggiani, 2008); densidad poblacional, plusvalía y crecimiento urbano (Alonso, 1964; Kotavaara, Antikainen, & Rusanen, 2011); operatividad de modos de transporte (D. A. Escobar et al., 2015; Geurs & Van Wee, 2004), exclusión social (Preston & Rajé, 2007); cohesión social (Schürmann, Spiekermann, & Wegener, 1997); redes sociales (Sailer, Penn, & Marmot, 2012); turismo (Kastenholz, Eusébio, Figueiredo, & Lima, 2012); geomarketing (Zuluaga & Escobar, 2017), entre otros campos.

### 3 METODOLOGIA.

La metodología desarrollada en este proyecto de tesis se enmarca en ocho (8) etapas: Actualización de la red, georreferenciación de estaciones y usuarios inscritos al sistema, definición de velocidades de operación; definición de las propuestas a partir de la situación actual. Posterior a esta etapa, para la situación actual y las dos propuestas se realiza: análisis de los usuarios inscritos respecto a la ubicación de las estaciones, cálculo de la cobertura espacial del sistema, análisis de accesibilidad territorial, cálculo de porcentajes de ahorro, y análisis de la cobertura. La metodología se observa detalladamente en la Figura 6.

Figura 6. Metodología.



Fuente: Elaboración propia.

### **3.1 ACTUALIZACIÓN DE LA RED.**

Los cálculos realizados en esta investigación se soportan en una red de infraestructura de transporte, compuesta por nodos, los cuales representan las intersecciones de la ciudad, y arcos, que representan los segmentos viales. Es de resaltar que existen algunos nodos adicionales que se encuentran en segmentos viales; la razón de la ubicación de los nodos, es para tener un número suficiente de puntos de interpolación para el análisis geoestadístico en el que se soporta la investigación.

A partir de la red de infraestructura de transporte utilizada por parte de la Universidad Nacional de Colombia para el desarrollo del Plan Maestro de Movilidad para la ciudad de Manizales en el año 2010, se realiza una actualización y depuración, en base a las siguientes fuentes oficiales:

- Google Maps
- Street View
- Openstreetmaps.
- Ortofoto actualizada de la ciudad, la cual se encuentra en el Sistema de información Geográfico de la Alcaldía de Manizales. Acceso libre en la siguiente dirección: <http://sig-alcaldia.azurewebsites.net/>
- Cambios de la red de infraestructuras verificados directamente en campo.

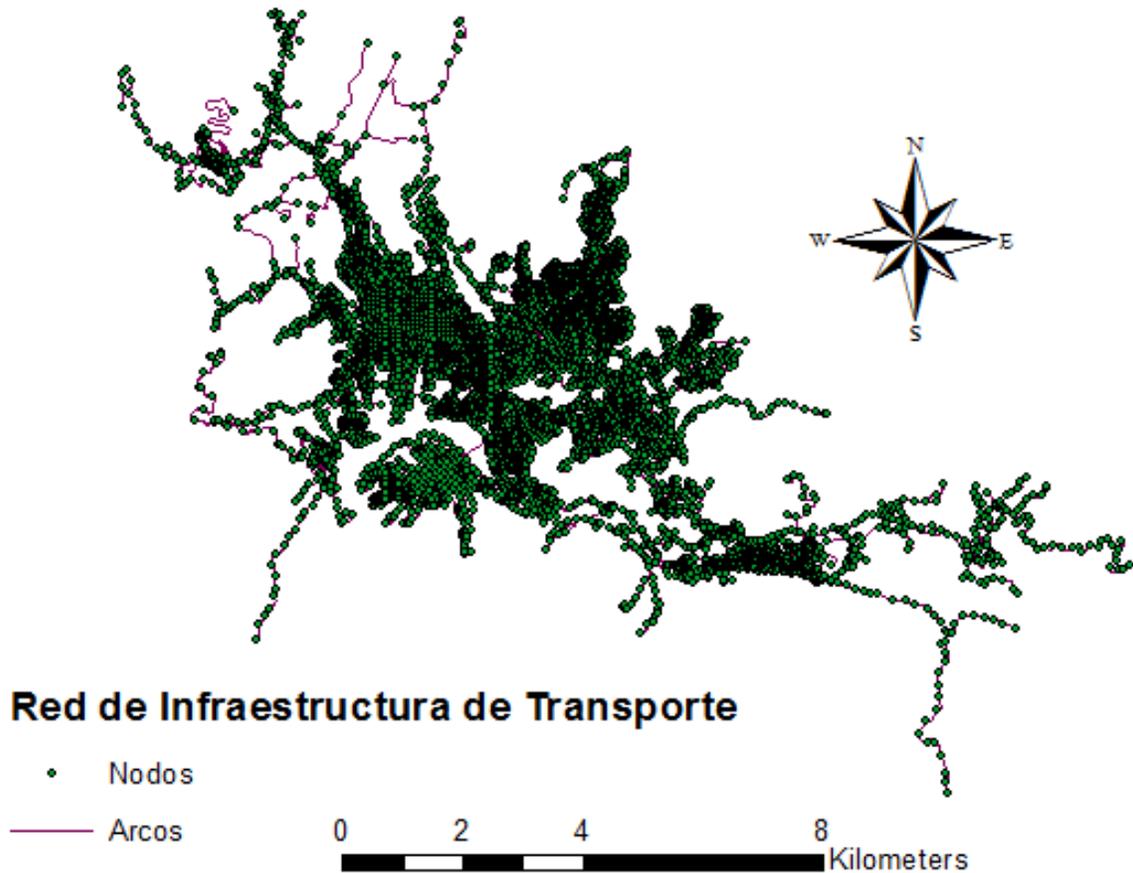
En total, se cuenta con 11.178 arcos y 8.548 nodos (Ver Figura 7). Entre los principales cambios que se observan en la red se tienen:

- Nuevos proyectos de infraestructura vial;
- Se encontraron arcos peatonales, que se confundían con los arcos para vehículos automotores;
- Cambios de direccionalidad;
- Errores de conexión identificados y corregidos.

### **3.2 GEORREFERENCIACIÓN.**

En esta etapa, se realiza la georreferenciación de las estaciones actuales del sistema a partir de visitas a campo; y la georreferenciación de los usuarios del sistema de bicicletas públicas hasta el mes de junio del año 2016, a partir de la base de datos de Manizales en Bici.

Figura 7. Red de Infraestructura de Transporte.



Fuente: Elaboración propia.

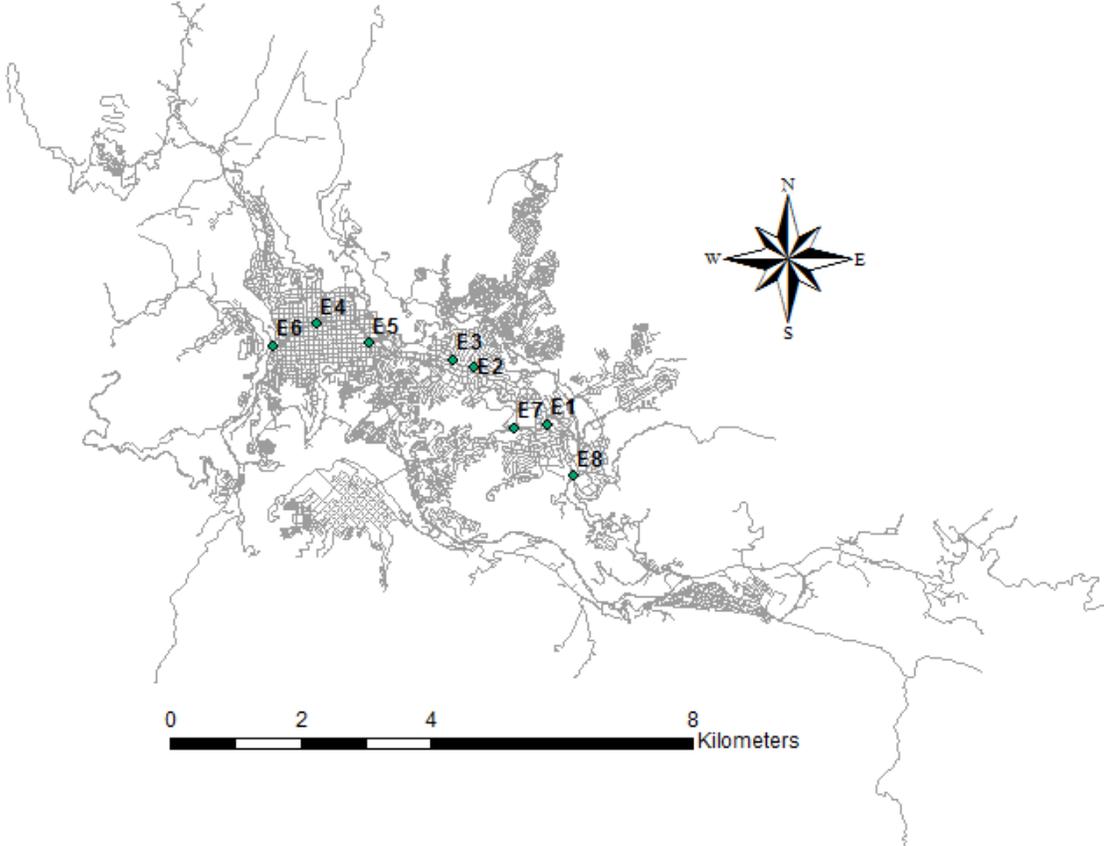
### 3.2.1 GEORREFERENCIACIÓN DE LAS ESTACIONES.

A partir de visitas hacia cada una de las estaciones de bicicletas, se realizó una inspección de la zona de influencia para analizar los usos del suelo circundantes a la estación y definir si es una zona con tendencia a ser generadora de viajes o atractora de viajes. En la Figura 8, se observa la ubicación de todas las estaciones.

La Estación 1 (E1) es la Estación Parque Antonio Nariño (Ver Figura 9), ubicada en el sector el Cable sobre la carrera 23 con calle 65, barrio Palogrande de la comuna Palogrande. Como sitios atractores de viaje importantes tiene: La Universidad Nacional, Centro Comercial Cable Plaza y Juan Valdez. En general el Cable es considerado como la zona rosa de la ciudad, donde hay actividad

nocturna los fines de semana. Esta estación tiene capacidad para 20 bicicletas que representa 17.39% del total de las bicicletas en las ocho estaciones.

Figura 8. Ubicación de Estaciones del Sistema de Bicicletas Públicas de Manizales



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Estación 1.



Fuente: Montoya (2015).

La Estación 2 (E2), está ubicada en la Avenida Santander (Carrera 23) sobre el paso del túnel de la 52 (Ver Figura 10), barrio Versalles que hace parte de la comuna La Estación. Circundante a la estación se encuentran edificios residenciales, y pequeños negocios. Esta estación tiene capacidad para 14 bicicletas que representa 12.17% del total de las bicicletas en las ocho estaciones.

Figura 10. Estación 2.



Fuente: Montoya (2015).

La Estación 3 (E3), es la estación del Parque de La Mujer (Ver Figura 11), ubicada sobre la carrera 23 con calle 48, en el barrio San Jorge que hace parte de la comuna La Estación. La zona cuenta con cuatro zonas atractoras de viajes importantes: El Parque de La Mujer, la Escuela Normal Superior de Caldas, Secretaria de Recreación y Deportes y el Hospital de Caldas; de igual forma se encuentra cerca a zonas residenciales. Esta estación tiene capacidad para 9 bicicletas que representa 7.83% del total de las bicicletas en las ocho estaciones.

La Estación 4 (E4), es la estación Alfonso López (Ver Figura 12), ubicada en paralelo a la carrera 19, sobre la Plaza Alfonso López de la Ciudad de Manizales (Sector centro), en el barrio Centro que pertenece a la comuna Cumanday. En la zona predomina el uso de suelo comercial. También se encuentra la Secretaria de Tránsito y Transporte. Esta estación tiene capacidad para 17 bicicletas que representa 14.78% del total de las bicicletas en las ocho estaciones.

Figura 11. Estación 3.



Fuente: Montoya (2015).

Figura 12. Estación 4.



Fuente: Montoya (2015).

La Estación 5 (E5), es la Estación Cable Aéreo Fundadores (Ver Figura 13), localizada sobre la carrera 23 contiguo a la estación del Cable Aéreo Fundadores en el barrio Fundadores, el cual pertenece a la comuna Cumanday. Se debe resaltar la importancia que tiene, ya que las personas que utilizan el cable aéreo, tienen la alternativa de transferirse a las bicicletas públicas, lo que generaría multimodalidad. Esta estación es muy importante ya que conecta directamente al sistema las personas que residen en Villa María, municipio conurbado con la ciudad de Manizales. Esta estación tiene capacidad para 16 bicicletas que representa 13.91% del total de las bicicletas en las ocho estaciones.

Figura 13. Estación 5.



Fuente: Montoya (2015).

La Estación 6 (E6) es la Estación Parque del Agua (Ver Figura 14), localizada al frente del parque Olaya Herrera sobre la Avenida Centenario, barrio Chipre, el cual pertenece a la comuna Atardeceres. Como zonas atractoras de viajes se encuentra el Parque del Agua, la Plaza de Toros; también se encuentran zonas residenciales en cercanía a la estación. Esta estación tiene capacidad para 13 bicicletas que representa 11.3% del total de las bicicletas en las ocho estaciones.

La Estación 7 (E7), es la llamada estación del parque la Gotera (Ver Figura 15), ubicada en predios de la Universidad de Caldas, barrio Palogrande, que pertenece a la comuna Palogrande. La zona se cataloga como institucional, ya que se encuentra adyacente a la Universidad Nacional sede Palogrande y la Universidad de Caldas. El estadio Palogrande también se encuentra en cercanías. Esta estación tiene capacidad para 13 bicicletas que representa 11.3% del total de las bicicletas en las ocho estaciones.

Figura 14. Estación 6.



Fuente: Montoya (2015).

Figura 15. Estación 7.



Fuente: Montoya (2015).

La Estación 8 (E8), es la estación Paseo de Milán (Ver Figura 16), ubicada sobre la carrera 23 en cercanías al Batallón de infantería N° 22 Ayacucho de la ciudad de Manizales, barrio Milán que pertenece a la comuna Palogrande. Se encuentra en la entrada de la zona G de la ciudad donde se ubican variedad de restaurantes.

Esta estación tiene capacidad para 13 bicicletas que representa 11.3% del total de las bicicletas en las ocho estaciones.

Figura 16. Estación 8.

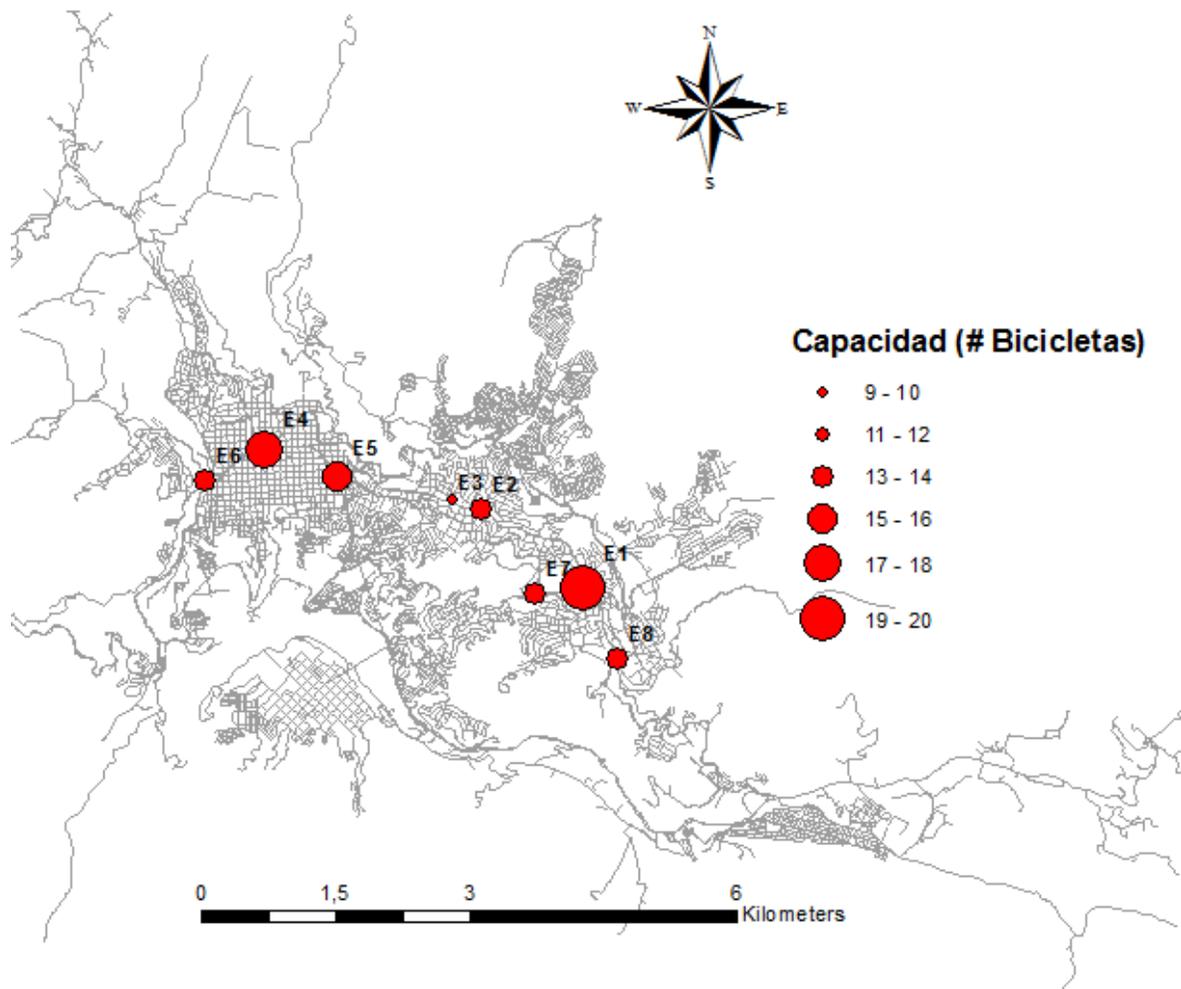


Fuente: Montoya (2015).

En general se observa que las ocho estaciones se encuentran en usos de suelo con predominancia a atraer viajes, lo que genera problemas ya que son viajes en su mayoría no basados en el hogar (NHB). En la mayoría de las ciudades del mundo los viajes No basados en el hogar representan entre el 15%-20% del total de los viajes diarios(Ortuzar & Willumsen, 2011), lo que significaría que el sistema no tiene una correcta planificación, por la falta de una Matriz Origen-Destino a la fecha que analice la demanda de la ciudad.

De igual forma en la Figura 17, se puede observar la capacidad de las estaciones. Se observa que la E1 (Estación del Cable) y E4 (Estación del Parque Alfonso López), son las que presentan mayor capacidad, mientras que la estación E3 (Parque de la Mujer), es la que tiene menor capacidad.

Figura 17. Capacidad de las estaciones.



Fuente: Montoya (2015).

### 3.2.2 GEORREFERENCIACION DE LOS USUARIOS ACTIVOS EN EL SISTEMA.

La base de datos de los usuarios fue solicitada a Manizales en Bici, con el objetivo de realizar un análisis sobre la ubicación de los usuarios inscritos respecto a la ubicación de las estaciones actuales. En la base de datos se encontraba la información de cedula de ciudadanía y dirección de residencia. En un principio se usó el número de la cedula para analizar datos repetidos; posterior al análisis, las cedulas de ciudadanía fueron borrados de la base de datos para sólo ser utilizada la dirección, representando cada usuario como un punto en la red.

El primer proceso que se realizó con las direcciones fue de unificar los códigos; la base de datos contaba con direcciones en las cuales la palabra "Carrera" aparecía

como “Kr, cr, cra, kra, carrer”; la palabra “Calle” aparecía como “cll, cl, cll”; la palabra “Avenida” aparecía como “Ave, Av, Avnd,”. La razón de unificar los códigos es que en el proceso de georreferenciación se utilizó una herramienta llamada OpenRefine; un software libre que tiene la capacidad de extraer las coordenadas de Google Maps a través de direcciones que deben llevar un formato unificado, el formato es el siguiente:

Código Inicial- Número de referencia del código-Símbolo #-Número de segunda referencia-Número del hogar. Un ejemplo de esto es el siguiente: Calle 32 #21-35 o Carrera 45#12-30.

Después de realizar la limpieza de la base de datos, y unificar los códigos de las direcciones, se introdujo la base de datos en el software OpenRefine. Se crean tres columnas: la primera en la cual se extraen los datos generales que pueden ser obtenidos de Google Maps con el siguiente comando:

- 'http://maps.googleapis.com/maps/api/geocode/xml?address='+escape(value,'url')+',+Manizales,+Caldas&sensor=false'.

Posterior a la obtención de la información, se corren otros dos comandos los cuales extraen de la información, la longitud y latitud:

- Latitud.

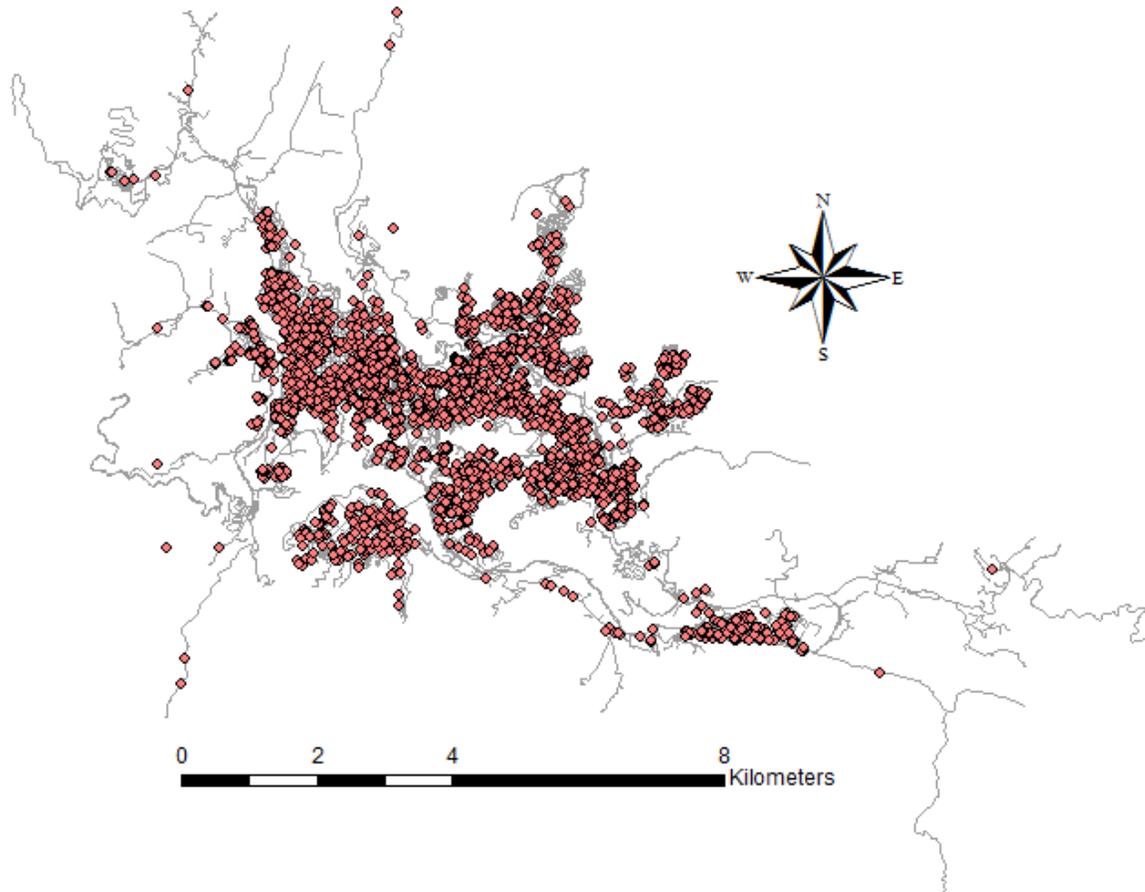
```
value.parseHtml().select("geometry")[0].select("location")[0].select("lat")[0].replace("<lat>","").replace("</lat>","")
```

- Longitud

```
value.parseHtml().select("geometry")[0].select("location")[0].select("lng")[0].replace("<lng>","").replace("</lng>","")
```

A través de esta herramienta de análisis de bases de datos, se obtienen las coordenadas de cada una de las direcciones en coordenadas WGS84, las cuales pueden ser georreferenciadas con el software Arcmap automáticamente. En total, la base de datos suministrada tiene 3.314 usuarios inscritos. En la Figura 18, se observa las direcciones de la base de datos georreferenciada.

Figura 18. Usuarios inscritos al sistema georreferenciados.



Fuente: Elaboración propia.

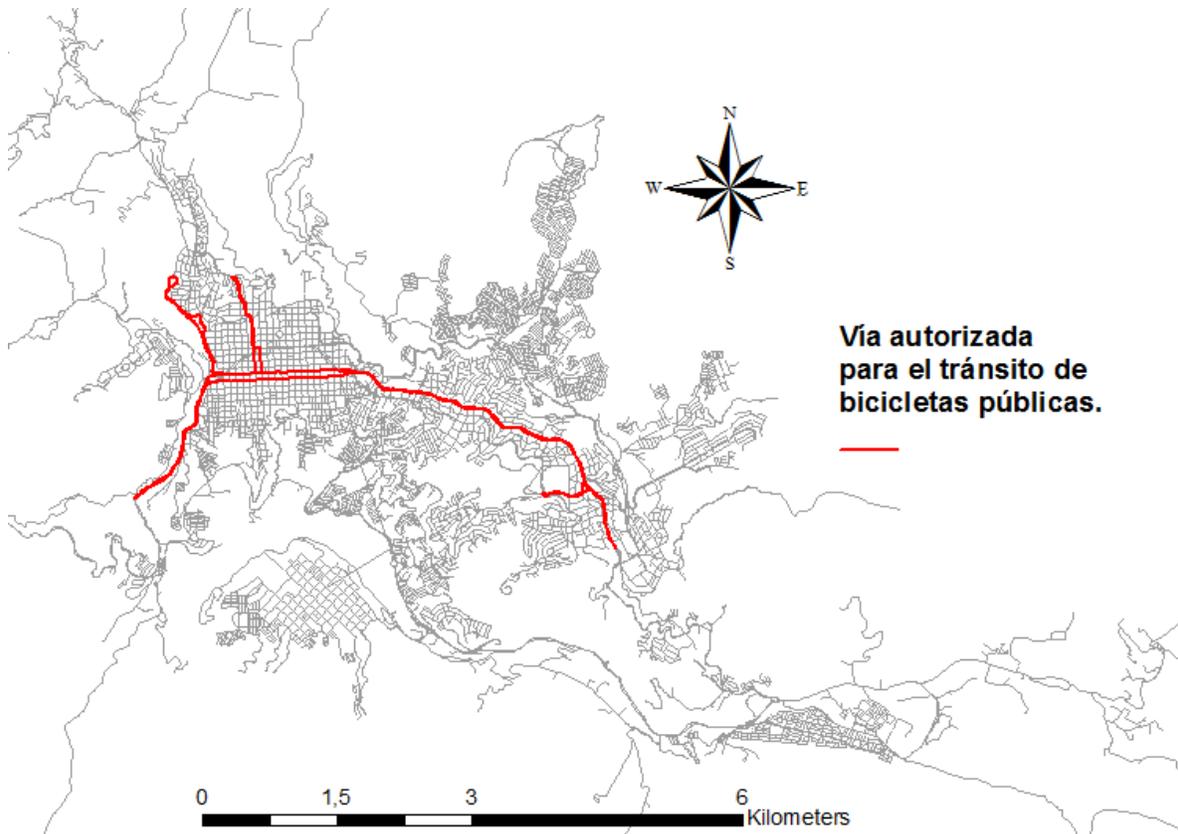
### 3.3 CALCULO DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN LA RED.

Para realizar los modelos de oferta aplicados en este estudio, se deben definir atributos de velocidad en la red de infraestructura de transporte. Se debe realizar el cálculo de las velocidades de operación para peatones y para usuarios de la bicicleta.

Por un lado, se utilizó un GPS, en el cual se midiera las velocidades de operación de un ciclista cotidiano que colaboró en el proyecto. Las velocidades fueron obtenidas sobre las vías autorizadas por el municipio para la movilidad de los ciclistas (Ver Figura 19).

El dato suministra simultáneamente información acerca de la localización de cada punto transmitido; así mismo reporta información respecto a un origen, dando una longitud, una latitud y una altura sobre el nivel del mar, la cual puede tener diferente tipo de unidades, dependiendo de la configuración del equipo.

Figura 19. Vías autorizadas para el tránsito de las bicicletas públicas.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la fecha y hora que el dato reporta, dependiendo de la configuración que se tenga en el equipo, nos suministra formato de día-mes-año para la fecha y hora-minuto-segundo para la hora. La hora de referencia es el meridiano de Greenwich el cual difiere de nuestra localización en seis (6) husos horarios. La precisión del GPS está directamente asociada a la tecnología y a la cantidad de satélites con los que trabaja para determinar el dato, en nuestro caso es  $\pm 3$  metros.

Una característica muy importante que se debe tener en cuenta a la hora de usar dispositivos GPS, para la toma de datos de campo, es cumplir con la resolución

068 del 28 de enero del año 2005 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi<sup>2</sup>, la cual determina:

*“Artículo 1°. Adóptese como único datum oficial de Colombia el Marco Geocéntrico Nacional de Referencia, también denominado: MAGNA-SIRGAS.*

*Parágrafo 1° MAGNA<sup>3</sup>-SIRGAS<sup>4</sup> es la densificación en Colombia de SIRGAS y a su vez del ITRF<sup>5</sup>*

*Parágrafo 2°. El modelo de geoide asociado al Datum MARGNA-SIRGAS será el producto denominado: GEOCOL 2004, que se adopta oficialmente por esta Resolución. Las versiones posteriores de este modelo geoide, serán nominadas teniendo en cuenta el año de su adopción oficial y las alturas basadas en los SGNS<sup>6</sup> serán referidas adecuadamente a dicho modelo.*

*Parágrafo 3°. Mientras no se disponga técnica y oficialmente la actualización del Sistema de Referencia Vertical para Colombia, se seguirá empleando el que tiene origen en el mareógrafo de Buenaventura.*

*Artículo 2° Este Instituto mantendrá y actualizará MARGNA-SIRGAS, considerando las indicaciones sobre sistemas e referencia emanadas de las Asambleas del Proyecto SIRGAS, de la IGAC<sup>7</sup>, de la IUGG<sup>8</sup> y del IPGH<sup>9</sup>.”*

El datum geodésico es el valor numérico que sirve de referencia, o base para la ubicación espacial de un punto; esta ubicación se puede expresar en coordenadas geográficas (latitud, longitud) o en coordenadas planas (norte, sur, oeste y este); sus valores están en función del tamaño, forma y ubicación del elipsoide de referencia.

En la Figura 20, se observan las velocidades cargadas a la red de infraestructuras del transporte. Se debe resaltar que en las zonas donde se necesitaban velocidades de bicicleta, dada la ausencia de datos de campo, principalmente para las propuestas en las cuales se expandían las rutas, se precisó utilizar la velocidad

---

<sup>2</sup> Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2005). Resolución 068 del 28 de Enero de 2005. [http://www.igac.gov.co:10040/wps/themes/htm/archivosPortal/pdf/Resolucion\\_068\\_DE\\_2005.pdf](http://www.igac.gov.co:10040/wps/themes/htm/archivosPortal/pdf/Resolucion_068_DE_2005.pdf). (25/07/2011).

<sup>3</sup> Marco Geocéntrico Nacional de Referencia.

<sup>4</sup> Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas

<sup>5</sup> International Terrestrial Reference System

<sup>6</sup> Sistemas Globales de Navegación por Satélite.

<sup>7</sup> International Association of Geodesy.

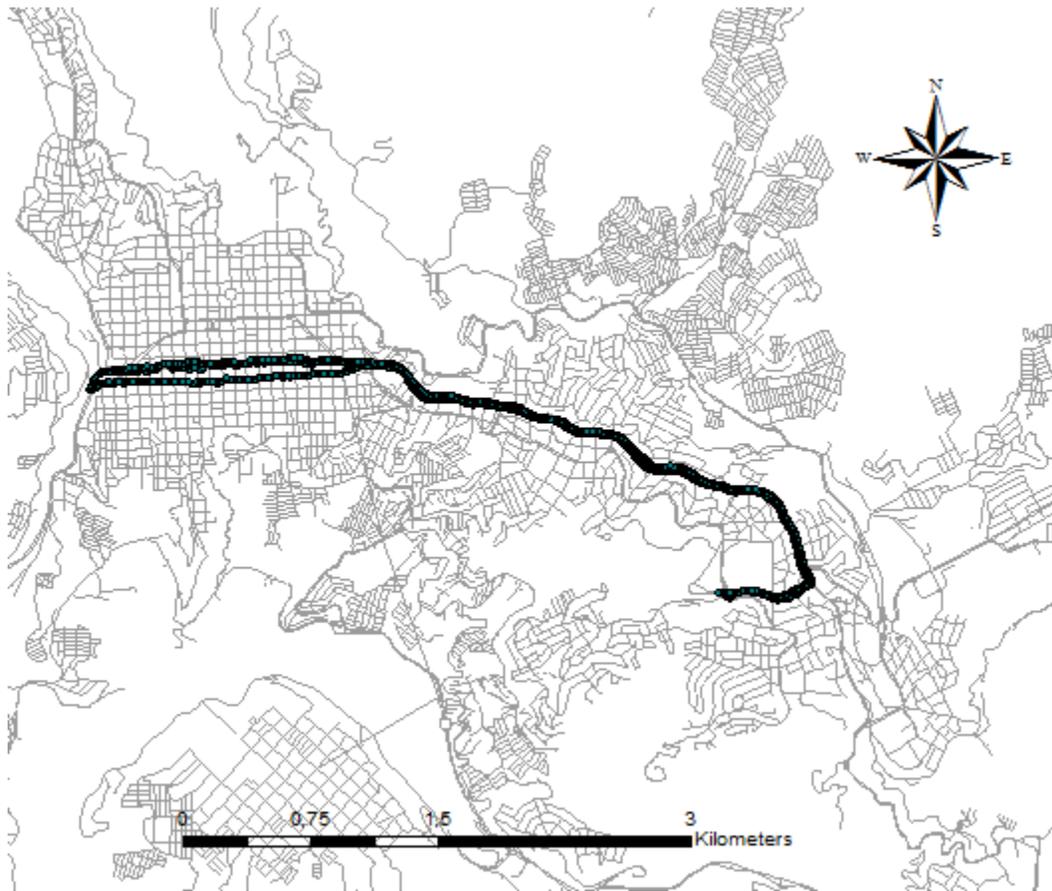
<sup>8</sup> Union of Geodesy and Geophysics.

<sup>9</sup> Instituto Panamericano de Geografía e Historia

promedio según la jerarquización vial. Según esto se tienen las siguientes velocidades promedio:

- Arteria principal: 29,39 km/h
- Arteria Secundaria: 21,71 km/h
- Colectora: 20,5 km/h
- Local: 23,47 km/h
- Semipeatonal: 23,38 km/h.

Figura 20. Velocidades con GPS.



Fuente: Elaboración propia.

El procesamiento de toda la información requirió de la aplicación de diferentes cálculos, colocándose especial énfasis en el análisis de la velocidad de operación dado que ésta variable determina el comportamiento general de la red y se convierte en un elemento clave para los cálculos de accesibilidad (Geurs & Ritseman Van Eck, 2001; Herce & Magrinya, 2002).

La velocidad de operación se determinó para cada arco de la red a partir de los datos de tiempo obtenidos en forma continua por los equipos GPS. Se analizaron tres parámetros:

- La velocidad de operación por intervalo de tiempo entre dos puntos (Ecuación 1), parámetro que permite establecer las variaciones de velocidad en un arco en particular.

*Ecuación 1. Velocidad de operación.*

$$v_i = \frac{3.6}{t} \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}$$

Fuente: Elaboración propia.

Donde,

$V_i$  = velocidad en Km/h

$x_1, y_1$  = coordenadas del punto 1 en metros

$x_2, y_2$  = coordenadas del punto 2 en metros

$t$  = intervalo de tiempo en segundos entre los puntos 1 y 2.

Este parámetro es útil para establecer las variaciones de la velocidad de un arco en particular y para determinar la rata de paradas cuando se obtienes valores iguales a cero; también llamada velocidad instantánea del vehículo.

- La velocidad de operación promedio de un viaje sobre el  $i$ -ésimo arco (Ecuación 2). Esta velocidad es la relación entre la longitud del arco y la diferencia de los tiempos de paso entre nodos.

*Ecuación 2. Velocidad promedio de viaje en un arco.*

$$v_i^a = 3.6 \frac{l_a}{t_2 - t_1}$$

Fuente: Elaboración propia.

Donde,

$V_{ia}$  = velocidad  $i$  en el arco  $a$  (km/h)

$l_a$  = longitud del arco  $a$  en metros

$t_1$  = tiempo de paso en el nodo inicial

$t_2$  = tiempo de paso en el nodo final.

- La velocidad promedio en el arco para un periodo de tiempo (Ecuación 3). Usada para establecer las impedancias de la red y para desarrollar el modelo de predicción de tiempos medios de viaje.

*Ecuación 3. Velocidad promedio en el arco.*

$$\bar{v}_a = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^a}{n}$$

Fuente: Elaboración propia.

Donde,

$V_a$  = velocidad promedio de operación del arco  $a$

$n$  = número de datos de velocidad registrados en el arco  $a$ , para un periodo de tiempo dado.

Por otro lado, se obtuvieron las velocidades de los peatones teóricamente. Se afectan las velocidades a partir de las pendientes de cada arco; estas pendientes estaban cargadas en los atributos de la red antes de ser mejorada. Los arcos peatonales que conectan con las ocho estaciones del SBP se cargaron con un valor de velocidad peatonal de 1,2m/s (4,32 km/h). Dicho valor de velocidad fue disminuido en 0,1 m/s (0,36km/h) por cada 10% de pendiente que tuviese cada arco (Prada, Laurents, & Cristancho, 2008).

### 3.4 PROPUESTAS PARA EL SISTEMA DE BICICLETAS.

En la presente investigación se realizaron dos propuestas de expansión del sistema, con el objetivo de mejorar la cobertura y ofrecer este modo de transporte a una mayor cantidad de población.

La propuesta 1 se compone de 29 estaciones (8 estaciones actuales y 21 nuevas estaciones), es decir se aumenta en un 262.5% el número de estaciones respecto a la situación actual; pasando de cubrir 7 barrios de la ciudad a cubrir 21 barrios en la ciudad de Manizales y 2 barrios en el municipio de Villamaría.

La ubicación de las estaciones de bicicletas en esta propuesta, se fundamenta en la elección de las zonas de la ciudad que más atraen viajes. En la Tabla 2, se observa las estaciones de las que se compone la propuesta; y en la Figura 21, se observa la ubicación geográfica de las estaciones.

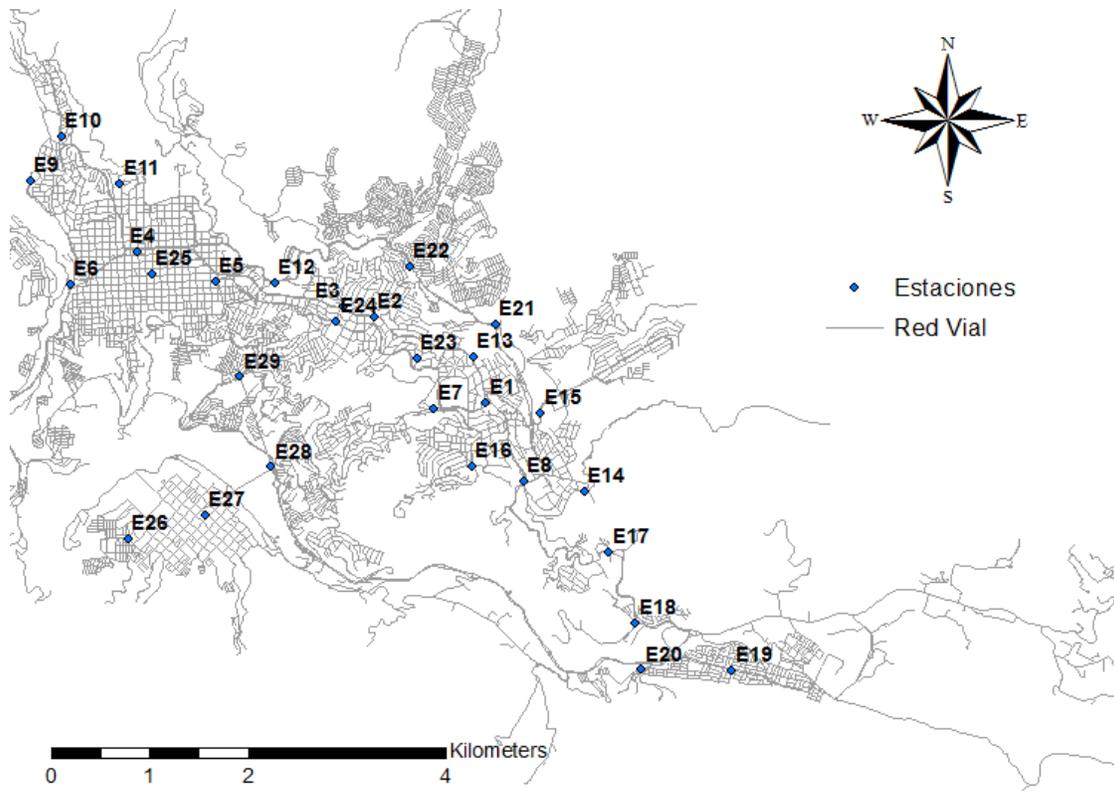
Tabla 2. Estaciones de la Propuesta 1.

<b>Estación</b>	<b>Ubicación</b>
E1	Cable
E2	Plaza 52
E3	Parque La Mujer
E4	Alfonso López
E5	Fundadores
E6	Parque del Agua
E7	Universidad Nacional Palogrande
E8	Milán
E9	Colonizadores
E10	Iglesia V/Pilar
E11	Universidad Manizales
E12	Universidad Autónoma
E13	Universidad Católica
E14	Parque Milán
E15	Homecenter
E16	Palermo
E17	Expoferias
E18	Bosque PP
E19	Caí Enea
E20	Universidad Nacional Nubia
E21	Aguas Manizales
E22	Entrada Villahermosa

Estación	Ubicación
E23	Positiva/ Col Rosario
E24	Universidad Caldas Salud
E25	Plaza Bolívar
E26	Caí Pradera
E27	Parque Villamaria
E28	Cambulos
E29	Bengala

Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Ubicación Geográfica de las estaciones en la propuesta 1.



Fuente: Elaboración propia.

La propuesta 2 se compone de 46 estaciones (8 estaciones actuales y 36 nuevas estaciones), aumentando en un 475% el número de estaciones respecto a la situación actual, y 58.62% respecto de la propuesta1; pasando de cubrir 7 barrios de la ciudad en la situación actual, y cubrir 21 barrios en la ciudad de Manizales y 2 barrios en el municipio de Villamaría en la propuesta 1, a cubrir 34 barrios en la ciudad de Manizales y 3 barrios en el municipio de Villamaría en la propuesta 2. A partir de la propuesta 1, se adicionan unas ubicaciones cercanas a zonas residenciales donde no se ofrecía cobertura en relación con la primera propuesta.

Se resalta que es necesario validar las ubicaciones de las estaciones a partir de estudios de demanda de este modo de transporte en la ciudad. En la Tabla 3, se observa las estaciones de las que se compone la propuesta 2; y en la Figura 22, se observa la ubicación geográfica de las mismas.

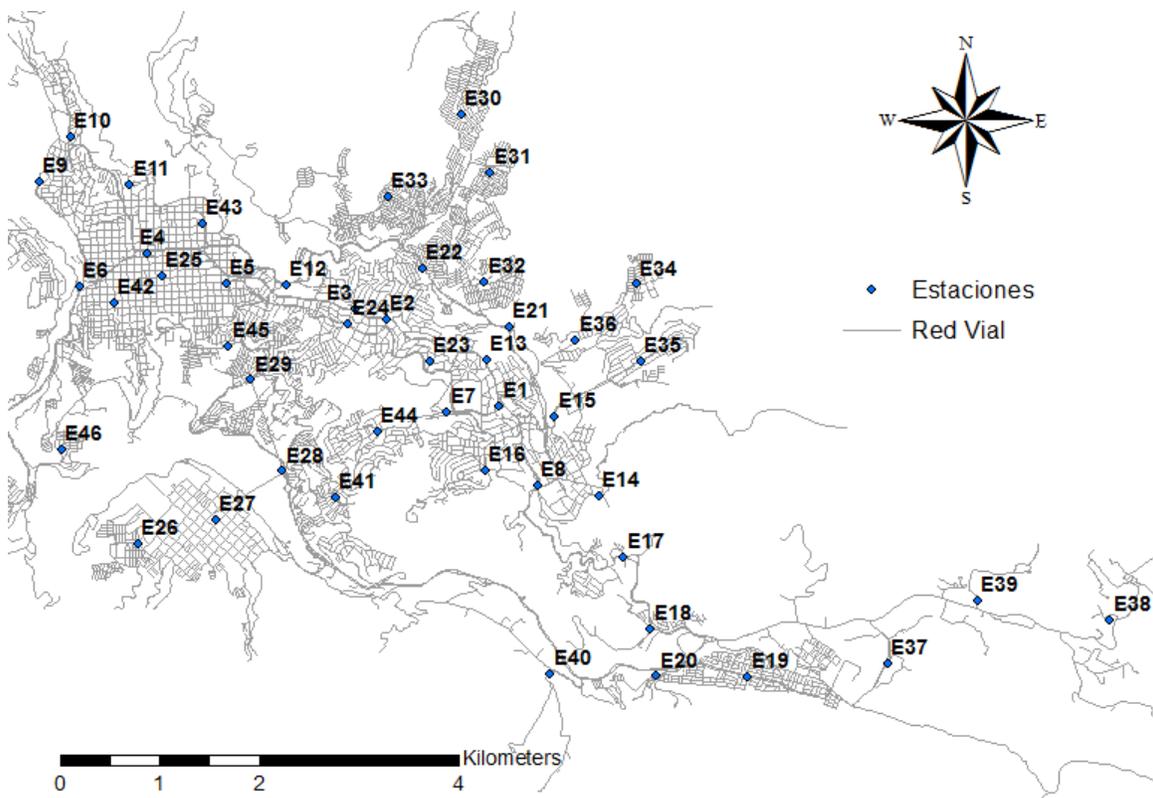
Tabla 3. Estaciones de la Propuesta 2.

<b>Estación</b>	<b>Ubicación</b>
E1	Cable
E2	Plaza 52
E3	Parque La Mujer
E4	Alfonso López
E5	Fundadores
E6	Parque del Agua
E7	Universidad Nacional Palogrande
E8	Milán
E9	Colonizadores
E10	Iglesia V/Pilar
E11	Universidad Manizales
E12	Universidad Autónoma
E13	Universidad Católica
E14	Parque Milán
E15	Homecenter
E16	Palermo
E17	Expoferias
E18	Bosque PP
E19	Caí Enea
E20	Universidad Nacional Nubia
E21	Aguas Manizales
E22	Entrada Villahermosa
E23	Positiva/ Col Rosario
E24	Universidad Caldas Salud
E25	Plaza Bolívar
E26	Caí Pradera
E27	Parque Villamaria
E28	Cambulos
E29	Bengala
E30	San Sebastián
E31	Solferino

Estación	Ubicación
E32	La Carola
E33	El Caribe
E34	La Cumbre
E35	La Sultana
E36	Minitas
E37	El Sena
E38	Materia
E39	Licorera
E40	La Florida
E41	Malhabar
E42	El Bosque
E43	Las Delicias
E44	Fátima
E45	EL Nevado
E46	Estambul

Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Ubicación Geográfica de las estaciones en la propuesta 2.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.5 ANALISIS DE RED.

A partir de la puesta a punto de la red de infraestructura de transporte y revisando la conectividad y los atributos de velocidad y tiempo cargados a cada arco, se realiza un análisis de red de infraestructuras del transporte con la herramienta "Network Analyst"<sup>10</sup> del software Arcmap. Esta herramienta basa los cálculos en el algoritmo de Dijkstra o algoritmo de los "caminos mínimos"; el algoritmo realiza un análisis a la red, y busca la trayectoria más corta desde un origen único medido a través de una variable de impedancia como la distancia o el tiempo de viaje en el caso del transporte (Dijkstra, 1959). Mas descriptivamente el algoritmo funciona de la siguiente manera:

Se tiene un grafo de N número de nodos, siendo x el nodo inicial, y un vector D de tamaño 1xN en la que se guardará al final del algoritmo las distancias desde x al resto de los nodos.

1. Inicializar todas las distancias en D con un valor infinito relativo ya que son desconocidas al principio, exceptuando la de x que se debe colocar en 0 debido a que la distancia de x a x sería 0.
2. Sea  $a = x$  (tomamos a como nodo actual).
3. Recorremos todos los nodos adyacentes de a, hasta llegar a un nodo  $y_i$  que pertenece al conjunto de nodos destino Y.
4. Se escoge el valor mínimo del conjunto de rutas entre el origen x y el destino  $y_i$ .
5. Se guarda el valor en el vector D, y se vuelve al paso 3 para analizar la impedancia hacia otro destino.

Para esta investigación, se tuvieron en cuenta ambas impedancias descritas anteriormente; por un lado, se usó la impedancia de la distancia para analizar la cobertura de cada una de las estaciones actual y propuestas del sistema; por otro lado, se usó la impedancia por tiempo para calcular la accesibilidad territorial con isócronas y analizar los tiempos de viaje de las personas en el sistema. La herramienta "Network Analyst", contiene una variedad de algoritmos que realizan diferentes labores, dependiendo de la necesidad.

---

<sup>10</sup> <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/algorithms-used-by-network-analyst.htm>

Para esta investigación se usarán tres (3): “Location-Allocation Problema”, “New Service Area”, y “Closest Facility”. A partir de recomendaciones de la Guía metodológica del ITDP (Gauthie et al., 2013), el radio de cobertura de cada estación es de 500 metros a la redonda, por tal razón este fue el valor de tolerancia evaluado para cada análisis.

### **3.5.1 ANALISIS DE LOS USUARIOS INSCRITOS AL SISTEMA.**

Se realiza un análisis de la ubicación de los usuarios inscritos al sistema, respecto a la ubicación de las estaciones de bicicletas públicas a través del algoritmo “Location-Allocation Problem” del Arcmap. El algoritmo analiza la ubicación de los puntos de servicio (Estaciones de bicicletas) de modo que suministren el servicio a la demanda circundante (Usuarios inscritos) de una manera más eficiente (Cooper, 1963). En la Figura 23, se observa un ejemplo del problema; cada punto representa, en este ejemplo, la demanda que pueda satisfacer las unidades de bomberos, los cuales están representados por un gráfico con la F (Fire), aquí se presentan equipamientos de color vivo y opacos, los primeros son los elegidos por el algoritmo para satisfacer la demanda, mientras que los segundos son los que no son necesarios, pues la demanda está cubierta por otra estación de bomberos.

El algoritmo asigna los puntos de la demanda a partir de los criterios que se quieran evaluar; para el caso de esta investigación se busca maximizar la cobertura, ya que se necesita que la demanda alcance el punto de servicio en un intervalo de distancia determinado. en el cual se le estipula un intervalo de impedancia y el evalúa a que usuarios se está ofreciendo el servicio con el criterio de maximizar la cobertura. Si se quiere profundizar en los diferentes criterios del algoritmo, se recomienda al lector ir a la página oficial del Arcmap<sup>11</sup>.

Figura 23. Location-Allocation Problem.

---

<sup>11</sup> <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>



Fuente: Arcgis desktop.

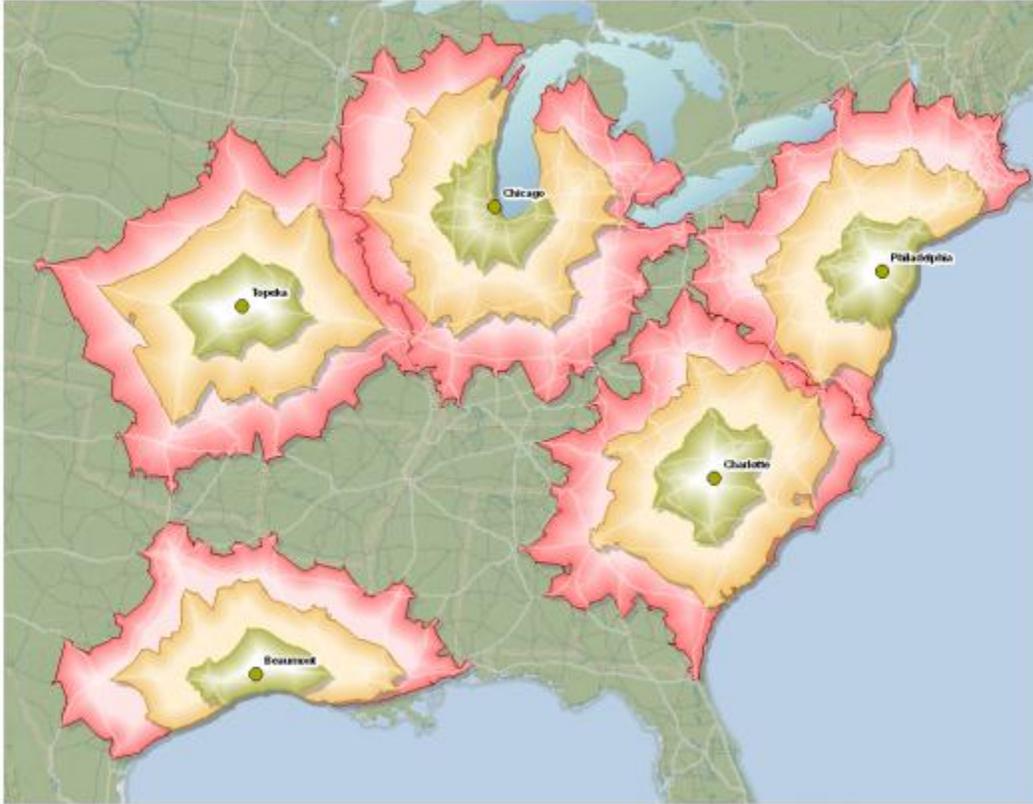
<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/location-allocation.htm> (12/04/2017)

### 3.5.2 CALCULO DE LAS AREAS DE COBERTURA DEL SISTEMA.

Se aplica un algoritmo del software Arcmap llamado “Análisis del Área de Servicio<sup>12</sup>”. Este algoritmo permite encontrar las áreas de servicio situadas en las proximidades sobre una red de infraestructura de transporte. Se generan polígonos que representan las calles más accesibles bajo una tolerancia dada, de la variable de impedancia que se esté evaluando; 500 metros para este caso. Una vez creados los polígonos se puede observar en la red, como se distribuye el servicio y a quienes se está ofreciendo realmente. (Ver Figura 24).

Figura 24. New Service Area.

<sup>12</sup> <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/service-area.htm>



Fuente: Arcgis desktop.

<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/service-area.htm> (12/04/2017)

### 3.5.3 CALCULO DE LA ACCESIBILIDAD TERRITORIAL

Para el cálculo de la accesibilidad territorial en base a la impedancia del tiempo, se usó el algoritmo de “Closest Facility”<sup>13</sup> del software Arcmap. El algoritmo evalúa los costos de viajar entre los orígenes y destinos y elige los mínimos. Se puede determinar previamente cuantos orígenes y destinos buscar, y determinar en qué dirección se viaja.

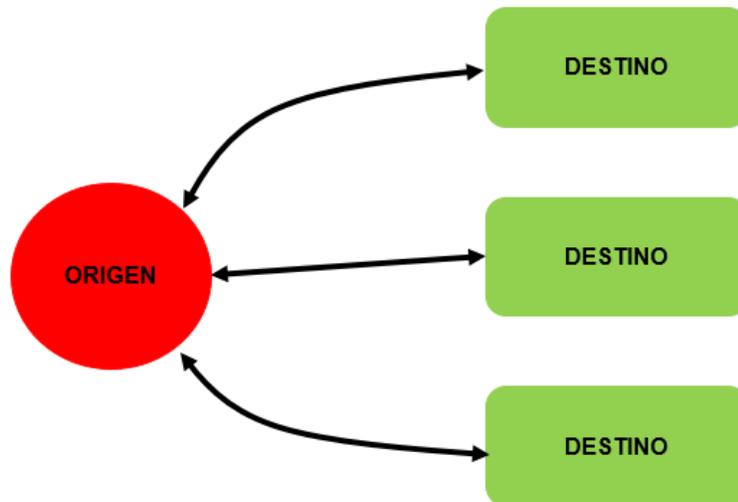
### 3.5.4 ACCESIBILIDAD MEDIA INTEGRAL

El concepto de accesibilidad media integral evalúa los costos mínimos u óptimos de viajar entre un origen al resto de la red de infraestructura del transporte. (Ver Figura 25). Este análisis se usa para evaluar la posición de un equipamiento en

<sup>13</sup> <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/closest-facility.htm>

particular respecto al resto de la infraestructura y analizarlo posteriormente con la población.

Figura 25. Accesibilidad media integral.



Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo en este caso funciona de la siguiente manera:

- Se requiere definir unas facilidades (“Facility”), los cuales en este caso son las estaciones de bicicletas públicas.
- Se define de igual forma los incidentes (“Incidents”), los cuales son el resto de nodos de la red de infraestructura.
- Se define como variable de impedancia el tiempo de viaje caminando y se corre haciendo que se viaje desde los incidentes hacia las facilidades.

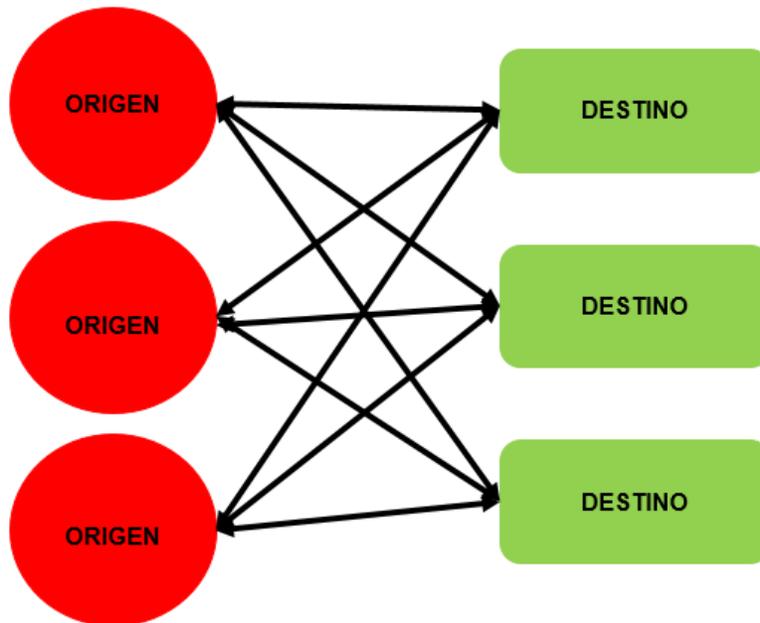
Se obtiene un vector de tiempos  $t_{vi}$  (Tiempo de viaje entre el nodo  $i$  al nodo  $j$ ), el cual contiene los tiempos mínimos que se necesitan para viajar desde los nodos de la red hacia las estaciones de bicicletas. Posterior a este análisis, se relaciona el tiempo de viaje con las coordenadas de longitud y latitud para el análisis geográfico, conformando una matriz de  $n \times 3$ .

### 3.5.5 ACCESIBILIDAD MEDIA GLOBAL.

El concepto de este tipo de accesibilidad varía en el sentido de que todos los nodos de la red se establecen como facilidades e incidentes. Al realizar el cálculo,

se obtienen los valores de tiempo mínimo de todos los nodos hacia todos los nodos, obteniendo una matriz de nxn (Ver Figura 26). De igual forma se resalta, que en las vías autorizadas como vías para los ciclistas, se calculó un tiempo medio de viaje basado en la velocidades del ciclistas; mientras que en el resto de la red, se calculó el tiempo medio de viaje basado en la velocidad peatonal, para simular el sistema como actualmente trabaja. Se calcula el valor promedio de viaje para cada nodo (Ver Ecuación 4).

Figura 26. Accesibilidad media global.



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación 4. Cálculo del tiempo promedio de viaje.

$$T_{vi} = \frac{t_{vi}}{(n - 1)} \quad i = 1,2,3,\dots,n \quad j = 1,2,3,\dots,m$$

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

$T_{vi}$  = Tiempo promedio de viaje del nodo i.

$t_{vi}$  = Tiempo de viaje del nodo i al nodo j.

Al Realizar este procedimiento se obtiene un vector de nx1 que deben ser relacionados con valores de longitud y latitud para el análisis geográfico, conformando una matriz de nx3.

En esta investigación se observa un obstáculo importante: se estaban evaluando dos modos de transporte al tiempo: caminata y viaje en bicicleta. En algunos puntos el algoritmo encontraba que era mejor realizar el viaje caminando que, a través de la bicicleta, distorsionando el análisis objetivo, por tal motivo el algoritmo de caminos mínimos solo se realizó sobre la vía autorizada para el tránsito de bicicletas.

Después de realizar el algoritmo, se utilizaron los valores de tiempo medio de viaje de la accesibilidad integral para complementar los viajes sobre el área de cobertura del sistema y poder obtener un análisis más robusto. En el capítulo de resultados se podrá evaluar detenidamente este punto.

### **3.6 ANÁLISIS GEOESTADISTICO.**

A partir de la matriz de nx3, se realiza un modelo geo estadístico; se toman los valores observados de la variable analizada en cada punto muestral, en este caso, valores del tiempo medio de viaje, y se predice valores en zonas donde no existen muestras de datos; para esto se utiliza la herramienta de Análisis Geo estadístico del software Arcmap.

Se utiliza el método Kriging, el cual encuentra la mejor estimación lineal insesgada de los valores de los puntos. Se compone de unos métodos de predicción espacial que incluyen la auto correlación, es decir, las relaciones estadísticas entre puntos medidos, fundamentado en la minimización del error cuadrático medio de predicción(Giraldo, 2002). Kriging supone que la distancia entre puntos muestrales reflejan una correlación espacial, que pueden explicar la variación de toda una superficie. Se cuenta con diferentes etapas; la primera es la exploración de los puntos muestreados, que para la investigación es la matriz de nx3; se crean los semivariogramas, cuya estructura se observa en la Ecuación 5, para evaluar la correlación entre los puntos muestreados; sigue con la creación de la superficie de toda el área de estudio y termina con el análisis de la varianza de la superficie.

Ecuación 5. Estructura del semivariograma.

$$\gamma(h) = \frac{\sum(Z(x+h) - Z(x))^2}{2n}$$

Fuente: Elaboración propia.

Donde,

$Z(x)$ = Valor de la variable en el sitio  $x$ ,

$Z(x+h)$  = Valor de la variable separado del sitio anterior por una distancia  $h$

$n$ = El número de parejas separada por dicha distancia.

Según esta fórmula, se parte del criterio que a menor distancia mayor correlación entre las variables estudiadas. La fórmula general del método kriging se forma como una suma ponderada de:

Ecuación 6. Estructura de Kriging.

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i)$$

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

$Z(S_i)$ = Valor medido en la ubicación  $i$ .

$\lambda_i$ = Ponderación para el valor medido en la ubicación  $i$

$S_0$ = Ubicación de la predicción

$N$ = Cantidad de valores medidos.

### 3.7 CALCULO DE PORCENTAJE DE AHORRO.

Para observar los cambios e impactos generados con las propuestas establecidas en la investigación, se realiza la comparación del tiempo de viaje de cada uno de los nodos en las propuestas con el homólogo en la situación actual, aplicando la Ecuación 7

*Ecuación 7. Cálculo del porcentaje de ahorro.*

$$\%Ahorro = \frac{(Tv Propuesta - Tv Situación Actual)}{Tv Situación Actual}$$

Fuente: Elaboración propia.

Nuevamente se obtendrá una matriz de nx3 con coordenadas en longitud y latitud, y se puede realizar geo estadística para observar los porcentajes de ahorro en el sistema de información geográfica.

Una vez obtenidos los resultados de las áreas de cobertura de las estaciones, las isócronas de la accesibilidad media integral y global, y las curvas del porcentaje de ahorro, se sobrepone un archivo que contiene información socioeconómica de la ciudad de Manizales, para determinar los estratos que se ven cubiertos por el sistema. Según el archivo geográfico, se tiene un total de 415.124 habitantes. A partir de los resultados de contrastar la información de los archivos, se crean ojivas para analizar el porcentaje de cobertura para cada estrato socioeconómico de la ciudad.

### **3.8 ANALISIS DE COBERTURA ESPACIAL.**

El análisis de cobertura espacial, se desarrolla superponiendo dos archivos que poseen características geográficas (ubicación), y características descriptivas (datos). Se hace un cruce de la información que se encuentra ubicado en el mismo espacio geográfico, sean puntos, líneas o polígonos, y se busca la relación de los datos de cada archivo.

Una vez obtenidos los archivos de las áreas de cobertura, curvas de accesibilidad y curvas de porcentaje de ahorro, se realiza una superposición de datos geográficos con un archivo que contiene información socioeconómica de la ciudad de Manizales, para determinar el área y la población que se encuentra cubierta. Para la población se tiene información discriminada por estratos socioeconómicos, siendo el estrato 1 el de menores ingresos y el estrato 6 el de mayores ingresos.

## 4 RESULTADOS.

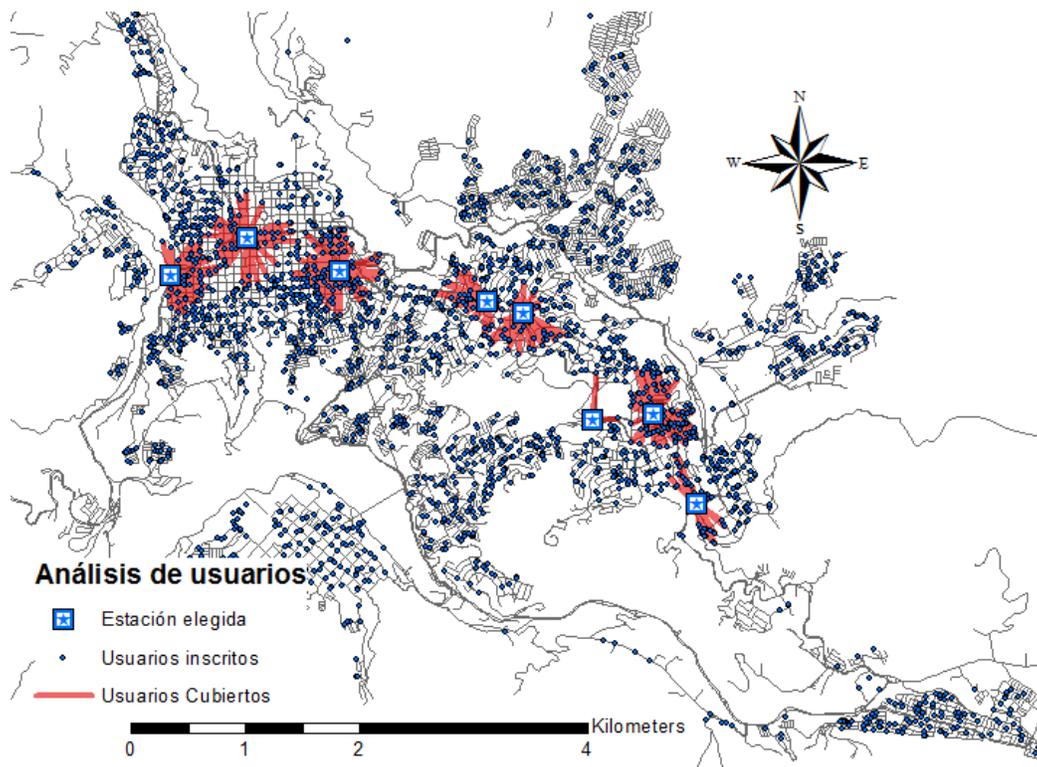
### 4.1 SITUACIÓN ACTUAL.

#### 4.1.1 ANALISIS DE LOS USUARIOS INSCRITOS.

En la Figura 27, se observa el resultado del análisis de la ubicación de las estaciones de bicicleta respecto a los usuarios inscritos. Visualmente, se puede observar que la inscripción de los usuarios al sistema ha sido exitosamente abarcada en toda la ciudad, sin embargo, la cantidad de usuarios que tienen cercana una estación es baja.

Al evaluar una impedancia de 500 metros desde las estaciones, se ven impactados por el sistema un total de 698 usuarios de los 3.314 inscritos en el sistema, que representa un 21,06% de los usuarios inscritos hasta junio del 2016, y representa el 0,17% de los habitantes de la ciudad.

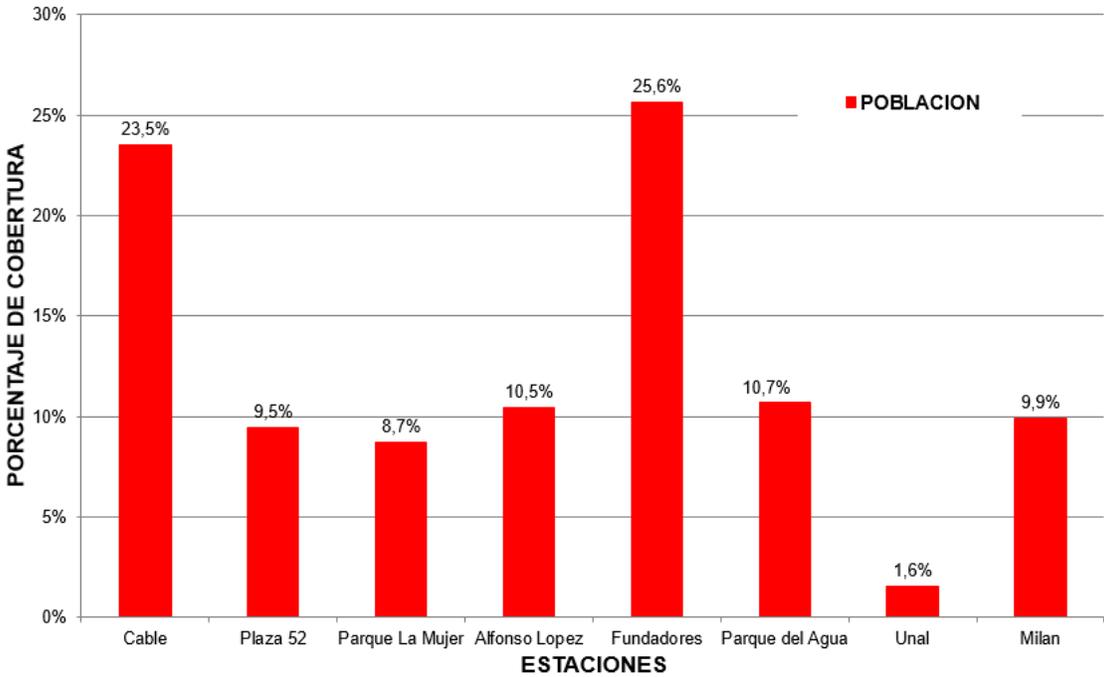
Figura 27. Location-Allocation problem, situación actual.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 28, se observar la distribución de usuarios efectivamente impactados por el sistema, en las estaciones actuales. Se observa que las estaciones más importantes del sistema son la estación de Fundadores (E5) y el Cable (E1), que cubren más del 50% de los 698 usuarios efectivamente cubiertos por el sistema; las demás estaciones cubren entre un 8,5% y 11% de los usuarios efectivamente cubiertos. La estación de la Universidad es la que menos porcentaje cubre, sin embargo, se debe tener en cuenta que, a pesar de no generar viajes basados en el hogar, es una zona muy importante para atraer viajes y generar viajes de regreso al hogar.

Figura 28. Distribución de los usuarios realmente impactados por el sistema, por estaciones.



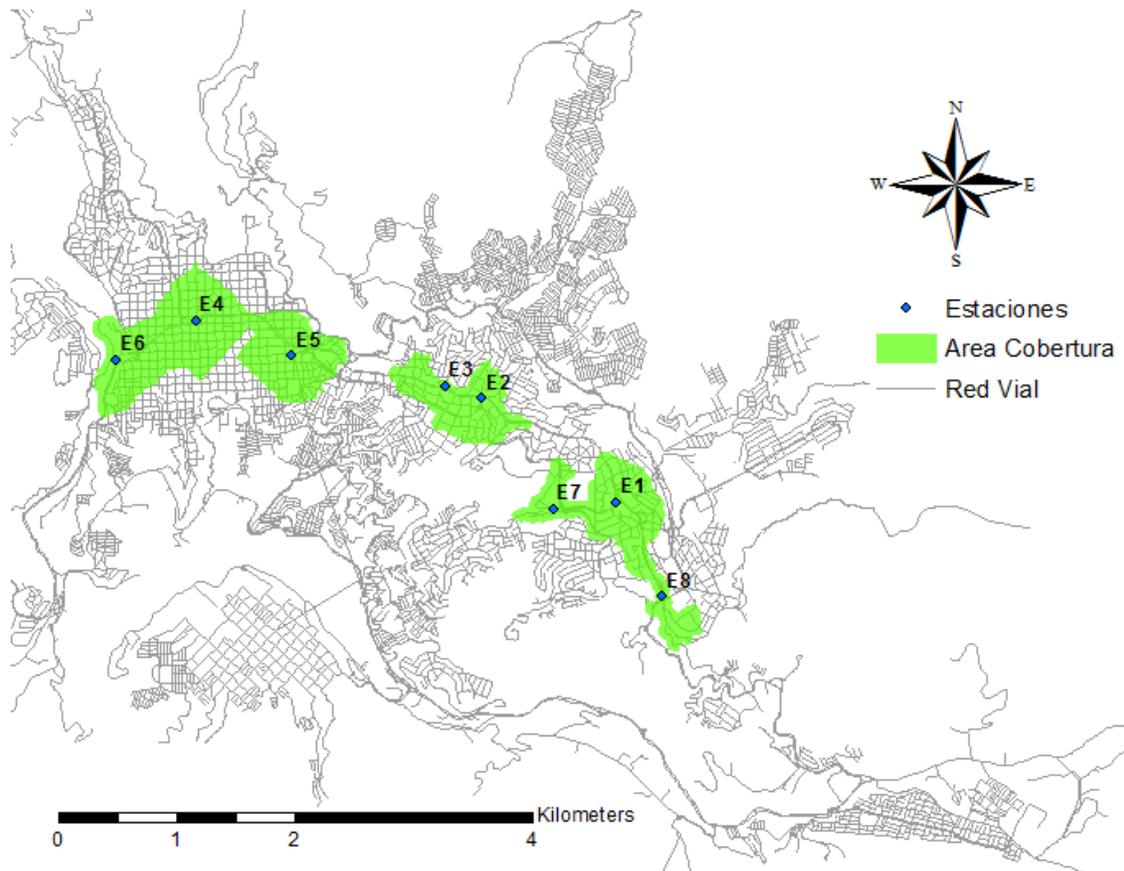
Fuente: Elaboración propia.

**4.1.2 COBERTURA DE LAS ESTACIONES.**

En la Figura 29, se observa la cobertura del sistema de bicicletas públicas para el escenario actual.

Se puede analizar que la cobertura del sistema se concentra en la Avenida Santander, zona donde existen mayores usos comerciales que residenciales. Se tiene un total de 2,5 km<sup>2</sup> de cobertura, donde se cubre un total de 40.358 habitantes, los cuales representan un 9,72% de la población.

Figura 29. Área de Cobertura escenario actual.

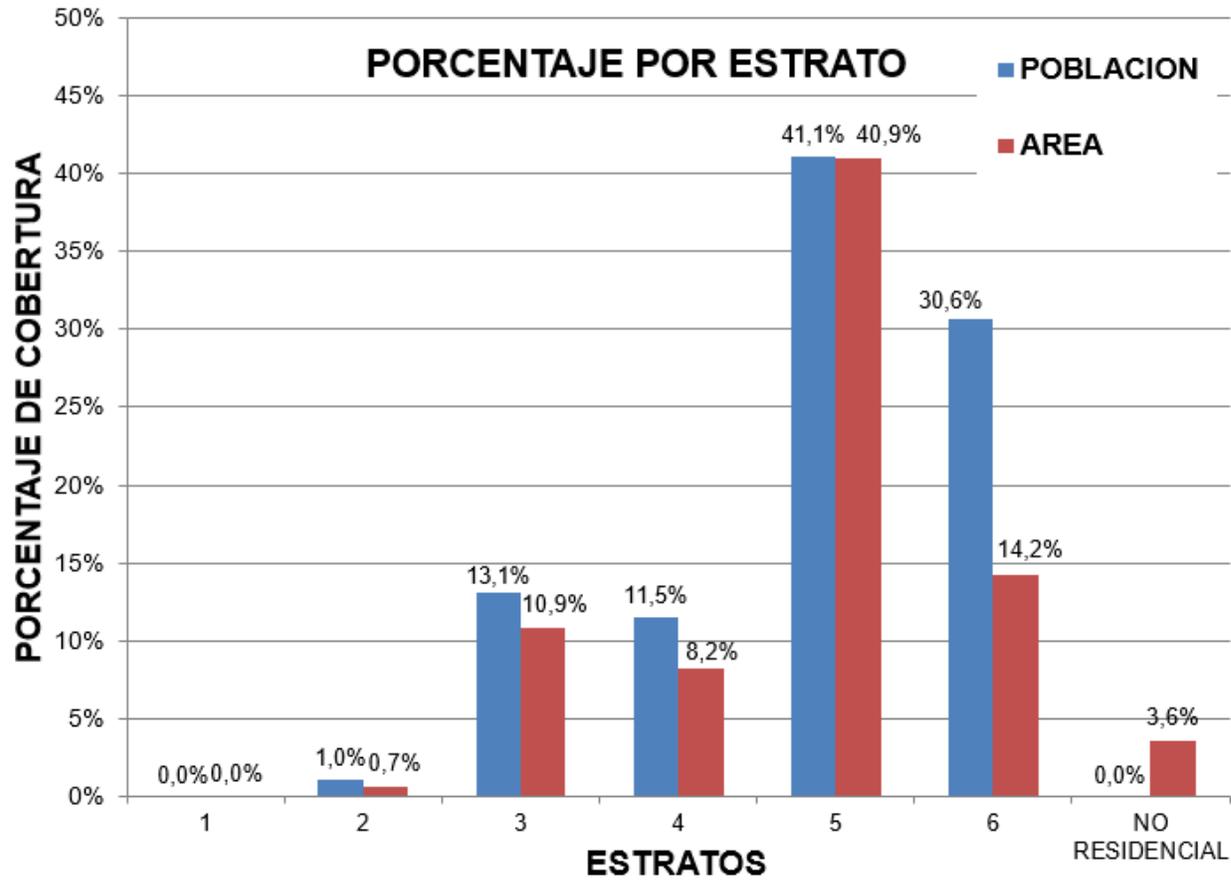


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30, se observa la distribución de población cubierta por estrato. Actualmente, el sistema cubre principalmente a los estratos 5 y 6 con 41,1% y 30,6% respectivamente; el estrato 1 no se ve cubierto por el sistema y el estrato 2 cubre solo el 1% de la población. Respecto al área cubierta, se resalta el estrato 6, donde solo se cubre el 14,2% del área, lo que indica que la(s) estación(es) que impactan directamente el estrato 6 de Manizales, están ubicadas cerca a residencias de alta densidad, como apartamentos.

Los resultados muestran dos panoramas claros; el primer panorama es que el sistema impacta directamente a la población de altos ingresos económicos, lo cual es una estrategia apropiada, ya que se está ofreciendo un modo de transporte alternativo al vehículo particular; por otro lado, el segundo panorama muestra que las personas con bajos ingresos económicos no se ven servidas por el sistema. Se debe mejorar la planificación desde esta perspectiva, ya que las personas con bajos ingresos son las más dispuestas al uso de un sistema económico, y que les reduciría los tiempos de viaje considerablemente.

Figura 30. Distribución de la población por estrato. Situación actual.

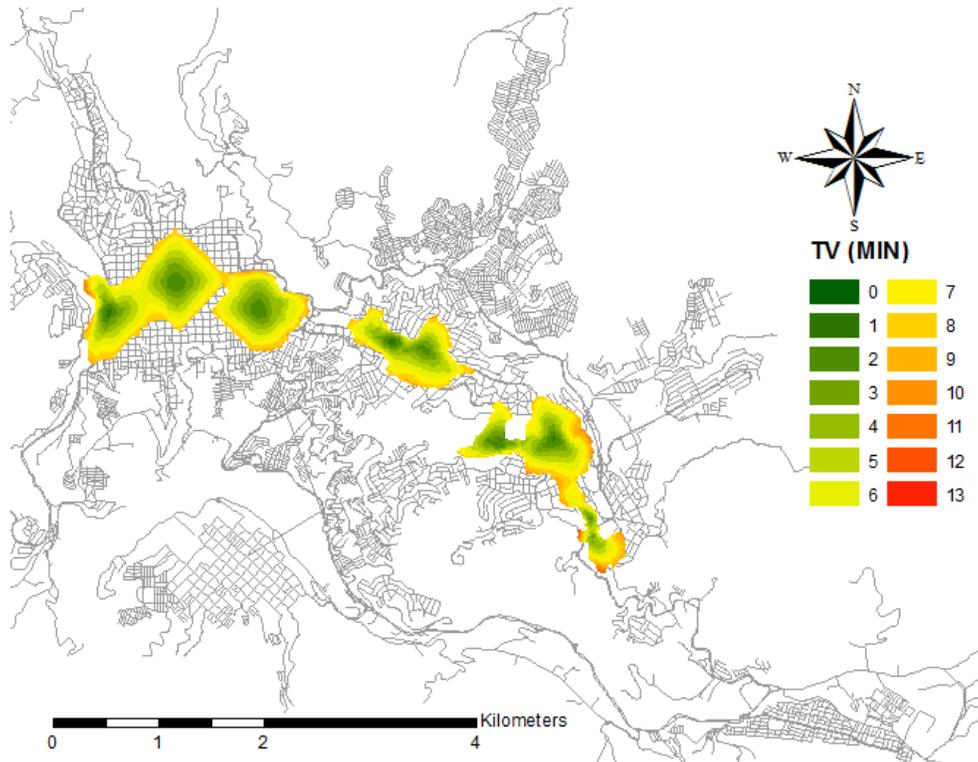


Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.3 ACCESIBILIDAD MEDIA INTEGRAL.

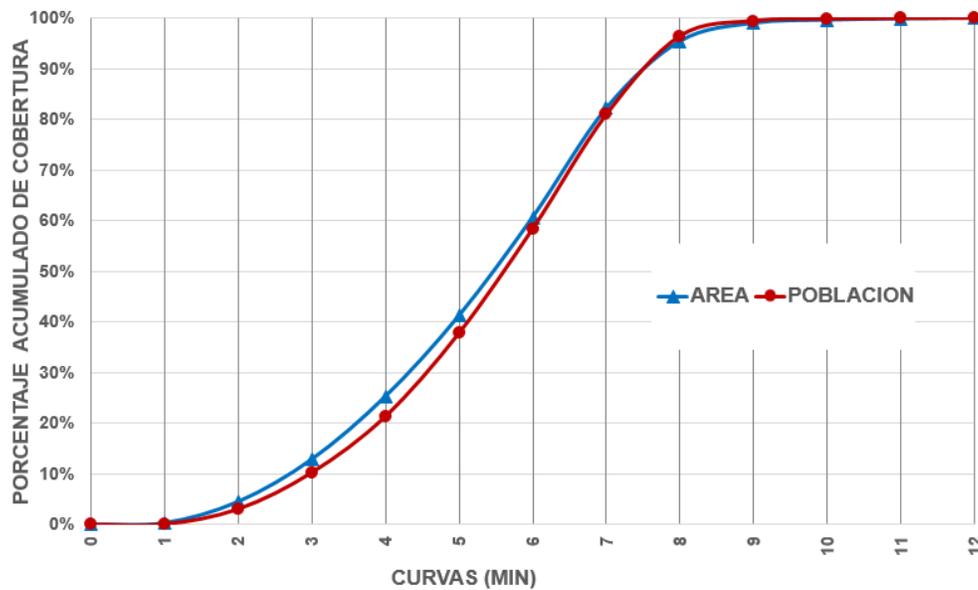
En la Figura 31, se observa las isócronas en las áreas de cobertura efectiva del sistema de bicicletas. Dentro de estas áreas se tienen hasta un tiempo máximo de 13 minutos para acceder a la estación. En la Figura 32, se observa el porcentaje de cobertura de las estaciones. El 50% de la población que se encuentra dentro del área de cobertura necesita invertir alrededor de 5,5 minutos para acceder a una estación; para que más del 90% llegue a una estación se debe invertir 8 minutos. Este panorama refleja que dentro del área de cobertura el tiempo para acceder a una estación es relativamente bajo. Se resalta que este análisis se basa en el tiempo de viaje que debe invertir las personas caminando hacia las estaciones para acceder a una bicicleta.

Figura 31. Accesibilidad Media Integral. Situación actual.



Fuente: Elaboración propia.

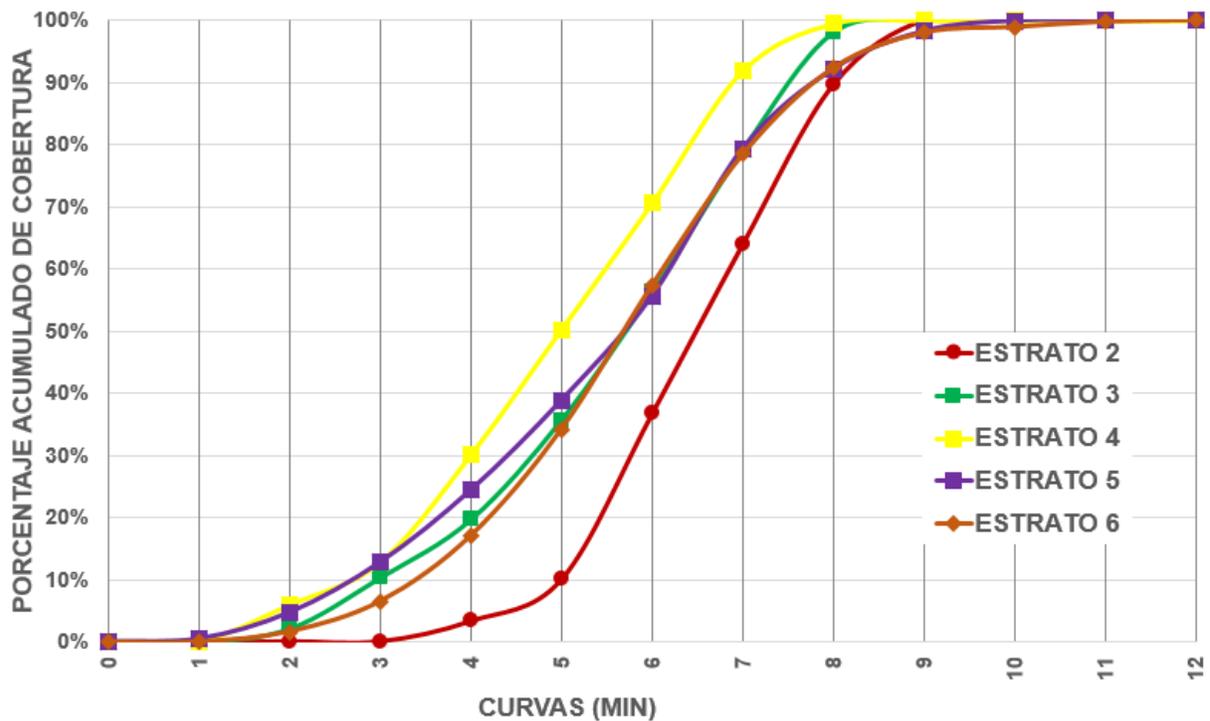
Figura 32. Porcentaje de cobertura. Situación actual.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 33, se observa la cobertura discriminada por estrato socioeconómico. Se observa que el estrato que debe invertir menos tiempos de viaje es el estrato 4, necesita 5 minutos para cubrir al menos el 50% de la población de este estrato; el estrato 3, 5 y 6 invierten los mismos tiempos de viaje hacia las estaciones, con tiempos de viaje de 5,5 minutos para cubrir al menos el 50% de las personas; y el estrato 2 es el estrato que debe invertir más tiempo para acceder a una estación, con tiempos de más de 6 minutos para cubrir el 50% de los residentes. El estrato 1 no evidencia ninguna cobertura por el sistema de bicicletas.

Figura 33. Porcentaje de cobertura por estrato. Situación actual.



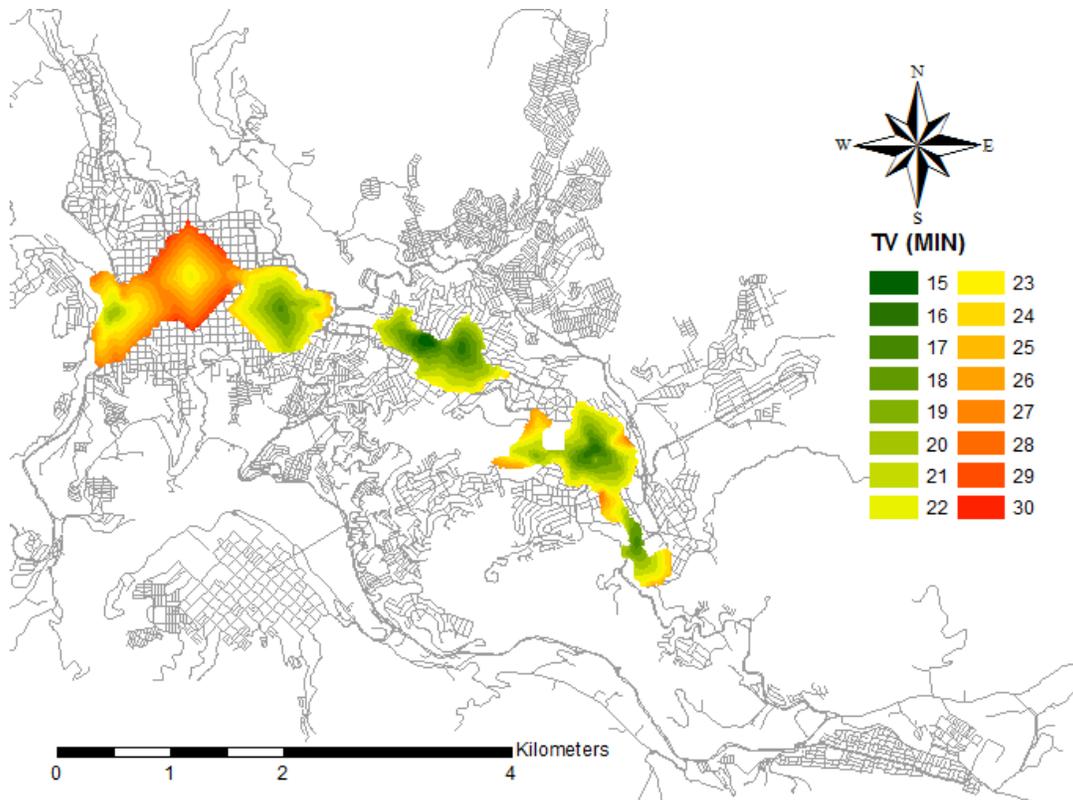
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.4 ACCESIBILIDAD MEDIA GLOBAL.

En la Figura 34, se observan las curvas isócronas en las áreas de cobertura efectiva del sistema de bicicletas. Se puede observar que en promedio desde cualquier zona dentro del área cobertura del sistema, es más accesible la zona del Parque de la Mujer, seguido de Plaza 52 y El Cable; por otro lado, la zona de cobertura de la Plaza Alfonso López, se identifica como el área menos accesible dentro del sistema de bicicletas.

En la Figura 35, se observa el porcentaje de cobertura del sistema de bicicletas dentro del área efectiva de cobertura del sistema. Se refleja que se necesitan en promedio 22 minutos de viaje para cubrir el 50% de la población influenciada por el sistema, y casi 30 minutos para cubrir a toda la población que se encuentra dentro del área de cobertura. Se resalta que este análisis se realiza con tiempos de viajes tanto caminando como de uso de la bicicleta.

Figura 34. Accesibilidad Media Global. Situación actual.

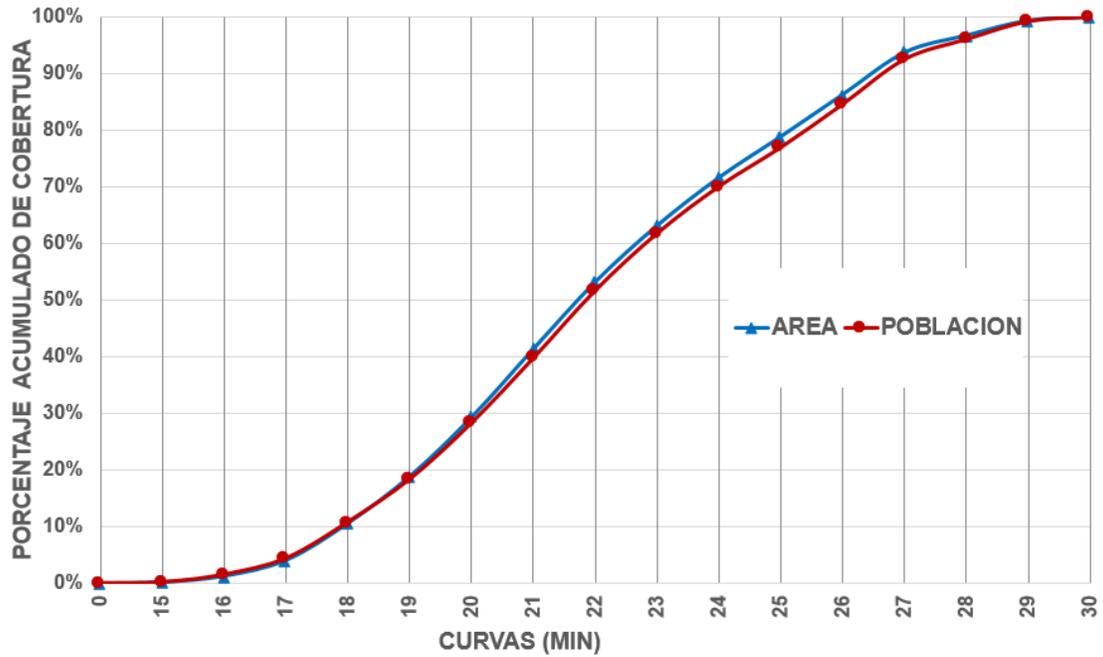


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 36, se observa la cobertura discriminada por estrato socioeconómico. Se observa que se deben invertir más de 22 minutos en promedio de viaje, para cubrir hasta el 50% de los residentes en estrato 2 y 3; mientras que los demás estratos se ven cubiertos en un 50% cuando se invierten en promedio 20 minutos.

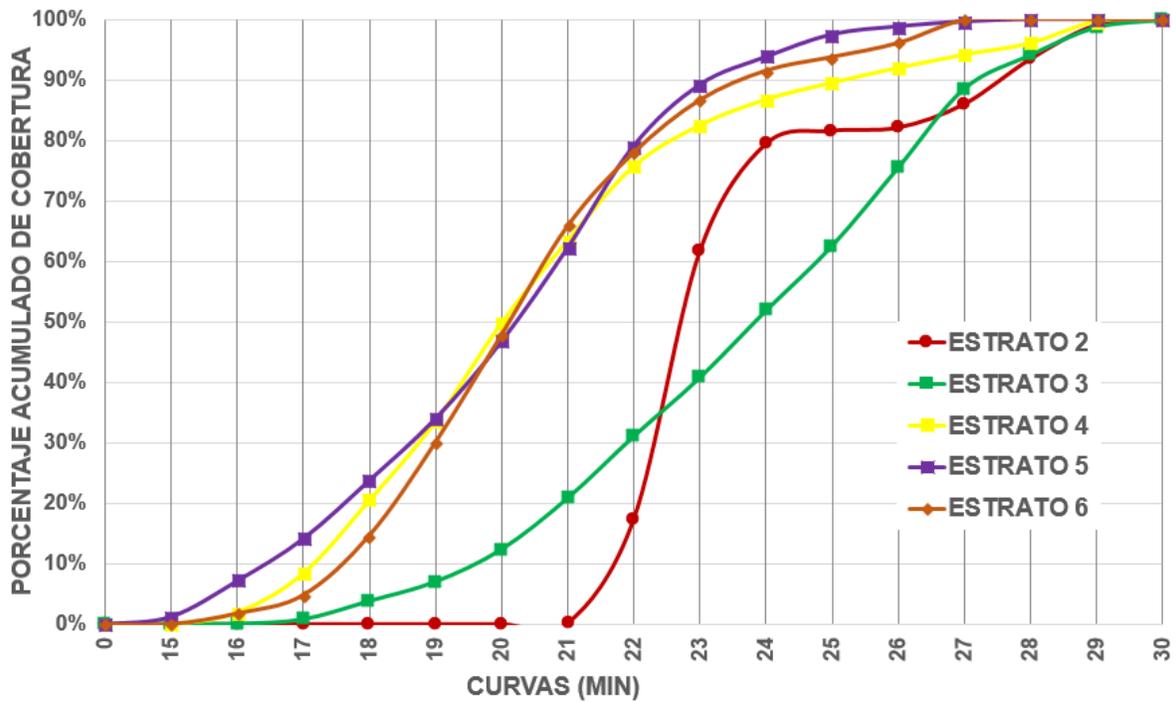
Si se analiza el comportamiento del estrato 2, se puede observar que hasta el minuto 21 no se presentaba cubrimiento en de población; posterior a los 21 minutos aumenta el porcentaje de cobertura de forma acelerada, esto se debe a que solo se cubre el 1% de estrato 2 como se vio en análisis anteriores, mas no por eficiencia del sistema.

Figura 35. Porcentaje de cobertura. Situación actual.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. Porcentaje de cobertura por estrato. Situación actual.



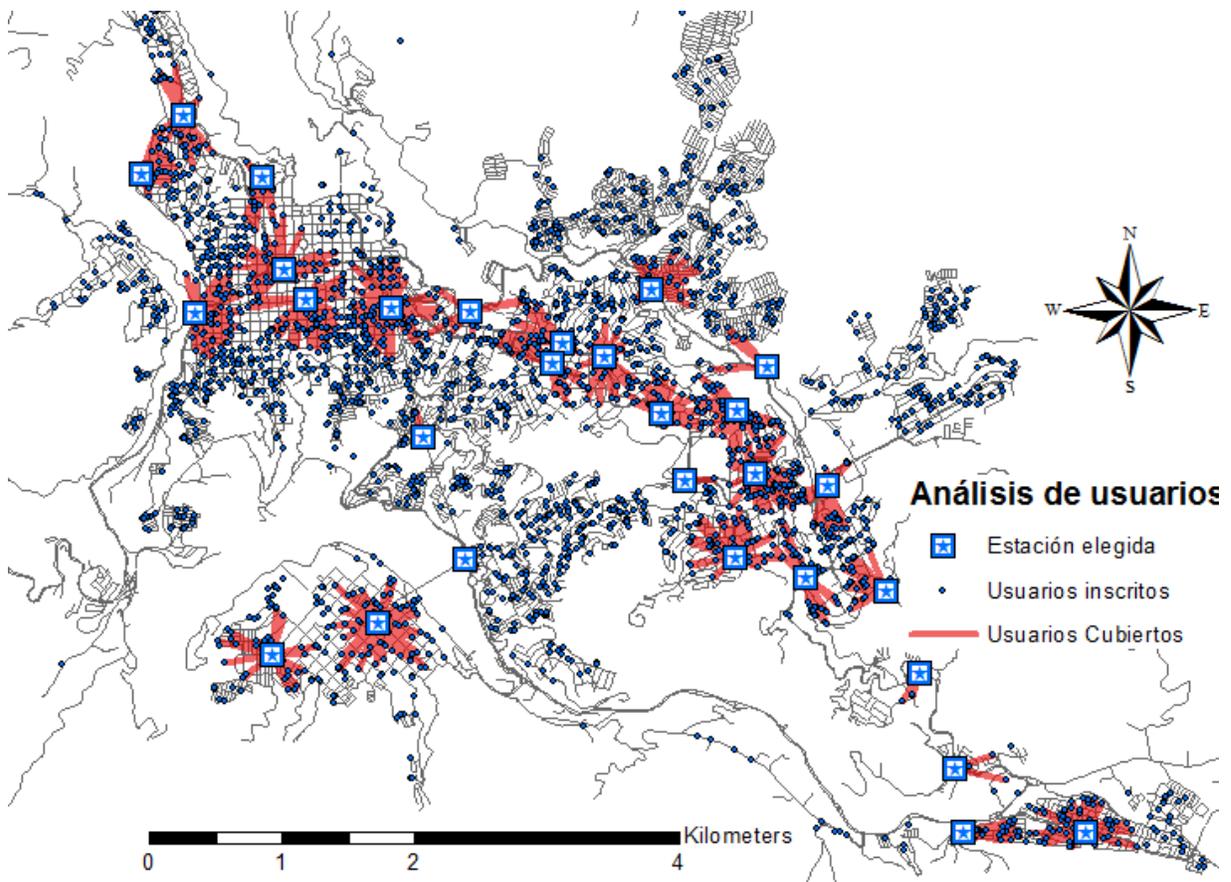
Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 PROPUESTA 1.

### 4.2.1 ANALISIS DE LOS USUARIOS INSCRITOS.

En la Figura 37, se observa el resultado del análisis de la ubicación de las estaciones de bicicleta de la propuesta 1, respecto a los usuarios inscritos. En general se observa una mejor cobertura con el aumento de las estaciones de bicicleta. En total se ven impactados por el sistema un total de 1.423 usuarios de los 3.314 usuarios inscritos en el sistema, que representa un 42,94% de los usuarios inscritos hasta junio el 2016, y representa el 0,34% de los habitantes de la ciudad; en promedio caminan 325 metros para acceder a una estación.

Figura 37. Location-Allocation problema. Propuesta 1.

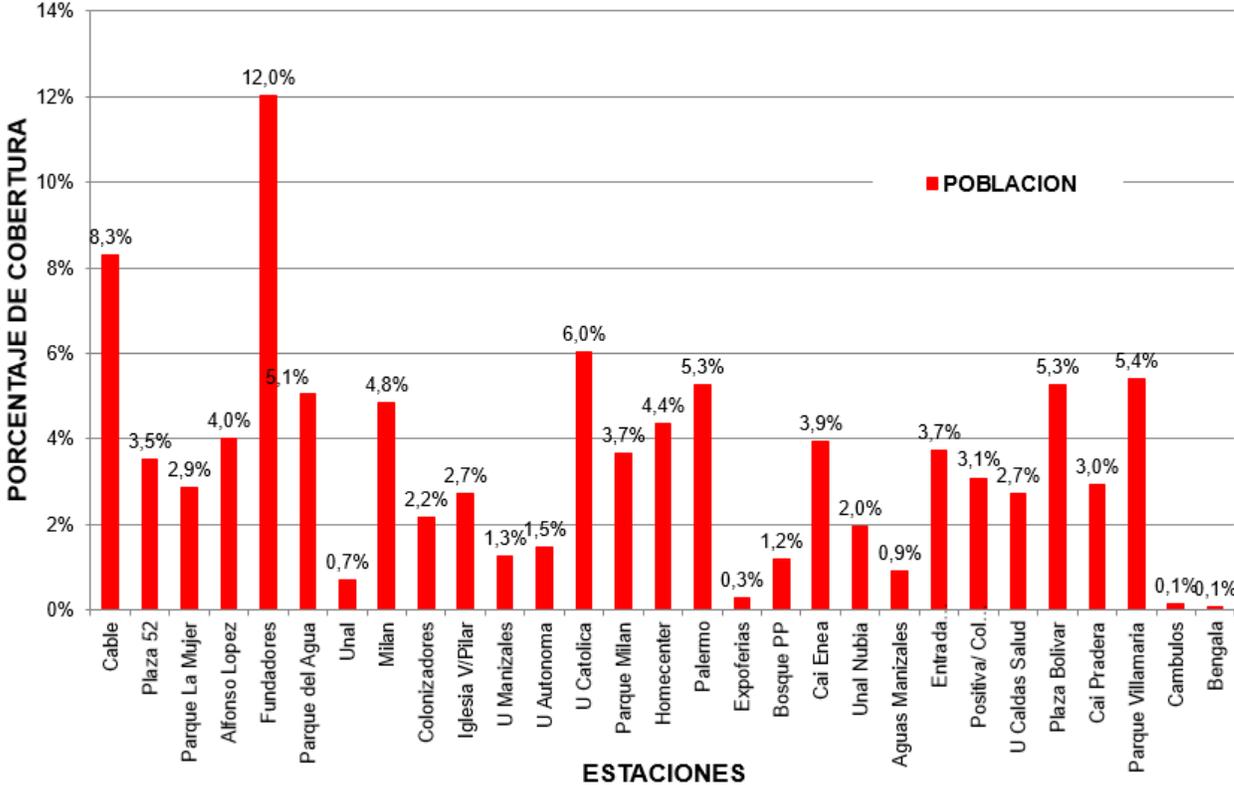


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 38, se observar la distribución de usuarios inscritos efectivamente impactados por el sistema, en las estaciones de la propuesta 1. Se observa que las estaciones más importantes del sistema continúan siendo la estación de Fundadores y el Cable, que cubren 20% de usuarios inscritos entre ambas; el

resto de usuarios se reparte en las demás estaciones. Las estaciones de la Universidad Nacional de Colombia y Universidad de Caldas, Expoferias, Bengala y Cábmulos son las que menos porcentaje cubren, sin embargo, se debe tener en cuenta que, a pesar de no generar viajes, son zonas que podrían atraer bastantes viajes, pero que deben ser validados por un estudio de demanda. Los puntos que no fueron asignados a ninguna estación, como la zona de Fátima, Carmen, Bosques del Norte, Sultana, entre otros, representan usuarios, que, a pesar de estar inscritos en el sistema, no cuentan con una estación cercana para usar la bicicleta.

Figura 38. Distribución de los usuarios realmente impactados por el sistema en la propuesta 1, por estaciones.



Fuente: Elaboración propia.

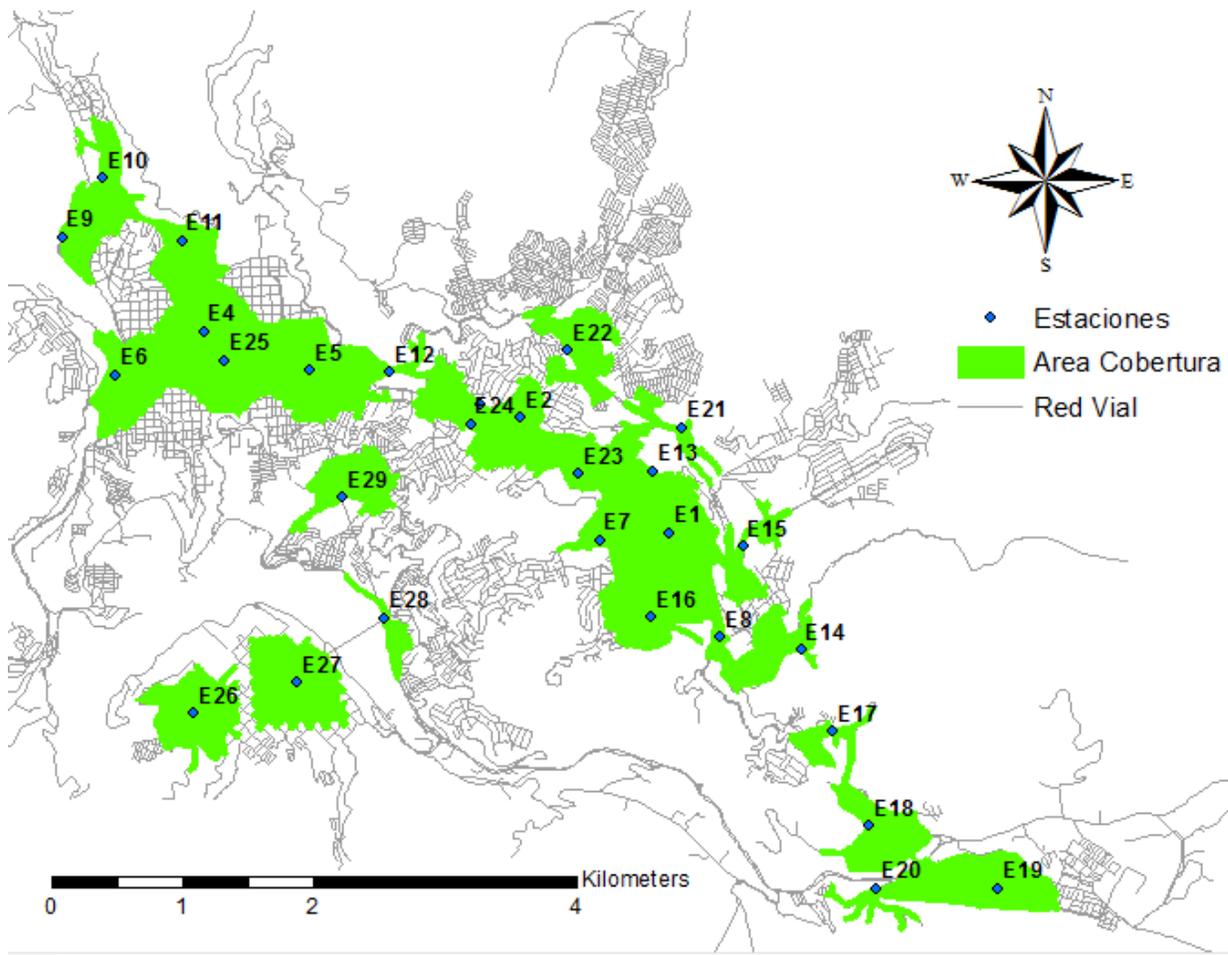
**4.2.2 COBERTURA DE LAS ESTACIONES.**

En la Figura 39, se observa la cobertura del sistema de bicicletas públicas de la propuesta 1. Se puede analizar que la cobertura del sistema mejora respecto a la situación actual. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la ubicación de las nuevas estaciones, se realizó en base a zonas atractoras de viajes y no a zonas

generadoras de viajes. Se tiene un total de 6,66 km<sup>2</sup> de cobertura, donde se cubre un total de 112.716 habitantes, los cuales representan un 27,15% de la población.

En la Figura 40, se observa la distribución de población cubierta por estrato. Se puede observar que con la propuesta mejoran los estratos 5 que pasa del 41,1% a 72,2% y el estrato 6 que pasa del 30,6% al 59,1% de la población cubierta; De igual forma mejoran los estratos 3 y 4, pero los estratos 1 y 2 no mejoran en cobertura.

Figura 39. Área de Cobertura. Propuesta 1.

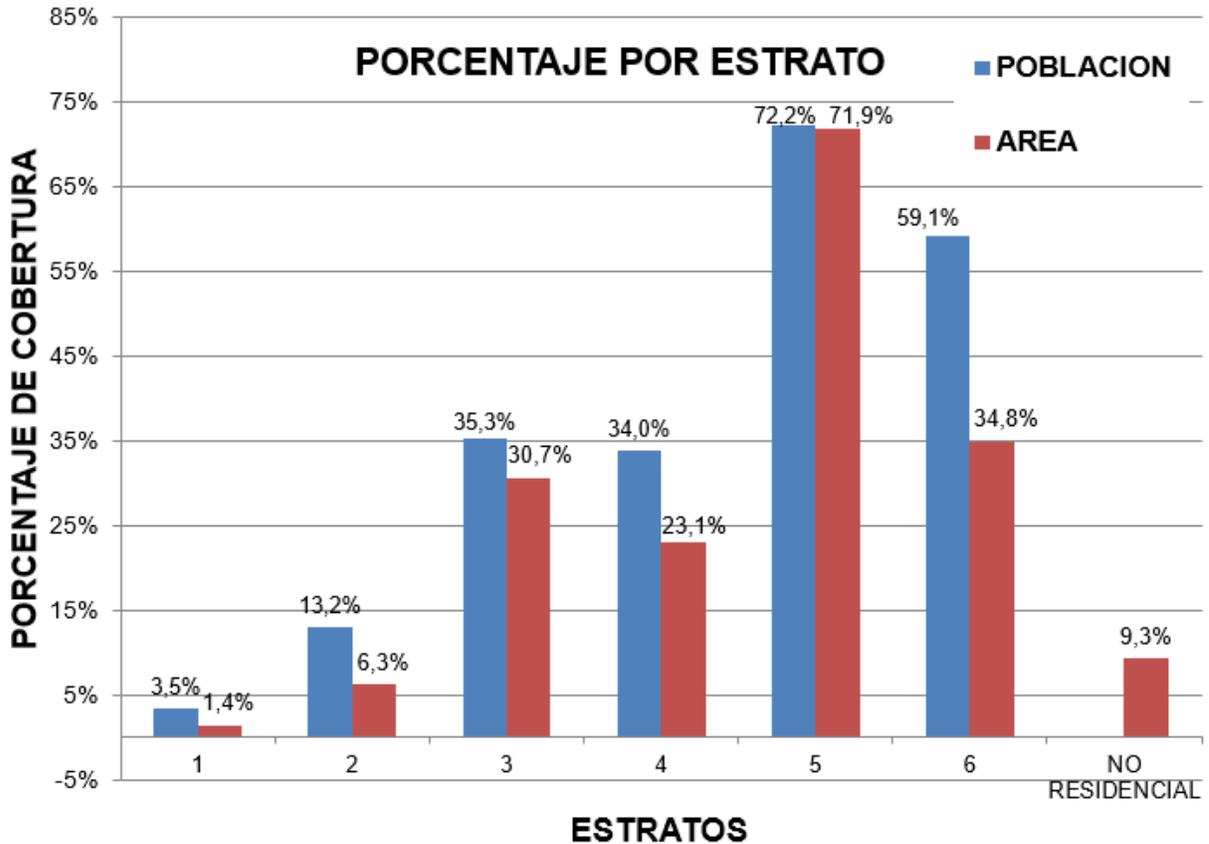


Fuente: Elaboración propia.

Esta situación, muestra por un lado que sin estudios en la ciudad sobre la demanda de viajes, es complejo tener un panorama para lograr un sistema equitativo en la ciudad; por otro lado, se puede ver cómo ha sido el planeamiento de la ciudad en las últimas décadas; Los estratos de mayor ingreso se encuentran cerca a los lugares más representativos de la ciudad y por tal razón mejor

cubiertos, mientras que los estratos de bajos recursos económicos se encuentran alejados de los lugares más representativos de la ciudad.

Figura 40. Distribución de la población por estrato. Propuesta 1.



Fuente: Elaboración propia.

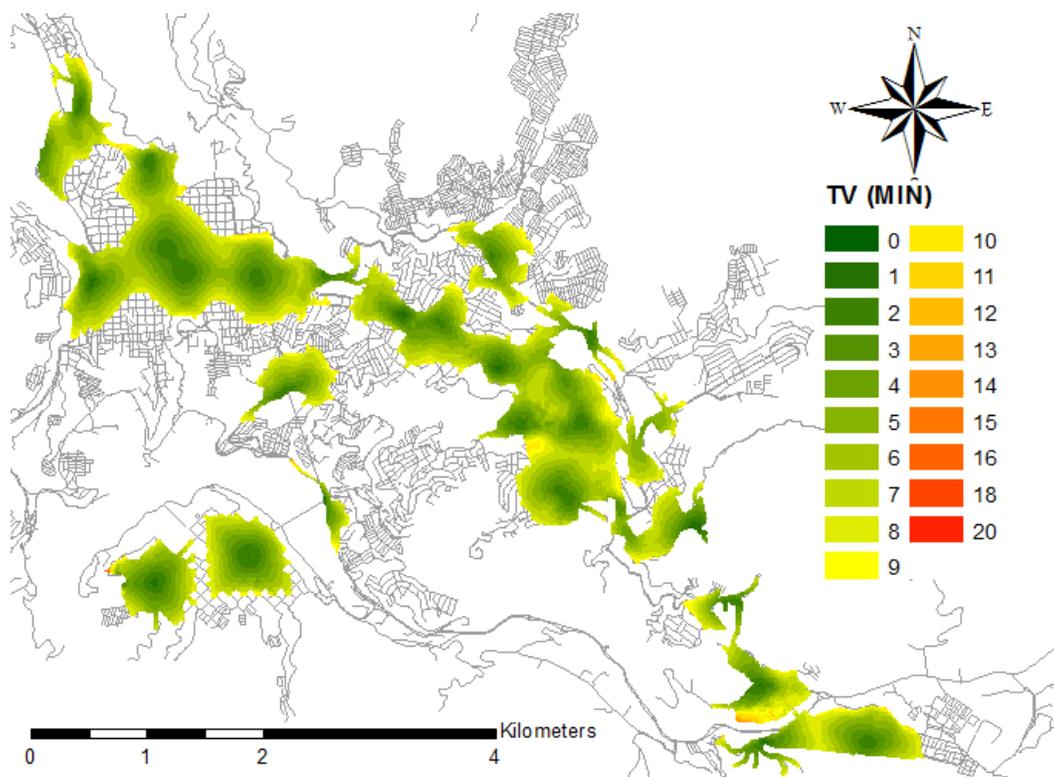
#### 4.2.3 ACCESIBILIDAD MEDIA INTEGRAL.

En la Figura 41, se observan las curvas isócronas en las áreas de cobertura efectiva del sistema de bicicletas en la propuesta. Dentro de estas áreas se invierten hasta un tiempo máximo de 20 minutos para acceder a la estación. En la Figura 42, se observa el porcentaje de cobertura de las estaciones. El 50% de la población que se encuentra dentro del área de cobertura necesita invertir alrededor de 5,5 minutos para acceder a una estación.

Para que más del 90% llegue a una estación se debe invertir 8 minutos. Se observan valores similares a la situación actual, lo que indica que, a pesar de

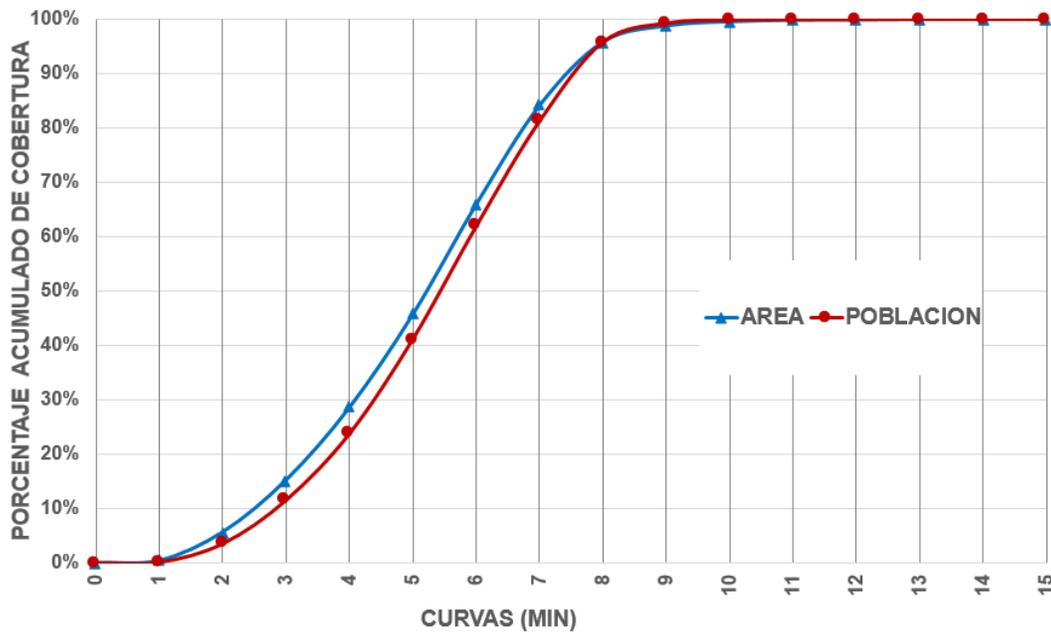
haber aumentado el área de cobertura, el tiempo que se debe invertir en promedio para acceder a una estación de bicicletas caminando, no tuvo un cambio apreciable.

Figura 41. Accesibilidad Media Integral. Propuesta 1.



Fuente: Elaboración propia.

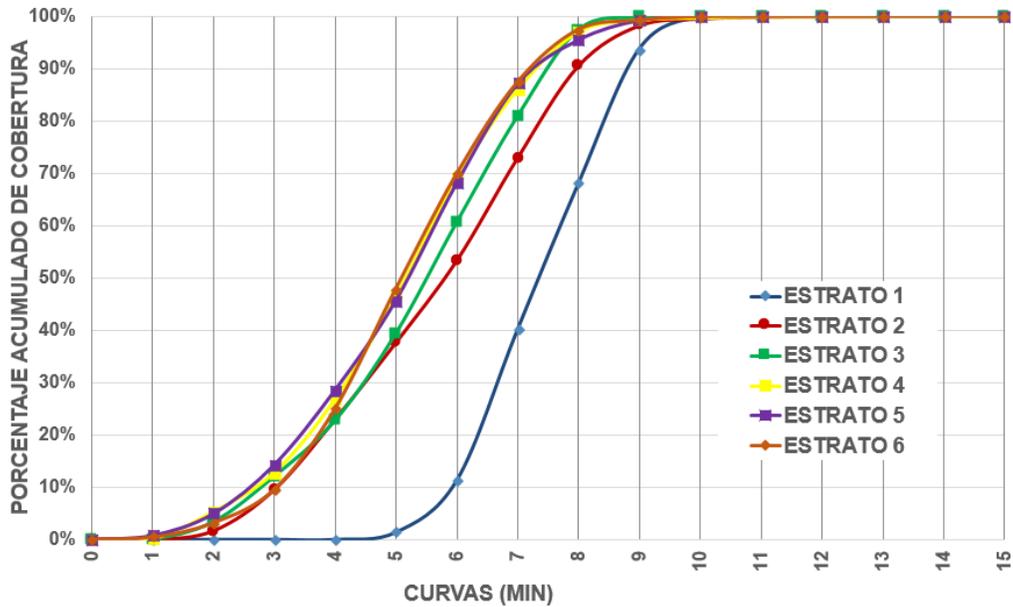
Figura 42. Porcentaje de cobertura. Propuesta 1.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 43, se observa la cobertura discriminada por estrato socioeconómico. Se observa que existe inequidad hacia los estratos de bajo ingreso; se debe invertir más de 7 minutos para cubrir el 50% de estrato 1 mientras que en la situación actual no estaba cubierto, casi 6 minutos para el estrato 2 y 5,5 minutos para el estrato 3. Los estratos 4, 5 y 6 invierten 5 minutos para cubrir el mismo porcentaje de población. En comparación con la situación actual, se observa que los estratos que reflejan una mejora son el 5 y el 6 que pasan de invertir 5,5 minutos de la situación actual, a 5 minutos en la propuesta, lo que representa una mejora del 9,09%.

Figura 43. Porcentaje de cobertura por estrato. Propuesta 1.



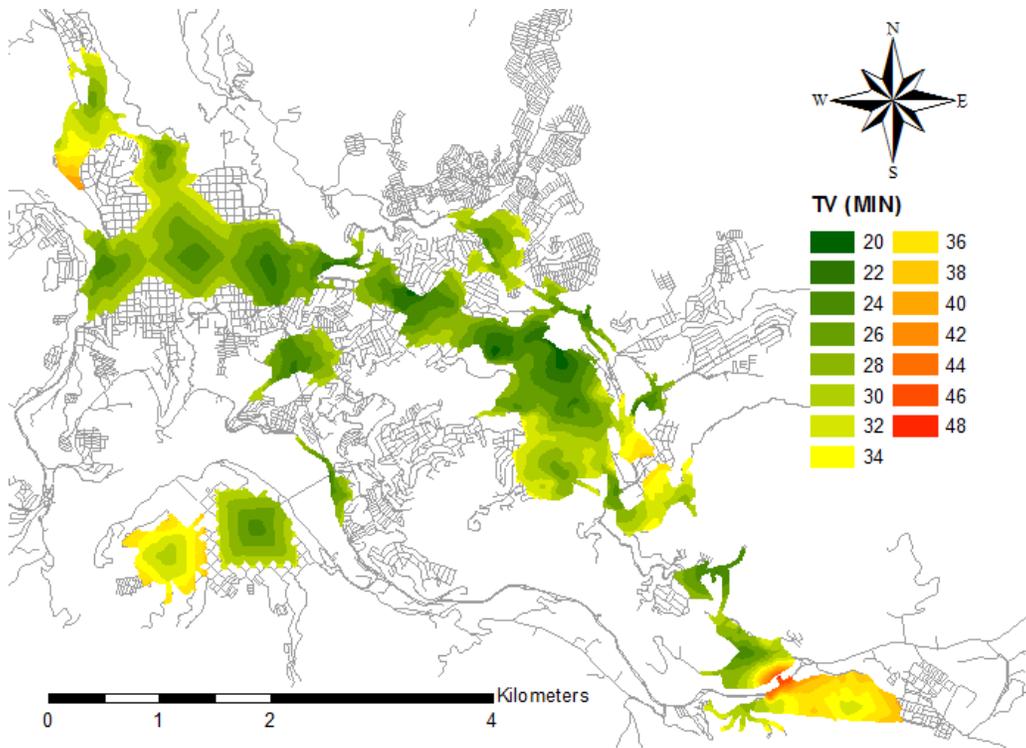
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.4 ACCESIBILIDAD MEDIA GLOBAL.

En la Figura 44, se observa las isócronas del tiempo promedio de viaje en las áreas de cobertura efectiva del sistema de bicicletas. Se observa más accesibilidad hacia la zona de la Universidad Católica, Parque de la Mujer y Fundadores.

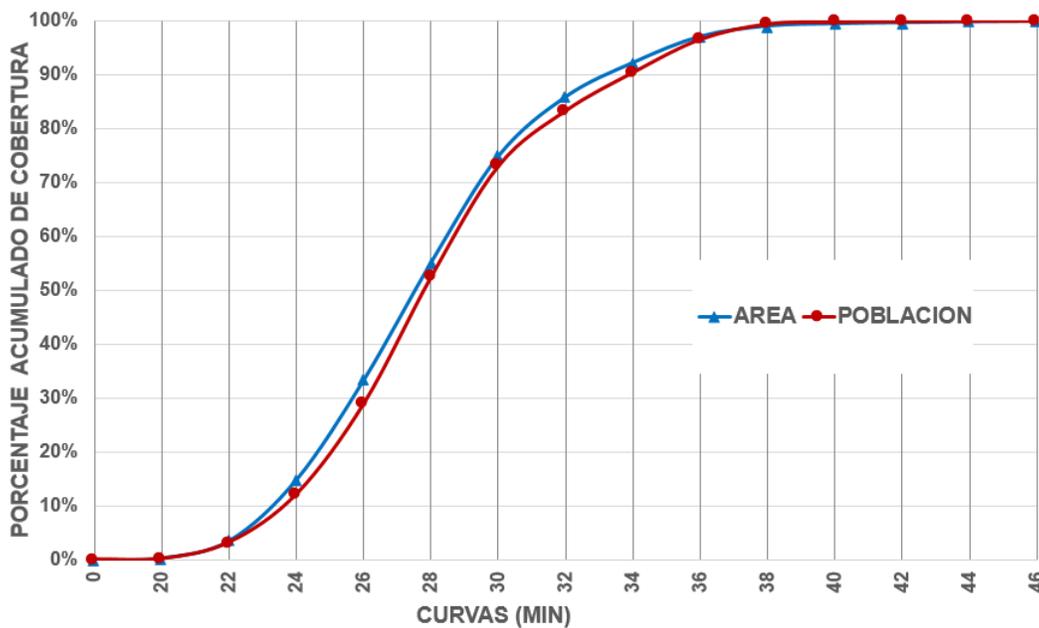
En la Figura 45, se observa el porcentaje de cobertura del sistema de bicicletas. Se refleja que se necesitan en promedio 28 minutos de viaje para cubrir el 50% de la población total que está dentro del área de cobertura, y casi 38 minutos para cubrir a toda la población que se encuentra dentro del área de cobertura. El hecho de que hayan aumentado los tiempos promedio para viajar en el sistema, se debe a que se aumenta el área de cobertura a lo largo de la ciudad. Se deben buscar alternativas como integrar el sistema con el transporte público, para disminuir el tiempo y competir contra otros sistemas tradicionales.

Figura 44. Accesibilidad Media Global. Propuesta 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 45. Porcentaje de cobertura. Propuesta 1.



Fuente: Elaboración propia.

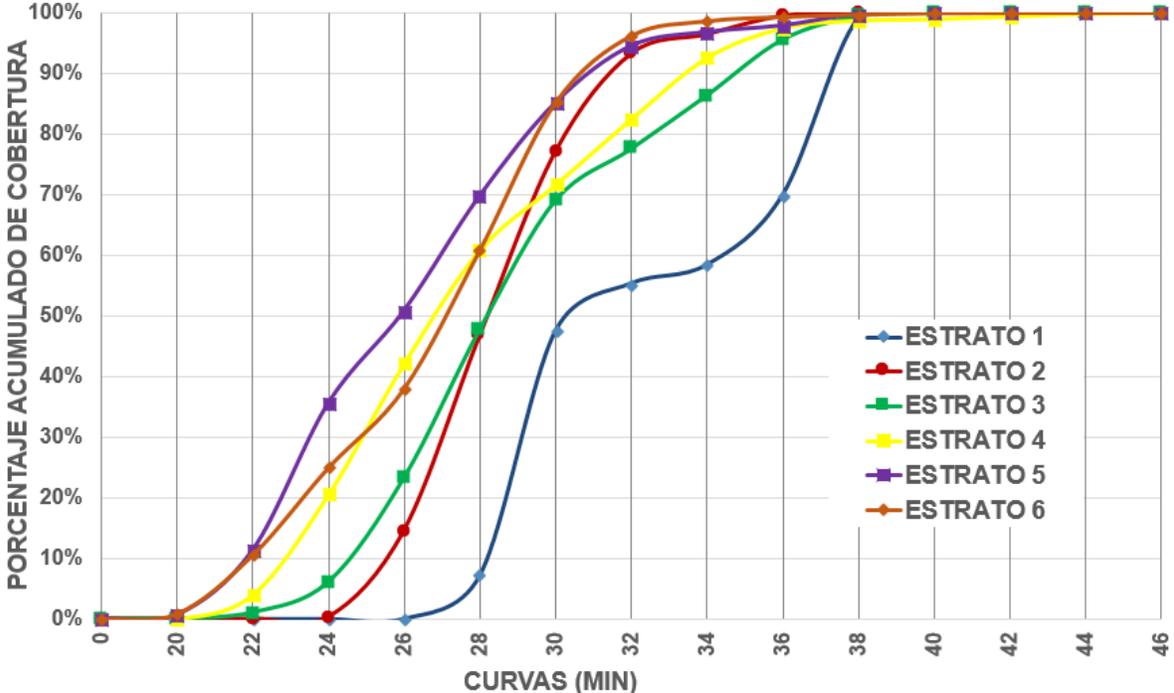
En la Figura 46, se observa la cobertura discriminada por estrato socioeconómico. Se observa que se deben invertir 30 minutos para cubrir el 50% de la población en

estrato 1; 28 minutos en promedio de viaje, para cubrir hasta el 50% de los residentes en estrato 2 y 3; 27 minutos para cubrir el 50% de la población en estrato 4 y 6; y 26 minutos para el estrato 5. Una vez más, se observa que movilizarse en el sistema de bicicletas en esta propuesta beneficia más a estratos de ingresos altos que a los estratos e ingresos bajos.

Si se analiza el comportamiento del estrato 1, se puede observar que hasta el minuto 26 no se presentaba cobertura en de población; entre los 26 minutos y 30 minutos, aumenta el porcentaje de cobertura de forma acelerada, esto se debe a que el porcentaje de cobertura para el estrato 1 es muy baja, mas no por eficiencia del sistema.

Se resalta aún más, la importancia de no basarse en la experiencia, sino en elaborar estudios serios de demanda para planear el sistema de una forma equitativa y eficiente.

Figura 46. Porcentaje de cobertura por estrato. Propuesta 1.



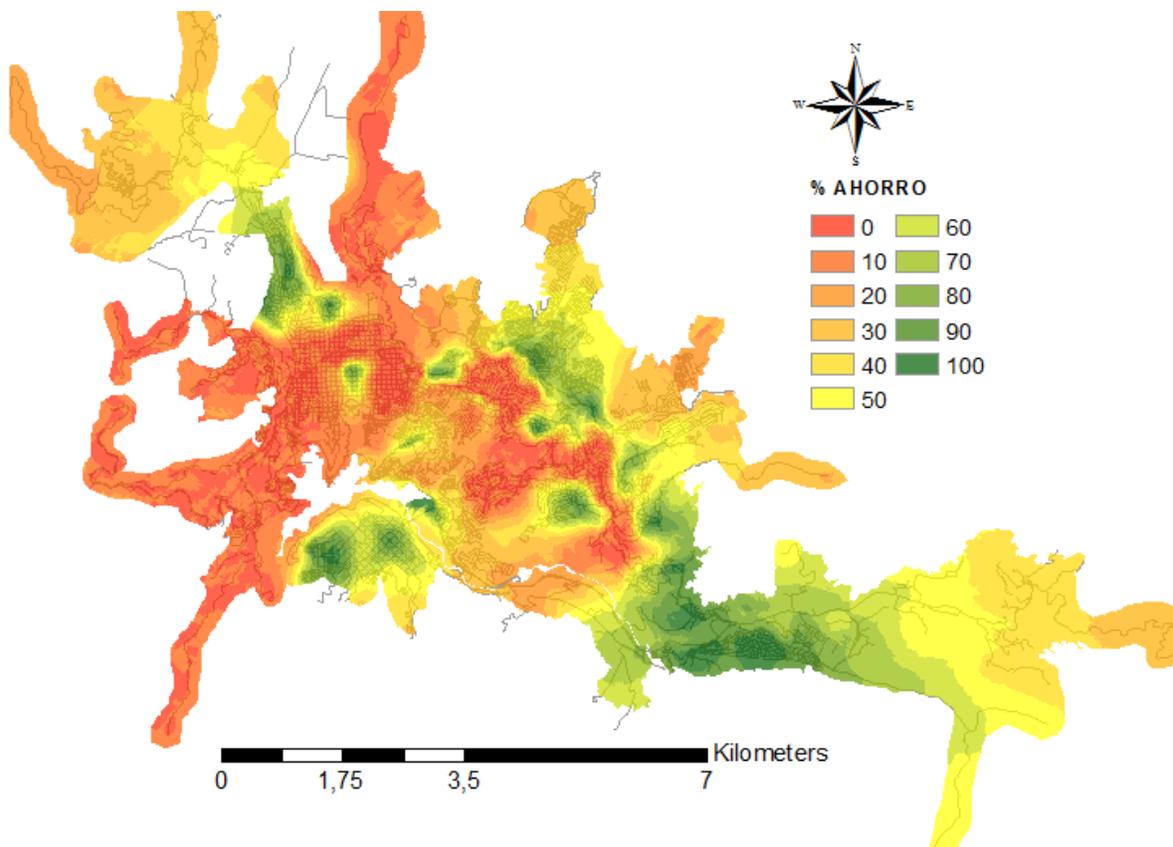
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.5 PORCENTAJE DE AHORRO DE LA PROPUESTA 1.

En la Figura 47, se observa el porcentaje de ahorro en el tiempo medio de viaje de la propuesta 1. Las Zonas de color rojo, muestran el mayor porcentaje de ahorro en la ciudad; resultado de la implantación de una estación de bicicletas donde antes no existía ninguna influencia generada por el sistema; se resaltan zonas como: Chipre, Villa Pilar, Villa Hermosa, La Carola, Fátima, Bosque Popular, La Enea y el Municipio de Villamaría.

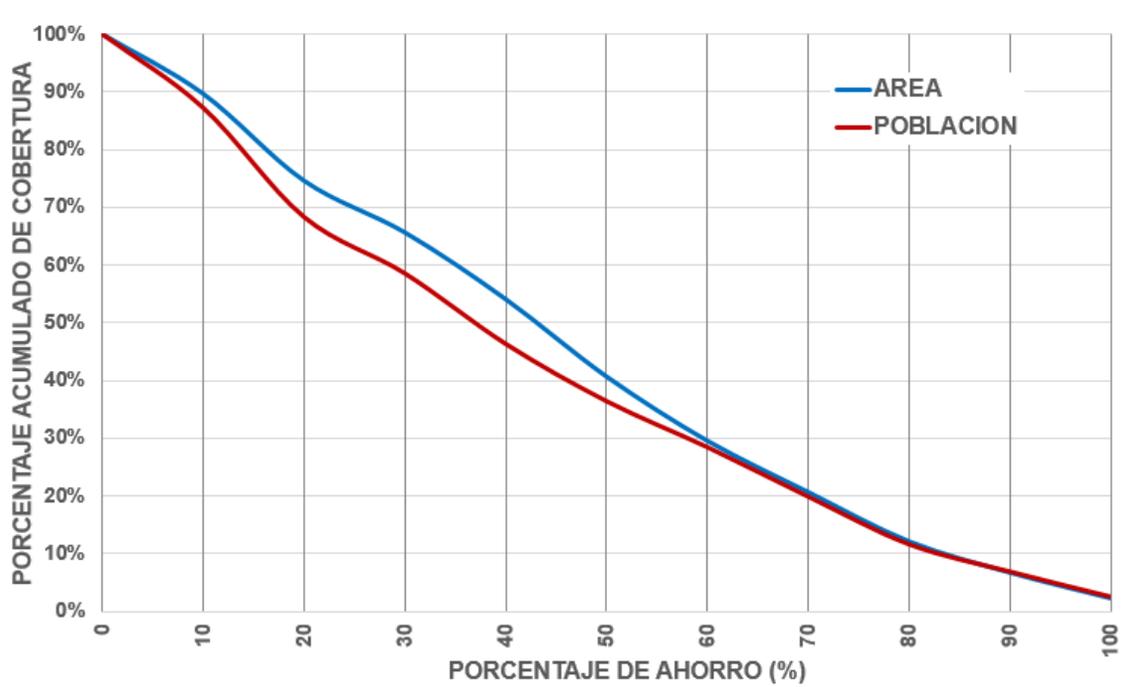
En la Figura 48, se observa el porcentaje acumulado de cobertura de área ciudad contra el porcentaje de ahorro de la propuesta. Se evidencia como mínimo el 90% de la población de la ciudad presenta ahorros en tiempo de viaje del 10%; el 50% de la población presenta ahorros en tiempo de viaje de algo más del 40%; y el 10% de la población presenta ahorros en tiempo de viaje de más del 80%.

Figura 47. Porcentaje de ahorro de tiempo de viaje. Propuesta 1.



Fuente: Elaboración propia.

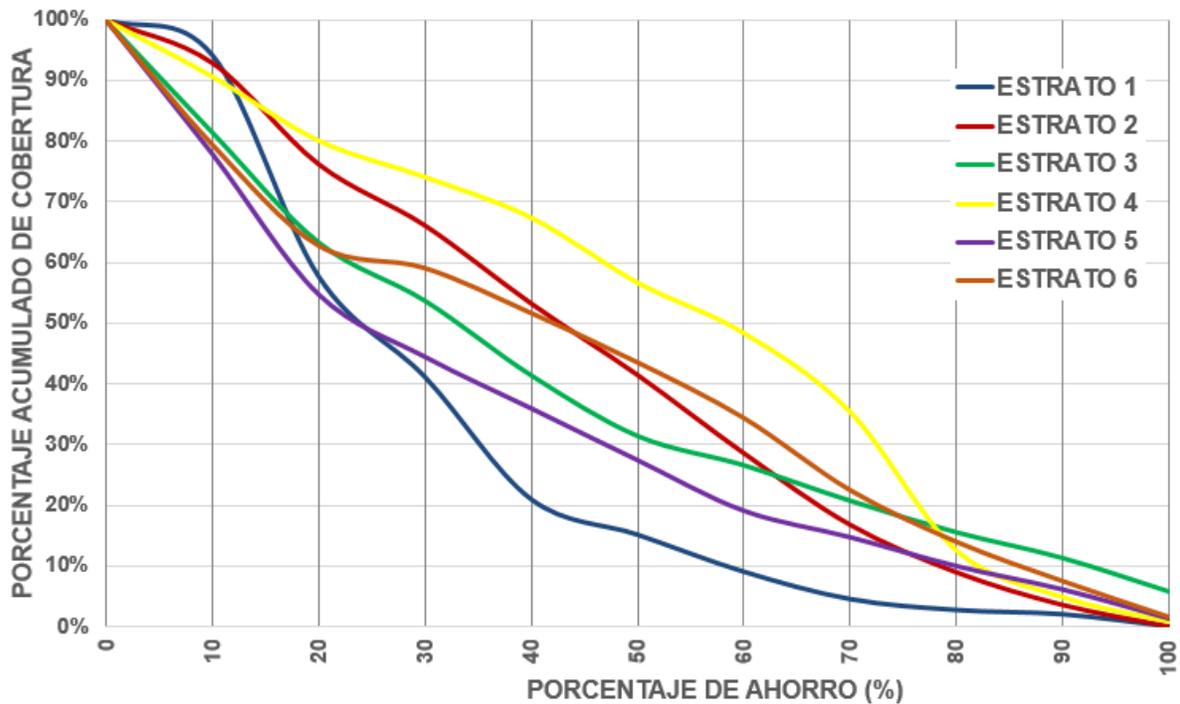
Figura 48. Porcentaje de cobertura vs Porcentaje de Ahorro. Propuesta 1.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 49, se observa el porcentaje de cobertura acumulado de población contra el porcentaje de ahorro según el estrato. Se observa que como mínimo para un 90% de la población se ahorra hasta un 10% de tiempo de viaje en estratos 1,2 y 4 y 5% para estratos 3,5 y 6; 50% de la población presenta ahorros en tiempo de viaje del casi el 60% para el estrato 4; 42% estratos 2 y 6; 35% estrato 3 y 25% estrato 1 y 5. Para el 10% de la población en estrato 1 se presentan ahorros del 60%; estratos 2 y 5 de casi el 80%; estrato 4 del 81%; estrato 6 del 87%; y el estrato 3 de más del 90%. En general se observa que el estrato 4 presenta los mayores ahorros y el estrato 1 los menores ahorros en porcentaje.

Figura 49. Porcentaje de cobertura vs Porcentaje de Ahorro, según el estrato socioeconómico. Propuesta 1.



Fuente: Elaboración propia.

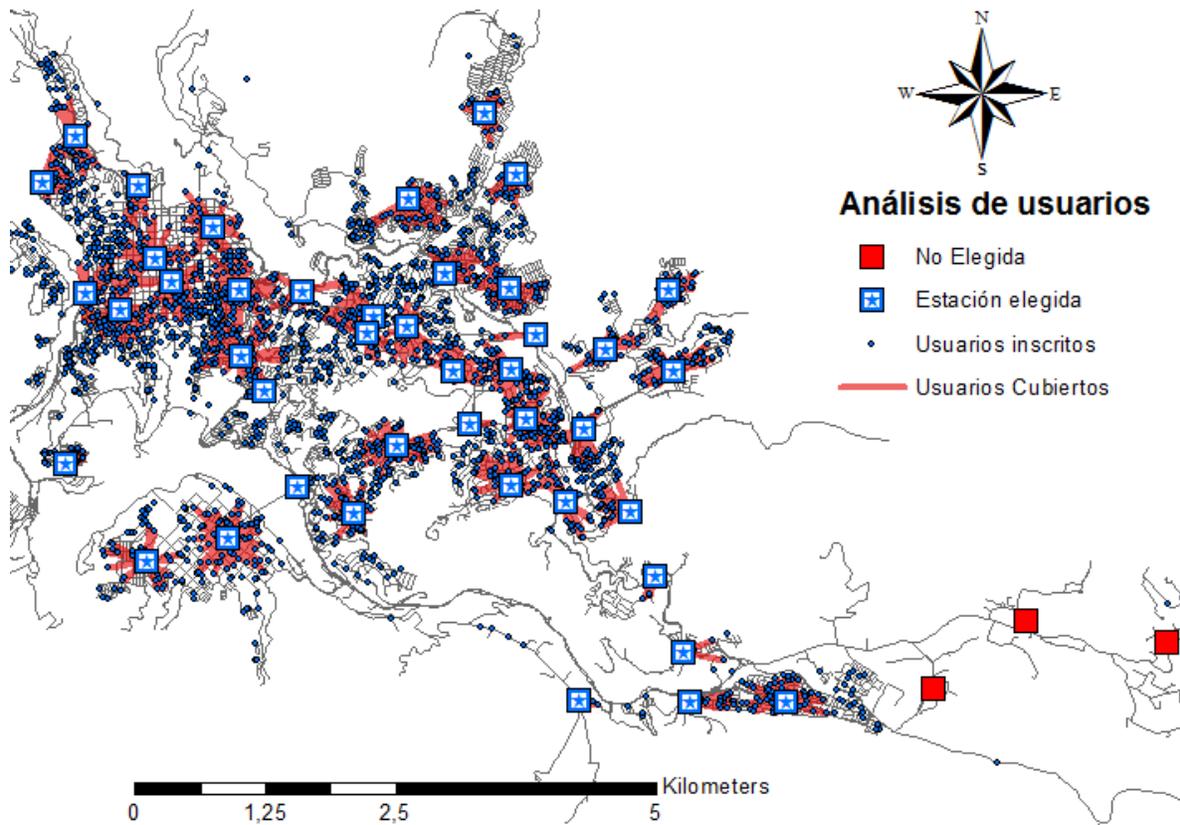
### 4.3 PROPUESTA 2.

#### 4.3.1 ANALISIS DE LOS USUARIOS INSCRITOS.

En la Figura 50, se observa el resultado del análisis de la ubicación de las estaciones de bicicleta de la propuesta 2, respecto a los usuarios inscritos. En total se ven impactados por el sistema un total de 2.022 usuarios de los 3.314 inscritos en el sistema, que representa un 61,01% de los usuarios inscritos hasta junio el 2016, y representa el 0,49% de los habitantes de la ciudad; en promedio caminarían 304 metros para acceder a una estación.

El resultado, muestra que las estaciones del Sena, Licorera y Maltería no cubren demanda de usuarios, debido a que no inciden sobre áreas residenciales de la ciudad.

Figura 50. Location-Allocation problema. Propuesta 2.

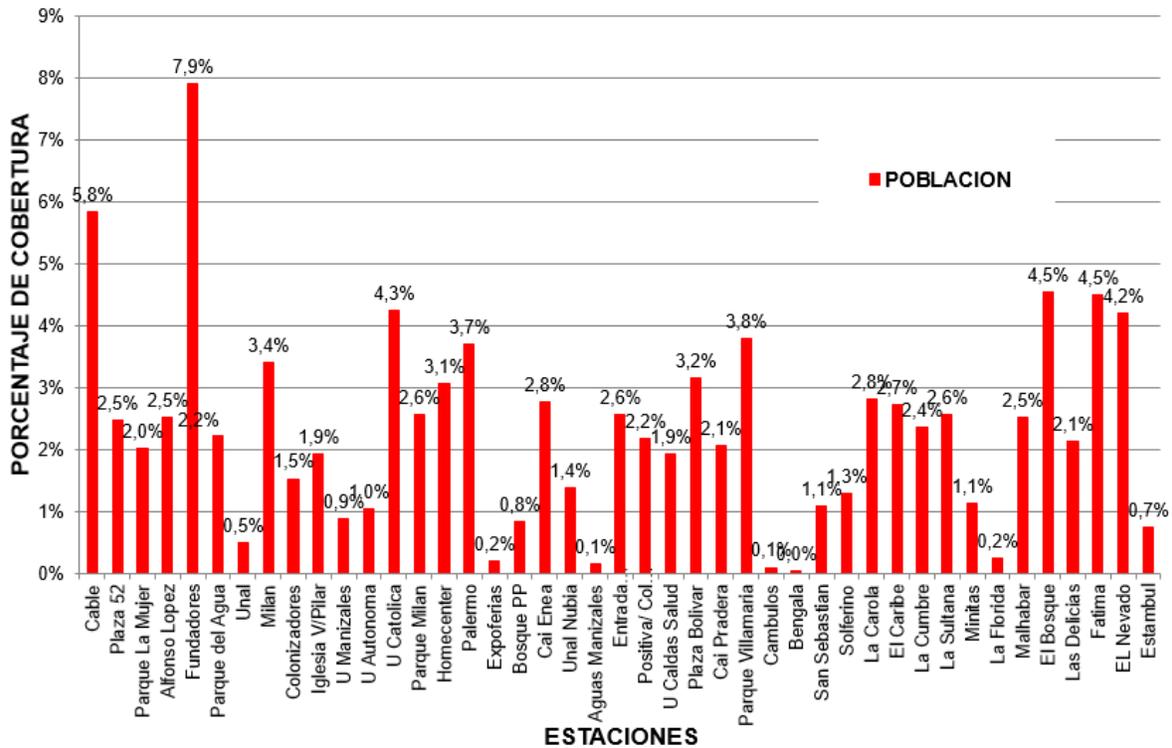


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 51, se observar la distribución de usuarios efectivamente impactados por el sistema, en las estaciones de la propuesta 2.

Se observa que las estaciones que más cubren usuarios inscritos del sistema continúan siendo la estación de Fundadores y el Cable. Desde la situación actual y con las dos propuestas, hasta ahora analizadas, se concluye que estas dos estaciones son estratégicas para la consolidación del sistema, tanto por la ubicación geográfica, como por las características especiales que las identifican como zonas atractoras de viajes.

Figura 51. Distribución de los usuarios realmente impactados por el sistema en la propuesta 2, por estaciones.



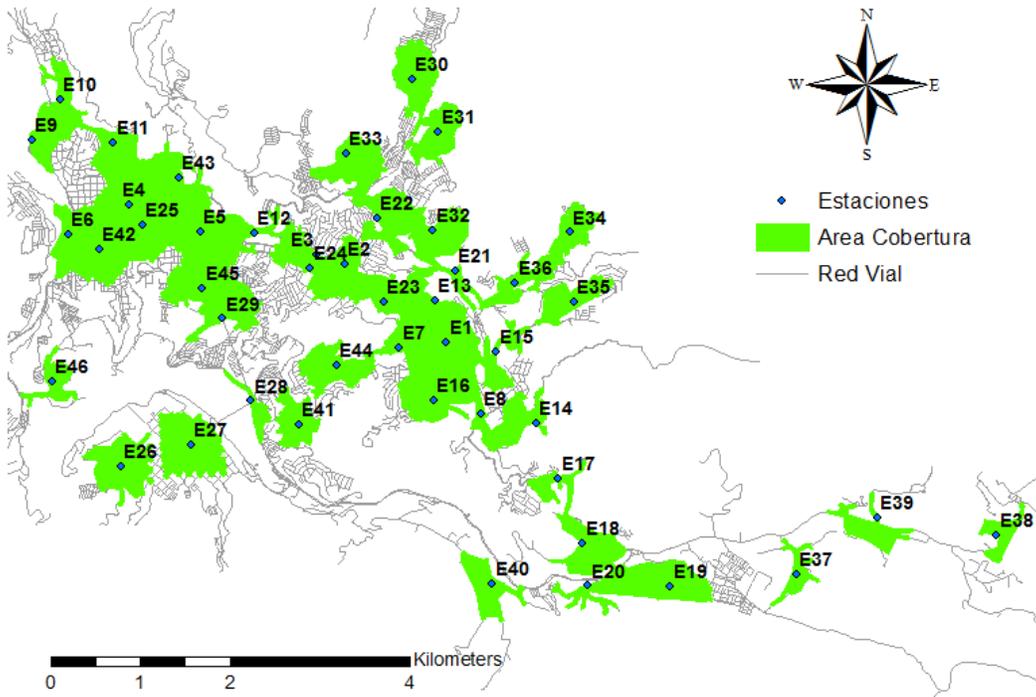
Fuente: Elaboración propia.

### 4.3.2 COBERTURA DE LAS ESTACIONES.

En la Figura 52, se observa la cobertura del sistema de bicicletas públicas de la propuesta 2. Se tiene un total de 10,17 km<sup>2</sup> de cobertura, donde se cubre un total de 198.137 habitantes, los cuales representan un 47,73% de la población total de la ciudad.

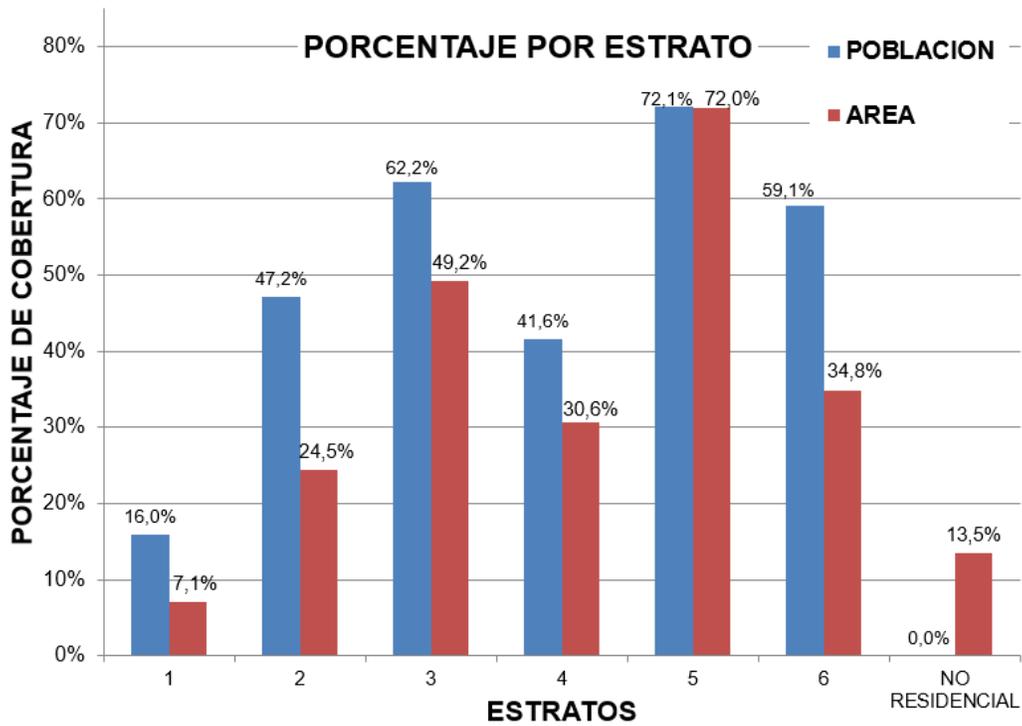
En la Figura 53, se observa la distribución de población cubierta por estrato. Se observa que la población de estrato socioeconómico alto se mantiene en porcentaje de cobertura, mientras que la población de estrato socioeconómico bajo mejora notablemente; el estrato 1 pasa de no estar cubierta en la situación actual, a cubrir 18% de la población en la propuesta 2; el estrato 2 para de cubrir 1% en la situación actual, a cubrir 48% de la población de la ciudad en la propuesta 2; y el estrato 3 pasa de cubrir 13,1% de la población de la ciudad, a cubrir 62% de la población de Manizales.

Figura 52. Área de Cobertura. Propuesta 2.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 53. Distribución de la población por estrato. Propuesta 2.



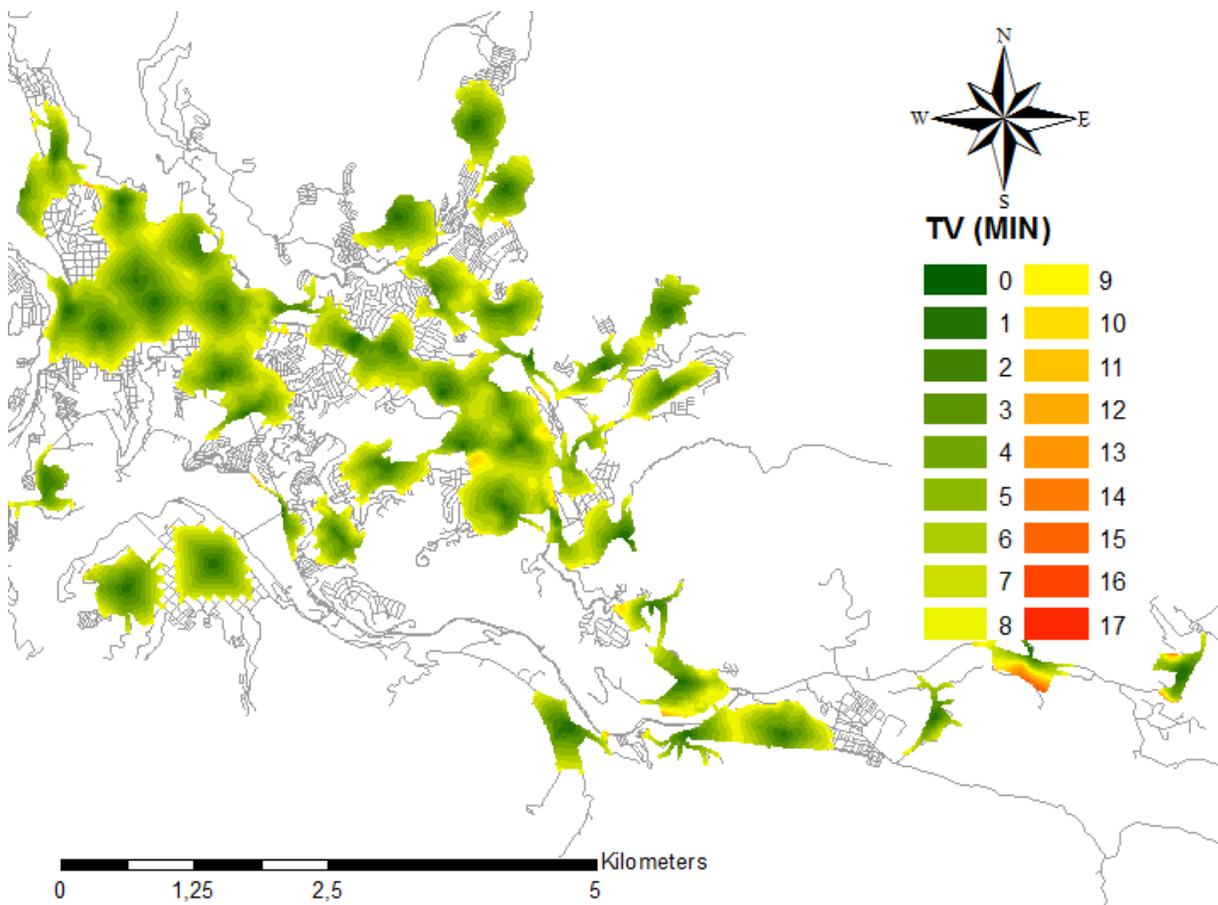
Fuente: Elaboración propia.

Para lograr un mejor balance de generación y atracción e viajes en el sistema, se debe planificar e implementar más estaciones en zonas residenciales, en base a estudios profundos de demanda, y poder brindar un modo de transporte a la población que esté dispuesta a realizar sus viajes en bicicleta.

### 4.3.3 ACCESIBILIDAD MEDIA INTEGRAL.

En la Figura 54, se observan las curvas isócronas en las áreas de cobertura efectiva del sistema de bicicletas en la propuesta 2. Dentro de estas áreas se invierten hasta un tiempo medio de viaje de 17 minutos para acceder a la estación, en la zona de la licorera; en el resto de estaciones el mayor tiempo medio para acceder a una estación caminando es de alrededor de 13 minutos.

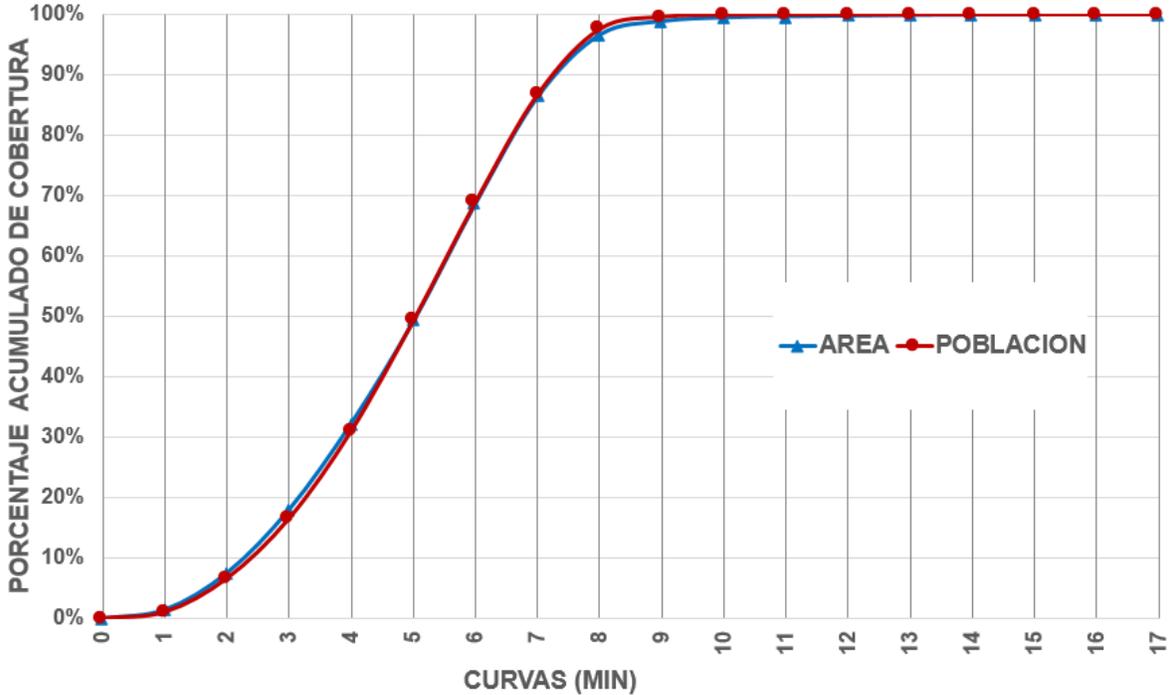
Figura 54. Accesibilidad Media Integral. Propuesta 2.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 55, se observa el porcentaje de cobertura de las estaciones. El 50% de la población a 500 metros de una estación, es decir, que se encuentran dentro del área de cobertura, necesita invertir alrededor de 5 minutos para acceder a una estación; Para que más del 90% llegue a una estación se debe invertir menos de 7,5 minutos, mostrando que, al aumentar el número de estaciones, no solo mejora la cobertura, sino que disminuye el tiempo de viaje para acceder a una estación de bicicletas caminando.

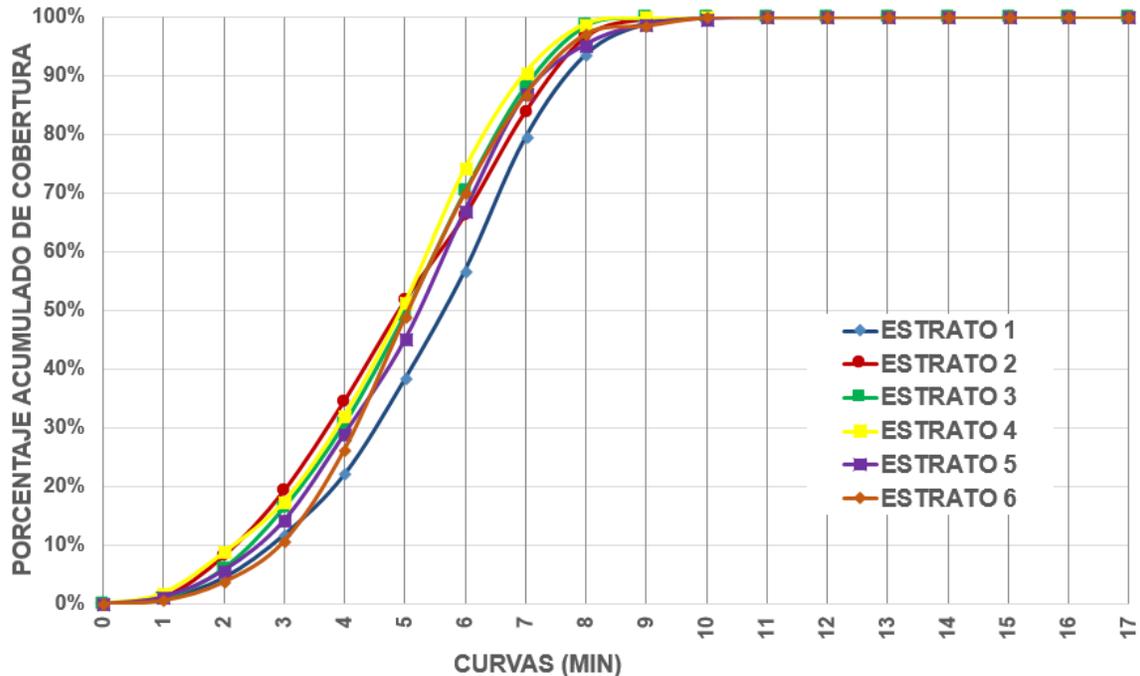
Figura 55. Porcentaje de cobertura. Propuesta 2.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 56, se observa la cobertura discriminada por estrato socioeconómico. Se observa que la implantación de nuevas estaciones de bicicletas mejora los tiempos de viaje de los estratos socioeconómicos más bajos, generando más equidad en el sistema, teniendo que invertir entre 5 y 5,5 minutos para cubrir el 50% de la población en cada estrato.

Figura 56. Porcentaje de cobertura por estrato. Propuesta 2.



Fuente: Elaboración propia.

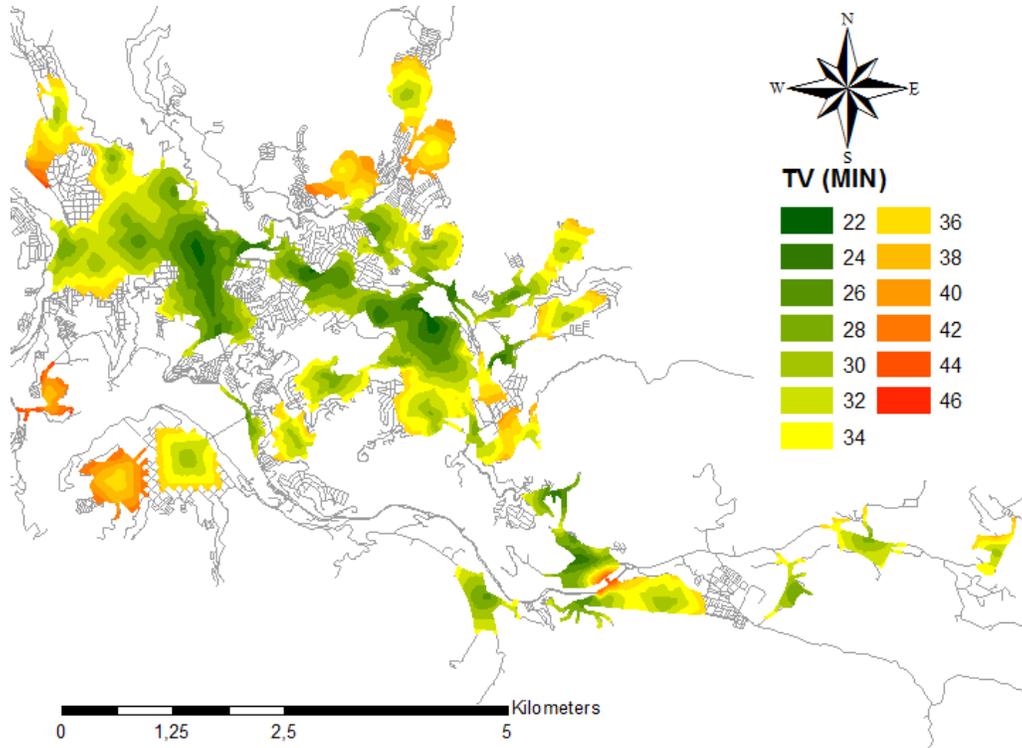
#### 4.3.4 ACCESIBILIDAD MEDIA GLOBAL.

En la Figura 57, se observan las curvas isócronas del tiempo promedio de viaje en las áreas de cobertura efectiva del sistema de bicicletas. La tendencia se mantiene muy similar a la propuesta anterior, las zonas más accesibles del sistema son la estación Fundadores, El parque de La mujer y la zona del Cable. En la

Figura 58, se observa el porcentaje de cobertura del sistema de bicicletas. Se refleja que se necesita en promedio 31 minutos de viaje para cubrir el 50% de la población influenciada por el sistema, es decir, que está dentro del área de cobertura, y casi 40 minutos para cubrir a toda la población que se encuentra dentro del área de cobertura. El hecho de que hayan aumentado los tiempos promedios para viajar en el sistema, se debe a que se aumenta el área de cobertura a lo largo de la ciudad. Se deben buscar alternativas como integrar el sistema con el transporte público, para disminuir el tiempo y competir contra otros sistemas tradicionales. Esto se evidencia en las zonas aledañas al cable aéreo; en estas zonas el tiempo de viaje del sistema se ve mejorado, ya que se puede superar niveles de altura considerables en poco tiempo, sirviendo como una

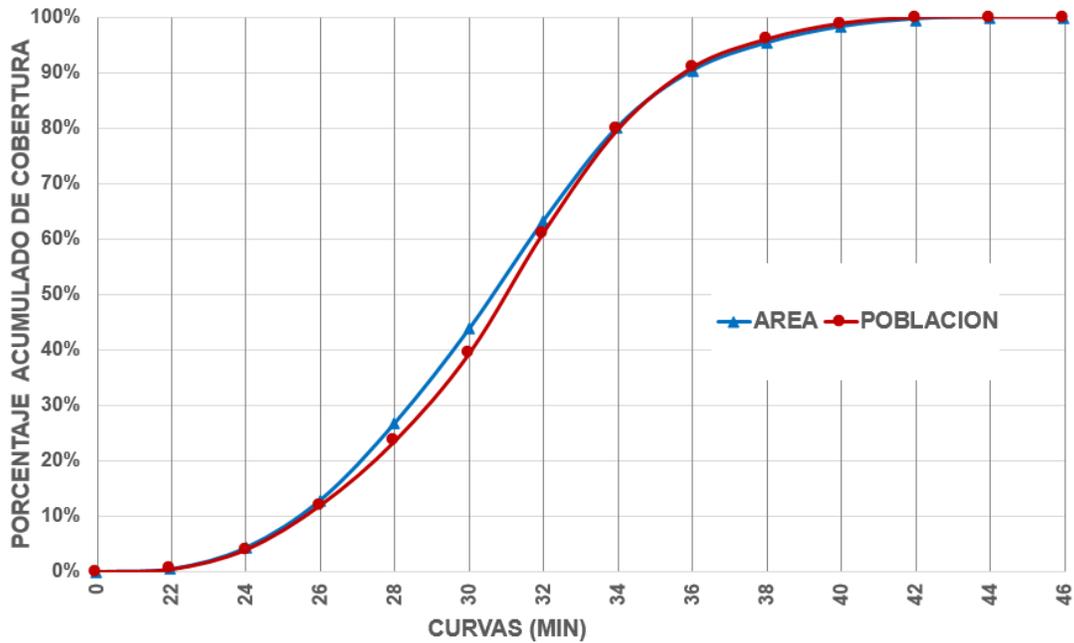
extensión al sistema de bicicletas públicas, conectándolo al municipio de Villamaría

Figura 57. Accesibilidad Media Global. Propuesta 2.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 58. Porcentaje de cobertura. Propuesta 2.

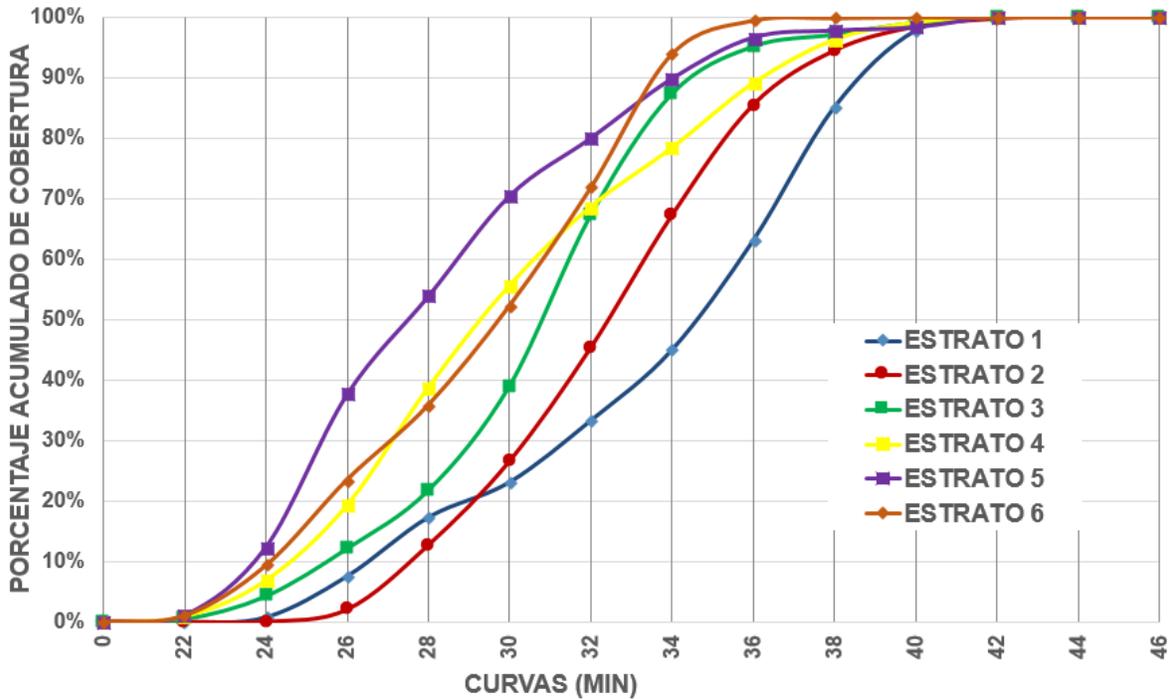


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 59, se observa la cobertura discriminada por estrato socioeconómico. Se observa que se deben invertir más de 34 minutos para cubrir el 50% de la población en estrato 1; 32 minutos en promedio de viaje, para cubrir hasta el 50% de los residentes en estrato 2; 31 minutos para el estrato 3; 30 minutos para cubrir el 50% de la población en estrato 4 y 6; y 27 minutos para el estrato 5. Este resultado muestra que movilizarse en bicicleta, beneficia más a estratos socioeconómicos altos.

Si se comparan los valores de la propuesta 2, con la situación actual y propuesta 1 se verá un incremento en el tiempo de viaje en la mayoría de casos, sin embargo, se debe tener en cuenta que se aumentaron el número de estaciones y se aumentó el área de cobertura del sistema; para disminuir estos tiempos de viaje en promedio, se deben generar estrategias para que el sistema se complemente con el sistema de transporte público y el sistema de líneas de cable aéreo de la ciudad.

Figura 59. Porcentaje de cobertura por estrato. Propuesta 2.



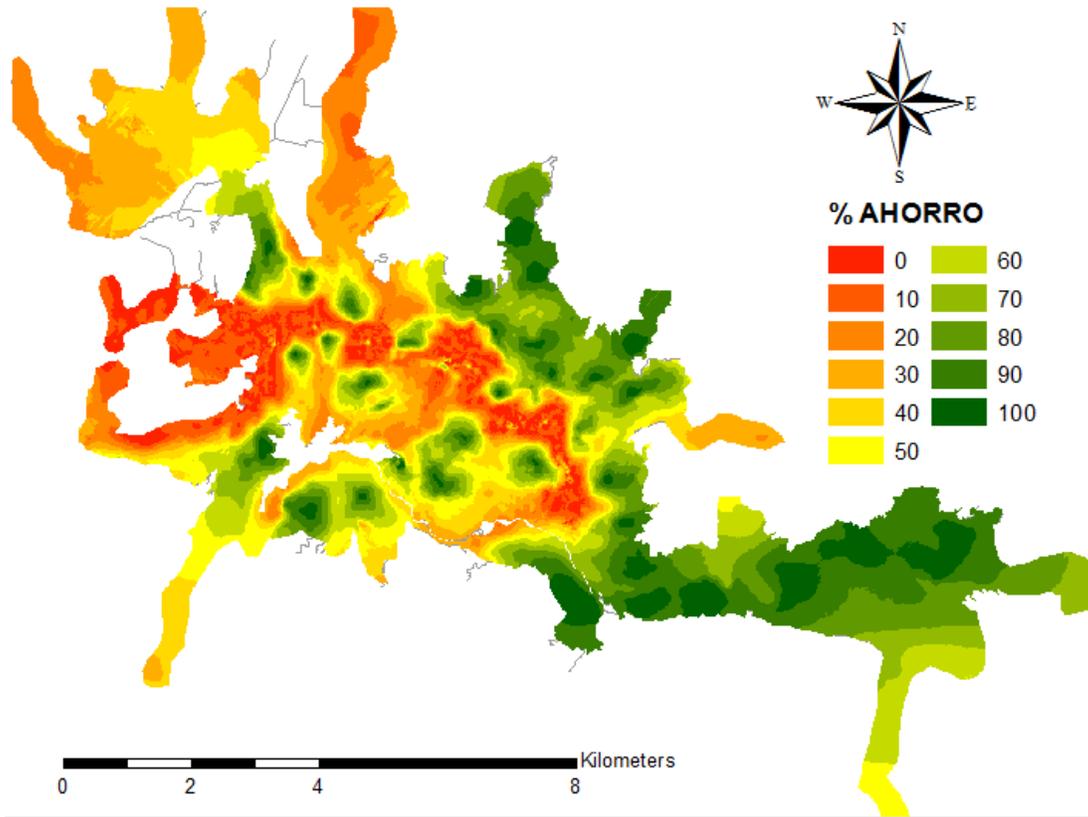
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.5 PORCENTAJE DE AHORRO DE LA PROPUESTA 2.

En la Figura 60, se observa el porcentaje de ahorro en el tiempo de viaje de la propuesta 2. Las Zonas de color rojo, muestran el mayor porcentaje de ahorro en la ciudad; resultado de la implantación de una estación de bicicletas donde antes no había ninguna influencia por el sistema; se resaltan zonas como: Chipre, Villa Pilar, Villa Hermosa, La Carola, Ciudadela del Norte, Fátima, Bosque Popular, La Enea, el Municipio de Villamaría y Maltería.

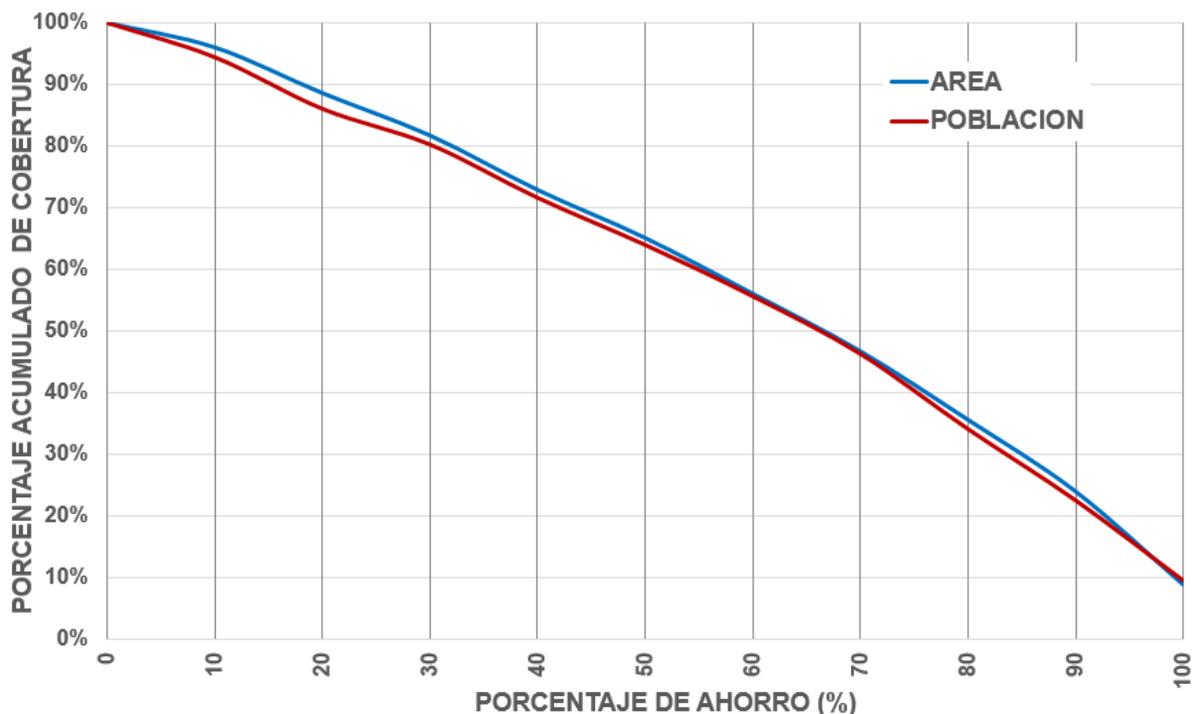
En la Figura 61, se observa el porcentaje acumulado de cobertura en área y población total de la ciudad contra el porcentaje de ahorro de la propuesta. Se evidencia como mínimo el 90% de la población presenta ahorros en tiempo de viaje del 15%, cuando en la propuesta 1 se generaban ahorros del 10%; el 50% de la población presenta ahorros en tiempo de viaje del 65%, cuando en la propuesta 1 se generaban ahorros de algo más del 40%; y el 10% de la población presenta ahorros en tiempo de viaje de casi el 100%, cuando en la propuesta 1 mostraba ahorros de más del 80%

Figura 60. Porcentaje de ahorro de tiempo de viaje. Propuesta 2.



Fuente: Elaboración propia.

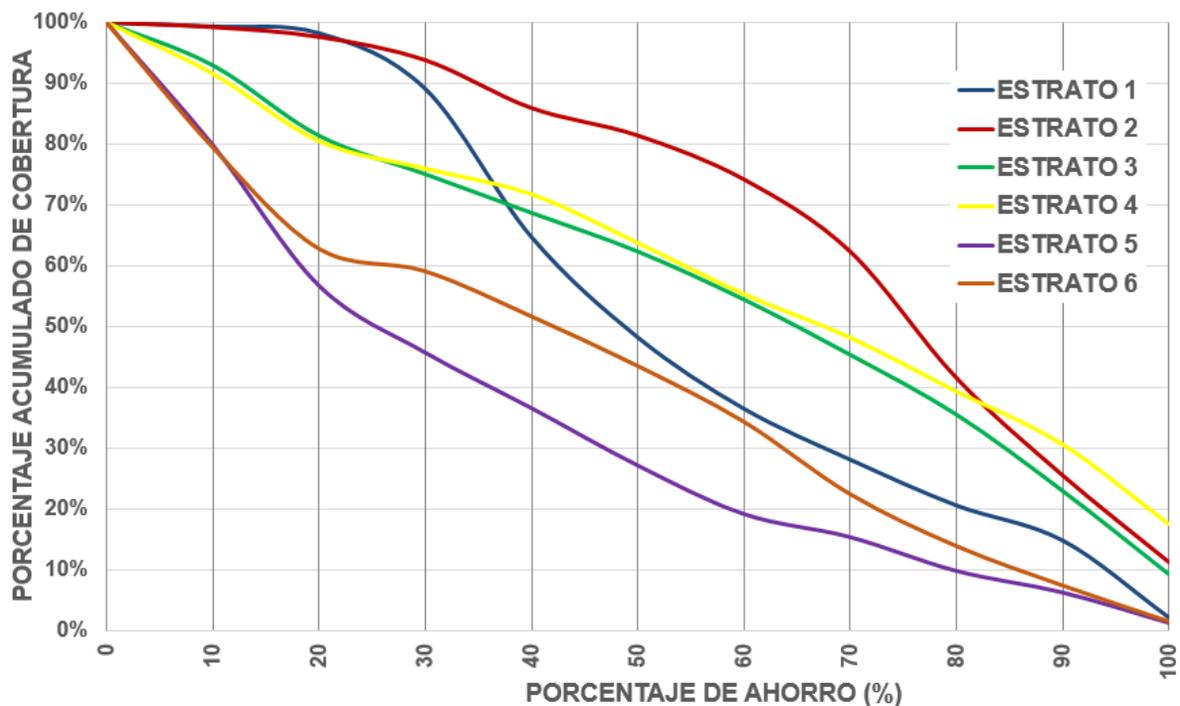
Figura 61. Porcentaje de cobertura vs Porcentaje de Ahorro. Propuesta 2.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 62, se observa el porcentaje acumulado de cobertura de población contra el porcentaje de ahorro según el estrato. Se observa que como mínimo para un 90% de la población se ahorra 35% para el estrato 2; 30% para el estrato 1; y algo más del 10% para estrato 3 y 4, cuando en la primera propuesta se mostraban ahorros de un 10% de tiempo de viaje en estratos 1,2y 4 y 5% para estratos 3; 50% de la población presenta ahorros en tiempo de viaje del casi el 70% para el estrato 4, cuando en la primera propuesta mostraba ahorros del 60%; 75% estratos 2, mientras que en la primer propuesta mostraba ahorros del 42% ; 65% estrato 3, cuando en la primera propuesta mostraba ahorros del 35% y casi el 50% el estrato 1, mientras que en la primer propuesta tenia ahorros del 25%. En general, se observan mayores ahorros de viaje para los estratos bajos y medios, mientras que para los estratos 5 y 6, de altos ingresos, no se vio un aumento en el porcentaje de ahorro, sino que se estancó.

Figura 62. Porcentaje de cobertura vs Porcentaje de Ahorro, según el estrato socioeconómico. Propuesta 2.



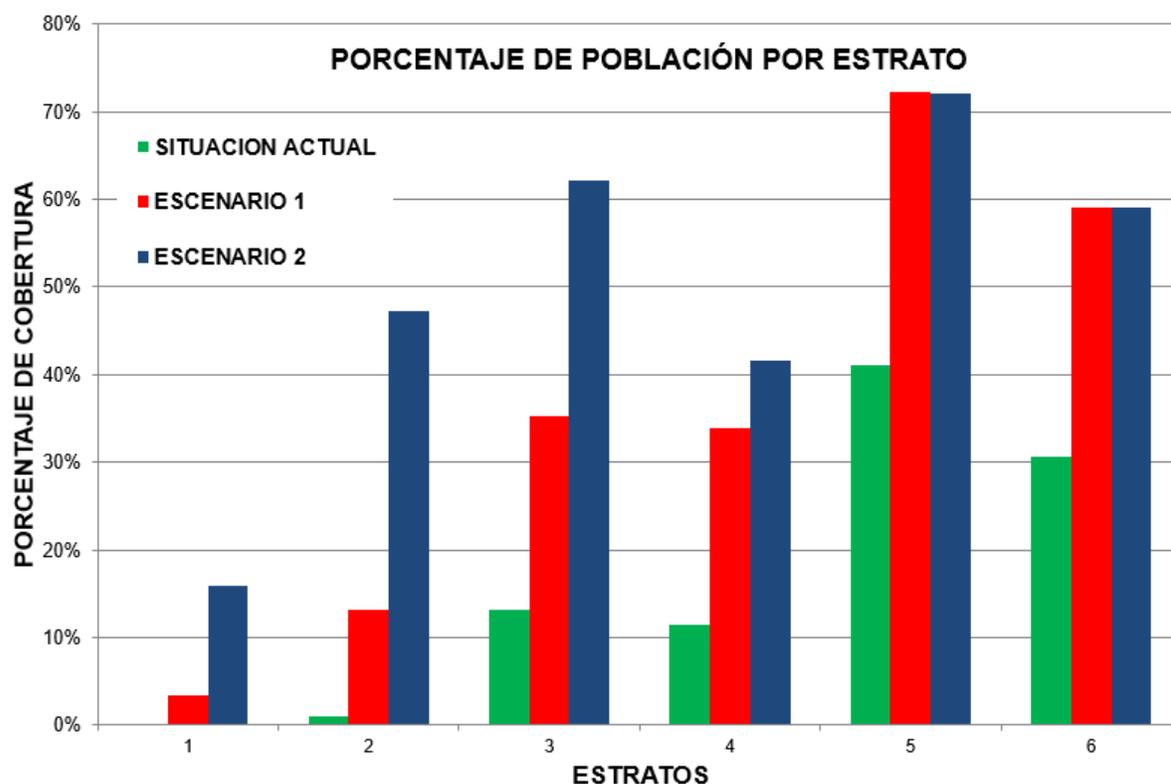
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.6 COMPARACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y LAS PROPUESTAS.

En la Figura 63, se observa una comparación de cobertura de la población en la situación actual y las dos propuestas. Con base en la situación actual, la propuesta 2 es la que muestra mejores resultados, ya que mejora la cobertura para todos los estratos, manteniendo una filosofía de proporcionar un modo de transporte alternativo a población que usa vehículo particular, y mejorando índices de equidad.

Este resultado también demuestra la importancia de insertar estaciones de bicicletas en usos de suelo mixto y con altas densidades, para cubrir más porcentaje de población en poco tiempo, y propone un reto importante que debe ser analizado y estudiado a profundidad en otras investigaciones relacionado con la equidad.

Figura 63. Comparación de la situación actual y las propuestas.

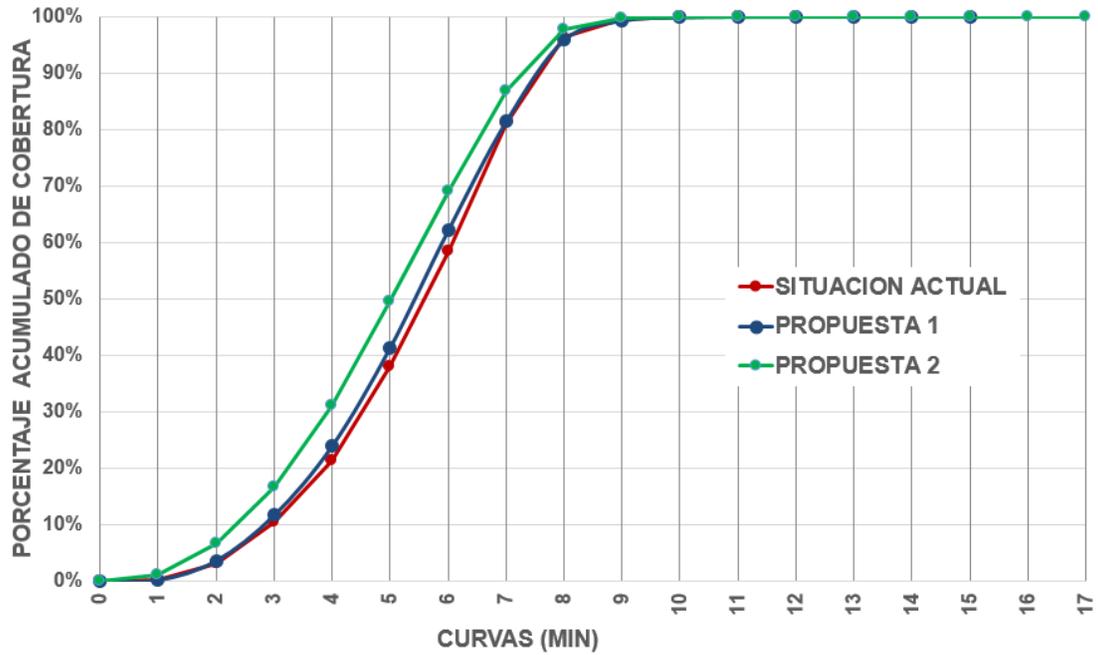


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 64, se compara la cobertura de la población de la situación actual y propuestas, hacia las estaciones de bicicletas caminando, es decir a partir del cálculo de accesibilidad integral de cada una. Para cubrir el 50% de la población que se encuentra dentro de los 500 metros, es decir, población que está dentro del área de cobertura, se necesita invertir 5 minutos en promedio en la propuesta 2; mientras que para la propuesta 1 y situación actual, se necesita invertir 5,5 minutos.

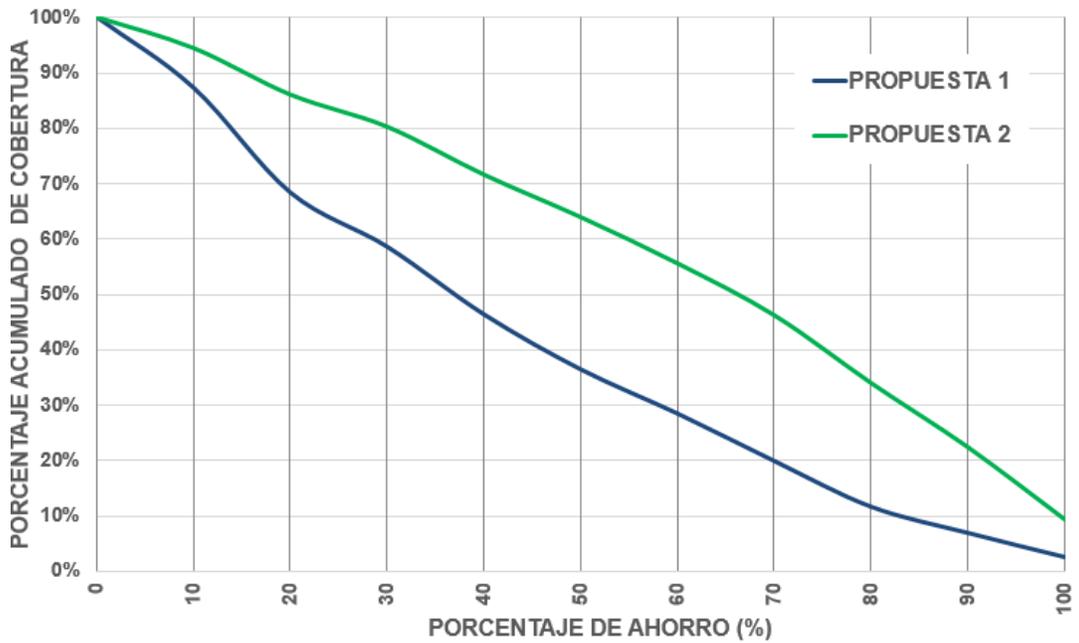
En la Figura 65, se compara la cobertura acumulada de la población para la propuesta 1 y 2, contra el porcentaje de ahorro en tiempo de viaje. Se evidencia que para un 90% de la población se tiene el 10% de ahorro en la propuesta 1, mientras que en la propuesta 2 se presenta un 15% de ahorro en tiempo de viaje; para un 50% de la población se tienen ahorros de casi 40% y 67% para las propuestas 1 y 2 respectivamente; y para un 10% de la población, la propuesta 1 presenta ahorros del 80%, mientras que la propuesta 2 presenta ahorros de casi el 100% en tiempo de viaje, lo que determina que la propuesta 2 aumenta la cobertura general de la población.

Figura 64. Comparación de porcentaje de población cubierta de la situación actual y las propuestas, hacia las estaciones de bicicletas caminando.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 65. Comparación del porcentaje acumulado de población cubierta de las propuestas contra el porcentaje de ahorro en tiempo de viaje.



Fuente: Elaboración propia.

Se deben aunar esfuerzos para disminuir los tiempos de viaje de acceso hacia las estaciones para consolidar el sistema, como ejemplo a seguir en el país, y que genere un impacto importante para migrar los viajes en vehículos particulares hacia modos amigables, menos contaminantes y más óptimos para la ciudad. Para lograr esta meta se debe evaluar una densificación del número de estaciones por kilómetro cuadrado como aconseja el ITDP.(Gauthie et al., 2013).

## 5 DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS.

Estas palabras están dedicadas a todas las personas que a través del tiempo han estado ahí para cada momento de mi vida, tanto como ser humano como profesional.

Primero que todo, este trabajo se lo dedico a mis padres Francisco Luis Zuluaga y Ana Beatriz García y a mi hermana Lina Maria Zuluaga, por siempre apoyarme en todos los proyectos de vida que he emprendido que me han fortalecido para ser un excelente profesional y una excelente persona.

De igual forma, quiero agradecer a mi tutor de tesis y amigo Diego Alexander Escobar García, por ser la persona que me encamino por el mundo de la ingeniería de transporte y la investigación académica. Sin lugar a dudas, todos esos años de relación profesional y amistad, han sido demostrados con la realización de proyectos impecables y que buscan el bienestar de la sociedad.

Quiero agradecer al DIMA (Dirección de Investigaciones Manizales), ya que a través de la CONVOCATORIA NACIONAL DE PROYECTOS PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN, CREACIÓN E INNOVACIÓN DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA 2016-2018; pudo ser realidad la investigación titulada: "Propuesta metodológica para el diagnóstico y planificación urbana de una red de ciclorutas. Caso de estudio: Manizales.", Código: 35178.

Por ultimo quisiera agradecer a todas las personas que de una u otra forma han estado ahí apoyándome en cada momento de mi vida, a Andrea López, a mi gran amigo y colega Juan Manuel Holguín, al grupo de trabajo de la Universidad Nacional, donde se realizó un gran trabajo en equipo, y encontré una calidad humana increíble. Diego Garcia, Sebastián Martínez, Jorge Montoya, Rafael Cardona, Katherine Palacio, Alejandro Londoño.

A todos muchas gracias.

## 6 CONCLUSIONES.

Los sistemas de bicicletas públicas son una respuesta óptima para los problemas actuales de la movilidad, los cuales deben ser potenciados en todo el mundo. Se debe investigar más sobre el tema y generar metodologías para mejorar la planificación e implantación, teniendo en cuenta las condiciones de cada ciudad.

Como se pudo observar en la investigación, la cobertura es un indicador muy importante para que un sistema penetre en el mercado y se consolide en las dinámicas de una ciudad; en el caso del sistema de bicicletas, al aumentar la cobertura en la ciudad de Manizales con las propuestas, se podía evaluar estrategias para generar políticas de transporte que busquen mejorar las condiciones de vida de los habitantes, generando competitividad y equidad.

Actualmente, el sistema de bicicletas públicas de la ciudad de Manizales debe trabajar en mejorar su cobertura; se observó que el sistema cubre el 9,72% de toda la población de la ciudad; si se analizan los usuarios inscritos al sistema, se evidencio que solo 698 personas inscritas pueden acceder a una estación dentro de 500 metros; estos usuarios inscritos representan el 0,17% de la población total de Manizales.

De las propuestas evaluadas se observa que, a mayor número de estaciones de bicicletas, es mayor la cobertura que se puede ofrecer a la población, aumentando el número de orígenes y destinos posibles de los ciudadanos, por tal motivo la propuesta 2 fue la que mejores valores mostro en tiempo de viaje, cobertura de población y porcentaje de ahorro de tiempo de viaje. Si el sistema busca consolidar la bicicleta como modo alternativo de transporte, se deben densificar las estaciones, y así aumentar la cobertura a la población. Para lograrlo se deben realizar estudios de demanda profundos, a partir de una matriz origen y destino, con estudios de preferencia declarada, para realizar escenarios hipotéticos pero realistas y analizar el comportamiento a una posible expansión del sistema.

El sistema es complementario de otros dos modos importantes; la caminata y el transporte público. Por un lado, al evaluar una expansión del sistema se debe definir la distancia que están dispuestas las personas caminar y de ahí determinar una densidad óptima para la ciudad. Por otro lado, se recomienda ver el sistema de bicicletas como una extensión de un futuro sistema integrado de transporte para la ciudad, el cual pueda unificar su funcionamiento con tarjetas inteligentes, y sea una extensión para las rutas de transporte público colectivo y cable aéreo. Ver la ciudad como una red multimodal, en el cual el eje puede ser la bicicleta, podría generar altos beneficios económicos, políticos y sociales.

## 7 REFERENCIAS.

- Alonso, W. (1964). Location and land use. Toward a general theory of land rent. *Location and Land Use. Toward a General Theory of Land Rent*.
- Arcidiacono, C., & Porto, S. M. C. (2010). A model to manage crop-shelter spatial development by multi-temporal coverage analysis and spatial indicators. *Biosystems Engineering*, 107(2), 107–122.
- Batty, M. (2009). Accessibility: in search of a unified theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(2), 191–194.
- Biehl, D. (1991). *The role of infrastructure in regional development*.
- Büttner, J., Mlasowsky, H., & Birkholz, T. (2011). Optimising Bike Sharing in European Cities, 90. Retrieved from [https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/obis\\_handbook\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/obis_handbook_en.pdf)
- Calcuttawala, Z. (2006). Landscapes of information and consumption: A location analysis of public libraries in Calcutta. *Edward D. Garten, Delmus E. Williams, James M. Nyce (Ed.)*, 24, 319–388.
- Cheng, J., Bertolini, L., & le Clercq, F. (2007). Measuring sustainable accessibility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2017), 16–25.
- Cooper, L. (1963). Location-allocation problems. *Operations Research*, 11(3), 331–343.
- Demaio, P., & Gifford, J. (2004). Will Smart Bikes Succeed as Public Transportation in the United States? *Journal of Public Transportation*, 7(2), 1–15. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5038/2375-0901.7.2.1>
- Demaio, P. J. (2003). Smart Bikes : Public Transportation for the 21st Century. *Transportation Quarterly*, 57(1), 9–12.
- Departamento Nacional de Planeación. (2015). DNP advierte que se avecina colapso de movilidad en las principales capitales. Retrieved from [https://www.dnp.gov.co/Paginas/DNP advierte que se avecina colapso de movilidad en las principales capitales.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/DNP%20advierte%20que%20se%20avecina%20colapso%20de%20movilidad%20en%20las%20principales%20capitales.aspx)
- Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271.
- Escobar, D. A., Tapasco, O. A., & Giraldo, J. A. (2015). Medición de Desempeño

del Sistema de Transporte Cable Aéreo de la Ciudad de Manizales en Colombia, usando Tres Enfoques: Analítico, Simulado y de Accesibilidad Urbana. *Información Tecnológica*, 26(6), 199–210. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000600020>

Escobar, D., García, F., & Tolosa, R. (2013). Análisis de accesibilidad territorial a nivel regional. *Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Y Arquitectura, Manizales*.

Escobar, D., Holguín, J. M., & Zuluaga, J. D. (2016). Accesibilidad de los centros de ambulancias y hospitales prestadores del servicio de urgencias y su relación con la inequidad espacial. Caso de estudio Manizales – Colombia. *Revista Espacios*, 37(20), 20. Retrieved from <http://www.revistaespacios.com/a16v37n20/16372020.html>

Evans, N., & Moskowitz, J. (2012). Bike Sharing in the United States : State of the Practice and Guide to Implementation, (September), 1–67.

Fishman, E., Washington, S., & Haworth, N. (2013). Bike Share: A Synthesis of the Literature. *Transport Reviews*, 33(2), 148–165. <https://doi.org/10.1080/01441647.2013.775612>

Fujita, M., Krugman, P. R., & Venables, A. (1999). *The spatial economy: Cities, regions, and international trade*. MIT press.

García-Palomares, J. C., Gutiérrez, J., & Latorre, M. (2012). Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach. *Applied Geography*, 35(1), 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.07.002>

Gauthie, A., Hughes, C., Kost, C., Li, S., Linke, C., Lotshaw, S., ... Treviño, X. (2013). Guía de planeación del sistema de bicicleta. *ITDP, Institute for Transportation and Development Policy*, 1–152.

Gellrich, M., & Zimmermann, N. E. (2007). Investigating the regional-scale pattern of agricultural land abandonment in the Swiss mountains: a spatial statistical modelling approach. *Landscape and Urban Planning*, 79(1), 65–76.

Geurs, K. T., Boon, W., & Van Wee, B. (2009). Social impacts of transport: literature review and the state of the practice of transport appraisal in the Netherlands and the United Kingdom. *Transport Reviews*, 29(1), 69–90.

Geurs, K. T., & Ritseman Van Eck, J. (2001). Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact.

Geurs, K. T., & Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140.

- Giraldo, R. (2002). *Introducción a la geoestadística. Teoría y aplicación*. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.
- Gobernación de Caldas, FINAGRO, F. para el F. del S. A., & Instituto Agustín Codazzi. (2016). Caldas. Retrieved from <http://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/caldas.html#7>
- Hansen, W. G. (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76.
- Herce, M., & Magrinya, F. (2002). *La Ingeniería en la evolución de la Urbanística*. Ediciones UPC. España.
- Higgs, G., Langford, M., & Fry, R. (2012). Investigating variations in the provision of digital services in public libraries using network-based GIS models. *Library & Information Science Research*, 35(1), 24–32.
- Holl, A. (2007). Twenty years of accessibility improvements. The case of the Spanish motorway building programme. *Journal of Transport Geography*, 15(4), 286–297.
- Kastenholz, E., Eusébio, C., Figueiredo, E., & Lima, J. (2012). Accessibility as competitive advantage of a tourism destination: The case of Lousã. *Field Guide to Case Study Research in Tourism, Hospitality and Leisure*. In: KF Hyde, Ryan, C. and Woodside, AG (Eds.). *Advances in Culture, Tourism and Hospitality Research*, 6, 369–385.
- Kotavaara, O., Antikainen, H., & Rusanen, J. (2011). Population change and accessibility by road and rail networks: GIS and statistical approach to Finland 1970–2007. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 926–935.
- Krugman, P. (1991). *Increasing returns and economic geography*.
- MacKinnon, D., Pirie, G., & Gather, M. (2008). Transport and economic development.
- Magalhães, M. T. (2016). Spatial coverage index for assessing national and regional transportation infrastructures. *Journal of Transport Geography*, 56, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.08.015>
- Manizales Como Vamos. (2017). *Informe de Calidad de Vida 2016*. Retrieved from <http://manizalescomovamos.org/wp-content/uploads/2016/08/Movilidad.pdf>
- Meddin, R. (2017). The bike sharing world-2017- Year and Data. Retrieved April 10, 2017, from <http://bike-sharing.blogspot.com.co/2017/>
- Metrobike, & DeMaio, P. (2009). Bike-sharing: History, Impacts, Models of Provision, and Future. *Journal of Public Transportation*, 12(4), 41–56.

- Morris, J. M., Dumble, P. L., & Wigan, M. R. (1978). Accessibility indicators for transport planning. *Transportation Research Part A: General*, 13(2), 91–109.
- Ortuzar, D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling Transport*.
- Park, S. J. (2012). Measuring public library accessibility: A case study using GIS. *Library & Information Science Research*, 34(1), 13–21.
- PMM, Plan Maestro de Movilidad para la ciudad de Manizales. (2010).
- Prada, L., Laurents, N., & Cristancho, S. (2008). *Guía Práctica de la Movilidad Peatonal Urbana*. Santa Fé de Bogota.
- Preston, J., & Rajé, F. (2007). Accessibility, mobility and transport-related social exclusion. *Journal of Transport Geography*, 15(3), 151–160.
- Ribeiro, A., & Silva, J. (2011). Space, development and accessibility between Portugal and Spain: the last frontier. *Revista Portuguesa de Estudos Regionais*, (27).
- Ricci, M. (2015). Bike sharing: A review of evidence on impacts and processes of implementation and operation. *Research in Transportation Business & Management*, 15, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.03.003>
- Rietveld, P., & Bruinsma, F. (2012). *Is transport infrastructure effective?: transport infrastructure and accessibility: impacts on the space economy*. Springer Science & Business Media.
- Rietveld, P., & Nijkamp, P. (1993). Transport and regional development. *Research Memorandum*, 50.
- Sailer, K., Penn, A., & Marmot, A. (2012). Spatial Configuration, Organisational Change and Academic Networks.
- Schürmann, C., Spiekermann, K., & Wegener, M. (1997). Accessibility indicators. *Berichte Aus Dem Institut Für Raumplanung*, 39.
- Shaheen, S. a., Guzman, S., & Zhang, H. (2010). Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2143(January 2010), 159–167. <https://doi.org/10.3141/2143-20>
- Story of cities #30: how this Amsterdam inventor gave bike-sharing to the world. (2016). *The Guardian*. Retrieved from <https://www.theguardian.com/cities/2016/apr/26/story-cities-amsterdam-bike-share-scheme>
- Suárez-Vega, R., Santos-Peñate, D. R., & Dorta-González, P. (2012). Location

models and GIS tools for retail site location. *Applied Geography*, 35(1–2), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.04.009>

Tassinari, P., Carfagna, E., Benni, S., & Torreggiani, D. (2008). Wide-area spatial analysis: A first methodological contribution for the study of changes in the rural built environment. *Biosystems Engineering*, 100(3), 435–447.

Tight, M., Timms, P., Banister, D., Bowmaker, J., Copas, J., Day, A., ... Watling, D. (2011). Visions for a walking and cycling focussed urban transport system. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1580–1589. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.03.011>

Vega, A. (2011). A multi-modal approach to sustainable accessibility in Galway. *Regional Insights*, 2(2), 15–17.

Vickerman, R., Spiekermann, K., & Wegener, M. (1999). Accessibility and economic development in Europe. *Regional Studies*, 33(1), 1–15.

Zuluaga, J. D., & Escobar, D. A. (2017). Geomarketing Analysis for Shopping Malls in Manizales (Colombia). Accessibility approach methodology. *Revista Espacios*, 38(21), 20.