

# **Maestría en Ingeniería Civil**

## **Determinación de los corredores factibles para la implementación de un sistema de transporte de pasajeros tipo tranvía en la ciudad de Bogotá**

**Iván Camilo Barahona Rodríguez**

**Bogotá, D.C., 11 de diciembre de 2019**



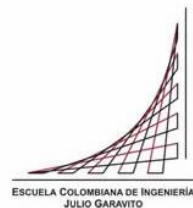
**Determinación de los corredores factibles para la implementación  
de un sistema de transporte de pasajeros tipo tranvía en la ciudad  
de Bogotá**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en Tránsito y Transporte**

**M.Sc. Santiago Henao Pérez**

**Director**

**Bogotá, D.C., 11 de diciembre de 2019**



La tesis de maestría titulada “*Determinación de los corredores factibles para la implementación de un sistema de transporte de pasajeros tipo tranvía en la ciudad de Bogotá*”, presentada por Iván Camilo Barahona Rodríguez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte.

---



Director de la tesis  
Ing. M.Sc. Santiago Henao Pérez

---

Jurado  
Ing. M.Sc. Maritza Cecilia Villamizar Roperio

---

Jurado  
Ing. M.Sc. Julián Silva Tovar

Bogotá, D.C., 11 de diciembre de 2019

«Nunca olvides lo que eres, el resto del mundo no lo hará.  
Llévalo como una armadura y nunca lo usarán para herirte».

“Tyrion Lannister”, *Juego de Tronos*

Agradecimientos:

El autor de este documento expresa sus más sinceros agradecimientos:

A todas aquellas personas que estuvieron pendientes del desarrollo del mismo y me dieron el impulso necesario en todos los momentos posibles.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería por ser mi Alma Mater y permitirme seguir creciendo intelectualmente.

## Resumen

A finales del siglo XX, Bogotá no contaba con un sistema de transporte masivo de pasajeros y, dada la necesidad de organizar el transporte de la ciudad, el Gobierno Nacional y la Administración Distrital tomaron la decisión de poner en funcionamiento el sistema de transporte masivo basado en buses, conocido como TransMilenio, el cual entró en funcionamiento en el año 2000. Se esperaba que luego de 16 años el sistema tuviera una cobertura de más del 80 % del área urbana, sin embargo, para el año 2019 el sistema no creció como se planeó, pero la demanda de pasajeros sí lo hizo. Por esta razón es necesario buscar alternativas para complementar la red de transporte público de la ciudad.

Basado en lo anterior, el propósito de este documento es determinar los corredores viales por los cuales es factible implementar un sistema de transporte público tipo tranvía, que permita atender la demanda insatisfecha debido a la red de transporte incompleta, pero que también sea atractivo y se ajuste a las condiciones físicas de la malla vial existente.

Para poder hacer la elección de los corredores, es necesario determinar primero las características representativas de los sistemas férreos metropolitanos, sus parámetros de diseño y la capacidad de transporte que tienen estos sistemas frente a otro tipo de tecnologías.

Se seleccionan de forma preliminar las vías que, tanto el Plan de Ordenamiento Territorial y el Plan Maestro de Movilidad definen como de alta y mediana capacidad. Utilizando un modelo de asignación se determina la demanda de cada corredor proyectada al año 2040. Finalmente, sobre los corredores con la demanda suficiente para ser atendidos con tranvía se realiza un análisis de las características físicas con las que cuentan para determinar si es factible la implementación de un sistema férreo de este tipo.

Como resultado se obtiene que cinco corredores de la ciudad cumplen con las condiciones de demanda e infraestructura para plantear una solución de transporte basada en tranvía. Estos son: la Av. Chile, la Av. Ferrocarril del Sur, la Av. Mariscal Sucre, la Av. José Celestino Mutis y la Av. Rodrigo Lara Bonilla.

**Palabras clave:** Demanda de transporte, infraestructura de transporte, transporte público, modelo de asignación, ferrocarriles metropolitanos.

## **Abstract**

*At the end of the 20th century, Bogota did not have a massive transport system for passengers and, given the need to organize the transport of the city, the National Government and the District Administration decided to put in operation the transport system based in buses, known as TransMilenio, which began operating in 2000. It was expected that after 16 years the system had coverage of more than 80 % of the urban area, however, in 2019 the system did not grow as it was planned, but passenger demand did. For this reason it is necessary to look for alternatives to complement the city's public transport network.*

*Based on the above, the purpose of this document is to determine the road corridors for which it is feasible to implement a public tram transport system that meets the unsatisfied demand, but is also attractive and meets the physical conditions of the network of existing roads.*

*To choose the corridors, it is first necessary to determine the representative characteristics of the metropolitan rail systems, the design parameters and the transport capacity that these systems have compared to other types of technologies.*

*It is possible to select in a preliminary way the routes that, both the Territorial Planning Plan and the Mobility Master Plan selected as high and medium capacity. Using an assignment model, the demand for each projected corridor is determined to the year 2040. Finally, on the correctors with sufficient demand to be served by tram, an analysis of the physical characteristics they have is carried out to determine if the implementation is feasible of a rail system of this type.*

*As a result, it is obtained that five corridors of the city meet the conditions of demand and infrastructure to propose a transport solution based on tram. These are: Chile St., Ferrocarril del Sur St., Mariscal Sucre St., Jose Celestino Mutis St. and Rodrigo Lara Bonilla St.*

**Keywords:** *Travel demand, transport infrastructure, public transport, assignment model, metropolitan railway.*

## Índice general

	<b>Pág.</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>2 OBJETIVOS Y ALCANCE</b>	<b>17</b>
2.1 Objetivos	17
2.1.1 Objetivo principal	17
2.1.2 Objetivos secundarios	17
2.2 Alcance	17
<b>3 ANÁLISIS DEL PROBLEMA</b>	<b>18</b>
<b>4 METODOLOGÍA</b>	<b>22</b>
<b>5 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS TIPO TRANVÍA</b>	<b>24</b>
5.1 Capacidad	25
5.2 Coches	25
5.3 Rieles	27
5.4 Bogies	28
5.4.1 Translohr	30
5.4.2 TVR	31
5.5 Parámetros de diseño geométrico	32
5.6 Sección transversal mínima	33
5.7 Señalización	34
5.8 Estaciones y plataformas	36
5.8.1 Diseño básico	36
5.8.2 Instalaciones fijas	37
5.8.3 Ubicación	39
<b>6 RED DE TRANSPORTE PÚBLICO DE BOGOTÁ</b>	<b>41</b>
6.1 Jerarquización de la infraestructura vial	41
6.1.1 Corredores de alta capacidad	43
6.1.2 Corredores de mediana capacidad	45
6.2 Cobertura de la red de transporte público	48
6.3 Elección preliminar de corredores	51
<b>7 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE TRANSPORTE PÚBLICO</b>	<b>52</b>
7.1 Modelo de transporte público	52
7.2 Encuesta de Movilidad 2015	53
7.2.1 Expansión de viajes	55
7.2.2 Construcción de matrices OD	56
7.3 Líneas de deseo	58
7.4 Asignación de viajes	59



7.4.1	Red de análisis	59
7.4.2	Asignación base para el año 2015	60
7.4.3	Elección del modelo	66
7.4.4	Proyección de volúmenes	68
7.4.5	Asignación preliminar para el año 2040	70
7.4.6	Asignación final para el año 2040	75
<b>8</b>	<b>CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS CORREDORES</b>	<b>78</b>
8.1	Avenida Chile	80
8.1.1	Planta	81
8.1.2	Perfil	82
8.1.3	Sección transversal	83
8.2	Avenida Ferrocarril del Sur	84
8.2.1	Planta	84
8.2.2	Perfil	85
8.2.3	Sección transversal	85
8.3	Avenida Mariscal Sucre	86
8.3.1	Planta	87
8.3.2	Perfil	88
8.3.3	Sección transversal	89
8.4	Avenida José Celestino Mutis	90
8.4.1	Planta	91
8.4.2	Perfil	92
8.4.3	Sección transversal	93
8.5	Avenida Rodrigo Lara Bonilla	94
8.5.1	Planta	94
8.5.2	Perfil	94
8.5.3	Sección transversal	95
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>97</b>
<b>10</b>	<b>REREFENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>99</b>

## Índice de tablas

Tabla 5-1. Parámetros de diseño para tranvías sobre ruedas metálicas.	32
Tabla 5-2. Parámetros de diseño para tranvías sobre ruedas de neumáticos.	33
Tabla 5-3. Parámetros de diseño en sección transversal.	34
Tabla 6-1. Corredores de alta capacidad proyectados a corto plazo.	44
Tabla 6-2. Corredores de alta capacidad proyectados a mediano y largo plazo.	45
Tabla 6-3. Corredores de media capacidad proyectados a corto plazo.	46
Tabla 6-4. Corredores de media capacidad proyectados a mediano y largo plazo.	47
Tabla 6-5. Corredores seleccionados que no cuentan con sistema de transporte.	51
Tabla 7-1. Parámetros de la red base de análisis y sus nodos para el año 2015.	60
Tabla 7-2. Asignación «todo o nada» Vs. volúmenes TransMilenio año 2015.	62
Tabla 7-3. Asignación «incremental» Vs. volúmenes TransMilenio año 2015.	63
Tabla 7-4. Asignación «estocástica» Vs. volúmenes TransMilenio año 2015.	64
Tabla 7-5. Asignación «sistema óptimo» Vs. volúmenes TransMilenio año 2015.	65
Tabla 7-6. Resumen comparativo de los modelos de asignación.	66
Tabla 7-7. Cálculo del factor de proyección de pasajeros al año 2040.	70
Tabla 7-8. Parámetros de la red base de análisis y sus nodos para el año 2040.	71
Tabla 7-9. Demanda en los tramos más cargados de los corredores, base 2040.	73
Tabla 7-10. Demanda en los tramos más cargados de los corredores, preliminar 2040.	75
Tabla 7-11. Demanda en los tramos más cargados de los corredores, final 2040.	76

## Índice de figuras

Figura 3-1. Área de influencia de TransMilenio y la PLMB según el CONPES 3096.	18
Figura 3-2. Abordajes Vs Tasa de Crecimiento para el SITP.	20
Figura 3-3. Habitantes por vehículo en Bogotá.	21
Figura 5-1. Capacidades de los diferentes medios de transporte público.	25
Figura 5-2. Configuraciones modulares de tranvías.	26
Figura 5-3. Dimensiones generales riel tipo Ri60.	27
Figura 5-4. Sistema de sujeción de un riel tranviario Ri60.	28
Figura 5-5. Esquema de un bogie típico de trenes de tranvía.	29
Figura 5-6. Interior del tranvía de Zaragoza en España.	29
Figura 5-7. Imagen digital de un bogie Translohr	30
Figura 5-8. Esquema de un bogie TVR.	31
Figura 5-9. Sección transversal mínima en sistemas tipo tranvía.	34
Figura 5-10. Lentes para semáforos de sistemas tipo tranvía.	36
Figura 6-1. Esquema de la jerarquización de transporte público en Bogotá.	42
Figura 6-2. Capacidad de los sistemas de transporte.	43
Figura 6-3. Área de cobertura de la red de transporte de alta y mediana capacidad.	48
Figura 6-4. Cobertura de la red del sistema TransMilenio en el 2019.	49
Figura 6-5. Cobertura de la red del sistema TransMilenio, PLMB y Regiotram.	50
Figura 7-1. Estructura general del modelo de transporte.	53
Figura 7-2. Distribución de muestra EODH Vs ZATs.	54
Figura 7-3. Densidad de atracción de viajes en transporte público colectivo.	57
Figura 7-4. Líneas de deseo del transporte público para el año 2015.	58
Figura 7-5. Asignación por el método del «sistema óptimo» para el año 2015.	67
Figura 7-6. Proyección potencial de viajes en TransMilenio.	68
Figura 7-7. Proyección potencial de viajes en SITP.	69
Figura 7-8. Asignación base para el año 2040.	72
Figura 7-9. Asignación preliminar para el año 2040.	74
Figura 7-10. Asignación definitiva para el año 2040	76
Figura 7-11. Corredores seleccionados por análisis de demanda.	77
Figura 8-1. Sección vial tipo V-2E.	80
Figura 8-2. Sección vial tipo V-3B.	80
Figura 8-3. Esquema del trazado de la Av. Chile.	81
Figura 8-4. Reserva vial Av. Chile por Av. Congreso Eucarístico y Av. Gabriel Andrade.	82
Figura 8-5. Perfil de terreno de la Av. Chile.	82
Figura 8-6. Anchos de vía sobre el corredor de la Av. Chile.	83
Figura 8-7. Esquema del trazado de la Av. Ferrocarril del Sur.	84
Figura 8-8. Perfil de terreno de la Av. Ferrocarril del Sur.	85

Figura 8-9. Anchos de vía sobre el corredor de la Av. Ferrocarril del Sur.	86
Figura 8-10. Esquema del trazado de la Av. Mariscal Sucre.	87
Figura 8-11. Av. Mariscal Sucre a la altura de la Calle 48 Sur.	87
Figura 8-12. Av. Mariscal Sucre a la altura de la Calle 20 Sur.	88
Figura 8-13. Perfil de terreno de la Av. Mariscal Sucre.	89
Figura 8-14. Anchos de vía sobre el corredor de la Av. Mariscal Sucre.	90
Figura 8-15. Esquema del trazado de la Av. José Celestino Mutis.	90
Figura 8-16. Av. Mutis entre Av. Boyacá y Av. de la Constitución.	91
Figura 8-17. Av. Mutis entre Av. Caracas y Av. Alberto Lleras.	92
Figura 8-18. Perfil de terreno de la Av. Mutis.	92
Figura 8-19. Anchos de vía sobre el corredor de la Av. Mutis.	93
Figura 8-20. Esquema del trazado de la Av. Rodrigo Lara Bonilla.	94
Figura 8-21. Perfil de terreno de la Av. Rodrigo Lara Bonilla.	95
Figura 8-22. Anchos de vía sobre el corredor de la Av. Rodrigo Lara Bonilla.	96
Figura 8-23. Sección transversal propuesta. Av. Rodrigo Lara Bonilla.	96

## **Índice de anexos**

Anexo 1 – Modelos de asignación

Anexo 2 – Trazado en planta de los corredores seleccionados

Anexo 3 – Registro fotográfico de los corredores seleccionados

## Lista de abreviaturas

ALO	Avenida Longitudinal de Occidente
Av.	Avenida
BOSTrab	<i>German Federal Regulations on the construction and operation of light rail transit systems (Verordnung über den Bau und Betrieb der Strassenbahnen)</i>
CAF	Banco de Desarrollo de América Latina (Antigua Corporación Andina de Fomento)
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
EM15	Encuesta de Movilidad 2015
EODH	Encuesta Origen Destino basada en el Hogar
EODI	Encuesta Origen Destino Interceptada en vía
FP	Factor de Proyección
KPH	Kilómetros Por Hora
NQS	Norte Quito Sur
OD	Origen-Destino
PLMB	Primera Línea de Metro de Bogotá
PMM	Plan Maestro de Movilidad
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
SDM	Secretaría Distrital de Movilidad
SITP	Sistema Integrado de Transporte Público
SPUTMP	Sistema de Servicio Público Urbano de Transporte Masivo de Pasajeros
TVR	Transporte por Vía Reservada ( <i>Transport sur Voie Réservee</i> )
UIC	Unión Internacional de Ferrocarriles ( <i>Union Internationale des Chemins de Fer</i> )
ZAT	Zona de Análisis de Transporte

# 1 INTRODUCCIÓN

Desde que las grandes ciudades tuvieron la necesidad de transportar a sus ciudadanos de forma eficiente aparecieron alternativas como los trenes metropolitanos, ahora conocidos como sistemas metro, y otro tipo de tecnologías principalmente basadas en rieles que permitieron realizar esta tarea de una manera eficiente. Es así como surgieron en diversas ciudades los sistemas de tipo tranvía; Bogotá no fue la excepción, desde 1824 en la ciudad se extendieron varios kilómetros de vías en madera dedicadas a los coches con tracción animal, con el paso del tiempo el sistema se fue tecnificando para tener rieles de acero y vehículos de tracción eléctrica, y la red se fue ampliando conforme lo hacía la ciudad. Sin embargo, el sistema entró en decadencia luego de los acontecimientos del Bogotazo, hasta que en 1951 fue desmontado en su totalidad.

Durante varios años, las administraciones, tanto nacionales como locales, intentaron implementar sistemas y organizar el ya caótico tráfico de la ciudad para incentivar así a las personas a utilizar el transporte público. Solo es hasta el año 2000 que entra en funcionamiento el sistema de transporte basado en buses que circulan por carriles exclusivos, conocido como TransMilenio. Este sistema surgió de un riguroso plan que presentaba que el sistema fuera creciendo conforme las proyecciones de la demanda de los pasajeros. Inicialmente se tenía planeado construir toda la red de transporte público en 16 años, lamentablemente la meta no se cumplió y la red de transporte, para el año 2019 aún no está completa. Además, los usuarios tienen una percepción negativa del sistema debido a diferentes factores, lo cual ha hecho que muchos opten por otros modos de transporte privado, que les ofrezca mejores condiciones.

Es así como surge la necesidad de buscar alternativas para completar la red de transporte público y que sea acorde a las necesidades actuales y futuras de la ciudad de Bogotá y surge la pregunta de que si es factible implementar un sistema de transporte público de pasajeros tipo tranvía en la ciudad de Bogotá, considerando las bondades que éste puede ofrecer comparado con otros sistemas de mayor capacidad como el metro.

Por las anteriores razones, este trabajo busca realizar un análisis general de las condiciones físicas y de demanda de transporte con la que cuentan los diferentes

corredores viales de la ciudad, para así poder determinar en cuáles de ellos es factible la implantación de un sistema de mediana capacidad como lo es el tranvía.

Este documento tiene la siguiente estructura: en el tercer capítulo se exponen las características del sistema de transporte público de la ciudad, sus antecedentes y la forma en la que en algún momento fue planificado. Además presenta las razones por las cuales las personas se presume están optando por abandonar el uso de los sistemas de transporte público para utilizar modos privados, definiendo así el problema a solucionar con este trabajo. El método a seguir en este documento se encuentra explicado en el cuarto capítulo.

En el quinto capítulo se describen los elementos particulares que caracterizan a estos sistemas en comparación con otros modos de transporte público, como los sistemas BRT o los metros. Aquí se realiza una comparación a la capacidad de transporte de pasajeros respecto a otras tecnologías, elemento fundamental al momento de determinar de forma preliminar los corredores aptos para proyectar un sistema tranviario.

En el sexto capítulo se define la jerarquización que se le ha dado a todas las vías de la ciudad en función de la capacidad teórica que estas deben tener para movilizar personas. Aquí se listan los corredores que tienen prioridad en el Plan Maestro de Movilidad para ser desarrollados según la importancia estratégica de los mismos. En este capítulo se realiza una elección preliminar de corredores, considerando aquellos que se establecen como vías de mediana o alta capacidad.

Al tener una primera elección de corredores, en el séptimo capítulo se determina el modelo de asignación que se va a utilizar para determinar la demanda de cada uno de los corredores proyectada al año 2040, utilizando como base la información arrojada por la Encuesta de Movilidad del año 2015. De esta modelación se eligen los corredores con la demanda justa para ser atendida por sistemas de tipo tranvía de mediana capacidad.

Finalmente, en el octavo y último capítulo se describen las características físicas de los corredores seleccionados, como lo son el trazado en planta, el perfil del terreno, y el espacio disponible en sección transversal para poder determinar aquellos en los que definitivamente sí es posible instalar un sistema tranviario. Seguido, se exponen las conclusiones derivadas del desarrollo del trabajo.



## **2 OBJETIVOS Y ALCANCE**

### **2.1 Objetivos**

#### **2.1.1 Objetivo principal**

Seleccionar los corredores viales en la ciudad de Bogotá en los cuales sea factible implementar un sistema de transporte público de pasajeros tipo tranvía, mediante un análisis de transporte y de condiciones físicas para complementar la planificación de la red de transporte público de la ciudad.

#### **2.1.2 Objetivos secundarios**

- Describir los sistemas de transporte tipo tranvía, implementados a nivel global, regional y local para determinar los modelos que se ajusten a la morfología de la ciudad de Bogotá.
- Detallar los corredores de transporte público definidos en el Plan Maestro de Movilidad según las características establecidas en el POT para categorizar aquellos donde sea posible implementar líneas de tranvía.
- Construir un modelo de transporte que permita determinar la demanda de pasajeros para los corredores seleccionados.
- Describir las características básicas de los corredores seleccionados para comprobar la aplicabilidad de este tipo de transporte en la ciudad de Bogotá.

### **2.2 Alcance**

Este documento busca hacer una selección de corredores factibles para implementar un tranvía basado únicamente en las características físicas y de demanda de los mismos, basado únicamente en información pública de las entidades distritales.

No se presentan diseños a detalle de la infraestructura, y tampoco se considera el análisis económico o tarifario con el que debería contar el sistema propuesto.

### 3 ANÁLISIS DEL PROBLEMA

En el año 2000, el Gobierno Nacional de Colombia emitió el documento CONPES 3096 (Consejo Nacional de Política Económica y Social) donde se estableció el seguimiento de las acciones para el desarrollo del Sistema de Servicio Público Urbano de Transporte Masivo de Pasajeros (SPUTMP) de Bogotá, acordadas con el Distrito desde 1998. En este documento se hizo específica la necesidad de postergar la construcción de la Primera Línea de Metro de Bogotá, o PLMB, debido a diferentes circunstancias como la situación fiscal de la Nación, la reconstrucción del Eje Cafetero debido al terremoto del año 1999, la reliquidación de créditos hipotecarios, entre otras. Es así como surgió la formulación de una alternativa para satisfacer las necesidades del servicio de transporte público de pasajeros en la ciudad que se conoció desde ese entonces como TransMilenio, un sistema de transporte basado en buses de alta capacidad que circulan por corredores exclusivos basado en las experiencias de las ciudades de Curitiba y Porto Alegre en Brasil. (Departamento Nacional de Planeación, 2000)

En el CONPES 3096 se estableció que la ciudad, en un plazo de 16 años, contaría con 21 corredores del sistema TransMilenio, con una extensión total de 388 km, los cuales debían cubrir el 80 % de los viajes de transporte público y el 85 % del área urbana mientras que la PLM propuesta para entonces tan solo cubriría el 8% como se puede ver en la Figura 3-1. Esta extensión de corredores sería atendida por 4475 buses, todos de tipo articulado. Se calculó entonces que la PLM costaría USD 107 millones/km y TransMilenio costaría por kilómetro el 5 % de este valor. Este documento también incluyó el perfil de pagos que le corresponderían al Distrito y a la Nación para llevar a cabo el plan durante los años acordados hasta el 2016.

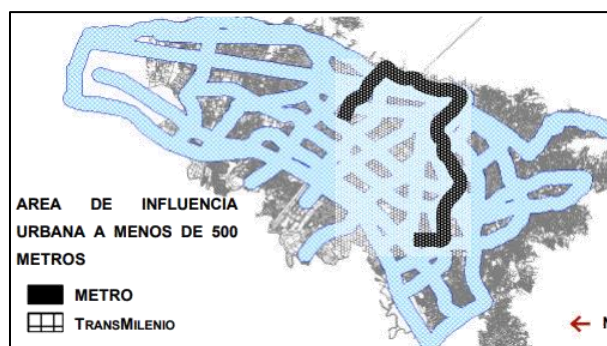


Figura 3-1. Área de influencia de TransMilenio y la PLMB según el CONPES 3096.  
Fuente: CONPES 3096

Hasta agosto de 2018 el sistema TransMilenio contaba con 114,4 km construidos y en operación sobre 9 de los 21 corredores originalmente planificados con un total de 2018 buses, entre articulados, biarticulados y padrones, estos corredores son:

- Calle 80
- Avenida Caracas
- Autopista Norte
- Av. de las Américas
- Avenida Suba
- Carrera Décima
- Calle Sexta
- Avenida Eldorado
- Avenida NQS

La demanda para el día hábil se encuentra en aproximadamente 2,5 millones de pasajeros, menos de la mitad de los pasajeros que se tenía presupuestado en el CONPES 3096 que era de cerca de 5,2 millones de pasajeros para el año 2018. (TransMilenio S.A., 2018)

Por otra parte, en el año 2009, mediante el Decreto 309, la Alcaldía adoptó el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) como el sistema de transporte público de Bogotá, el cual estableció las acciones para articular, vincular y operar de forma integrada los diferentes modos de transporte público. Especialmente, este decreto buscó reorganizar las rutas servicio colectivo que se prestaban con buses a través de la estructuración, diseño e implementación de una red jerarquizada de rutas de transporte público según la función y el área establecida. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2009)

Sin embargo, solo es hasta finales del año 2012 cuando se ponen en funcionamiento diversas rutas colectivas de buses diferenciadas por su función o por la zona servida, estas rutas se concibieron como adicionales a las ya establecidas rutas troncales y alimentadoras de TransMilenio. Es así como se establecen las rutas urbanas, encargadas de realizar recorridos largos entre zonas distantes de la ciudad y sobre corredores de alta demanda;

las ruta complementarias, que se pensaron como rutas cortas y circulares dentro de pequeñas zonas que llevaran a los pasajeros a las estaciones de TransMilenio; y finalmente, las rutas especiales que prestarían el servicio en zonas alejadas de la ciudad, de baja demanda y donde históricamente no se había prestado el servicio de transporte público. (SITP, 2012)

Actualmente, las rutas zonales, complementarias y especiales del SITP presentan reducciones significativas en la tasa de crecimiento de los abordajes, algo normal por tratarse de un sistema completamente nuevo que se va adoptado de forma paulatina durante varios años. Sin embargo, desde el año 2016 estas tasas vienen siendo negativas como se aprecia en la Figura 3-2, lo que puede significar dos cosas: que los pasajeros están descendiendo de los buses colectivos para pasar a otros modos de transporte, o que el fenómeno de las personas que no validan sus pasajes, conocidas como colados, ha aumentado.

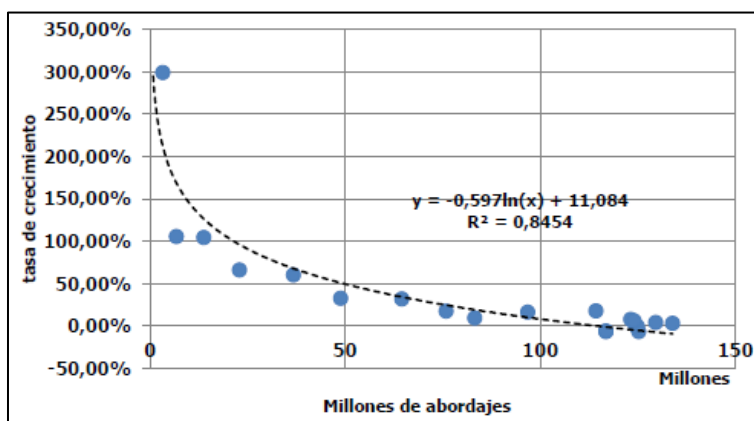


Figura 3-2. Abordajes Vs Tasa de Crecimiento para el SITP.  
Fuente: TransMilenio S.A., 2018

Según la Contraloría de Bogotá (2017), desde el año 2002 se evidencia un constante aumento en el número de vehículos particulares que circulan en la ciudad de Bogotá. Este crecimiento resulta más acelerado que el de la población lo cual ha hecho que la tasa de habitantes por vehículo haya pasado de 9,6 en el año 2002 a tan solo 3,7 en el 2015 como se muestra en la Figura 3-3. Por lo tanto, es preciso indicar que las personas que antes utilizaban el servicio público ahora se movilizan en sus propios vehículos, ya sea automóvil o motocicleta.

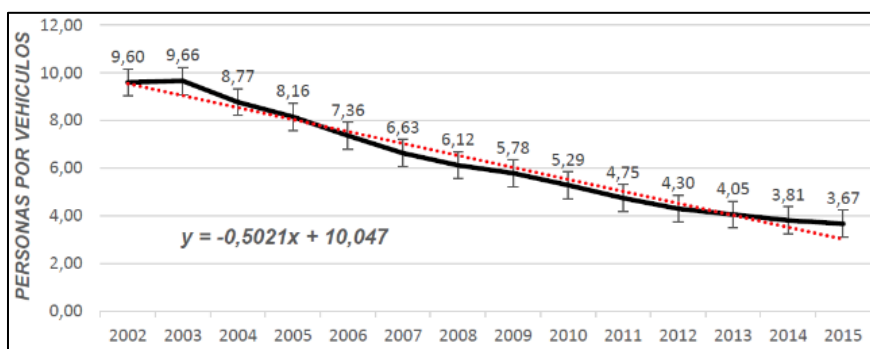


Figura 3-3. Habitantes por vehículo en Bogotá.  
Fuente: Contraloría de Bogotá 2017

En adición, tanto el sistema TransMilenio, como los demás buses del SITP y los buses del sistema colectivo tradicional que aún siguen circulando en las vías de la ciudad cuentan con la percepción de calidad más baja respecto a los demás modos de transporte, imagen que contrasta con la de los primeros años de funcionamiento del sistema de transporte masivo cuando contaba con la mejor calificación de todos los modos. (Bogotá Cómo Vamos, 2017)

Dadas las anteriores razones, surge la necesidad de continuar con la implementación de sistemas de transporte público de pasajeros en la ciudad, ya que su población sigue aumentando, la insatisfacción general del transporte de la ciudad ha ido en ascenso y los corredores planificados no han sido materializados según lo establecido, todo esto conlleva a que el parque automotor siga en aumento cuando la oferta vial no presenta un crecimiento proporcional. Debe ser posible ofrecerle a la ciudad alternativas que permitan desarrollar el transporte público de pasajeros, hacerlo atractivo, pero sobretodo funcional para que así la calidad de vida de los ciudadanos no se deteriore aún más.

## 4 METODOLOGÍA

Con el fin de determinar los corredores en los cuales sería posible implementar un sistema de transporte público de pasajeros tipo tranvía en la ciudad de Bogotá, se propuso seguir una secuencia de pasos que permitieron evaluar uno a uno los corredores de transporte público de la ciudad determinados en el Plan Maestro de Movilidad para, en cada una de las etapas, depurar la lista de los mismos hasta obtener aquellos que cumplieran los requisitos determinados para implementar este tipo de transporte.

En primer lugar hizo una descripción de las particularidades del funcionamiento de los sistemas férreos urbanos: las diferentes formas de implantación, el funcionamiento operacional y las diversas configuraciones del material rodante con el fin de determinar cuáles combinaciones de los anteriores podrían resultar adecuados para el contexto urbano de la ciudad de Bogotá.

Luego de tener un contexto general de los sistemas de transporte férreo urbanos, se analizaron las reservas viales incluidas en el POT (Plan de Ordenamiento Territorial) vigente para la ciudad al momento de realizar el presente proyecto de investigación, con el fin de determinar la sección vial planificada para todos los corredores de la ciudad, descartando aquellos en los cuales ya se encuentra implementado algún sistema de transporte masivo, o donde haya abierto un proceso para su construcción; esto con el fin de proponer corredores que le permitan a la ciudad ampliar la red de transporte a futuro sin alterar o modificar lo ya construido.

Determinada la viabilidad de construir en los corredores previamente seleccionados un sistema tipo tranvía, se procedió a analizar la demanda de transporte de estos, por tanto, utilizando los datos de generación y atracción de viajes de la Encuesta de Movilidad 2015 se construyó un modelo de asignación, obteniendo como resultado la demanda de transporte público para los corredores, proyectada a un año de proyecto, en este caso, el año 2040.

Seleccionados los corredores en la etapa anterior se realizó una caracterización de los elementos principales de las secciones transversales, particulares a cada corredor, con el fin de definir aquellos en los cuales era factible implementar un sistema tipo tranvía sin

necesidad de requerir grandes recursos en la adquisición de predios. En esta etapa se incluyó un análisis general de pendientes que permitió definir la viabilidad de utilizar los diversos tipos de material rodante descritos en etapas anteriores en los corredores seleccionados.

## 5 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS TIPO TRANVÍA

Cuando la sociedad empezó a agruparse surgieron los centros poblados caracterizados por tener diversidad de actividades económicas. El tamaño de estos centros siempre estuvo limitado por las distancias que se debían recorrer para desplazarse y llevar a cabo dichas actividades. Es por esta razón que usualmente se tenían concentraciones urbanas de no más de 6,0 km de extensión aproximadamente para poder realizar los viajes a pie. Con la aparición del transporte público y los vehículos de tracción combustible y eléctrica, naturalmente los tamaños de los centros urbanos fueron aumentando ya que fue posible desplazarse a mayores distancias gastando tiempos relativamente racionales. La aparición de los buses promovió el aumento de las manchas urbanas, y los sistemas férreos permitieron conectar ciudades con poblaciones cada vez a mayores distancias. Es así como surgió la necesidad de implantar diversos sistemas de transporte que permitieran satisfacer las necesidades particulares de los habitantes de las grandes ciudades, siempre en procura de optimizar los tiempos de desplazamiento. (Rietveld & van Nierop, 1995)

La mayoría de ferrocarriles urbanos basan su sistema de explotación en la implantación sobre corredores de gran densidad poblacional. Es por esta razón que suelen utilizar estaciones con pequeñas distancias entre ellas, y teniendo en cuenta que es necesario ofrecer velocidades comerciales atractivas y tiempos de desplazamiento bajos, el material rodante que tienen estos sistemas debe ser capaz de generar aceleraciones y desaceleraciones cómodas para el usuario pero que también resulten eficientes en la operación de los mismos. Además, considerando que este tipo de sistemas se implantan en corredores donde suelen tener espacio compartido con el tráfico mixto, peatones y ciclistas, los vehículos deben tener las dimensiones necesarias para lograr una adaptación física en la vía según los requerimientos técnicos particulares para cada tipo de tren.

Por estas razones resulta necesario describir de forma particular las características representativas de los sistemas férreos conocidos como tranvías teniendo en cuenta que sus condiciones de operación resultan ser diferentes a las que presentan otros sistemas férreos tradicionales como los metros urbanos o los trenes de cercanías.



## 5.1 Capacidad

El principal objetivo que tiene cualquier sistema de transporte masivo, ya sea férreo o no, es el de transportar usuarios de una forma rápida, segura y sobretodo económica que sirva como una alternativa válida frente al transporte particular basado en el modo carretero. Es por esta razón que la razón principal a la hora de escoger entre un sistema de transporte u otro es la cantidad máxima de pasajeros que sea capaz de movilizar bajo ciertas condiciones mínimas de calidad para los usuarios.

Según los diferentes sistemas de operación y configuración de los diversos materiales rodantes en los modos de transporte es posible determinar ciertos intervalos de capacidad entre los cuales pueden funcionar cada uno de ellos como se evidencia en la Figura 5-1:

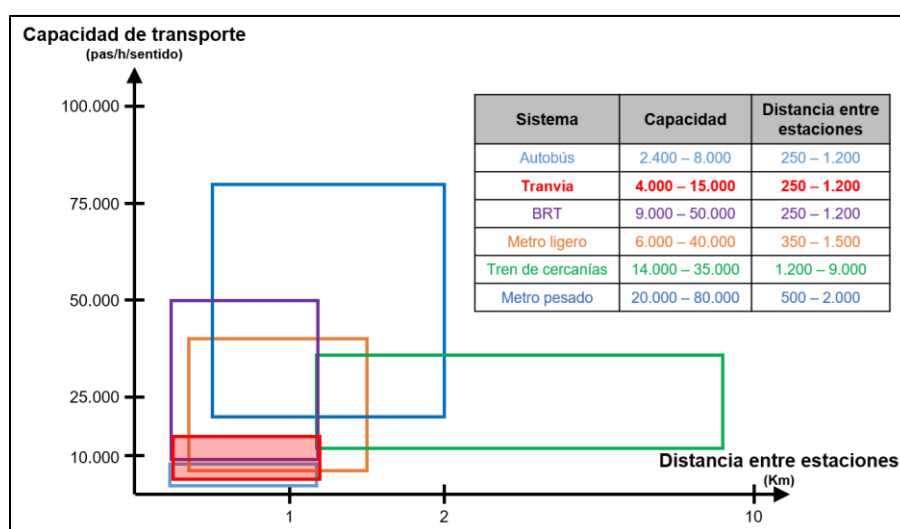


Figura 5-1. Capacidades de los diferentes medios de transporte público.  
Fuente: (Melis Maynar & González Fernández, 2008)

## 5.2 Coches

Una característica de los ferrocarriles metropolitanos es que circulan por infraestructuras de alto costo, como viaductos o túneles; o en superficie como es común en los trenes ligeros y los sistemas tranviarios. Esta situación implica que el tamaño de los coches no puede ser el mismo al de un ferrocarril convencional, y como se mencionó anteriormente, estos ferrocarriles tienen la necesidad de generar aceleraciones elevadas por lo que la típica configuración de una unidad tractora y coches remolcados no es

aplicable en estos casos. Usualmente se utilizan configuraciones del tipo MM (motor-motor), MRM (motor-remolque-motor), MMRMM (motor-motor-remolque-motor-motor), o similares que básicamente se caracterizan por tener un gran número de coches tractores frente a los coches remolcados.

Algunas de las grandes marcas fabricantes de trenes tranviarios como Alstom, Siemens, Bombardier, AnsaldoBreda, CAF, entre otras, han optado por diseñar coches estándares y modulares con el fin de aumentar la capacidad de los trenes cuando así sea necesario incorporando nuevos módulos en las configuraciones existentes. Una ventaja significativa de este tipo de fabricación es la reducción en los costos de construcción y ensamblaje, por lo tanto permite que los precios del material rodante sean más bajos, ventaja que los órganos responsables de la movilidad en las ciudades de diferentes países pueden aprovechar para implementar estos sistemas en tiempos relativamente cortos y con presupuestos ajustados.

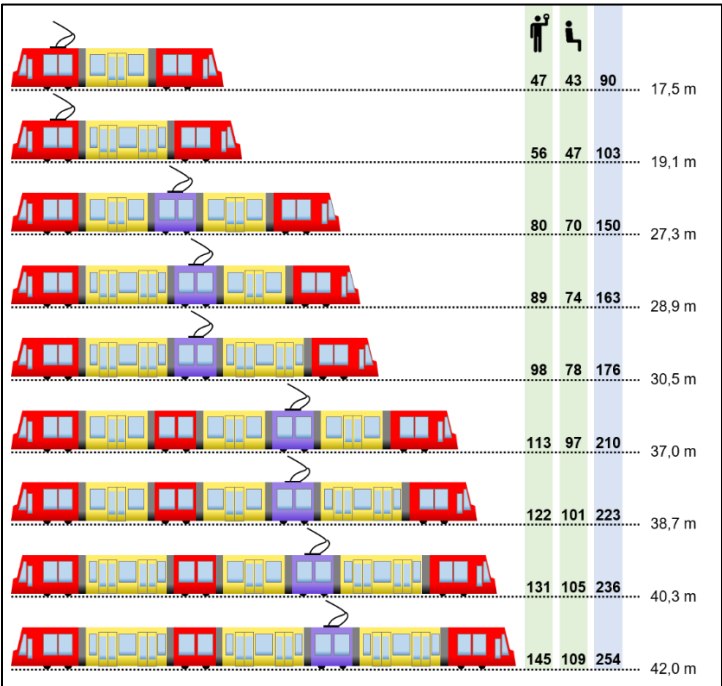


Figura 5-2. Configuraciones modulares de tranvías.  
Fuente: (Melis Maynar & González Fernández, 2008)

Usualmente se construyen estos vehículos en acero y aluminio principalmente, y otros materiales que permiten que sean ligeros. Normalmente se utilizan cabinas con anchos entre los 2,30 m y 2,65 m, apoyados sobre vías con anchos entre 1000 mm y

1435 mm, este último conocido como el ancho de trocha estándar, aunque también existen casos particulares en los que los vehículos son guiados por un único riel y sus apoyos se dan sobre neumáticos, este particular caso se detalla adelante. Además, otra particularidad con la que cuentan los trenes tranviarios, y a diferencia de los trenes tradicionales, es que, con el fin de lograr una mejor integración con el tránsito mixto, estos son de piso bajo, lo que significa que la distancia entre la vía y el piso del vehículo es igual o inferior a 300 mm.

### 5.3 Rieles

La principal característica de los sistemas tranviarios es la posibilidad que tienen sus coches de compartir el espacio vial con los vehículos de tráfico mixto, por lo tanto, a diferencia de los ferrocarriles tradicionales, para estos, resulta necesario embeber y enrasar la parte superior de los rieles con la superficie de rodadura de la calle por la cual circula.

El tipo de riel más utilizado en estos sistemas es el «Ri» cuya denominación se ajusta al peso en kilogramos por metro lineal, similar a como ocurre con los rieles tradicionales denominados UIC. Los rieles más utilizados para sistemas tranviarios son los Ri54 y Ri60.

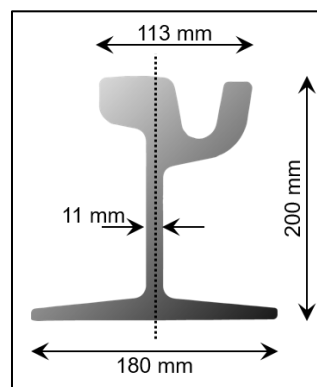


Figura 5-3. Dimensiones generales riel tipo Ri60.  
Fuente: (Arcelor Mittal, 2019)

Una de las particularidades que tienen los rieles dedicados a los sistemas tranviarios es que, dados los radios mínimos de curvatura que se deben permitir en los trazados urbanos, la interacción entre las ruedas y los rieles es más agresiva por lo que se debe tener especial cuidado en la dureza de los materiales que se utilizan para fabricar estos dos elementos ya que el desgaste es mutuo entre ellos.

Cuando el trazado en planta requiere curvas con radios inferiores a los 80 m, resulta necesario que estos rieles especiales sean curvados desde el origen, y no como sucede con los rieles UIC que, dadas sus características, permiten aplicar las respectivas deflexiones en el sitio de instalación.

Para instalar estos rieles es necesario realizar excavaciones hasta la subbase en la cual se instalan los apoyos separados en promedio cada 1,5 m, sin embargo, como los rieles se encuentran embebidos normalmente en concreto es necesario utilizar envolventes elásticos que permitan disminuir la transmisión de vibraciones a las placas de concreto y por lo tanto atenuar al máximo el ruido en el entorno como se observa en la Figura 5-4.

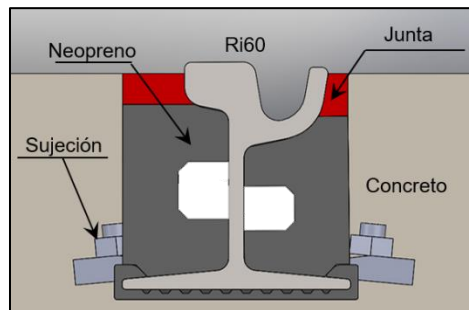


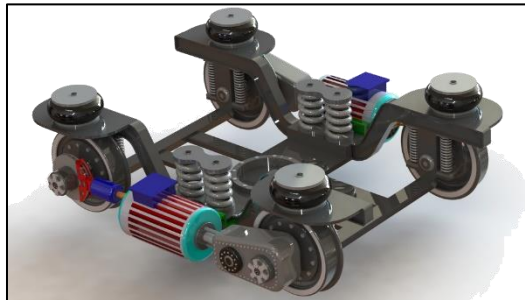
Figura 5-4. Sistema de sujeción de un riel tranviario Ri60.  
Fuente: (Frankó Rubber, 2019)

Un inconveniente asociado a la forma en la que se instalan estos rieles radica en que las sujeciones a la placa de concreto quedan completamente ocultas, lo que implica que al momento de realizar algún cambio o mantenimiento correctivo, sea necesario extraer completamente el riel y los demás elementos asociados al mismo, a diferencia de lo que sucede en rieles comunes donde estas reparaciones se pueden hacer de forma puntual y en poco tiempo.

## 5.4 Bogies

El material móvil de los trenes es uno de los elementos más importantes y a la vez variados que componen los coches, junto con las mismas cajas y los enganches. Básicamente es la rodadura mecánica que sustenta las cajas, ya sea de las locomotoras o de los vagones remolcados, razón por la cual la clasificación más general que existe para este tipo de elementos es: *bogies* motores o *bogies* remolques. También, estos elementos suelen ser diferentes considerando los diferentes métodos de alimentación eléctrica que

pueden llegar a tener los trenes, ya sea a través de un pantógrafo en contacto con una catenaria o utilizando un tercer riel electrificado. Estos elementos, a pesar de ser diseñados para adaptarse a anchos de vía estandarizados presentan variaciones en sus elementos más particulares en procura de disminuir el desgaste de las ruedas a lo largo de los tramos curvos o simplemente para optimizar los sistemas de amortiguación de los coches, o incluso hacer más eficientes los sistemas de frenado de los mismos.



*Figura 5-5. Esquema de un bogie típico de trenes de tranvía.  
Fuente: (CrabCAD, 2019)*

Como ya se ha mencionado en anteriores ocasiones, una de las particularidades más grandes que presentan los sistemas de tipo tranvía es el uso de coches con piso 100 % bajo; además de utilizar únicamente alimentación eléctrica a través de pantógrafo y catenaria dados los riesgos de electrocución de los demás actores viales, al tratarse de un sistema que comparte espacio y operación. Es por esta razón que los *bogies* de estos sistemas férreos urbanos son fabricados de tal forma que no obstaculicen la circulación de los pasajeros al interior de los trenes. Aun así, dado el espacio que requieren las ruedas, en el interior de un tranvía típico, con un ancho normal de 2,65 m, solo es posible lograr pasillos de hasta 70 cm de ancho, como se aprecia en la Figura 5-6.



*Figura 5-6. Interior del tranvía de Zaragoza en España.  
Fuente: (Tranvía de Zaragoza, 2016)*

### 5.4.1 Translohr

Teniendo en cuenta que los sistemas de tipo tranvía se han venido desarrollando a lo largo de diferentes ciudades, y que no todas cumplen con las condiciones topográficas ideales para instalar sistemas férreos con pendientes longitudinales bajas, ha surgido un nuevo *bogie* que permite guiar al tren solo por un riel central y ejercer la tracción sobre ruedas de neumático en los extremos en reemplazo de las tradicionales ruedas metálicas como se aprecia en la Figura 5-7. Se le conoce como sistema Translohr ya que ha sido desarrollado y patentado por la empresa francesa *Lohr Industrie*. (NTL, 2019)



Figura 5-7. Imagen digital de un bogie Translohr  
Fuente: (Translohr, 2013)

En teoría la instalación de este tipo de sistemas resulta ser más sencilla y económica por contar únicamente con un riel, además de permitir radios mínimos de curvatura de hasta 10,5 m en comparación con un *bogie* tradicional que permite radios mínimos de 25 m. Sin embargo, la ventaja más notoria de este sistema es que permite la instalación de sistemas férreos en corredores con pendientes longitudinales de hasta un 13 % gracias a los neumáticos que utiliza en sus ruedas, lo que a su vez mejora la aceleración y la distancia de parada en caso de emergencia. (Translohr, 2013)

También es necesario resaltar que este sistema de rodadura en efecto es más económico al momento de adquirir, sin embargo, considerando el desgaste natural de los neumáticos hace que su reemplazo sea mucho más frecuente que el de las ruedas metálicas, por lo que el ahorro en el costo inicial se puede perder en

el costo de mantenimiento. Además, ese mayor agarre sobre la superficie que ofrece el sistema Translohr también hace que el gasto energético aumente. Por estas razones es necesario siempre realizar análisis comparativos para poder determinar el sistema que mejor se ajuste a las necesidades y posibilidades de una ciudad.

Este sistema ha sido susceptible a algunos inconvenientes: en el 2006 un tren de la ciudad de *Clermont-Ferrand* en Francia, se descarriló dada la presencia de un objeto extraño en la garganta del riel guía, por esta razón, estos *bogies* ahora cuentan con un sistema de limpieza que libera de cualquier suciedad el riel al paso de los coches.

#### 5.4.2 TVR

El sistema de transporte por vía reservada o TVR por nombre en francés (*Transport sur Voie Réservée*) es un sistema tranviario desarrollado por la empresa Bombardier y que ya se ha puesto en funcionamiento en ciudades francesas como Nancy y Caen. Al igual que el sistema Translohr, éste se encuentra soportado en un *bogie* con neumáticos y guiado por un único riel central, sin embargo, este sistema permite que los coches, si es necesario, se desliguen del riel para ser conducidos de manera independiente, por esta razón cuentan con un sistema de dirección que el operador puede utilizar para guiar el vehículo cuando no se encuentra vinculado al riel.

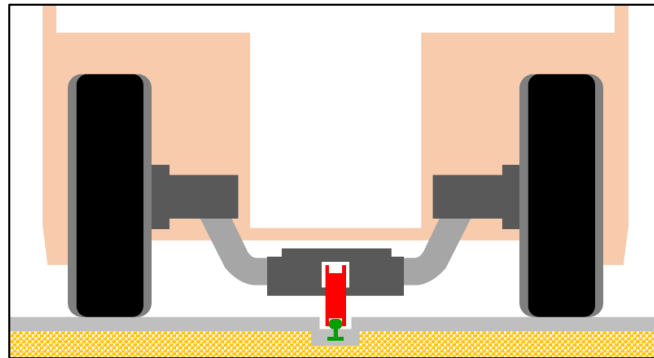


Figura 5-8. Esquema de un bogie TVR.  
Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que estos vehículos pueden funcionar sin una guía, deben ser más cortos para poder realizar las maniobras necesarias en caso de no

estar guiados por un riel. Pueden asemejarse a un bus biarticulado alimentado a través de un pantógrafo. Al igual que los demás tranvías, estos están diseñados con piso 100 % bajo con capacidades de hasta 105 pasajeros.

## 5.5 Parámetros de diseño geométrico

Bajo la Resolución 6249 de 2017 expedida por el Ministerio de Transporte se reglamentaron las condiciones mínimas que debe tener en Colombia cualquier sistema de metro ligero, tren ligero, tranvía o tren-tram. Estos parámetros son específicos para la inserción de trenes en zonas urbanas, objeto de estudio de este documento, ya que para las vías férreas implementadas en zonas rurales con el propósito de comunicar municipios, aplican las normas establecidas para la red férrea de Colombia en los reglamentos de operación y de transporte adoptados por los concesionarios de esta red.

En la Tabla 5-1 se resumen los parámetros de diseño para las vías férreas urbanas apoyadas en ruedas de acero:

Tabla 5-1. Parámetros de diseño para tranvías sobre ruedas metálicas.

Parámetro	Unidad	Valor	Valor excepcional*
Aceleración transversal máxima sin compensación	m/s <sup>3</sup>	0,65	1,00
Radio mínimo horizontal	m	50	25
Longitud mínima alineación recta	-	Longitud del vehículo	Distancia entre bogies
Longitud mínima alineación circular	-	Longitud del vehículo	Distancia entre bogies
Longitud mínima curva de transición (L)	m	$L > 2.5 \frac{V^3}{R}$	
Peralte máximo	mm	100	150
Insuficiencia de peralte máxima	mm	100	150
Rampa de peralte máxima	mm/m	4,00	
Inclinación máxima en curva (i)	%	$i + \frac{800}{R}$	
Inclinación mínima	‰	10	5
Aceleración vertical máxima	m/s <sup>3</sup>	0,2	0,4
Lamina de aire	mm	200	100

\*El valor excepcional corresponde a una situación singular en la inserción urbana de los trenes y se deberá corresponder a una solución de última instancia y debidamente justificada.

Fuente: Elaboración propia a partir de lo establecido en el Capítulo III de la Resolución 6249 de 2017 del Ministerio de Transporte



Así mismo en la Tabla 5-2 se presentan los parámetros de diseño para los las vías férreas con apoyo en llantas de neumático:

Tabla 5-2. Parámetros de diseño para tranvías sobre ruedas de neumáticos.

Parámetro	Unidad	Valor	Valor excepcional*
Longitud mínima de la curva de transición	m	10	0 para R > 1000
Radio mínimo horizontal	m	20,0	10,5
Velocidad máxima en curvas sin peralte.(V)	km/h	$V \leq 3,6 \sqrt{R}$	
Pendiente longitudinal máxima	%	13,0	
Pendiente longitudinal máxima en estaciones	%	4,5	
Pendiente longitudinal máxima en zonas de maniobra y final de trayecto	%	4,0	
Radio parabólicos mínimos	m	≥ 2500 en recta ≥ 1500 en accesos a estación	≥ 1000
Radio parabólico mínimo en combinación de trazado en planta y alzado	m	≥ 2500 para 30 ≥ R > 70 ≥ 1500 para 70 ≥ R > 200	
*El valor excepcional corresponde a una situación singular en la inserción urbana de los trenes y se deberá corresponder a una solución de última instancia y debidamente justificada.			

Fuente: Elaboración propia a partir de lo establecido en el Capítulo III de la Resolución 6249 de 2017 del Ministerio de Transporte

Si bien la Resolución 6249 de 2017 no indica un valor máximo permitido para la pendiente máxima permitida en tranvías sobre ruedas metálicas, el Manual de Normativa Férrea, también del Ministerio de Transporte, indica que la pendiente máxima para zonas de circulación de trenes debe ser de 60 ‰, o 6 %, valor comúnmente utilizado como parámetro máximo en sistemas tranviarios teniendo en cuenta las bajas velocidades de operación de estos sistemas. Sistemas tipo metro pueden limitar este valor incluso hasta 3,5 ‰. (Ministerio de Transporte, 2013)

## 5.6 Sección transversal mínima

Para poder definir el ancho mínimo necesario para implementar un sistema tranviario, se recurre a experiencias internacionales, en donde, como se muestra en la

Figura 5-9, se ha utilizado anchos máximos para dos vías con báculo en la entrevía de hasta 6,7 m. Además en la Tabla 5-3 Tabla 5-3. Parámetros de diseño en sección transversal.se muestran otros parámetros que establecen el ancho mínimo de sección transversal para el funcionamiento este tipo de transporte. (Conejo Feliu, 2015)

Tabla 5-3. Parámetros de diseño en sección transversal.

Parámetro	Unidad	Valor
Ancho de vía	mm	1435
Diferencia mínima entre ejes de vías paralelas	m	3,17 sin báculo entre vías 3,52 con báculo entre vías
Ancho total mínimo de franja reservada	m	3,31 sin báculo entre vías 6,70 con báculo entre vías
Ancho de franja en estaciones	m	11,97 estaciones laterales 10,04 estación en separador
Altura de cable de contacto sobre el carril	m	6,00 máxima 5,75 normal e intersecciones 4,00 sin acceso a tráfico mixto

Fuente: Elaboración propia.

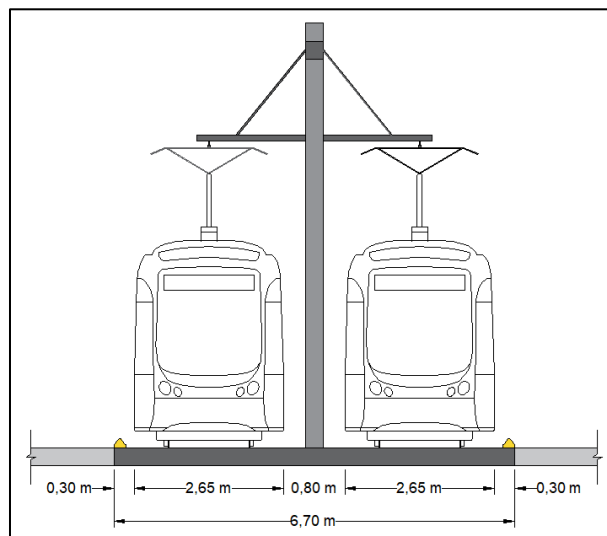


Figura 5-9. Sección transversal mínima en sistemas tipo tranvía.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.7 Señalización

Como se ha venido mencionando a lo largo de este documento, el elemento diferenciador de los sistemas tranviarios respecto a los demás sistemas ferroviarios metropolitanos es que éste comparte el viario con los demás actores viales, no solo vehículos motores o no, también con transeúntes que pueden compartir espacio con los

trenes. Es por esta razón que la señalización que se utiliza en estos sistemas debe estar acorde y estrechamente relacionada con la señalización vial típica de las ciudades donde se implementan.

Vale la pena aclarar que, a pesar de utilizarse sistemas de señalización similares a los convencionales, es preciso que los controles operativos se realicen siempre buscando favorecer el flujo continuo de los trenes teniendo prioridad sobre los demás flujos de tráfico mixto con los que comparte espacio. Precisa entonces la necesidad de instalar sistemas de detección de los tranvías, elementos de recepción en los vehículos e interconectar todo el sistema con la semaforización viaria sobre la cual el tranvía tiene prioridad. Es por estas razones que el mando de estos sistemas siempre lo lleva a cabo un operador, ya que, debido al riesgo que se corre con los demás actores viales, operar los coches desde centros de control no resultaría práctico ni seguro. (Melis Maynar & González Fernández, 2008)

Actualmente en Colombia se encuentra en vigencia el Manual de Señalización Vial expedido por el Ministerio de Transporte en el año 2015. En este manual no existe aún algo particularmente relacionado con la señalización de sistemas de tipo tranvía, sin embargo, en el Decreto 1008 de 2015 que reglamenta el servicio de transporte público masivo de pasajeros por metro ligero, tren ligero, tranvía o tren-tram y bajo la Resolución 6249 de 2017 del Ministerio de Transporte que reglamenta las condiciones mínimas que deben tener estos sistemas, se indica que en la señalización para la operación de los trenes ligeros se recomienda utilizar lo determinado en el Apéndice 4: *Signals, Signs and Indicators* del BOStrab<sup>1</sup>. (German Federal Regulations, 1987; Ministerio de Transporte, 2017; Presidencia de la República de Colombia, 2015)

El aislamiento de la circulación de estos sistemas respecto a la de los carriles normales se realiza normalmente mediante un sardinel o con dispositivos de separación como bordillos o tachones. Además, considerando que las paradas o estaciones suelen ubicarse sobre el separador central de las vías, es necesario considerar el control operacional para permitir el acceso de los peatones a las mismas de forma segura.

---

<sup>1</sup> Como se le conoce al *German Federal Regulations on the construction and operation of light rail transit systems* traducido del original «*Verordnung über den Bau und Betrieb der Strassenbahnen*» (*Strassenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab*) vom 11 Dezember 1987.

Finalmente, debe evitarse en la medida de lo posible los conflictos con los vehículos que esperar girar a la izquierda en las intersecciones con el flujo recto de estos sistemas de transporte, razón por la estos giros a la izquierda deben prohibirse o debe permitirse sólo en una fase semaforizada independiente. (Ministerio de Transporte, 2015)

En cuanto a la semaforización de este tipo de corredores, el BOStrab y el Manual de Señalización indican que es muy importante que los conductores de vehículos, tanto del flujo normal como del flujo de transporte público, no confundan los semáforos aplicables a uno u otro sistema, razón por la cual sugiere que estos sistemas utilicen semáforos especiales, con indicaciones y colores, como se muestran la Figura 5-10:

















Dirección de circulación				
Señal de tres lentes	<ul style="list-style-type: none"> <li> Alerta</li> <li> Pare</li> <li> Avance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li></li> <li></li> <li></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li></li> <li></li> <li></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li></li> <li></li> <li></li> </ul>

Figura 5-10. Lentes para semáforos de sistemas tipo tranvía.  
Fuente: elaboración propia con información del apéndice 4 del BOStrab.

De hecho, el tranvía de Ayacucho, de la ciudad de Medellín, que ya se encuentra en funcionamiento, cuenta con este tipo de señalización, basada en lo que expone la guía alemana, sin embargo, en el tiempo de funcionamiento de este sistema ya se han presentado algunos incidentes que llegaron a acumular en el año 2018, cerca de 30 horas de atraso en la prestación del servicio. (Jiménez, 2018)

Respecto a la señalización de los cruces peatonales y los cruces férreos con el sistema vial, la Resolución 6249 de 2017 establece que la norma vigente es el Manual de Señalización 2015 y no el BOStrab alemán.

## 5.8 Estaciones y plataformas

### 5.8.1 Diseño básico

Al igual que sucede con la señalización, la Resolución 6249 de 2017 del Ministerio de transporte tiene como objetivo reglamentar las condiciones mínimas

para las paradas o estaciones de los sistemas de tranvías urbanos. Resalta que estos lugares deben ser diseñados teniendo en cuenta que hacen parte del espacio público peatonal, y por lo tanto deben cumplir con todos los parámetros mínimos para permitir la libre circulación de personas con movilidad reducida, además de ajustarse y ser armónicas con el entorno.

Las paradas deben ser lugares adecuados para permitir el ascenso y descenso de los pasajeros de estos sistemas férreos metropolitanos en lugares abiertos al público general. Dadas las características físicas con las que cuentan estos coches, descritas anteriormente en este capítulo, estas estaciones deben construirse de tal forma que permitan el acceso a vehículos de piso bajo, por lo tanto no pueden superar los 20 cm de altura respecto al nivel de la rasante. Se espera que la longitud de éstas sea la suficiente para albergar el conjunto de coches completamente, junto con otras instalaciones necesarias para prestar un adecuado servicio dentro de la estación.

El ancho mínimo que debe tener la plataforma, para permitir la circulación segura de los usuarios es de apenas 2,0 m aunque se sugiere que sea por lo menos de 3,0 m. Sin embargo, en caso de que estas plataformas no se encuentren incorporadas a la acera, y por el contrario se construyan de forma elevada, el parámetro mínimo de ancho de plataforma que se debe cumplir es de 2,5 m. Además, para que el ingreso de las personas a los trenes sea seguro y rápido, debe haber un espacio horizontal entre el borde del andén y el piso del vehículo de no más de 20 cm, medidos desde el centro de la puerta del coche. Esta distancia es la necesaria para que el paso siempre se realice entre el vehículo y el andén sin posibilidad a pisar directamente la rasante de la vía en las operaciones de ascenso y descenso de los pasajeros. (Ministerio de Transporte, 2017)

## **5.8.2 Instalaciones fijas**

### **5.8.2.1 Control de accesos**

Dependiendo de la política tarifaria establecida para sistema de transporte que compone una sola red de la ciudad, es necesario definir la

forma en la que se controla el acceso a las estaciones y plataformas. Si se considera un sistema de control abierto, no se debe utilizar ningún tipo de barrera para que el usuario acceda a la infraestructura o directamente al tranvía, en este caso el usuario debe realizar el pago de forma voluntaria.

El sistema cerrado a la entrada y abierto a la salida es el que comúnmente se utiliza en los sistemas de transporte masivo en Colombia, este consiste en imponer una barrera física que solo puede ser superada al validar el viaje o realizar el respectivo pago al momento de ingresar al sistema, instalando en la salida puertas simplemente para controlar el flujo de personas pero sin necesidad de validar ningún tiquete. Este sistema es adecuado cuando no existe zonificación en las ciudades que contemplen tarifas diferenciales.

Finalmente, el sistema cerrado es aquel que requiere que el usuario valide su pasaje al entrar al sistema, pero más importante, al salir, ya que existen tarifas diferenciales en las que el costo del pasaje depende de la distancia recorrida o de la diferenciación entre las zonas donde se accede y donde se sale del sistema. En este caso, la pedagogía que se debe realizar al usuario es exhaustiva ya que la responsabilidad del pago cae enteramente en él.

#### **5.8.2.2 Venta de tiquetes**

Normalmente se debe tener a disposición infraestructura destinada a ubicar personal que se encargue de realizar la venta o recarga de tarjetas prepagadas para poder acceder a las plataformas de los diferentes sistemas de transporte público, sin embargo, existe la tendencia a instalar máquinas automáticas de venta y expedición de tiquetes. Estas instalaciones, ya sean automáticas o no, deben ubicarse en sitios accesibles, preferiblemente que no entorpezcan la entrada a las plataformas y que permitan la adquisición de pasajes para cualquier persona sin importar si cuentan con alguna discapacidad física o no.

### **5.8.2.3 Puertas de andén**

Por seguridad del pasajero es preferible el uso de puertas que sean capaces de separar la vía de la plataforma para evitar que los pasajeros se muevan entre andenes considerando la baja altura a la que se instalan las plataformas para los sistemas tipo tranvía. Estas puertas deben instalarse de tal forma que, cuando el tren se encuentre detenido y debidamente estacionado, las puertas del coche y las del andén se encuentren debidamente alineadas.

En sistemas tranviarios estas puertas se instalan por varias causas, entre las que se encuentran: proteger de forma pasiva a las personas invidentes o con movilidad reducida; proteger el descenso de pasajeros por los lugares que no corresponden o simplemente evitar la caída de objetos a la vía; operativamente estos elementos permiten que el operador del tren pueda entrar más rápido a la estación y así mejorar el flujo de los trenes.

Para este tipo de sistemas es común el uso de puertas de andén de media altura, es decir, de entre unos 1,2 a 1,5 m de altura ya que son alternativas más baratas y no se requiere realizar aislamiento de los andenes para controlar las temperaturas, ya que estas puertas permiten la circulación de aire desde el exterior hacía el interior de la estación.

### **5.8.3 Ubicación**

La localización de estas estaciones debe resultar de un análisis completo del corredor en el cual se va a implantar el sistema. Estudios en Estados Unidos han demostrado que de la correcta ubicación de las estaciones depende el número de pasajeros que tienen capacidad de atraer cada una de ellas. Es así como las zonas con mayores puestos de trabajo en la tarde o áreas residenciales en la mañana suelen atraer mayores cantidades de pasajeros, resultado que es de esperar, sin embargo, la cercanía a paradas de autobús o grandes centros de estacionamiento también hacen que se atraigan más usuarios, ya que estas zonas permiten que

exista intermodalidad y facilita los trasbordos dentro de la red de transporte urbano.  
(Kuby, Barranda, & Upchurch, 2004)



## **6 RED DE TRANSPORTE PÚBLICO DE BOGOTÁ**

Las administraciones públicas, tanto nacionales como municipales tienen por objeto proyectar sus ciudades a cargo de tal forma que sean competitivas y ofrezcan las características básicas que permitan el crecimiento de las empresas que en ellas se emplazan, pero más aún, buscan elevar el nivel de vida de los ciudadanos. Una de las formas más relevantes para llevar a cabo este propósito es mejorar los servicios que presta la ciudad, principalmente el de transporte público ya que este a su vez se espera que mejore la calidad del aire, la seguridad, la accesibilidad y la movilidad de todos los ciudadanos.

Debe tenerse en cuenta también qué, desde que se concibe, el transporte público influye en los procesos de urbanización de la ciudad, y por lo tanto son determinante a la hora de planificar el crecimiento y la forma de los cascos urbanos. En el desarrollo urbano sostenible se deben tener en cuenta particularmente tres estrategias: la estructura urbana, el uso y la ocupación del suelo, y la movilidad urbana; esta última debe clasificar la circulación y el transporte público para optimizar los desplazamientos en la ciudad siempre en busca de atender las necesidades de la población.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, es necesario entender la ciudad como un ambiente colectivo, y por lo tanto atender primero las necesidades de la mayoría de la población, que en el caso bogotano corresponde a aquella que se moviliza en medios de transporte públicos. Esta razón es la que se debe considerar para darle prioridad a la circulación del transporte público, a los peatones, y a modos alternos como la bicicleta. (Cal y Mayor Asociados, 2006)

### **6.1 Jerarquización de la infraestructura vial**

El Plan Maestro de Movilidad para la ciudad de Bogotá (2006) establece que la estrategia para mejorar el sistema de transporte público es conferirle a este el papel de estructurador de la movilidad, articulando los diferentes modos, y dentro de las estrategias complementarias para llevar a cabo el objetivo se encuentra, entre otras: integrar el transporte masivo con el colectivo, implementar planes de construcción y mantenimiento de la infraestructura, modernizar el parque vehicular, privilegiar el transporte público sobre el

privado y estructurar una red jerarquizada de rutas de transporte público según su función y área servida.

Considerando que el transporte público debe adaptarse a las características de cada sector de la ciudad, y debe funcionar como un sistema coordinado para racionalizar la operación y los costos de transporte y además, que se desarrolla mediante la implementación de nueva infraestructura vial de estaciones y de intercambios modales, resulta necesario operar rutas jerarquizadas de transporte público.

Se espera que la jerarquización oriente la demanda hacia los modos de mayor capacidad y calidad, y sobretodo buscar eficiencia en términos de transporte buscando reducir así el consumo de energía, la contaminación, el ruido, la ocupación de espacio, los tiempos de desplazamiento, los incidentes, y la inversión en infraestructura.

Como se aprecia en la Figura 6-1, la jerarquización de las rutas del transporte público en Bogotá se encuentra dividida en: corredores de alta capacidad, corredores de mediana capacidad, corredores de baja capacidad internos, corredores de baja capacidad externos, transporte interurbano y transporte individual. Sin embargo, y para efectos del presente documento, solo se tendrán en cuenta dentro del análisis los corredores de alta y mediana capacidad, considerando las características descritas para los sistemas tipo tranvía en el Capítulo 5.1.

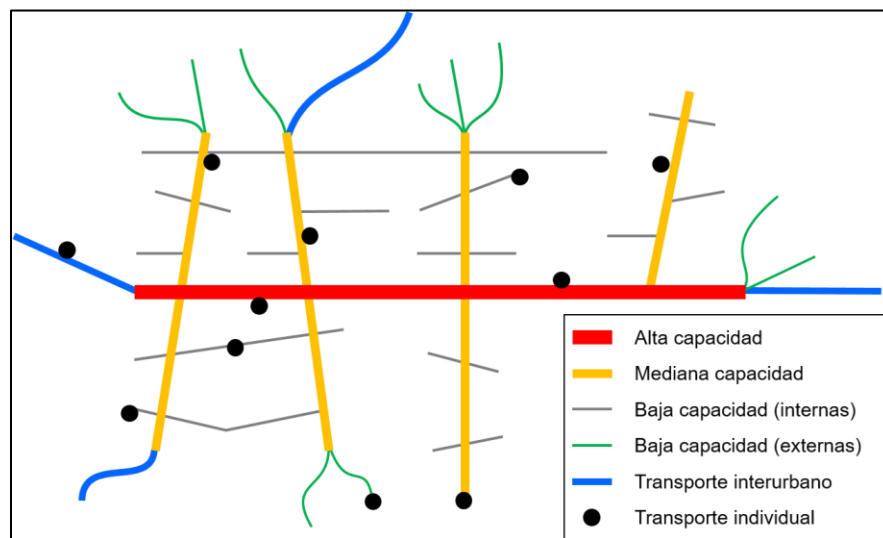


Figura 6-1. Esquema de la jerarquización de transporte público en Bogotá.  
Fuente: Elaboración propia con información del Plan Maestro de Movilidad para la ciudad de Bogotá.

### 6.1.1 Corredores de alta capacidad

Los corredores de alta capacidad son los que actualmente se denominan corredores troncales, las rutas de transporte que circulan por estas vías son consideradas como los ejes principales del sistema de transporte público de pasajeros. La tecnología que se espera sea utilizada en estos corredores debe seleccionarse de acuerdo a la demanda sobre cada uno de ellos, sin dejar de lado los costos de inversión, tanto en infraestructura como en vehículos; las características socioeconómicas de los usuarios, el espacio vial disponible o la reserva vial y finalmente, la sostenibilidad de la operación de los servicios que por allí se presten.

En la Figura 6-2 se muestran los niveles máximos de movilización por tipo de tecnología según el Plan Maestro de Movilidad para la ciudad de Bogotá:

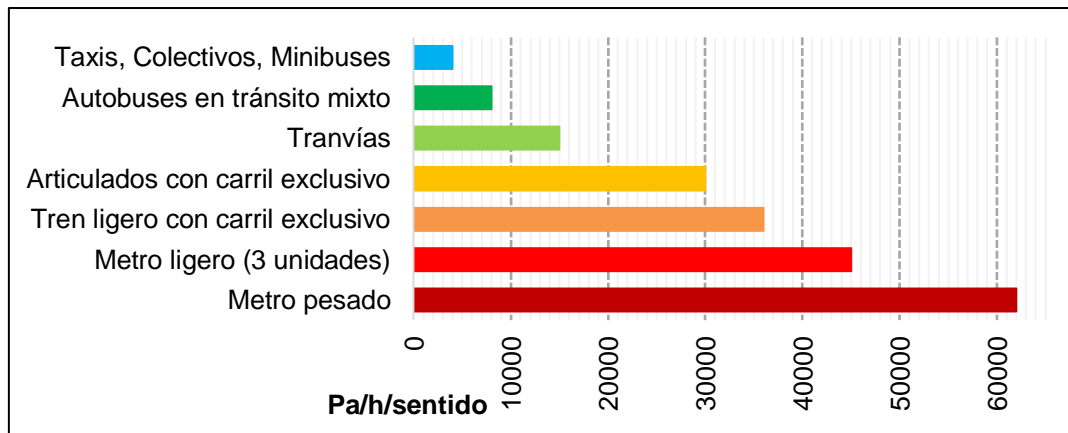


Figura 6-2. Capacidad de los sistemas de transporte.  
Fuente: adaptada de (Melis Maynar & González Fernández, 2008)

Para los denominados corredores de mediana y alta capacidad, se espera que las diferentes tecnologías sean implantadas sobre los carriles centrales o utilizando el espacio medio de la reserva vial para permitir el tránsito exclusivo de los vehículos sin importar cuál tecnología se decida utilizar.

#### 6.1.1.1 Corredores de alta capacidad en el corto plazo

Para el año 2006, los corredores que se consideraron de alta capacidad fueron aquellos que en años posteriores se incluyeron en los

planes de expansión del sistema TransMilenio e hicieron parte, algunos, de las fases II y III proyectadas por las administraciones distritales posteriores a la elaboración del Plan Maestro de Movilidad. Estos corredores de alta capacidad priorizados se encuentran resumidos en la Tabla 6-1:

*Tabla 6-1. Corredores de alta capacidad proyectados a corto plazo.*

Corredor	TRAMO	
	Desde	Hasta
Av. Caracas	Av. Medellín	Av. Villavicencio
Av. Caracas	Av. Villavicencio	Av. Boyacá
Av. Ciudad de Cali	Av. Villavicencio	Av. Manuel Cepeda
Av. Villavicencio	Av. Boyacá	Av. Caracas
Av. Colón	Av. Batallón Caldas	Av. NQS
Av. de las Américas	Av. Centenario	Av. Ciudad de Cali
Av. de las Américas	Av. Agoberto Mejía	Banderas
Av. NQS	Límites con Soacha	Circunvalar del Sur
Av. Jiménez	Av. Caracas	Carrera 1
Av. Medellín	Av. Paseo de Los Libertadores	ALO
Av. Paseo de los Libertadores	Av. Medellín	Av. San José
Av. Paseo de los Libertadores	Av. San José	Límite del Distrito con Chía
Av. NQS	Calle 92	Límites con Soacha
Av. Suba	Av. Ciudad de Cali	Av. Medellín
Av. Alberto Lleras Camargo	Av. San José	Calle 26
Av. Fernando Mazuera	Av. Eldorado	Av. Villavicencio

*Fuente: Tabla 8-20 del Plan Maestro de Movilidad para la ciudad de Bogotá.*

De estos corredores ya cuentan con sistema de transporte de pasajeros la Av. Caracas; la Av. Colón (Calle 13), entre la Av. Caracas y la Carrera 50; la Av. de las Américas entre la Av. Ciudad de Cali y la Av. Colón; La NQS entre el límite del Distrito con el municipio de Soacha y la Av. Paseo de los Libertadores conocida como Autopista Norte; la Av. Jiménez; la Av. Medellín o Calle 80; la mencionada Autopista Norte; la Av. Suba y finalmente la Av. Fernando Mazuera o Carrera Décima.

### 6.1.1.2 Corredores de alta capacidad en el mediano y largo plazo

Al igual que sucedió con los corredores de alta capacidad proyectados a corto plazo, los corredores que se ilustran en la Tabla 6-2 fueron incluidos en los planes de expansión del sistema de transporte masivo TransMilenio, sin embargo, luego de realizar un análisis económico, el Plan Maestro de Movilidad determinó que éstos debían ser construidos o potenciados en el mediano o largo plazo.

Tabla 6-2. Corredores de alta capacidad proyectados a mediano y largo plazo.

Corredor	TRAMO	
	Desde	Hasta
Av. Centenario	Av. Congreso Eucarístico	Av. Batallón Caldas
Av. Centenario	Av. Congreso Eucarístico	Av. Longitudinal de Occidente
Av. Villavicencio	Av. Primero de Mayo	Av. Boyacá
Av. Villavicencio	Av. Ciudad de Cali	Av. Tintal
Av. Villavicencio	Av. Primero de Mayo	Av. Ciudad de Cali
Av. Villavicencio	Av. El Tintal	Av. Longitudinal de Occidente
Av. Congreso Eucarístico	Autopista Sur	Av. Medellín
Av. Congreso Eucarístico	Av. Medellín	Av. Paseo de Los Libertadores
Av. Eldorado	Av. Ciudad de Cali	Av. Fernando Mazuera
Av. NQS	Límites con Soacha	Circunvalar del Sur
Av. de las Américas	Av. Ciudad de Cali	ALO
Av. Suba	Av. Ciudad de Cali	ALO

Fuente: Tabla 8-24 del Plan Maestro de Movilidad para la ciudad de Bogotá.

De estos corredores el único que ya cuentan con sistema de transporte masivo es la Av. Eldorado, entre la Carrera 3 y la Av. Longitudinal de Occidente, conocida comúnmente como ALO.

### 6.1.2 Corredores de mediana capacidad

Además de los corredores de alta capacidad, se definen los servicios complementarios que se conciben para dar cubrimiento del sistema de transporte público en sectores urbanos de la ciudad donde la infraestructura o la demanda no son suficiente para implementar sistemas de alta capacidad.

En particular, los corredores de mediana capacidad son aquellos que ofrecen cobertura sobre los corredores principales del sistema, pero adyacentes a los corredores troncales. Según el perfil tecnológico del sistema a utilizar, estos deben circular sobre carriles preferenciales o preferiblemente exclusivos.

A estos corredores se incorporarán los de baja capacidad, ya sean internos o externos, y los de mediana capacidad se espera que se incorporen y sean complemento de los corredores de alta capacidad. Particularmente los servicios de transporte individual también deben contemplar la debida articulación con los corredores de mediana y alta capacidad.

### **6.1.2.1 Corredores de media capacidad en el corto plazo**

Al igual que sucede con la red de corredores de alta capacidad, para aquellos de mediana capacidad, el Plan Maestro de Movilidad determina cuales son los que deberían tener una solución en el corto plazo según la disponibilidad presupuestal, estos se listan en la Tabla 6-3:

*Tabla 6-3. Corredores de media capacidad proyectados a corto plazo.*

Corredor	TRAMO	
	Desde	Hasta
Av. Boyacá	Av. Villavicencio	Av. Suba
Av. Boyacá	Av. Villavicencio	Autopista al Llano
Av. Ciudad de Cali	Av. Manuel Cepeda	Carrera 91
Av. Ciudad de Cali	Calle 125	Av. Suba
Av. Ciudad de Cali	Carrera 91	Calle 125
Av. Circunvalación	Av. Francisco Miranda	Calle 60
Av. Primero de Mayo	Av. Fernando Mazuera	Av. Villavicencio
Av. San Bernardino	Av. El Tintal	ALO
Av. Comuneros	Av. Caracas	Av. Batallón Caldas
Av. Comuneros	Av. Fernando Mazuera	Av. Caracas

*Fuente: Tabla 8-21 del Plan Maestro de Movilidad para la ciudad de Bogotá.*

### **6.1.2.2 Corredores de media capacidad en el mediano y largo plazo**

Finalmente, en la Tabla 6-4 se listan los corredores que en el Plan Maestro de Movilidad para Bogotá son categorizados como corredores de

mediana capacidad para ser desarrollados en el mediano o largo plazo, también considerando la disponibilidad presupuestal de las administraciones futuras.

*Tabla 6-4. Corredores de media capacidad proyectados a mediano y largo plazo.*

Corredor	TRAMO	
	Desde	Hasta
Av. Boyacá	Av. Suba	Av. San José
Av. Ciudad de Cali	Av. Suba	Av. San José
Av. Ciudad de Lima	Carrera 1	Av. de las Américas
Av. Circunvalación	Av. Villavicencio	Limite Distrito
Av. Ferrocarril del Sur	Av. Pedro León Trabuchy	Av. Comuneros
Av. Ferrocarril del Sur	Av. Congreso Eucarístico	Av. Boyacá
Av. Mutis	Av. NQS	Av. Congreso Eucarístico
Av. Mutis	Av. Boyacá	Av. Ciudad de Cali
Av. Mutis	Av. Alberto Lleras Camargo	Av. NQS
Av. Mutis	Av. Congreso Eucarístico	Av. Boyacá
Av. Laureano Gómez	Av. San Juan Bosco	Av. De los Cedritos
Av. Laureano Gómez	Av. De los Cedritos	Av. NQS
ALO	Av. Suba	Av. Circunvalar del Sur
Av. San José	Av. Paseo de Los Libertadores	Av. Boyacá
Av. San José	Av. Boyacá	Av. Ciudad de Cali
Av. San José	Av. Alberto Lleras Camargo	Av. Paseo los Libertadores
Av. Ferrocarril del Sur	Av. Comuneros	Av. Congreso Eucarístico
Av. Ferrocarril del Sur	Av. Boyacá	Av. NQS
Av. General Santander	Av. Fucha	Av. NQS
Av. Mariscal Sucre	Av. Francisco Miranda	Av. Teusaquillo
Av. Mariscal Sucre	Av. Congreso Eucarístico	Av. Santa Lucía
Av. Colombia	Av. Francisco Miranda	Av. NQS
Av. Chile	Av. Bolivia	Av. Ciudad de Cali
Av. Chile	Av. El Cortijo	Av. Bolivia
Av. Chile	Av. Alberto Lleras Camargo	Av. Ciudad de Cali
Av. Rodrigo Lara Bonilla	Av. Paseo de Los Libertadores	Av. Suba
Av. Rodrigo Lara Bonilla	Av. Suba	Av. El Rincón
Av. Batallón Caldas	Av. Montes	Av. Primero de Mayo
Av. Batallón Caldas	Av. Primero de Mayo	Av. NQS
Av. Batallón Caldas	Av. Montes	Av. Mutis

*Fuente: Tabla 8-25 del Plan Maestro de Movilidad para la ciudad de Bogotá.*

## 6.2 Cobertura de la red de transporte público

Teniendo en cuenta la red de transporte público, tanto de alta capacidad como de mediana capacidad, se determina un área de cobertura de esta, considerando un radio de influencia de 500 m a cada uno de los costados de los corredores, distancia aceptable para acceder de forma peatonal a los mismos.

En la Figura 6-3 se ilustra el área de la ciudad de Bogotá que se espera sea cubierta con la implementación de sistemas de transporte sobre corredores de media y alta capacidad.

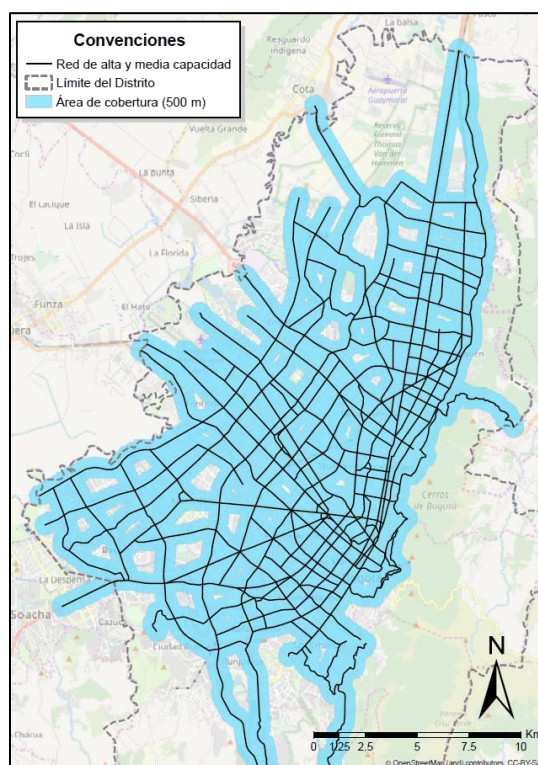


Figura 6-3. Área de cobertura de la red de transporte de alta y mediana capacidad.  
Fuente: Elaboración propia.

De los corredores propuestos en el Plan Maestro de Movilidad, al año 2019, se han implementado las troncales de TransMilenio sobre las avenidas NQS; la Av. Paseo de los Libertadores, la Av. Colón, la Av. Jiménez y la Av. Caracas en toda su extensión; además, un gran porcentaje de la Av. Medellín, la Av. de las Américas, la Av. Suba, la Av. Eldorado y la Av. Comuneros entre Av. Fernando Mazuera y la Av. NQS.



En la Figura 6-4 se muestra la ubicación de estas troncales sobre los correspondientes corredores de la ciudad, así como el área de cobertura de las mismas, utilizando la misma distancia anteriormente descrita. Se puede identificar claramente que la red se ha expandido de tal forma que conecte los sitios de mayor generación de viajes, ubicados en las localidades del occidente de la ciudad con los centros de atracción más importantes, ubicados sobre el eje oriental, aproximadamente entre la Av. NQS y los cerros orientales; y, entre la Av. Congreso Eucarístico y la Av. Comuneros.

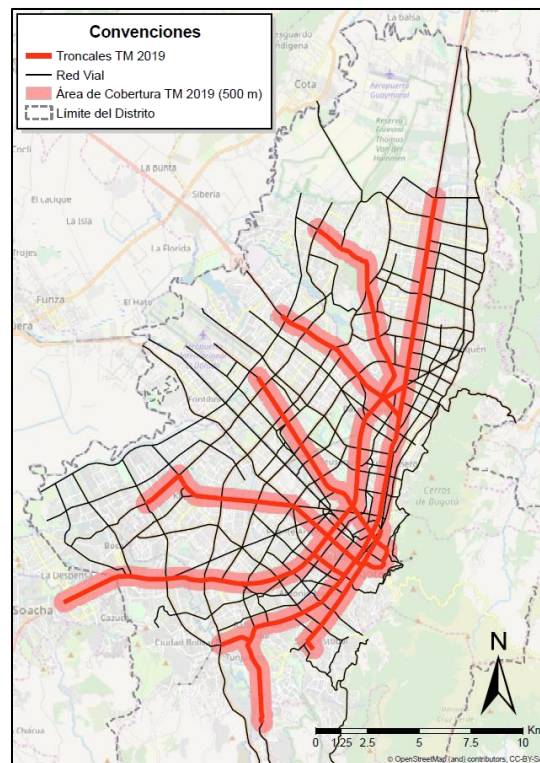


Figura 6-4. Cobertura de la red del sistema TransMilenio en el 2019.  
Fuente: Elaboración propia.

En adición, en el corredor de la Av. Alberto Lleras Camargo, nombre oficial de la Carrera Séptima, entre la Av. Eldorado y la Av. Contador (calle 134), se ha implementado un sistema de pretroncales que consiste en la utilización de la vía, en carril compartido con los vehículos mixtos, con buses duales; es decir, que tienen la capacidad de realizar detenciones tanto en vía como en estaciones del sistema TransMilenio. Este sistema se ha implementado de forma provisional mientras se toma la decisión de la tecnología más óptima para dar solución al sistema de transporte de este eje vial.

Además, durante el año 2019 se llevó a cabo la estructuración de la licitación y posterior adjudicación del diseño y construcción de dos sistemas férreos, en distintos corredores de la ciudad: la primera línea del metro pesado de la ciudad, o PLMB, que recorrerá un pequeño tramo al occidente de la Av. Villavicencio partiendo del Portal de las Américas de TransMilenio, la Av. Primero de Mayo desde la Av. Villavicencio hasta la Av. NQS donde luego, por la Av. de la Hortua (calle 1) llegará hasta la Av. Caracas por la cual el recorrido finaliza a la altura de la Av. Chile (calle 72); y el Regiotram de occidente que consiste en un tren ligero que parte en el municipio de Facatativá, pasando por Funza, Madrid y Mosquera para entrar al casco urbano sobre la Av. Ferrocarril de Occidente (calle 22), recorrido del antiguo Tren de la Sabana, este sistema se comportará como un tranvía dentro de la ciudad, y finalizará el recorrido a la altura de la Av. Caracas con calle 22 donde se espera se conecte tanto con el sistema TransMilenio como con la PLMB. La cobertura del actual sistema de transporte con estas dos líneas férreas se aprecia en la Figura 6-5:

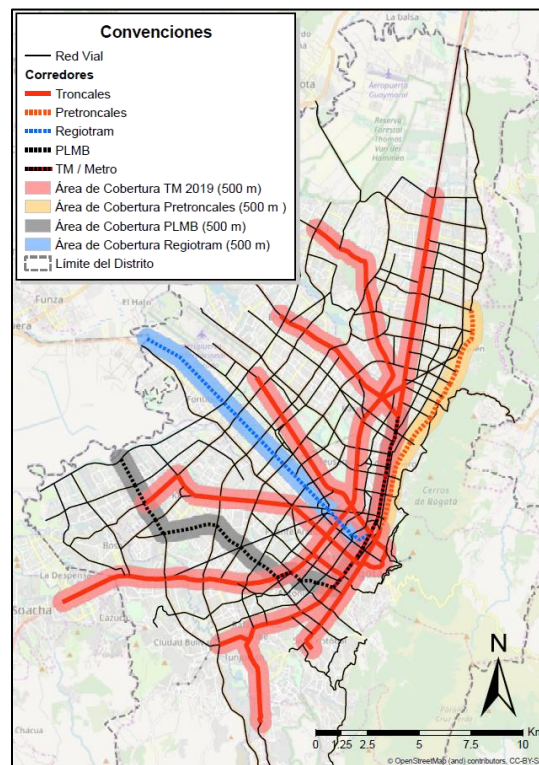


Figura 6-5. Cobertura de la red del sistema TransMilenio, PLMB y Regiotram.  
Fuente: Elaboración propia.

### 6.3 Elección preliminar de corredores

Luego de conocer los corredores por los cuales ya existe un sistema de transporte implementado, ya sea de mediana o alta capacidad, se procede a determinar entonces cuáles son los corredores planificados en el Plan Maestro de Movilidad para ser atendidos por diversas tecnologías de transporte.

En la Tabla 6-5 se presenta el resumen de los corredores que serán considerando en el estudio objeto de este documento en adelante. Dentro del listado existen corredores en los cuales aún no se ha construido ningún tipo de infraestructura vial, tan solo se cuenta con la definición de su correspondiente reserva vial, sin embargo se presenta la implementación de un sistema tipo tranvía como la oportunidad para construir estos corredores.

Tabla 6-5. Corredores seleccionados que no cuentan con sistema de transporte.

Corredor	Nomenclatura	Desde	Hasta
<b>ALO</b>	Carrera 96	Av. San José	Av. Circunvalar del Sur
<b>Av. Batallón Caldas</b>	Carrera 50	Av. Mutis	Av. NQS
<b>Av. Boyacá</b>	Carrera 72	Av. Villavicencio	Av. San José
<b>Av. Centenario</b>	Calle 13	Av. Batallón Caldas	ALO
<b>Av. Chile</b>	Calle 72	Av. Alberto Lleras	Av. Ciudad de Cali
<b>Av. Ciudad de Cali</b>	Carrera 86	Av. Primero de Mayo	Av. San José
<b>Av. Colombia</b>	Carrera 24	Av. Francisco Miranda	Av. NQS
<b>Av. Comuneros</b>	Calle 6	Av. NQS	Av. Batallón Caldas
<b>Av. Congreso Eucarístico</b>	Carrera 68	Autopista Sur	Av. Alberto Lleras
<b>Av. Ferrocarril del Sur</b>	N/A	Av. Pedro León Trabuchy	Av. Boyacá
<b>Av. General Santander</b>	Carrera 27	Av. Fucha	Av. NQS
<b>Av. Laureano Gómez</b>	Carrera 9	Av. San Juan Bosco	Av. NQS
<b>Av. Mariscal Sucre</b>	Carrera 24	Av. Boyacá	Av. Francisco Miranda
<b>Av. Mutis</b>	Calle 63	Av. Caracas	Av. Ciudad de Cali
<b>Av. Primero de Mayo</b>	Calle 22 Sur	Av. Fernando Mazuera	Av. Batallón Caldas
<b>Av. Rodrigo Lara Bonilla</b>	Calle 127	Av. Alberto Lleras	Av. Boyacá
<b>Av. San José</b>	Calle 170	Av. Alberto Lleras	Av. Ciudad de Cali
<b>Av. Villavicencio</b>	Calle 43 Sur	Av. Boyacá	Av. Ciudad de Cali

Fuente: Elaboración propia

## **7 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE TRANSPORTE PÚBLICO**

Con el fin de poder definir los corredores de la ciudad sobre los cuales es conveniente implementar un sistema metropolitano de transporte férreo tipo tranvía, es necesario determinar la cantidad de personas que están dispuestos a utilizar un sistema de transporte público, sin importar cual, sobre cada uno de los corredores maximizando su utilidad, ya sea considerando un costo económico, costo en tiempo o una combinación de ambos. Otro aspecto importante que surge de la estimación de la demanda, es que luego de conocer el número de pasajeros que un sistema va a transportar, es necesario planificar su operación además de poder predecir la viabilidad financiera del mismo. (Institute for Transportation Development Policy, 2010)

Suele pensarse que la decisión de construir un sistema de transporte de pasajeros debe tomarse solo por el espacio disponible en sección vial en los corredores que las ciudades determinan como principales o arteriales, sin embargo, el espacio solo es un indicador de la capacidad que tiene una infraestructura, más no de la demanda que esta pueda ser atendida.

Considerando que los sistemas de transporte público deben ser diseñados de tal forma que atiendan la demanda futura de forma razonable, esta debe ser proyectada a partir de una estimación base con la información existente o con aquella que sea necesaria recolectar para poder realizar dicha actividad.

Por estas razones, en esta sección se realizará la estimación de la demanda base de los corredores previamente seleccionados para poder determinar cuáles de ellos, según las condiciones de operación actuales, tienen la demanda suficiente para justificar la instalación de un sistema tipo tranvía sobre otro tipo de tecnologías.

### **7.1 Modelo de transporte público**

El modelo tradicional de transporte conocido como el modelo de las 4 etapas permite determinar, de acuerdo a las características socioeconómicas, además de otros factores, la cantidad de viajes que se generan en una zona de estudio, ZAT, y la cantidad de viajes que las mismas atraen; luego de conocer este dato representativo de cada zona, la segunda etapa del modelo permite determinar cómo se distribuyen los viajes a las demás zonas de

transporte en el área de estudio; conocidos los viajes de cada uno de los pares OD se determina sobre qué medios de transporte se realizan estos viajes para, finalmente, en el cuarto paso determinar las rutas o los arcos viales que utiliza cada modo para llegar de un origen a un destino optimizando alguna variable de impedancia, que en la mayoría de los casos corresponde al tiempo gastado en completar el viaje y al costo del mismo. En la figura se muestran los pasos a seguir para determinar la demanda del transporte partiendo de un modelo general de 4 etapas. (Molineró & Sánchez, 1998)

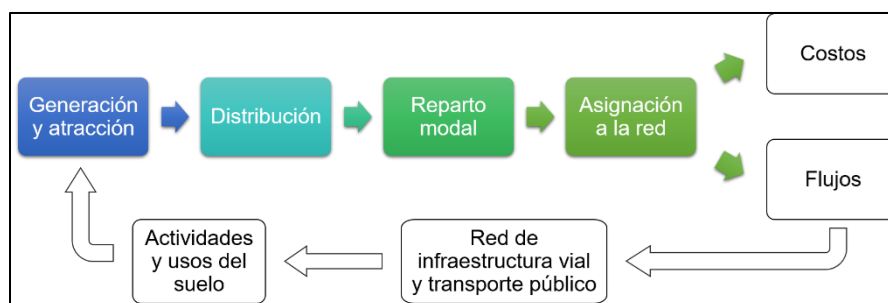


Figura 7-1. Estructura general del modelo de transporte.  
Fuente: Elaboración propia a partir de la Figura 6.8 del libro *Transporte Público*, Molineró & Sánchez

Para cumplir el objetivo de este estudio, y poder determinar los flujos correspondientes al transporte público en la ciudad de Bogotá, se utiliza como insumo principal la Encuesta de Movilidad del año 2015 y la matriz origen-destino específica para transporte público, uno de los productos entregados por dicha encuesta.

## 7.2 Encuesta de Movilidad 2015

Una encuesta de movilidad es uno de los instrumentos más comunes para obtener información inicial para construir un modelo de transporte general. En la ciudad de Bogotá se han realizado cuatro encuestas de movilidad en los años 1995, 2005, 2011 y 2015.<sup>2</sup> Este tipo de encuestas se realizan directamente en las viviendas pertenecientes a una muestra previamente determinada dentro de subdivisiones catastrales, para el caso de Bogotá, esta división mínima es a la que se le conoce como manzana. Las personas encuestadas son todas aquellas mayores de 5 años, a quienes se les indaga por los viajes realizados el día

<sup>2</sup> Durante el año 2019 se llevó a cabo la quinta encuesta de movilidad, sin embargo, ésta no se tuvo en cuenta para el desarrollo de este proyecto de investigación ya que al momento de surtir esta fase de la investigación, los resultados de dicha encuesta no se habían dado a conocer públicamente.

anterior al cual se realiza la encuesta, además de consignar otros datos como los correspondientes a la caracterización socioeconómica de la vivienda y de los hogares que en ella habitan, como el ingreso medio, la tenencia de vehículos, entre otras; teniendo en cuenta que según el DANE se entiende por hogar a aquel grupo de personas que comparten el mismo espacio para comer. (Ministerio de Transporte, 1998)

Para la EM15 no solamente se considera como ámbito de estudio a la ciudad de Bogotá, también incluye 17 municipios aledaños y que se encuentran en el área de influencia de la ciudad, los cuales son: Bojacá, Cajicá, Chía, La Calera, Facatativá, Funza, Gachancipá, Madrid, Mosquera, Sibaté, Soacha, Sopó, Tabio, Tenjo, Tocancipá y Zipaquirá.

La EM15 determinó tomar la información a una muestra mínima de aproximadamente 28.000 hogares distribuidos en cerca de 1000 ZATs, sin embargo, pese al tamaño de la muestra, solo se logró un cubrimiento del 90 %. Esta falta de información se debió principalmente, a la existencia de zonas sin urbanizar o que corresponden a terrenos baldíos, o de uso institucional, industrial o de equipamientos de carácter local o metropolitano. Estas zonas que no fueron incluidas en la EM15 se aprecian en la Figura 7-2:

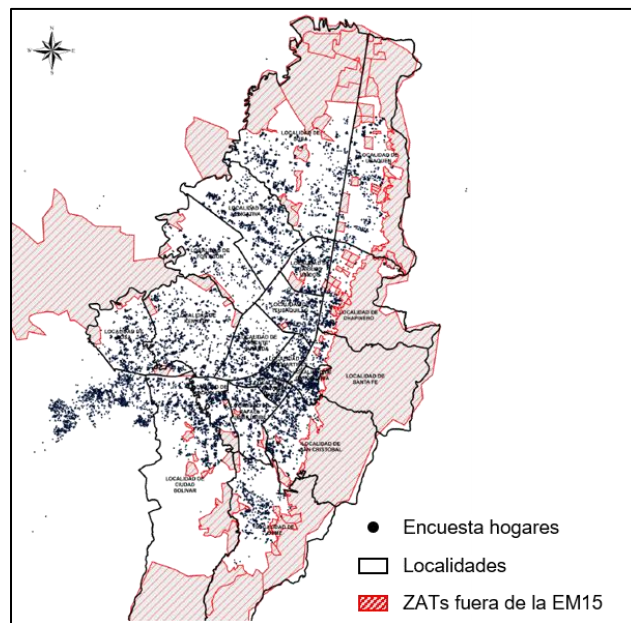


Figura 7-2. Distribución de muestra EODH Vs ZATs.  
Fuente: Encuesta de Movilidad 2015, tomo III, mapa 1.

### 7.2.1 Expansión de viajes

Para definir el número de viajes que se generan desde cada una de las ZATs hacia igual número de destinos, la EM15 emplea el método de factores de expansión (1) que consiste en determinar el número de viajes que representa cada una de las personas encuestadas en función de las características de manzana y la correspondiente localidad en la cual se realizó dicha encuesta:

$$F_{expansión_{general}} = F_{hogar_{vivienda}} * F_{vivienda_{manzana}} * F_{manzana_{localidad}} \quad (1)$$

Donde:  $F_{expansión_{general}}$ : Factor que expande los viajes de cada encuesta realizada según las características del hogar, la manzana y la localidad.

$F_{hogar_{vivienda}}$ : Número de hogares que conforman una vivienda.

$F_{vivienda_{manzana}}$ : Relación del número total de viviendas que conforman una manzana y el número de viviendas a las cuales se les realizó la encuesta en la manzana.

$F_{manzana_{localidad}}$ : Relación del número total de manzanas que conforman una localidad y el número de manzanas en las cuales se realizó la encuesta en la localidad.

Este proceso de expansión puede ser aceptable dada la cantidad de datos obtenidos en la encuesta, sin embargo, es necesario realizar ajustes a los valores ya expandidos teniendo en cuenta la consistencia con los datos socioeconómicos y de movilidad de la ciudad en general.

Un elemento particular a tener en cuenta, es que, en la definición de los viajes en el sistema TransMilenio, se tiene un comparativo fiable y más certero que en otros modos de transporte, ya que esta empresa prestadora del servicio cuenta con los datos de ingresos al sistema para cada una de sus troncales. La EM15, al realizar la expansión de los viajes hechos en TransMilenio, encontró un total de 1 903 573

viajes diarios hechos en este medio, sin embargo la empresa TransMilenio reportó 2 289 978, existiendo una diferencia cercana a los 380 000 viajes.

Esta diferencia es explicada por varios elementos que no son tenidos en cuenta en la realización de la encuesta como lo son:

- Habitantes de las zonas rurales de los 17 municipios aledaños que no se incluyen en la encuesta.
- Habitantes de otras zonas del país que llegan al aeropuerto o a las terminales terrestres de autobuses y que pueden tener una estancia de varios días, agregando viajes a la zona metropolitana.
- Nuevos desarrollos urbanos no considerados en el marco muestral del DANE.
- Sub reportes de viajes no cotidianos o viajes no obligados.
- Desfase entre la proyección de población y la población real (sobre todo en censos antiguos)

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la EM15 determinó un factor de ajuste adicional para los viajes realizados en TransMilenio de 1,203 con el fin de poder considerar en la matriz OD particular para transporte público aquellos viajes que de otra forma no quedaron reportados en la EODH.

### **7.2.2 Construcción de matrices OD**

Finalmente, basados en la información suministrada por las encuestas, y luego de aplicar los correspondientes factores de expansión a cada uno de los encuestados, TransConsult, la empresa consultora encargada de llevar a cabo el estudio, construyó las diferentes matrices OD para viajes diarios de día hábil y no hábil; desagregadas por propósito para cada uno de los diferentes medios de transporte: bicicleta, vehículo particular, motocicleta, transporte público colectivo y transporte público individual.



Debe considerarse que para la construcción de estas matrices, la EM15 solo tuvo en cuenta los datos obtenidos en los hogares y no los de las encuestas de intercepción en corredores de transporte EODI ya que estas últimas no tienen control estadístico del origen o el destino sobre el cual se está realizando el viaje encuestado, por lo que se puede correr el riesgo de contar viajes dobles para algunas ZATs y permanecer sin información para otras distintas.

Dado que, el objeto de este documento es realizar un estudio al nivel de prefectibilidad, se acepta el uso de estas matrices para determinar la demanda de los corredores de transporte público, entendiendo que el detalle del análisis se limita al área metropolitana de la ciudad de Bogotá y que no se espera encontrar el detalle particular para cada uno de los arcos que conforman la red de transporte de la ciudad. Para esos casos es necesario realizar completo un modelo de 4 etapas desde la generación-atracción, junto con la distribución, usualmente bajo el modelo gravitacional, para así poder realizar a detalles proyectos viales a una escala inferior.

Con el fin de llevar a cabo el presente estudio, se decidió utilizar como insumo principal la matriz OD generada por la EM15 discriminada por hora pico y por medio de viaje, en este caso, transporte público colectivo. (TransConsult, 2015)

En la Figura 7-3 se puede apreciar las ZAT que más viajes atraen viajes durante el día. Resulta evidente que el corredor oriental, entre calle 72 y Av. Primero de Mayo, es el que tiene la mayor concentración de viajes atraídos.

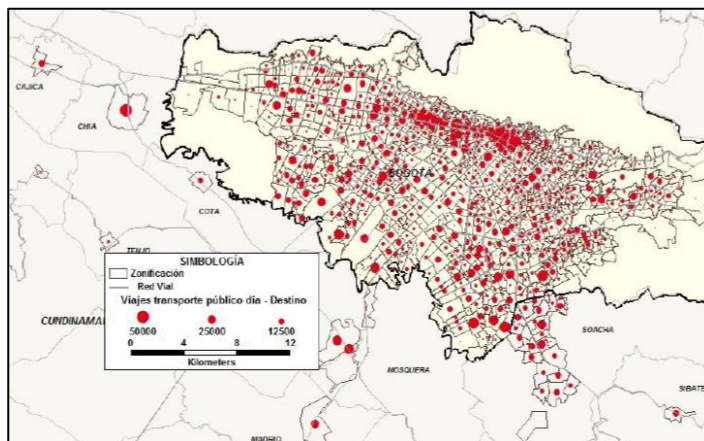


Figura 7-3. Densidad de atracción de viajes en transporte público colectivo.  
Fuente: Encuesta de Movilidad 2015, tomo V, mapa 12.

### 7.3 Líneas de deseo

Una de las formas de interpretar la matriz OD de transporte público es construyendo de forma esquemática las líneas de deseo, de esta forma es posible conocer los puntos de origen y destino que, en teoría, la mayoría de los viajes conectan y que se espera los usuarios sigan con cierta lógica reduciendo principalmente los tiempos de recorrido. (Molineró & Sánchez, 1998)

En la Figura 7-4 se observan las líneas de deseo generadas con la matriz OD resultado de la EM15. Allí se puede apreciar que estas líneas de deseo conectan principalmente las ZATs de los bordes oriental y occidental, junto con otra proporción de viajes, en menor intensidad que cruzan la ciudad de sur a norte. Geográficamente, la zona suroccidental de la ciudad en su mayoría espera conectar viajes con el centro ampliado de la ciudad y con el norte de la misma, así como también la zona noroccidental busca generar conexiones con el mismo centro ampliado al oriente de la ciudad.

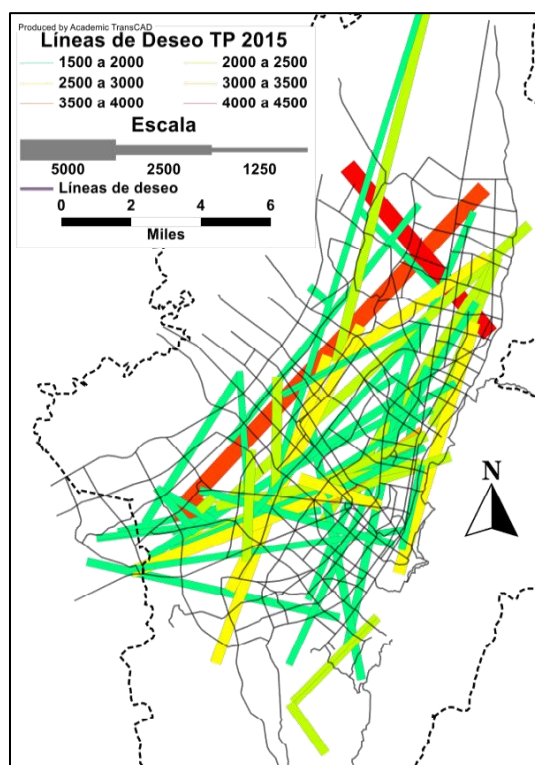


Figura 7-4. Líneas de deseo del transporte público para el año 2015.  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Encuesta de Movilidad 2015

## **7.4 Asignación de viajes**

Con el fin de determinar la demanda de cada uno de los corredores, es necesario, a partir de la información de la EM15, generar un modelo de asignación a la red de transporte público de la ciudad para así poder indicar los volúmenes de pasajeros que cada uno de los corredores debería estar en capacidad de soportar y así, finalmente, seleccionar los corredores que se puedan considerar aptos para implementar un sistema tipo tranvía que tenga la capacidad suficiente para atender una demanda proyectada al año 2040.

Para realizar la asignación de viajes se utiliza la herramienta TransCAD 7.0 con licencia académica y soporte de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

### **7.4.1 Red de análisis**

Para efectos de este trabajo, se toma la red de transporte público categorizada en el POT y en el Plan Maestro de Movilidad como de alta y mediana capacidad según lo expuesto en el Capítulo 6.1. Considerando que ambos documentos plantean corredores que para el año 2015 aún no se encontraban construidos es necesario incluirlos teniendo la precaución de asignarle parámetros que se ajusten a la realidad, es decir, que limiten la asignación de viajes a estos arcos.

Partiendo de una red básica de los corredores principales de la ciudad, de acceso público, se modifican los parámetros de la misma de tal forma que la evaluación solo tenga en consideración aquellos referentes al transporte público de la ciudad como se observa en la Tabla 7-1.

Para el parámetro de la velocidad se utilizan los datos estadísticos que suministra TransMilenio de forma bimensual. Con el fin de reducir la impedancia en los arcos con sistema troncal se asigna una velocidad promedio de 27,9 KPH a los arcos en los cuales, para el año 2015, contaban con troncales de TransMilenio. Para los demás arcos que componen la red se asigna un valor de 17 KPH, velocidad promedio con la que ruedan por las vías los buses del SITP, incluyendo las rutas alimentadoras.

Con el fin de tener un tiempo artificialmente alto en los conectores desde los centroides de las ZATs hasta los nodos de la red, a estos arcos particulares se les asigna por defecto una velocidad de 200 KPH.

Tabla 7-1. Parámetros de la red base de análisis y sus nodos para el año 2015.

Arcos Red Base 2015 Bogotá	
Parámetro	Descripción
ID	Número identificador de cada arco en el total de arcos de la red.
Length	Longitud del arco entre nodos en metros
V_PÚBLICO	Velocidad promedio del transporte público. 27,9 KPH para arcos con corredor troncal 17,0 KPH para arcos sin corredor troncal 200,0 KPH para arcos conectores centroide-nodo
T_PÚBLICO	Tiempo de recorrido en transporte público para cada arco, en minutos. Calculado así: $[Length]/([V\_PÚBLICO]*(1000/60))$
C_PÚBLICO	Capacidad del transporte público, en pasajeros/h/sentido 45 000 para arcos con corredor troncal 20 000 para arcos sin corredor troncal
Nodos Red Base 2015 Bogotá	
Parámetro	Descripción
ID	Número identificador de cada nodo en el total de nodos de la red.
ID_CENTROIDE	Número identificador de cada ZAT en el total de ZATs del área de estudio asociado a un único nodo de la red.

Fuente: Elaboración propia.

#### 7.4.2 Asignación base para el año 2015

Con el propósito de escoger el método más apropiado de asignación de viajes a la red y, teniendo como insumos la matriz OD para transporte público en hora pico del año 2015, la red antes descrita y además, los pasajeros reportados para cada una de sus troncales por el sistema TransMilenio, utilizando la herramienta TransCAD 7.0 se realizan cuatro modelos de asignación diferentes cuyos resultados son comparados con los volúmenes reportados por TransMilenio para determinar cuál de los métodos genera menos diferencia con los realmente encontrado en campo.

Los modelos de asignación utilizados por TransCAD, a excepción de los llamados «todo o nada» e «incremental» generan procesos iterativos que afectan

los tiempos de viaje en cada uno de los arcos de la red en función de la capacidad del mismo, del volumen asignado en cada iteración y del tiempo inicial considerado como el tiempo a flujo libre. El propósito de esta afectación es considerar los efectos de la congestión vial en cada arco. A pesar de realizar la asignación en sistemas de transporte público, los existentes en la ciudad se ven afectados igualmente por congestión de los mismos vehículos que operan el sistema, por lo tanto, se tiene en cuenta en el modelo «estocástico» y de «sistema óptimo».

La función de demora debida al volumen más utilizada es la BPR (por las siglas en inglés del *Bureau of Public Roads*),<sup>3</sup> la cual relaciona los tiempos de viaje con la relación entre el volumen asignado al arco y la capacidad del mismo, así:

$$T_{fi} = t_0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{x_i}{C} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

Donde:  $T_{fi}$ : Tiempo de viaje asignado al arco después en la iteración  $i$ .

$t_0$ : Tiempo de viaje a flujo libre del arco.

$x_i$ : Volumen de pasajeros asignado al arco en la iteración  $i$ .

$C$ : Capacidad del arco.

$\alpha$ : Constante.

$\beta$ : Constante.

Históricamente los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  han sido establecidos en 0,15 y 4,0 respectivamente.(Caliper Corporation, 2015)

El detalle de los cuatro modelos elaborados para la asignación base se encuentran en el Anexo 1.

---

<sup>3</sup> Ahora *Federal Highway Administration* o FHWA.

### 7.4.2.1 Todo o nada

En este método, todo el flujo de pasajeros entre un punto de origen y un punto de destino es asignado a la ruta más corta o con menor impedancia. En este caso es asignado a la ruta que presente el menor tiempo posible entre pares OD. Este método tiene la limitación que no es realista ya que entre pares OD es posible utilizar diversas rutas con impedancia relativamente similares, sin embargo es un método sencillo que permite realizar un análisis rápido de la red. También se debe considerar que este método no considera la capacidad de cada uno de los arcos que conforman la red, por lo tanto el valor de impedancia no varía dependiendo de la congestión del link. Suele ser más recomendado para la asignación en redes de transporte intermunicipal.

Utilizando este método y comparando la asignación con los reportes de TransMilenio se obtiene una diferencia promedio de más de 40 mil viajes por tramo como se observa en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2. Asignación «todo o nada» Vs. volúmenes TransMilenio año 2015.

Corredor Troncal	Volumen tramo más cargado Todo o nada	Volumen TransMilenio 2015	Diferencia de viajes
Av. Alberto Lleras	723	20 000	19 277
Av. Caracas	122 327	42 000	80 327
Av. Ciudad de Cali	17 686	37 000	19 314
Av. Comuneros	30 228	26 000	4 228
Av. de las Américas	41 509	37 000	4 509
Av. Eldorado	97 040	32 000	65 040
Av. Fernando Mazuera	83 004	14 000	69 004
Av. Jiménez	49 773	21 000	28 773
Av. Medellín	49 773	24 000	25 773
Av. NQS	155 008	42 000	113 008
Av. Paseo de los Libertadores	132 304	45 000	87 304
Av. Suba	61 908	24 000	37 908
Av. Villavicencio	26 925	21 000	5 925
Carrera 3	18 520	22 000	3 480
		<b>Promedio</b>	<b>40 276</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 7.4.2.2 Incremental

En este método se asignan a la red porciones de la matriz OD paso a paso. En cada uno de los pasos, la fracción de los viajes totales que componen la matriz es asignada utilizando el método todo o nada antes descrito. Al finalizar la asignación en cada uno de los pasos el tiempo de viaje es recalculado basado en los volúmenes de cada uno de los arcos. Para el presente estudio se utilizó una asignación incremental de cuatro pasos con fracciones de la matriz OD de 40 %, 30 %, 20 % y 10 %, respectivamente.

De la misma manera que con el método anterior, al comparar la asignación con los reportes de TransMilenio se obtiene una diferencia promedio de alrededor de 27 mil viajes por tramo como se observa en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3. Asignación «incremental» Vs. volúmenes TransMilenio año 2015.

Corredor Troncal	Volumen tramo más cargado Incremental	Volumen TransMilenio 2015	Diferencia de viajes
Av. Alberto Lleras	20 785	20 000	785
Av. Caracas	96 910	42 000	54 910
Av. Ciudad de Cali	26 272	37 000	10 728
Av. Comuneros	27 035	26 000	1 035
Av. de las Américas	43 067	37 000	6 067
Av. Eldorado	81 444	32 000	49 444
Av. Fernando Mazuera	80 582	14 000	66 582
Av. Jiménez	51 904	21 000	30 904
Av. Medellín	51 904	24 000	27 904
Av. NQS	84 194	42 000	42 194
Av. Paseo de los Libertadores	85 116	45 000	40 116
Av. Suba	61 142	24 000	37 142
Av. Villavicencio	40 072	21 000	19 072
Carrera 3	18 520	22 000	3 480
		<b>Promedio</b>	<b>27 883</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 7.4.2.3 Estocástico

A diferencia del método todo o nada, el método estocástico distribuye los viajes en diversas alternativas de recorrido entre los diferentes pares OD.

Estos viajes son asignados de forma proporcional a la probabilidad de elección de cada una de las rutas calculadas mediante un modelo *logit* de elección de ruta. En términos generales, entre menor sea el tiempo de viaje de una ruta, en comparación con los tiempos de viaje de las demás rutas, mayor será su probabilidad de elección. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que este método no asigna viajes a todas las rutas alternativas, ya que tiene en cuenta solamente aquellas que considera «razonables», es decir, las rutas que no alejan al viajero de su origen o de su destino. Este método utiliza como valor de impedancia el tiempo de viaje que resulta ser fijo, razón por la cual no depende del volumen del enlace, por lo tanto no es un método de equilibrio.

En este caso, la comparación con los reportes de TransMilenio se evidencia una diferencia promedio de cerca de 20 mil viajes por tramo como se observa en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4. Asignación «estocástica» Vs. volúmenes TransMilenio año 2015.

Corredor Troncal	Volumen tramo más cargado Estocástico	Volumen TransMilenio 2015	Diferencia de viajes
Av. Alberto Lleras	42 904	20 000	22 904
Av. Caracas	73 373	42 000	31 373
Av. Ciudad de Cali	36 901	37 000	99
Av. Comuneros	22 586	26 000	3 414
Av. de las Américas	43 998	37 000	6 998
Av. Eldorado	54 757	32 000	22 757
Av. Fernando Mazuera	71 721	14 000	57 721
Av. Jiménez	41 000	21 000	20 000
Av. Medellín	41 000	24 000	17 000
Av. NQS	74 872	42 000	32 872
Av. Paseo de los Libertadores	69 213	45 000	24 213
Av. Suba	52 643	34 000	18 643
Av. Villavicencio	36 083	21 000	15 083
Carrera 3	18 521	22 000	3 479
		<b>Promedio</b>	<b>19 754</b>

Fuente: Elaboración propia.



#### 7.4.2.4 Sistema óptimo

La asignación óptima del sistema busca minimizar el tiempo total de viaje de toda la red. Debe considerarse que bajo la concepción de este método, ningún usuario puede cambiar de ruta sin aumentar el tiempo total de viaje en el sistema aunque puede ser posible que disminuya sus propios tiempos de viaje. En este modelo se puede considerar que el costo total del sistema se minimiza cuando se le dice a los viajeros qué ruta tomar específicamente. Considerando las pocas posibilidades de elección de ruta que tiene un pasajero de transporte público, este método es aceptable para determinar la demanda de sistemas de transporte público.

Finalmente, para la asignación hecha utilizando el modelo de optimización del sistema, como se aprecia en la Tabla 7-5, se presentan diferencias promedios de apenas 12 mil viajes respecto a los reportados por el sistema TransMilenio en el año 2015.

Tabla 7-5. Asignación «sistema óptimo» Vs. volúmenes TransMilenio año 2015.

Corredor Troncal	Volumen tramo más cargado Sistema Óptimo	Volumen TransMilenio 2015	Diferencia de viajes
Av. Alberto Lleras	38 791	20 000	18 791
Av. Caracas	53 114	42 000	11 114
Av. Ciudad de Cali	36 469	37 000	531
Av. Comuneros	24 353	26 000	1 647
Av. de las Américas	42 684	37 000	5 684
Av. Eldorado	43 156	32 000	11 156
Av. Fernando Mazuera	57 519	14 000	43 519
Av. Jiménez	34 595	21 000	13 595
Av. Medellín	34 595	24 000	10 595
Av. NQS	53 858	42 000	11 858
Av. Paseo de los Libertadores	57 829	45 000	12 829
Av. Suba	45 549	34 000	11 549
Av. Villavicencio	35 363	21 000	14 363
Carrera 3	18 898	22 000	3 102
		<b>Promedio</b>	<b>12 167</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 7.4.3 Elección del modelo

Con el fin de poder evaluar un escenario futuro partiendo de las condiciones de los volúmenes de pasajeros reportadas para el sistema TransMilenio en el año 2015, y ante la imposibilidad de generar una calibración del modelo de asignación, se toma la decisión de elegir el uso del método de optimización del sistema, considerando que éste presenta variaciones en menor proporción a los demás métodos probados.

Tabla 7-6. Resumen comparativo de los modelos de asignación.

Corredor Troncal	Volumen tramo más cargado por modelo				Volumen TransMilenio 2015	Diferencia de viajes por modelo			
	Todo o Nada	Incremental	Estocástico	Sistema Óptimo		Todo o Nada	Incremental	Estocástico	Sistema Óptimo
Av. Alberto Lleras	723	20785	42904	38791	20000	19277	785	22904	18791
Av. Caracas	122327	96910	73373	53114	42000	80327	54910	31373	11114
Av. Ciudad de Cali	17686	26272	36901	36469	37000	19314	10728	99	531
Av. Comuneros	30228	27035	22586	24353	26000	4228	1035	3414	1647
Av. de las Américas	41509	43067	43998	42684	37000	4509	6067	6998	5684
Av. Eldorado	97040	81444	54757	43156	32000	65040	49444	22757	11156
Av. F. Mazuera	83004	80582	71721	57519	14000	69004	66582	57721	43519
Av. Jiménez	49773	51904	41000	34595	21000	28773	30904	20000	13595
Av. Medellín	49773	51904	41000	34595	24000	25773	27904	17000	10595
Av. NQS	155008	84194	74872	53858	42000	113008	42194	32872	11858
Av. P. Libertadores	132304	85116	69213	57829	45000	87304	40116	24213	12829
Av. Suba	61908	61142	52643	45549	34000	27908	27142	18643	11549
Av. Villavicencio	26925	40072	36083	35363	21000	5925	19072	15083	14363
Carrera 3	18520	18520	18521	18898	22000	3480	3480	3479	3102
					<b>Prom.</b>	<b>39562</b>	<b>27169</b>	<b>19754</b>	<b>12167</b>

Fuente: Elaboración propia.

Es necesario destacar que los cuatro modelos analizados presentan grandes diferencias respecto a los volúmenes reportados por el sistema TransMilenio para el corredor de la Av. Fernando Mazuera (Carrera Décima). Esto se debe en parte a que para el año 2015 ésta troncal contaba con apenas tres años de funcionamiento, razón por la cual aún no se encontraba funcionando a total capacidad. Además,

también se debe resaltar el hecho que las rutas planificadas para este corredor dependen en gran parte de la construcción de la troncal de la Av. Alberto Lleras (Carrera Séptima) por lo cual no se han puesto en funcionamiento aún rutas destinadas a utilizar este corredor, este es un hecho que los modelos no pueden poner en consideración.

En la Figura 7-5 se presenta el mapa de la asignación realizada para el año 2015 utilizando el método elegido junto con la matriz OD de la EM15. En él se puede evidenciar que los corredores que resultan encontrarse más cargados son los de la Av. Caracas, Av. NQS y Av. Paseo de los Libertadores, tal cual se evidencia en los resultados de la encuesta de movilidad. Los demás corredores troncales también presentan mayores volúmenes de pasajeros respecto a los arcos en los que aún no se considera ningún sistema de transporte público.

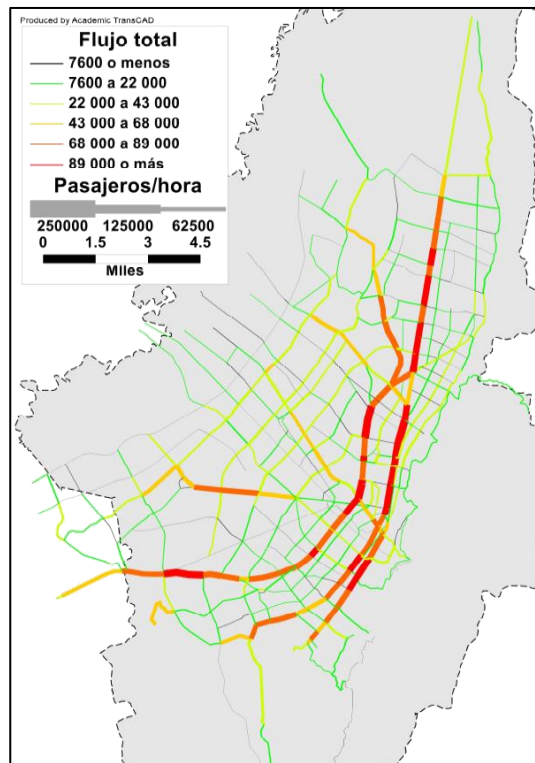


Figura 7-5. Asignación por el método del «sistema óptimo» para el año 2015.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 7.4.4 Proyección de volúmenes

Conocido el escenario base, que para el caso corresponde al año 2015, es necesario realizar una evaluación de la demanda para un año futuro, el cual tenga en consideración el aumento en el número de viajes que se realizan en transporte público en la ciudad y así, realizar una nueva asignación de viajes con la matriz de transporte público expandida para poder determinar la cantidad de personas que demandan de sistema de transporte público en los demás corredores de la ciudad diferentes a los que ya cuentan con servicio de transporte masivo.

Para realizar la expansión de esta matriz OD se tuvo en cuenta el crecimiento normal de abordajes, tanto para TransMilenio como para el transporte colectivo SITP reportado por la entidad para cada año en los que han estado en funcionamiento. Utilizando distintos tipos de regresiones, se seleccionó aquella que genere coeficiente de correlación cercano a la unidad, en ambos casos resulta ser una función potencial como se muestra en las figuras Figura 7-6 y Figura 7-7:

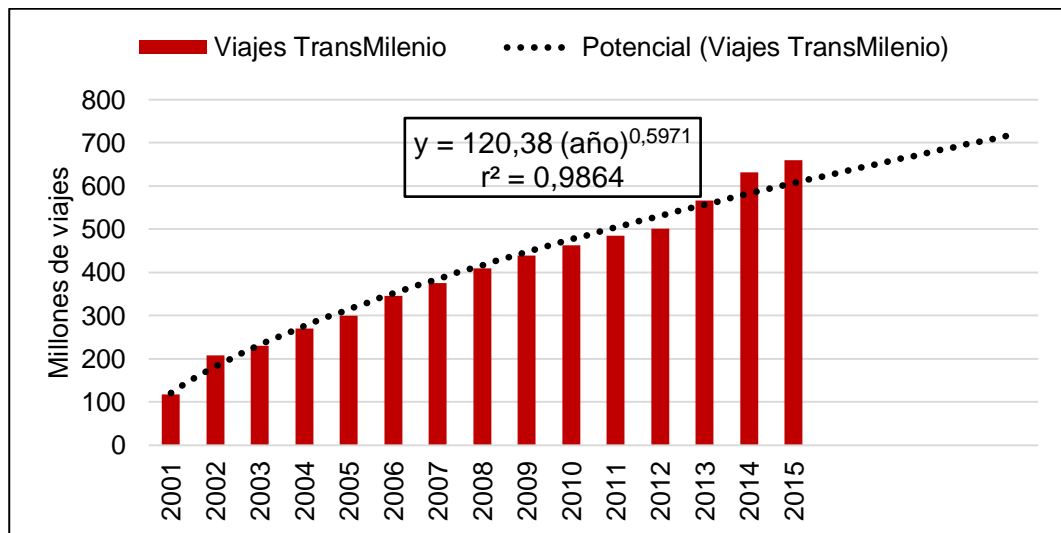


Figura 7-6. Proyección potencial de viajes en TransMilenio.  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos publicados por TransMilenio S.A.

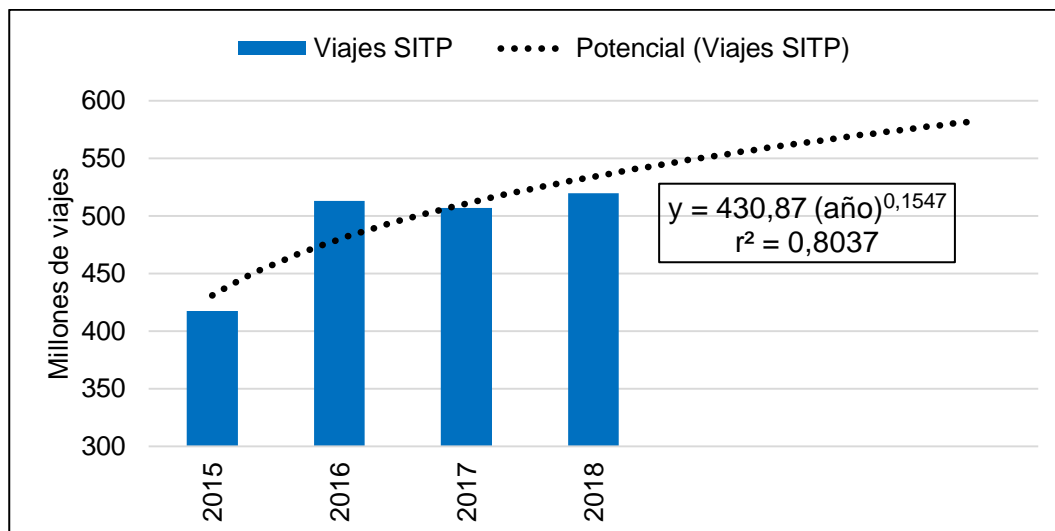


Figura 7-7. Proyección potencial de viajes en SITP.  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos publicados por TransMilenio S.A.

Se utilizan estas proyecciones con el fin de determinar el aumento esperado para el año 2040. Es preciso aclarar que no se tiene en cuenta el crecimiento poblacional, ya que las características de quienes utilizan transporte público son menos variables, por lo tanto se consideró acertado basar el crecimiento de estos viajes directamente con el que actualmente desarrolla el transporte público, incluyendo los que se encontraban en funcionamiento para el año 2015, TransMilenio y SITP.

$$FP = 1 + \left( \frac{TC_{2040} - TC_{2018}}{TC_{2018}} \right) \quad (3)$$

Donde: *FP*: Factor de proyección.

$TC_{2040}$ : Volumen del transporte colectivo proyectado al año 2040.

$TC_{2018}$ : Volumen del transporte colectivo en el año 2015.

En la Tabla 7-7 se presenta el factor de proyección utilizado para determinar los volúmenes de transporte público al año 2040:

Tabla 7-7. Cálculo del factor de proyección de pasajeros al año 2040.

Año	Volumen SITP [Millones]	Volumen TransMilenio [Millones]	Volumen Transporte Colectivo [Millones]	FP
2018	640,0	519,4	1159,4	1,51
2040	1040,0	708,0	1748,0	

Fuente: Elaboración propia.

Conocido el factor de proyección, todos los flujos entre pares OD de la matriz de transporte colectivo generada a partir de la EM15 son afectados en igual proporción para construir así una nueva matriz OD estimada para el año 2040.

#### 7.4.5 Asignación preliminar para el año 2040

Conocida la matriz OD de pasajeros, se procede a determinar la demanda de los corredores de mediana y alta capacidad realizando una asignación sobre la red base del año 2015. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 7-8.

En esta red preliminar para el año 2040 se restringe la capacidad de los corredores troncales de TransMilenio, así como la de los corredores por donde pasará la PLMB y el Regiotram, asumiendo que para el año 2040 ya se encontrarán en pleno funcionamiento. De la misma manera, se asumen las velocidades para estos nuevos sistemas de transporte basado en los reportes de los pliegos de licitación de los respectivos proyectos.

Para aquellos arcos en los que existirán doble sistema de transporte, es decir, Metro y TransMilenio, tanto los parámetros de velocidad y capacidad se calculan sumando los valores determinados para aquellos arcos con solo uno de esos sistemas, esto permitirá que el modelo de asignación encuentre estos corredores con menos impedancia por tiempo y capacidad, lo que conlleva a que cargue aún más estos arcos de la red.

Finalmente, a los corredores que actualmente no cuentan con sistema de transporte masivo, se les asigna una capacidad artificialmente alta con el fin de, mediante el modelo de asignación, determinar la demanda de los mismos y, encontrar así, aquellos corredores que para el año 2040 ya deban contar con un sistema de transporte de alta capacidad.

Tabla 7-8. Parámetros de la red base de análisis y sus nodos para el año 2040.

Arcos Red Base 2040 Bogotá	
Parámetro	Descripción
ID	Número identificador de cada arco en el total de arcos de la red.
Length	Longitud del arco entre nodos en metros
V_PÚBLICO	Velocidad promedio del transporte público. 43,0 KPH para arcos con línea de metro. 35,0 KPH para arcos con línea de metro y corredor troncal. 27,9 KPH para arcos con Regiotram. 27,9 KPH para arcos con corredor troncal. 17,0 KPH para arcos sin corredor troncal. 200,0 KPH para arcos conectores centroide-nodo
T_PÚBLICO	Tiempo de recorrido en transporte público para cada arco, en minutos. Calculado así: $[Length]/([V\_PÚBLICO]*(1000/60))$
C_PÚBLICO	Capacidad del transporte público, en pasajeros/h/sentido 120 000 para arcos con línea de metro y corredor troncal. 72 000 para arcos con línea de metro. 45 000 para arcos con corredor troncal. 15 000 para arcos con Regiotram. 200 000 para los demás arcos.
Nodos Red Base 2040 Bogotá	
Parámetro	Descripción
ID	Número identificador de cada nodo en el total de nodos de la red.
ID_CENTROIDE	Número identificador de cada ZAT en el total de ZATs del área de estudio asociado a un único nodo de la red.

Fuente: Elaboración propia.

#### 7.4.5.1 Volumen proyectado asignado a la red del 2015 ajustada

En una primera etapa se genera la asignación de viajes con la matriz del año 2040 con el objetivo de incorporar los sistemas Metro y Regiotram para evidenciar la afectación que estos tienen en la asignación de los viajes en transporte público, sin incluir otros corredores de alta capacidad.

En la Figura 7-8 se presenta el mapa con el modelo de asignación descrito, en este caso se evidencia el efecto de la PLMB sobre el corredor de la Av. Primero de Mayo y la Av. Caracas, sobre los cuales aumenta el flujo de pasajeros dada una impedancia reducida y una capacidad aumentada.

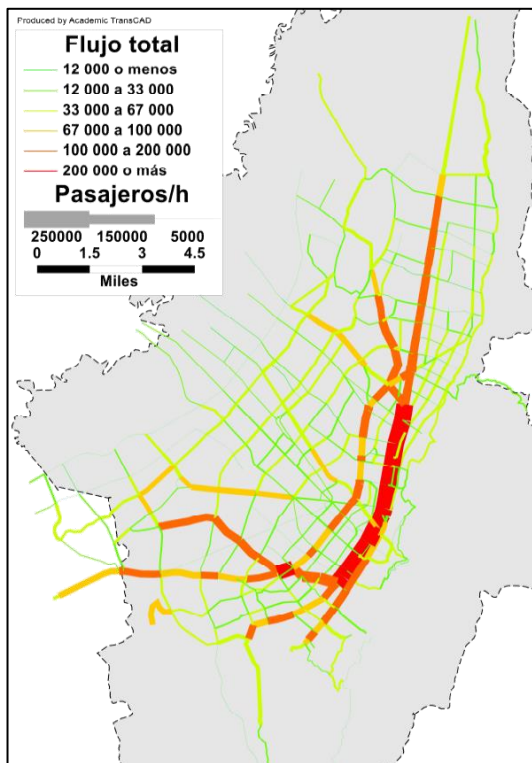


Figura 7-8. Asignación base para el año 2040.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7-9 se presenta la demanda de los corredores seleccionados previamente, y que se encuentran en la Tabla 6-5, que resultan de ésta asignación preliminar. En ella se puede apreciar que existen cinco corredores, en su orden, Av. Ciudad de Cali, Av. Villavicencio, Av. Congreso Eucarístico, Av. Laureano Gómez y Av. Boyacá; sobre los cuales la demanda de transporte público supera los 30 000 pasajeros/h/sentido, razón por la cual se asume que estos corredores deben contar en el año de proyecto con tecnologías de alta capacidad que atiendan dichas cargas.

Además, también se asume que vías presentes en el POT de la ciudad de Bogotá y en el Plan Maestro de Movilidad que actualmente no se encuentran construidas, lo estarán en el año 2040, como lo son, por ejemplo, la Av. Ferrocarril del Sur y la ALO. Por estas razones, se vuelve a realizar la asignación a la red completa para poder determinar realmente la demanda de transporte público bajo estas nuevas condiciones en el año de proyecto.



En esta nueva asignación se utilizan nuevamente los parámetros descritos en la Tabla 7-8.

Tabla 7-9. Demanda en los tramos más cargados de los corredores, base 2040.

Corredor	Demanda de pasajeros en el tramo más cargado
Av. Ciudad de Cali	51 003
Av. Villavicencio	48 900
Av. Congreso Eucarístico	48 314
Av. Laureano Gómez	38 322
Av. Boyacá	33 786
Av. Batallón Caldas	30 499
Av. Colombia	28 161
Av. Comuneros	28 161
Av. Mariscal Sucre	26 319
Av. Rodrigo Lara Bonilla	25 511
Av. Centenario	24 634
Av. General Santander	24 088
Av. Mutis	20 329
Av. San José	19 365
ALO	19 354
Av. Primero de Mayo	17 687
Av. Chile	16 635
Av. Ferrocarril del Sur	0

Fuente: Elaboración propia.

#### 7.4.5.1 Volumen proyectado asignado a la red del 2040

Establecida la nueva red para la ciudad de Bogotá, se procede a realizar la asignación, nuevamente utilizando el método de optimización del sistema, considerando los nuevos corredores de alta capacidad antes mencionados.

En la Figura 7-9 se presenta el mapa con los corredores que se asumen contarán con sistema de transporte masivo de alta capacidad derivados de la asignación. Los volúmenes de transporte público de los demás corredores, sobre los cuales aún se cuenta con capacidad artificialmente alta se distribuye debido a los cambios hechos en la red, por

lo tanto, es de esperar que la demanda de los mismos haya cambiado también.

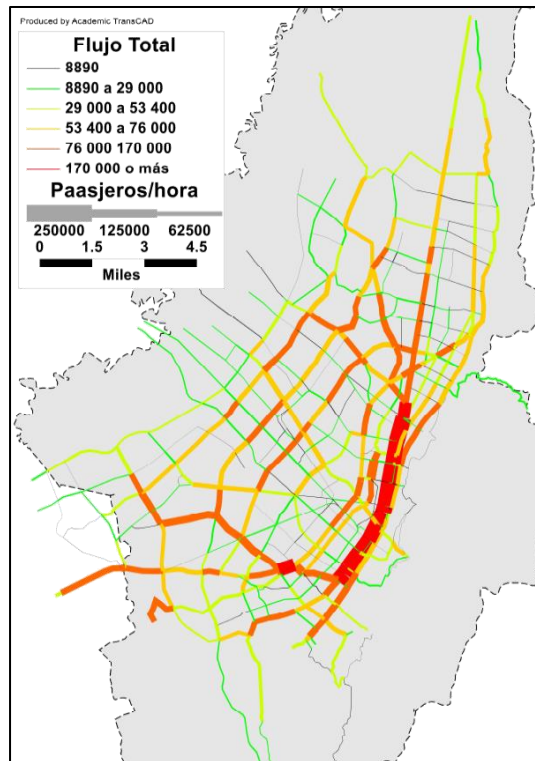


Figura 7-9. Asignación preliminar para el año 2040.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7-10 se presenta la nueva demanda de las vías que aún no habían sido consideradas como de alta capacidad. Se puede apreciar que, al disminuir asignarle una capacidad específica a aquellos que se reconsideraron como de alta capacidad, la demanda se distribuyó en los corredores que hasta el momento habían sido considerados de mediana capacidad. Teniendo en cuenta que estos tampoco pueden ser atendidos por un sistema tranvía, resulta necesario realizar una última asignación, descartando los corredores de las Avenidas General Santander, ALO, Primero de Mayo, San José y Batallón Caldas como corredores de mediana capacidad.

Tabla 7-10. Demanda en los tramos más cargados de los corredores, preliminar 2040.

Corredor	Demanda de pasajeros en el tramo más cargado
Av. General Santander	59 920
ALO	40 813
Av. Primero de Mayo	29 117
Av. San José	23 982
Av. Batallón Caldas	23 097
Av. Mariscal Sucre	19 755
Av. Rodrigo Lara Bonilla	17 650
Av. Ferrocarril del Sur	17 607
Av. Centenario	17 511
Av. Chile	17 082
Av. Mutis	16 625

Fuente: Elaboración propia.

#### 7.4.6 Asignación final para el año 2040

Finalmente, se debe verificar, que luego de establecer los últimos corredor con tecnologías de alta capacidad, los restantes tengan la demanda suficiente para ser atendidos por sistemas de transporte de tipo tranvía, para lo cual se debe realizar nuevamente la asignación de viajes con la red definitiva de la ciudad para el año 2040 manteniendo los parámetros expuestos en la Tabla 7-8.

La Figura 7-10 presenta los volúmenes de transporte público asignados para cada uno de los corredores de alta capacidad y permite diferenciar aquellos, considerados de mediana capacidad, sobre los cuales resultaría factible implementar sistemas de transporte de tipo tranvía. A su vez, permite identificar la proporción de dicho volumen demandado respecto a los volúmenes con los cuales estarían trabajando los corredores de alta capacidad.

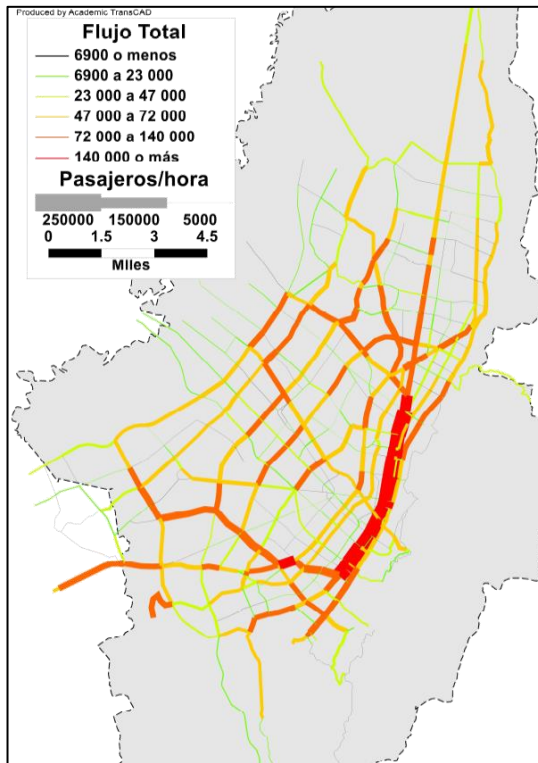


Figura 7-10. Asignación definitiva para el año 2040  
Fuente: Elaboración propia.

Como se resalta en la Tabla 7-11, con esta última asignación, solo resulta necesario descartar un corredor adicional, el de la Av. Centenario, ya que la demanda excede los límites para un sistema de mediana capacidad. Por lo tanto, los corredores que se consideran factibles dada la demanda de transporte con la que cuentan son los de las Avenidas Mutis, Rodrigo Lara Bonilla, Mariscal Sucre, Chile y Ferrocarril del Sur.

Tabla 7-11. Demanda en los tramos más cargados de los corredores, final 2040.

Corredor	Demanda de pasajeros en el tramo más cargado
Av. Centenario	29 578
Av. Mutis	18 974
Av. Rodrigo Lara Bonilla	17 306
Av. Mariscal Sucre	17 281
Av. Chile	17 022
Av. Ferrocarril del Sur	10 727

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7-11 se presenta el mapa con los corredores dentro de la malla vial que se consideran factibles para implementar un sistema de tipo tranvía según la demanda de estos:

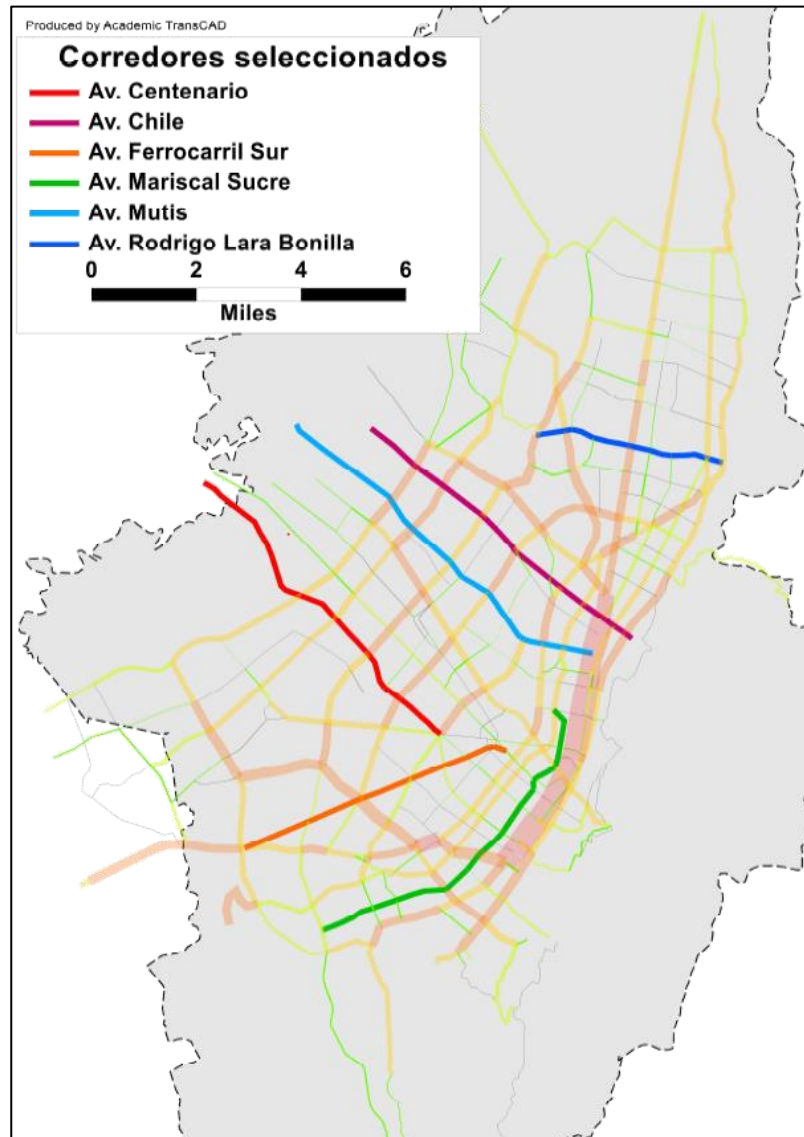


Figura 7-11. Corredores seleccionados por análisis de demanda.  
Fuente: Elaboración propia.

## 8 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS CORREDORES

Conocidos los corredores sobre los cuales es posible implementar un sistema de transporte de pasajeros tipo tranvía, dada la demanda que en ellos se proyecta, resulta necesario ahora determinar si estos corredores tienen las características físicas adecuadas para implementar este tipo de tecnología. Para realizar el análisis se tienen en cuenta los parámetros establecidos en la Tabla 5-1 y la Tabla 5-2.

En planta, es necesario determinar los radios de giro críticos que pueden presentar estos corredores, ya que éste parámetro puede limitar el tipo de vehículo a utilizar. Para determinar los radios de giro, se construye para cada uno de los corredores un eje central en AutoCAD Civil 3D, utilizando como base la ortofotografía de acceso público más reciente del IDECA, que corresponde al año 2016. El eje construido, y ajustado a cada corredor, permite identificar los lugares en donde el radio de giro es reducido y también permite identificar la necesidad de modificar el trazado de cada corredor en caso de no llegarse a cumplir con los parámetros establecidos.

El detalle de la composición de los ejes centrales de cada corredor se presenta en el Anexo 2 de este documento.

El análisis en perfil busca determinar las pendientes críticas que se puedan presentar a lo largo de las vías que conforman el corredor, para así poder seleccionar el tipo de *bogie* más adecuado para que, en caso de presentarse altas pendientes, estas puedan ser superadas. Para poder determinar las pendientes de los corredores, utilizando la herramienta incorporada en Google Earth, se procedió a construir el perfil del eje central del corredor sobre el cual se calculó la pendiente para aquellos tramos más críticos, así como la pendiente promedio que se presenta a lo largo de todo el eje.

Finalmente, el análisis en sección transversal pretende especificar el ancho disponible entre paramentos para cada corredor y compararlo con el ancho necesario para el adecuado funcionamiento de un tranvía, así como para la operación de vehículos mixtos según las secciones establecidas por el POT para cada uno de los corredores. Estos anchos se establecieron utilizando la herramienta AutoCAD Civil 3D, creando secciones

cada 10 m en el abscisado cuyo ancho era variable hasta los paramentos establecidos en la ortofotografía del IDECA.

Debe tener en cuenta que el POT vigente de la ciudad de Bogotá, establece más de diez diferentes configuraciones de secciones viales, y algunos casos especiales, las cuales establecen la distribución de los espacios entre paramentos, el número de carriles, los anchos de los paramentos y demás características en función del objetivo que se espera cumpla cada una de las vías de la ciudad. Estas secciones se encuentran numeradas desde la tipo V-0 que establece un ancho entre paramentos de 100 m, así como la implementación de sistema masivo de transporte de alta capacidad; y la V-9 que consiste en alamedas peatonales con un ancho máximo de 8 m entre paramentos sin permitir la circulación de vehículos a través de ellas. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2004)

Para este estudio, los corredores seleccionados se encuentran categorizados como tipos V-2 o V-3 cuyas características se describen a continuación:

### **Sección vial tipo V-2**

Este tipo de sección establece un ancho mínimo de 40 m entre los paramentos de los predios que configuran el corredor; además, esta sección típica establece que si la vía cuenta con sistema de transporte en superficie, se deben asegurar por lo menos dos carriles de circulación para los vehículos mixtos por sentido, así como ciclorrutas unidireccionales, el ancho de los andenes varía en función de la tecnología utilizada en el sistema de transporte, es así que para desarrollar este trabajo se optó por utilizar la sección tipo V-2E que establece la posibilidad de contar con un sistema de transporte férreo a nivel, como se aprecia en la Figura 8-1

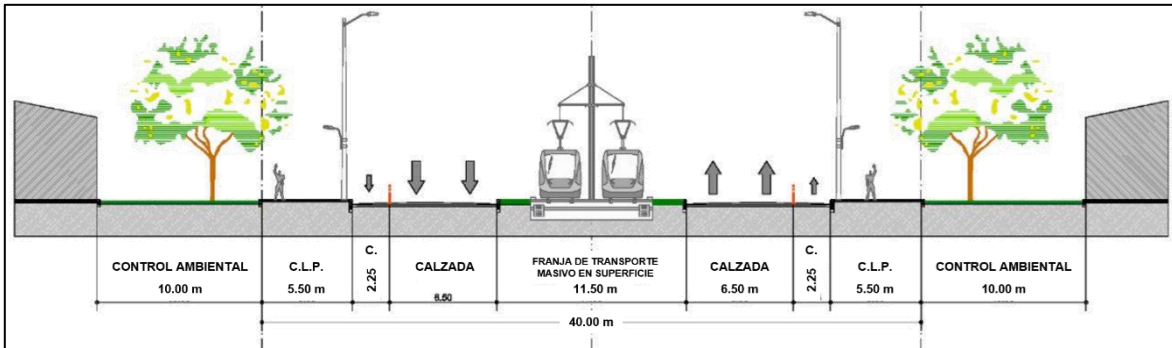


Figura 8-1. Sección vial tipo V-2E.  
Fuente: Anexo 9 del Decreto 190 de 2004.

### Sección vial tipo V-3

Como se observa en la Figura 8-2, esta sección establece un ancho mínimo de 32 m entre los paramentos de los predios que configuran el corredor. Sin embargo esta sección no establece la posibilidad de un sistema de transporte basado en rieles, solamente contempla la utilización de carriles unidireccionales exclusivos para buses, con por lo menos dos carriles de circulación para los vehículos mixtos por sentido, así como ciclorrutas unidireccionales. Es así que para desarrollar este trabajo se optó por utilizar la sección tipo V-3<sub>B</sub> reemplazando el sistema de buses por uno de tranvías.

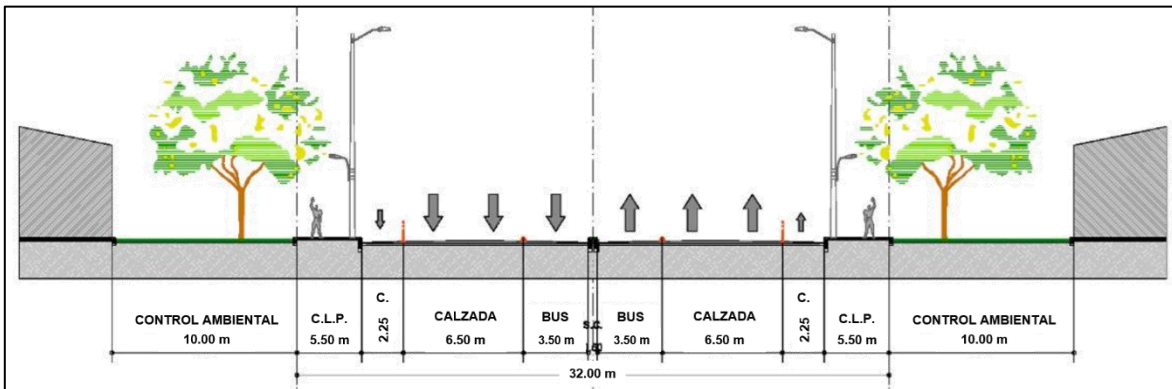


Figura 8-2. Sección vial tipo V-3B.  
Fuente: Anexo 9 del Decreto 190 de 2004.

## 8.1 Avenida Chile

Esta avenida arterial, conocida por su nomenclatura como Calle 72, inicia su recorrido al occidente de la ciudad, en la Carrera 112, a la altura del Humedal Jaboque; se dirige al oriente cruzando las localidades de Engativá, Barrios Unidos y Chapinero y finaliza



su trazado en la Av. Alberto Lleras Camargo con una longitud aproximada de 10,3 km. Actualmente cuenta con intersecciones a desnivel a la altura de las avenidas Boyacá, Congreso Eucarístico y NQS como se observa en la Figura 8-3.

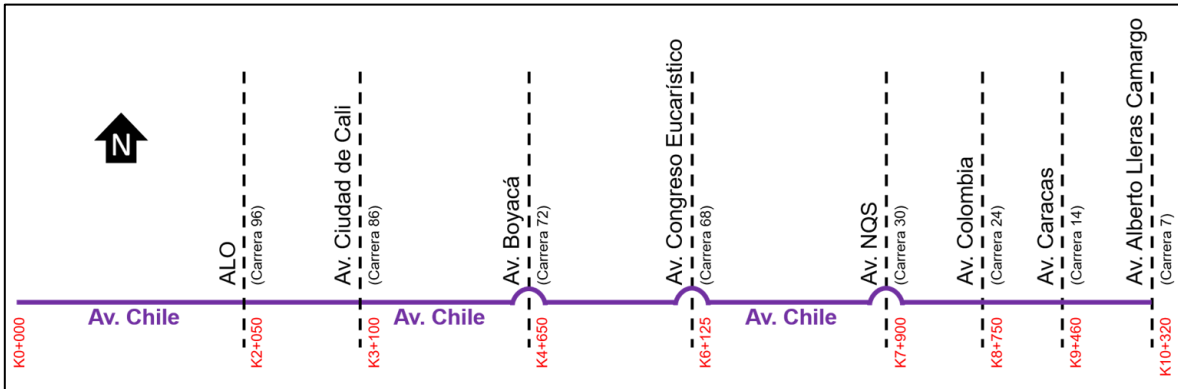


Figura 8-3. Esquema del trazado de la Av. Chile.  
Fuente: Elaboración propia.

### 8.1.1 Planta

La mayoría del trazado presenta trayectos completamente rectos, lo cual facilitaría la implantación de un sistema de tipo tranvía. Las deflexiones que se presentan en el eje de la vía pueden ser superadas con acuerdos de hasta más de 2000 m de radio, lo cual facilita la implantación del corredor férreo.

A la altura de la Avenida Congreso Eucarístico, esta avenida presenta una bifurcación hacia la que se conoce como Calle 68, sin embargo, debe considerarse que en este punto, el POT vigente de la ciudad de Bogotá contempla la implantación de una intersección a desnivel que solucione los movimientos que se presentan en este punto donde convergen las tres vías como se muestra en la Figura 8-4. Esta intervención deberá tener en cuenta la posible implantación de un sistema férreo, para lo cual la solución planteada en planta debe permitir la circulación ininterrumpida de los trenes a lo largo de la Calle 72.



Figura 8-4. Reserva vial Av. Chile por Av. Congreso Eucarístico y Av. Gabriel Andrade.  
Fuente: Elaboración propia a partir de Mapas Bogotá y POT 2004.

### 8.1.2 Perfil

Entre el extremo occidental y la Av. Caracas, la Av. Chile se considera plana, ya que presenta una inclinación promedio inferior al 1 %, con pendientes máximas en algunos tramos de hasta el 3 %. Sin embargo, desde la Av. Caracas hacia el oriente la inclinación promedio supera el 6 %, lo cual imposibilita el uso de tranvías sobre ruedas metálicas para este tramo ya que la tracción no sería suficiente para solventar estas rampas. En la Figura 8-5 se presentan las zonas con pendientes críticas a lo largo del perfil del terreno de la vía.

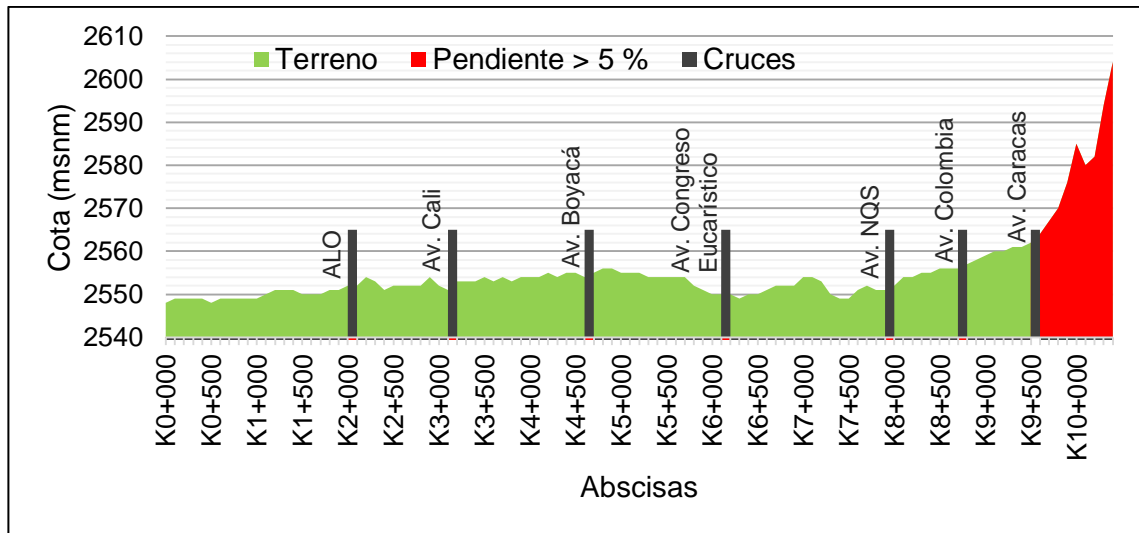


Figura 8-5. Perfil de terreno de la Av. Chile.  
Fuente: Elaboración propia.

### 8.1.3 Sección transversal

El POT establece que la Av. Chile, a lo largo de todo su recorrido debe ser de tipo V-2, por lo tanto, el ancho mínimo que debe tener a disposición este corredor debe ser de 40 m. En la Figura 8-6 se observa el ancho entre paramentos con el que actualmente cuenta este corredor en toda su longitud comparado con el que debería tener disponible para poder implementar un sistema tranviario, en ella se puede identificar que, en su mayoría, no se cuenta con el espacio suficiente para cumplir con los anchos mínimos exigidos, sin embargo, dentro del mismo rango de secciones establecidas en el POT, se logran identificar andenes con anchos mínimos de incluso 3,5 m; y si se considera el ancho mínimo en sección para sistemas tipo tranvía como se mostró en la Figura 5-9, es posible calcular un ancho mínimo de sección aceptable para implementar el sistema de 31 m.

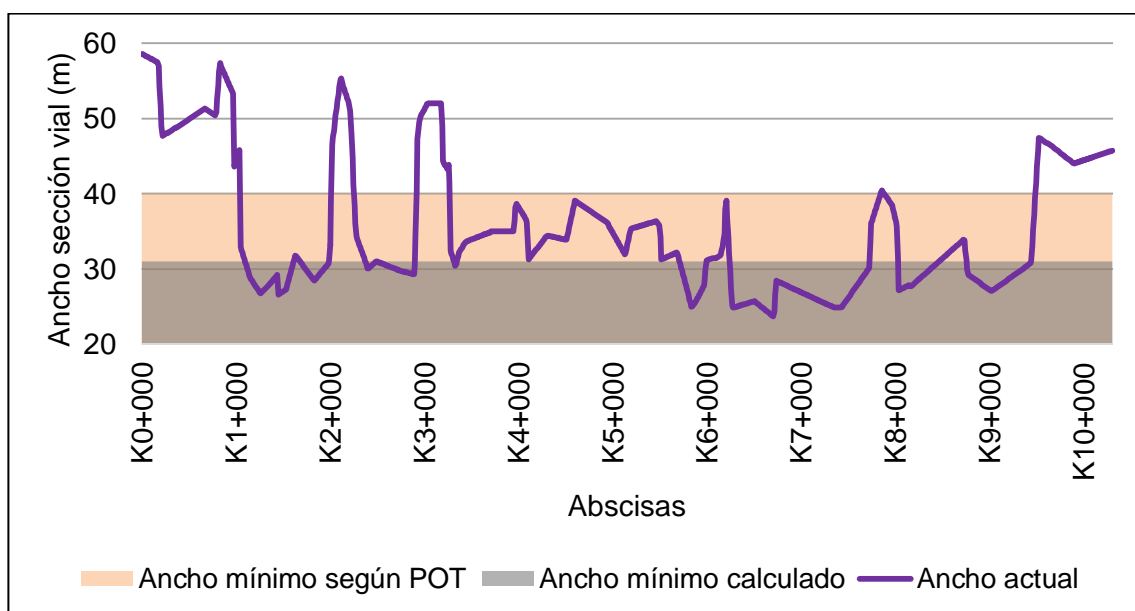


Figura 8-6. Anchos de vía sobre el corredor de la Av. Chile.  
Fuente: Elaboración propia.

Se determina entonces, que no todo el corredor cuenta con el ancho suficiente actualmente para poder instalar un sistema tranviario, la zona más crítica se presenta entre la abscisa K6+300 y K7+400, un tramo de un poco más de un kilómetro comprendido entre la Av. Congreso Eucarístico y la Carrera 55 donde el ancho promedio entre paramentos es

de apenas 26 m, lo cual hace necesario que en este tramo del corredor deba realizarse adquisición predial para poder implantar el sistema.

## 8.2 Avenida Ferrocarril del Sur

Como su nombre lo indica, el corredor de la Av. Ferrocarril del sur corresponde a los terrenos destinados antiguamente para la línea férrea que conectaba a la ciudad de Bogotá con los, para la época, municipios vecinos de Bosa, Soacha y Sibaté con intención de llegar hasta Fusagasugá, e incluso al Río Magdalena. Con la construcción del sistema TransMilenio sobre la Autopista Sur, el antiguo corredor férreo fue cercenado y los rieles desaparecieron. Por lo tanto, este corredor inicia a la altura de la intersección de la Autopista sur con Av. Villavicencio, recorre en línea recta hacia el nororiente, cruzando varias de las vías principales y arteriales de la ciudad como se ilustra en la Figura 8-7; en ninguna de ellas existe actualmente alguna intersección a desnivel. El trazado finaliza en la Av. Ferrocarril de Occidente, donde los antiguos rieles empalmaban con los existentes del tren de la Sabana de Bogotá.

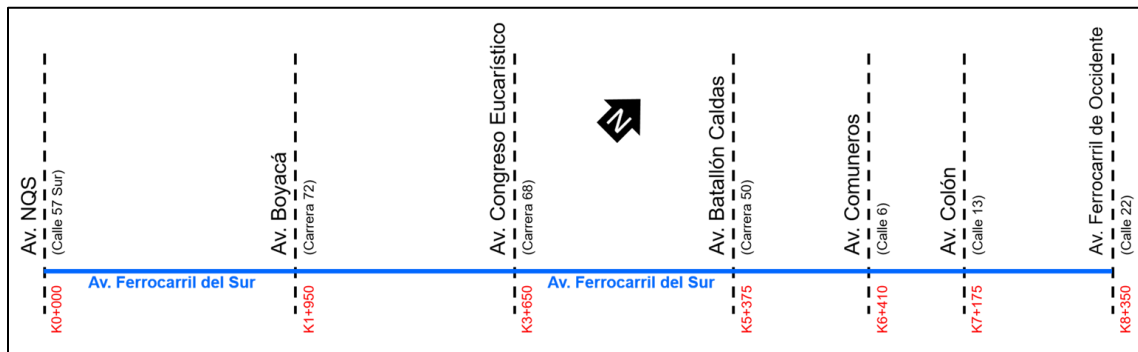


Figura 8-7. Esquema del trazado de la Av. Ferrocarril del Sur.  
Fuente: Elaboración propia.

### 8.2.1 Planta

Dada la naturaleza original de este corredor, no presenta a lo largo de su recorrido deflexiones que impliquen la necesidad de utilizar radios de curvatura ajustados. Todos los acuerdos en planta se pueden realizar con radios superiores a los 2000 m.

La longitud total de este corredor es de aproximadamente 8,5 km.

### 8.2.2 Perfil

A lo largo de todo el corredor no se presentan desniveles importantes. El promedio de pendiente es de apenas el 1 %, lo cual hace factible la implantación de un sistema tranviario. En la Figura 8-8 se representan las variaciones en el perfil del terreno natural existente, para este corredor no se consideran zonas con pendientes críticas.

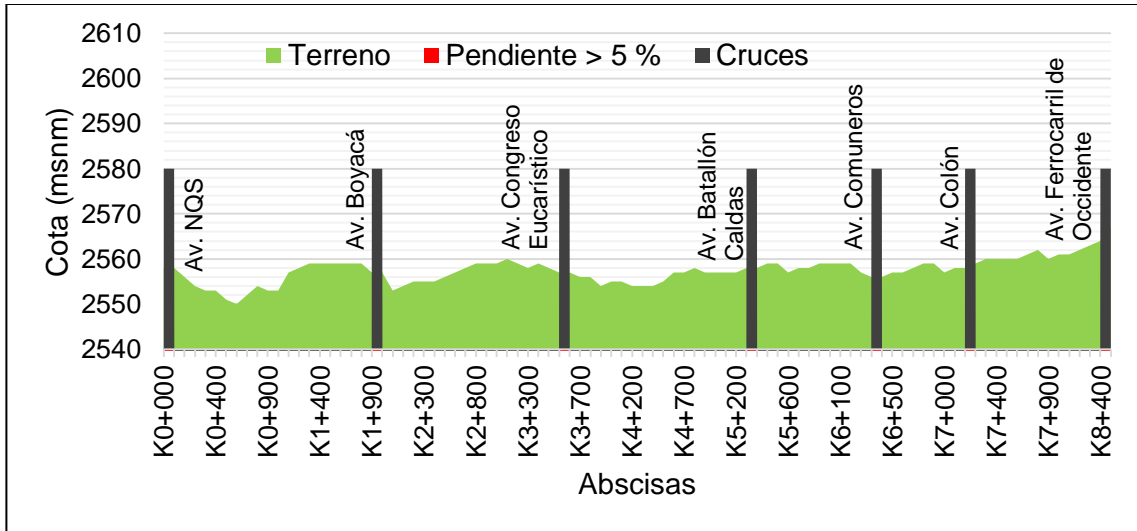


Figura 8-8. Perfil de terreno de la Av. Ferrocarril del Sur.  
Fuente: Elaboración propia.

### 8.2.3 Sección transversal

El POT establece que la Av. Ferrocarril del Sur, a lo largo de todo su recorrido debe ser de tipo V-3, por lo tanto, el ancho mínimo que debe tener a disposición este corredor debe ser de 32 m. En la Figura 8-9 se observa el ancho entre paramentos con el que actualmente cuenta este corredor en toda su longitud comparado con el que debería tener disponible para poder implementar un sistema tranviario, en ella se puede identificar que, en su mayoría, el espacio es suficiente; tan solo se presentan un par de zonas, entre las abscisas K1+900 y K2+600, y al final del corredor. En estos sitios se presentan viviendas que han invadido la reserva vial del corredor, por lo tanto, se debe suponer que su traslado y posterior demolición no debe considerarse como un impedimento para poder llevar a cabo, en algún momento, la implantación de un sistema tipo tranvía. Como se puede apreciar, en

el resto del corredor se presenta el espacio suficiente, incluso para construir hasta tres carriles para el tráfico mixto de ser necesario.

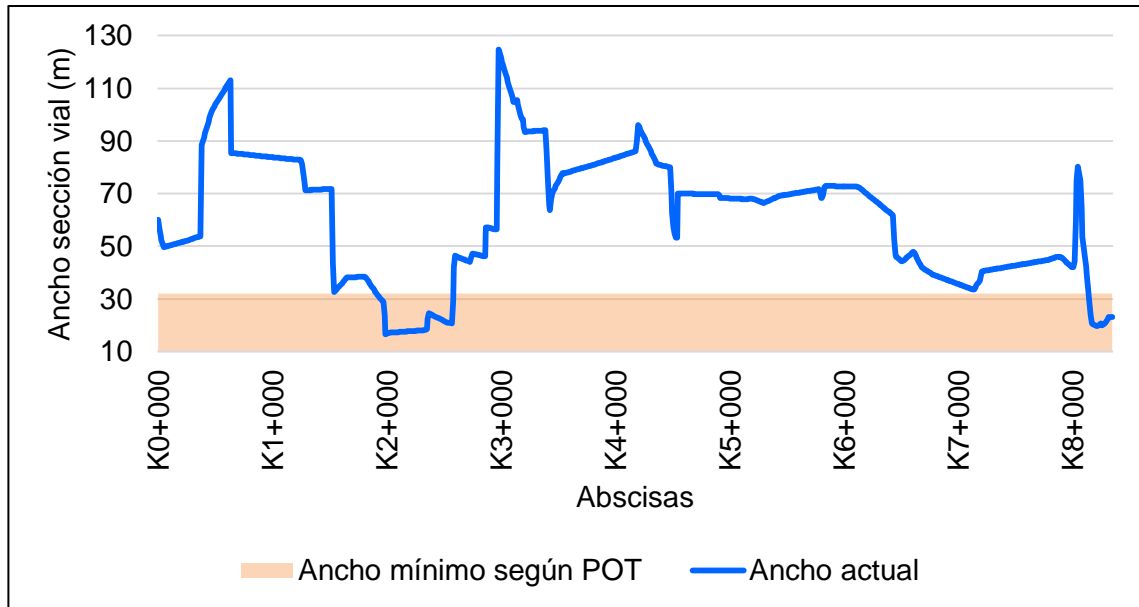


Figura 8-9. Anchos de vía sobre el corredor de la Av. Ferrocarril del Sur.  
Fuente: Elaboración propia.

### 8.3 Avenida Mariscal Sucre

Este corredor nace en la Av. Boyacá, junto al Parque Metropolitano El Tunal y el Portal de TransMilenio con el mismo nombre. Recorre hacia el norte con un trazado irregular. Usualmente se le conoce por su nomenclatura como la Carrera 24, sin embargo, a lo largo de su recorrido puede ser la Carrera 19 o Carrera 18. Al llegar a la Av. Primero de Mayo, este corredor tiene una particularidad, y es que se bifurca para transcurrir a través del barrio Restrepo, hasta llegar a la Av. Hortúa como se muestra en la Figura 8-10; en este sector el corredor funciona como un par vial. Luego continúa hacia el norte hasta llegar a la Av. Comuneros o Calle Sexta donde nuevamente se transforma en un par vial hasta llegar a la Av. Ciudad de Lima, desde allí continúa como una sola vía hasta llegar a la Av. Eldorado donde, por tercera vez se bifurca para atravesar la localidad de Teusaquillo hasta volver a ser una sola vía en la intersección con la Av. Francisco Miranda (Calle 45) donde finaliza su recorrido.

La longitud total de este corredor se estima en aproximadamente 11,2 km.

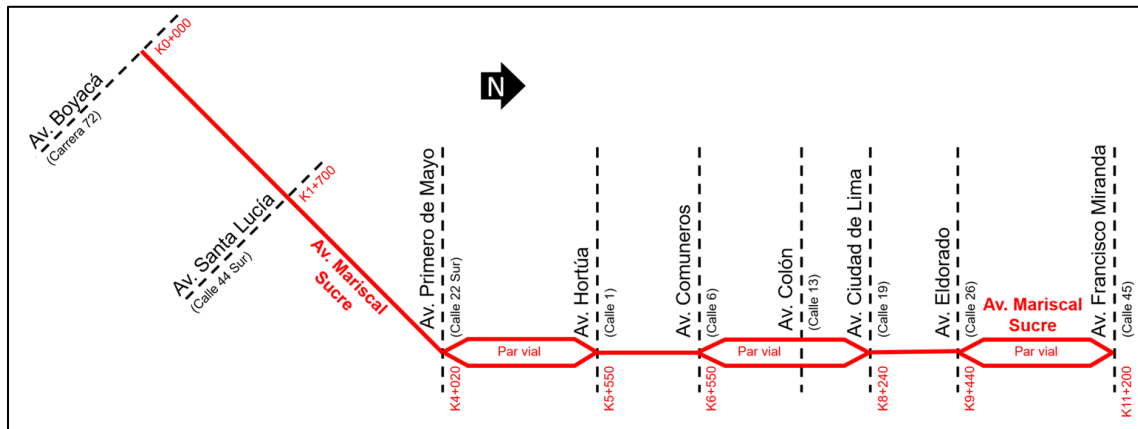


Figura 8-10. Esquema del trazado de la Av. Mariscal Sucre.  
Fuente: Elaboración propia.

### 8.3.1 Planta

El recorrido de esta vía es sinuoso, incluso, luego de superar el primer kilómetro, a la altura de la Calle 40 Sur el eje central de la vía presenta una curva y contracurva como se observa en la Figura 8-11, sin embargo, los radios que presentan son de hasta 200 m, lo cual para un sistema de transporte férreo tipo tranvía no resulta ser inconveniente.

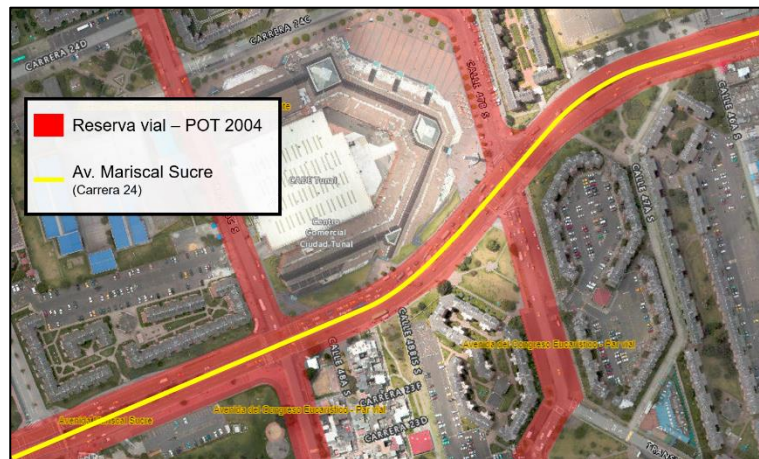


Figura 8-11. Av. Mariscal Sucre a la altura de la Calle 48 Sur.  
Fuente: Elaboración propia a partir de Mapas Bogotá y POT 2004.

Sin embargo, en varios puntos del corredor, sobre todo en aquellos donde inician y finalizan los pares viales antes descritos, el trazado presenta deflexiones de hasta 90° los cuales solo pueden ser superados utilizando el radio mínimo según la tecnología escogida, ya sea de trenes sobre ruedas metálicas o de neumático. En



la Figura 8-12 se presenta el caso particular a la altura de la Calle 20 Sur, en donde la Av. Mariscal Sucre sufre una bifurcación para convertirse en un par vial. Esta misma situación se presenta en varios puntos del trazado, especialmente en las calles 4, 16, 19, 28 y 42:



*Figura 8-12. Av. Mariscal Sucre a la altura de la Calle 20 Sur.  
Fuente: Elaboración propia a partir de Mapas Bogotá y POT 2004.*

### **8.3.2 Perfil**

A pesar de lo sinuoso del recorrido en planta de todo el corredor, no se presentan desniveles importantes. El promedio de pendiente es de un poco más de 1,0 %, lo cual hace factible la implantación de un sistema tranviario. En la Figura 8-13 se representan las variaciones en el perfil del terreno natural existente, para este corredor no se presentan zonas con pendientes críticas.



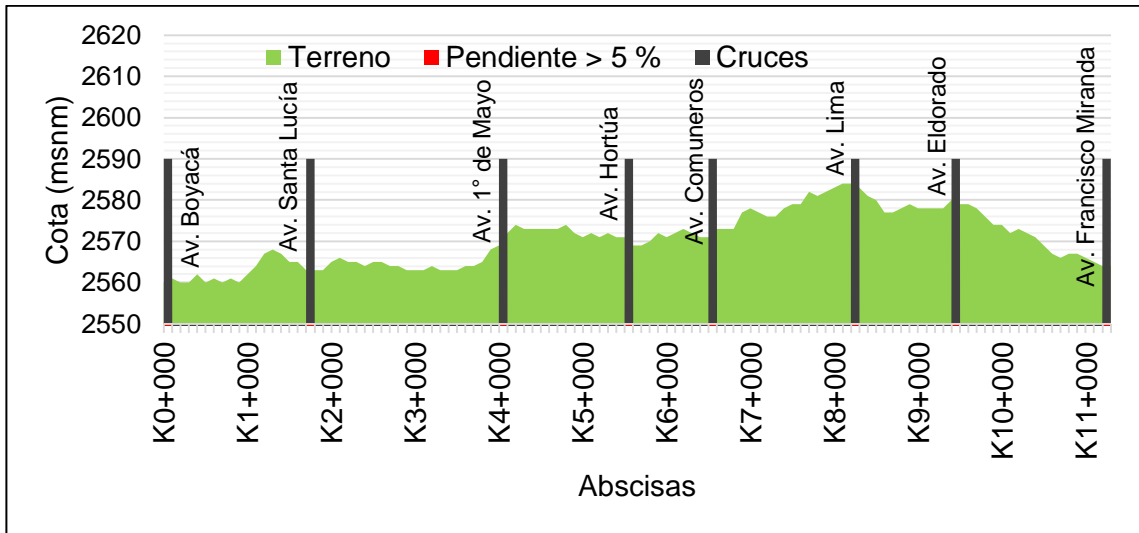


Figura 8-13. Perfil de terreno de la Av. Mariscal Sucre.  
Fuente: Elaboración propia.

### 8.3.3 Sección transversal

Para este corredor, el POT vigente establece una sección vial de tipo V-3, por lo tanto, el ancho mínimo que debe tener a disposición este corredor debe ser de 32 m. Además, para los pares viales establece anchos mínimos de 17 m, con dos carriles de tráfico mixto. Considerando el ancho de franja para un tranvía establecido en la Tabla 5-3 para una sola vía, es posible establecer un ancho mínimo total de la sección de 17 m, coincidente con lo establecido en el POT, bajo la salvedad que en este caso se utilizarían andenes de 3,5 m y n 5,0 m que establece la sección vial del POT.

En la Figura 8-14 se observa el ancho entre paramentos con el que actualmente cuenta este corredor en toda su longitud comparado con el que debería tener disponible para poder implementar un sistema tranviario, en ella se puede identificar que, en su mayoría, el espacio es suficiente; tan solo se presenta una sola crítica entre las abscisas K1+480 y K4+080 correspondiente al tramo entre el Parque Metropolitano El Tunal y la Av. Primero de Mayo.

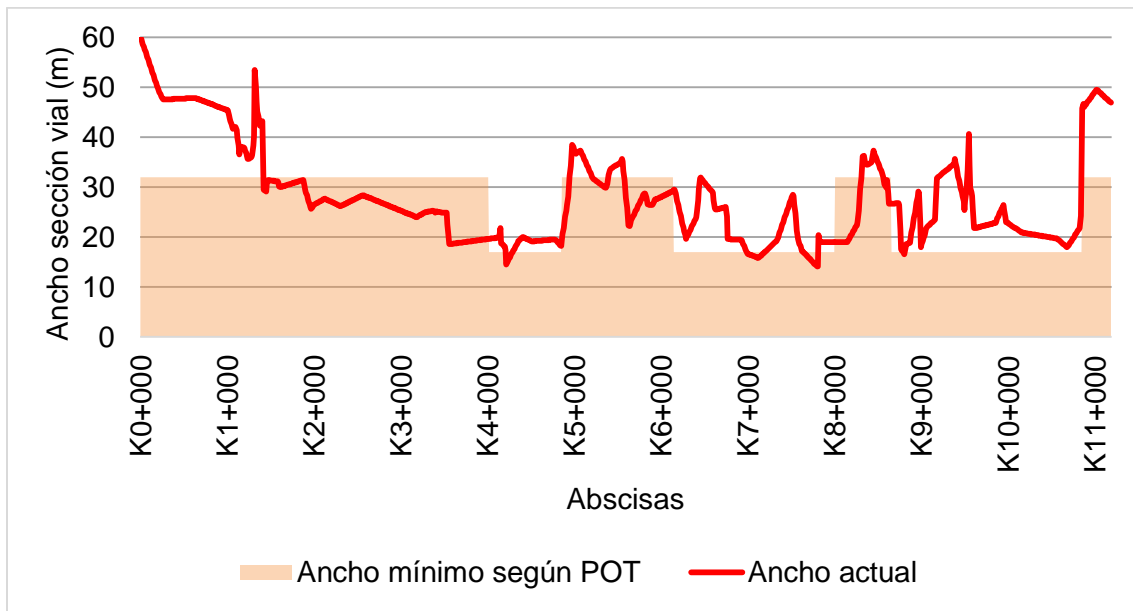


Figura 8-14. Anchos de vía sobre el corredor de la Av. Mariscal Sucre.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 8.4 Avenida José Celestino Mutis

Esta avenida arterial, conocida por su nomenclatura como Calle 63, inicia su recorrido al occidente de la ciudad, en la Carrera 112, recorre justo el borde norte del Aeropuerto Eldorado y finaliza su trazado en la Av. Alberto Lleras Camargo con una longitud aproximada de 11 km. A lo largo de su recorrido cruza el Parque Metropolitano Simón Bolívar. Entre la Av. Caracas y la Av. Alberto Lleras no se encuentra construida en su totalidad. Actualmente cuenta con intersecciones a desnivel a la altura de las avenidas Cali, Boyacá, Congreso Eucarístico y NQS como se observa en la Figura 8-15.

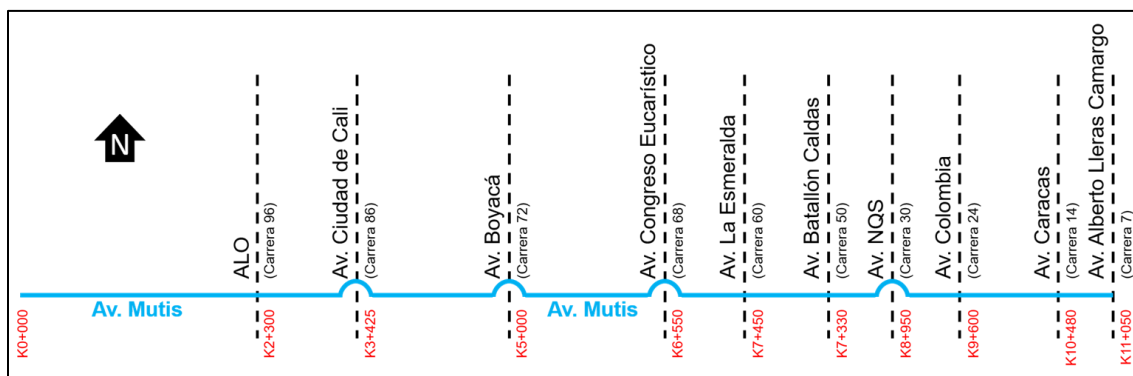
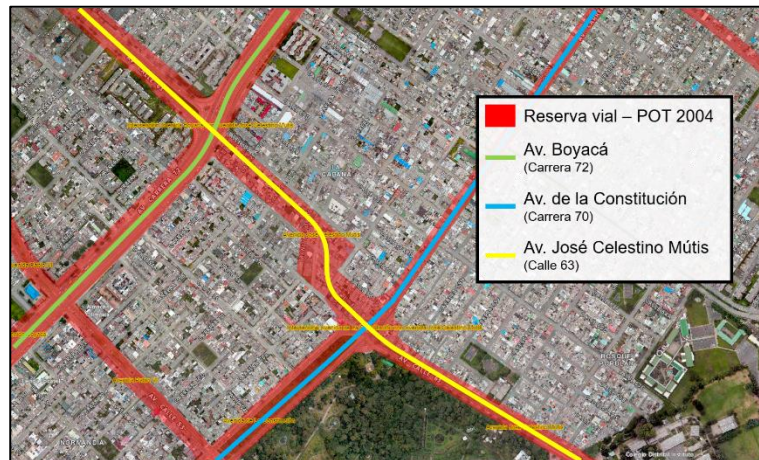


Figura 8-15. Esquema del trazado de la Av. José Celestino Mutis.  
Fuente: Elaboración propia.

### 8.4.1 Planta

La mayoría del trazado presenta trayectos completamente rectos, lo cual facilitaría la implantación de un sistema de tipo tranvía. Las deflexiones que se presentan en el eje de la vía pueden ser superadas con acuerdos de hasta más de 2000 m de radio, lo cual facilita la implantación del corredor férreo. Las únicas excepciones se presentan en el tramo comprendido entre la Av. Boyacá y la Av. de la Constitución, y entre la Carrera 13 y la Av. Alberto Lleras; en el primero actualmente se construye la continuación de la vía utilizando una curva y contracurva que ajusta el trazado vial al trazado urbano como se aprecia en la Figura 8-16, en este punto se requieren radios mínimos de 50 m para poder realizar los empalmes de las tangentes; en el segundo caso, como ya se mencionó, la vía trascurre por calles locales para desembocar en la Av. Alberto Lleras, como se observa en la Figura 8-17, lo cual implica el uso de radios de curvatura mínimos según la tecnología seleccionada.



*Figura 8-16. Av. Mutis entre Av. Boyacá y Av. de la Constitución.  
Fuente: Elaboración propia a partir de Mapas Bogotá y POT 2004.*



Figura 8-17. Av. Mutis entre Av. Caracas y Av. Alberto Lleras.  
 Fuente: Elaboración propia a partir de Mapas Bogotá y POT 2004.

### 8.4.2 Perfil

Entre el extremo occidental y la Av. Caracas, la Av. Mutis se considera plana, ya que presenta una inclinación promedio de 1,3 %, con pendientes máximas en algunos tramos de hasta el 4,0 %. Sin embargo, desde la Av. Caracas hacia el oriente la inclinación promedio supera el 5 %, lo cual imposibilita el uso de tranvías sobre ruedas metálicas para este tramo ya que la tracción no sería suficiente para solventar estas rampas. En la Figura 8-18 se presentan las zonas con pendientes críticas a lo largo del perfil del terreno de la vía.

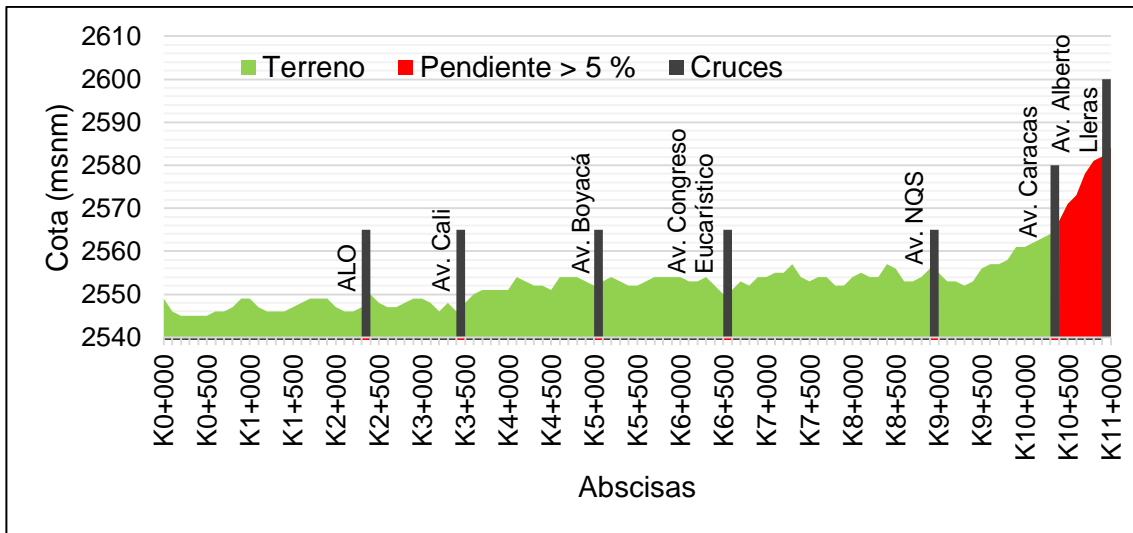


Figura 8-18. Perfil de terreno de la Av. Mutis.  
 Fuente: Elaboración propia.

### 8.4.3 Sección transversal

El POT establece que la Av. Mutis, debe ser de tipo V-2 desde su extremo occidental hasta la Av. NQS, a partir de esta vía, y hacia el oriente, el POT determina que la Av. debe ser considerada con una sección tipo V-3, por lo tanto, el ancho mínimo que debe tener a disposición este corredor debe ser de 40 m y 32 m respectivamente. En la Figura 8-19 se observa el ancho entre paramentos con el que actualmente cuenta este corredor en toda su longitud comparado con el que debería tener disponible para poder implementar un sistema tranviario, en ella se puede identificar que, en su mayoría, el espacio es suficiente. Los primeros dos kilómetros del corredor se encuentran con la reserva vial invadida, estos predios son los que se encuentran en el costado norte del Aeropuerto Eldorado, por lo tanto, debe tenerse en cuenta que deben realizarse demoliciones en este trayecto para poder construir en su totalidad la sección vial. Por otro lado, en el extremo oriental del corredor, como se mencionó antes, la vía utiliza calles locales, por lo cual no se cumple con el ancho mínimo establecido, razón por la cual, si se espera construir un sistema tranviario deben demolerse los predios necesarios para completar el ancho total de la sección V-3.

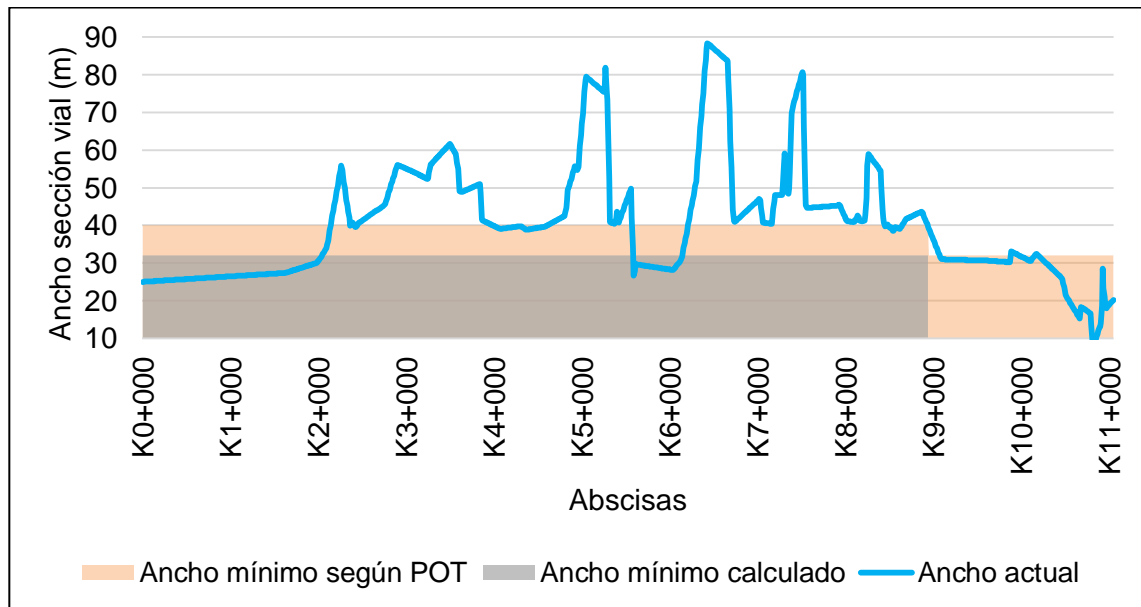


Figura 8-19. Anchos de vía sobre el corredor de la Av. Mutis.  
Fuente: Elaboración propia.

## 8.5 Avenida Rodrigo Lara Bonilla

También es conocida por su nomenclatura como la Calle 127. De los cinco corredores analizados, este es el que tiene menor longitud ya que apenas es de cerca de 6 kilómetros. Inicia a la altura de la Av. Boyacá y recorre hacia el oriente hasta finalizar a la altura de la Av. Alberto Lleras. Actualmente cruza a la Av. Paseo de los Libertadores y a la Av. Laureano Gómez sobre un puente vehicular, en las demás intersecciones importantes los movimientos se solucionan mediante semaforización.

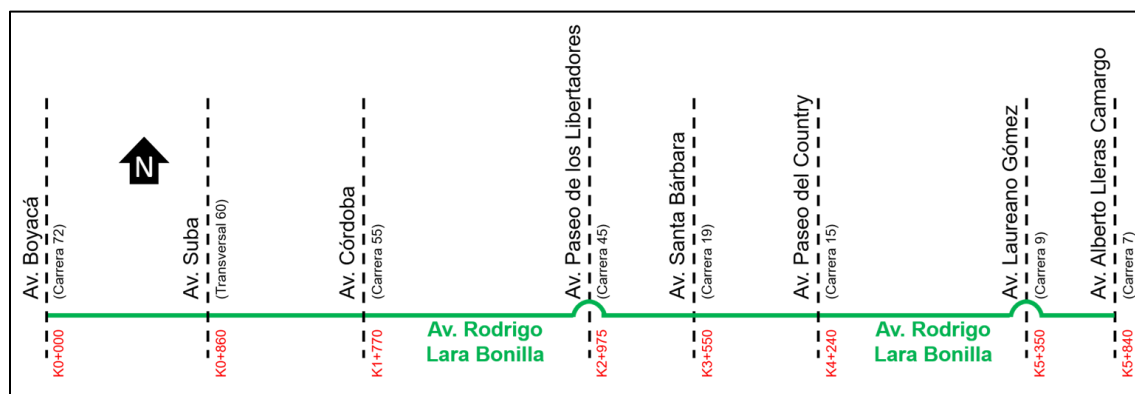


Figura 8-20. Esquema del trazado de la Av. Rodrigo Lara Bonilla.  
Fuente: Elaboración propia.

### 8.5.1 Planta

A pesar de no tener un trazado completamente recto, la Av. Rodrigo Lara no presenta deflexiones importantes a lo largo de su recorrido, todos se pueden resolver con radios superiores a los 300 m.

### 8.5.2 Perfil

Para este corredor no se presentan desniveles importantes. El promedio de pendiente es de 1,6 %, lo cual hace factible la implantación de un sistema tranviario. En la Figura 8-21 se representan las variaciones en el perfil del terreno natural existente, para este corredor no se presentan zonas con pendientes críticas.

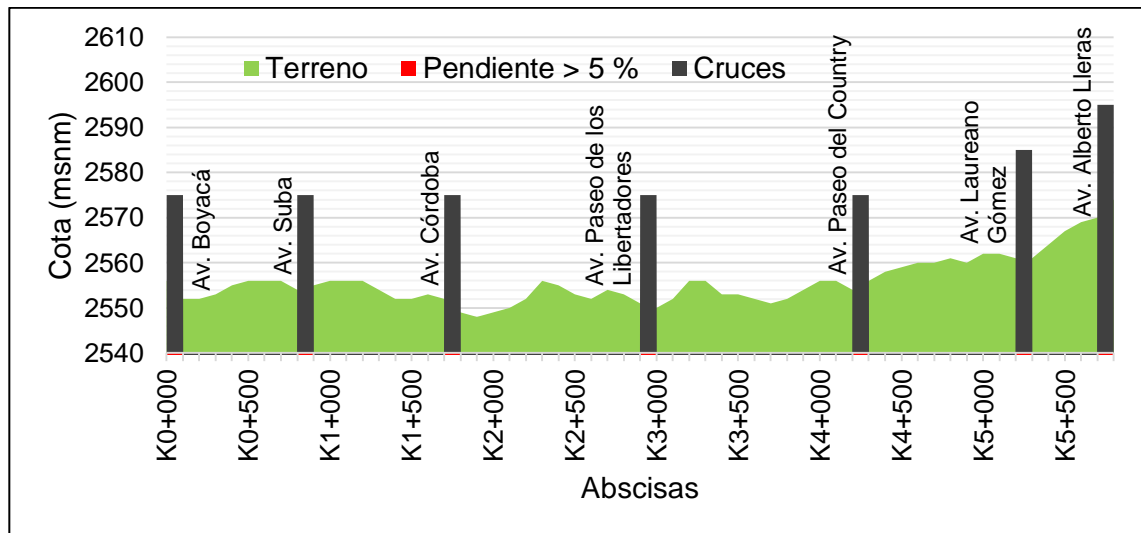


Figura 8-21. Perfil de terreno de la Av. Rodrigo Lara Bonilla.  
Fuente: Elaboración propia.

### 8.5.3 Sección transversal

Según el POT, la Av. Rodrigo Lara Bonilla, a lo largo de todo su recorrido debe ser de tipo V-2, por lo tanto, el ancho mínimo que debe tener a disposición este corredor debe ser de 40 m. En la Figura 8-22 se observa el ancho entre paramentos con el que actualmente cuenta este corredor en toda su longitud comparado con el que debería tener disponible para poder implementar un sistema tranviario, en ella se puede identificar que, en su totalidad, el espacio es suficiente para considerar construir la sección vial completa, incluso ampliar zonas peatonales y para ciclistas de ser necesario.

Resulta preciso aclarar que entre la Av. Boyacá y la Av. Paseo de los Libertadores existe una ciclorruta bidireccional sobre el separador central, la cual sería necesario trasladar a los andenes. Además, el tramo comprendido entre la Av. Paseo de los Libertadores y la Av. Alberto Lleras cuenta con un canal de aguas lluvias en el separador central, razón por la cual la distancia entre paramentos resulta ser tan amplia en este caso. Para poder implementar un sistema tipo tranvía en este tramo, se sugiere utilizar el sistema que ya se usó sobre la Av. Comuneros para construir el sistema TransMilenio y en donde se presentan condiciones similares. En este caso las estaciones se construyen sobre un voladizo sin afectar la sección hidráulica del canal como se muestra en la Figura 8-23.

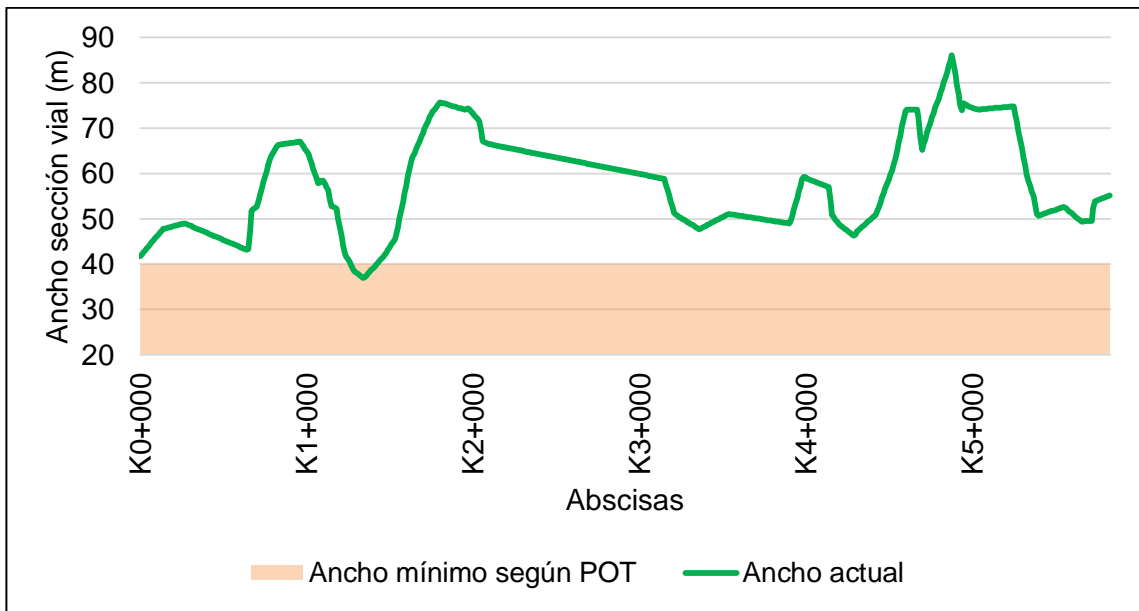


Figura 8-22. Anchos de vía sobre el corredor de la Av. Rodrigo Lara Bonilla.  
Fuente: Elaboración propia.

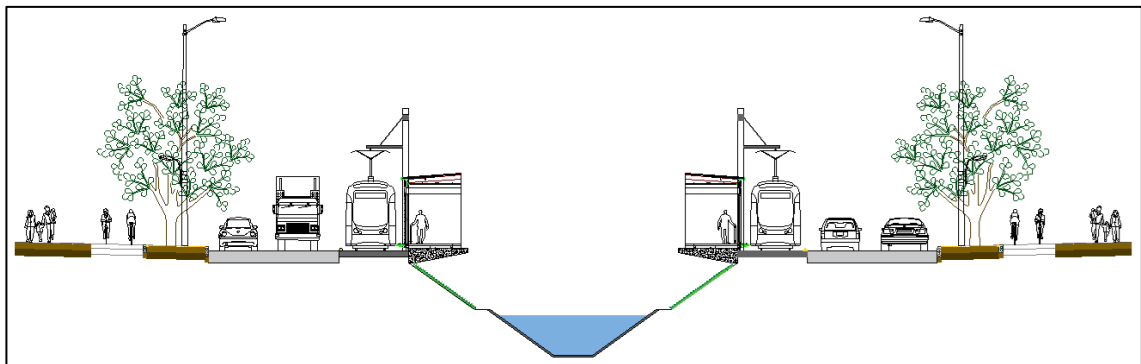


Figura 8-23. Sección transversal propuesta. Av. Rodrigo Lara Bonilla.  
Fuente: Elaboración propia.



## 9 CONCLUSIONES

El desarrollo de este documento ha permitido concluir que sí es posible implementar un sistema de transporte público de pasajeros tipo tranvía en la ciudad de Bogotá, tomando como base la demanda que éste debe satisfacer y las características físicas de las vías por las cuales es posible realizar su implementación.

Alrededor del mundo se han implementado este tipo de sistemas, de los cuales es posible identificar los elementos que sobresalen sobre otro tipo de sistemas férreos. La característica más importante a tener en cuenta para los sistemas tranviarios es que comparten la infraestructura con los demás actores viales, su segregación no es absoluta, lo cual implica que los parámetros de diseño tengan en cuenta la interacción con los demás involucrados en la movilidad. La tecnología seleccionada no solamente debe cumplir parámetros geométricos o técnicos, debe ser acorde al entorno urbano y a los mismos usuarios quienes obtendrán el mayor beneficio de este tipo de sistemas.

Considerando que el Plan Maestro de Movilidad de la ciudad de Bogotá data del año 2006, y el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad del año 2004, es posible afirmar que la política de planeación de transporte de Bogotá no ha sido lo suficientemente rigurosa para mantenerse actualizada en el tiempo. Al desarrollar los modelos de transporte, se identificaron en los corredores que se debería considerar la implementación de sistemas de transporte masivo de alta y mediana capacidad bajo las condiciones establecidas en estos dos documentos. Sin embargo, es importante realizar el mismo análisis considerando la dinámica del crecimiento de la ciudad, así como la modernización de los sistemas de transporte y la aparición de nuevas tecnologías, sobretodo de transporte unipersonal.

La elección de los corredores factibles para la implementación de un sistema tipo tranvía permitió identificar las características básicas de infraestructura que cada uno de estos tiene. Se puede evidenciar que, para cada uno de ellos, las condiciones que ofrecen son muy variables entre sí y por lo tanto, vale la pena entrar a detallar con más rigor cada uno de ellos para encontrar soluciones técnicas que permitan la ejecución de proyectos férreos a nivel urbano.

De los cinco corredores seleccionados solo tres tienen las condiciones necesarias para implementar un sistema tranviario en la totalidad de su trazado; estos son la Av. Ferrocarril del Sur, la Av. Mariscal Sucre y la Av. Rodrigo Lara Bonilla. Sin embargo, los otros dos corredores que son, la Av. Chile y la Av. José Celestino Mutis pueden ser considerados también realizando modificaciones en el tramo final de sus trazados, ya que, al dirigirse hacia los Cerros Orientales de la ciudad, la pendiente longitudinal es un factor difícil de superar sin la necesidad de utilizar tecnologías no convencionales solamente para satisfacer los requerimientos de un pequeño tramo. Si en estos dos corredores se contempla la implementación solo hasta la Av. Caracas, sería posible, para el conjunto de corredores implementar un sistema de tranvía apoyado en ruedas metálicas.

## 10 REREFENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía Mayor de Bogotá. Decreto Distrital 190 de 2004 por el cual se reglamente el Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá (2004).
- Alcaldía Mayor de Bogotá. Decreto 309 de 2009 - Por el cual se adopta el Sistema Integrado de Transporte Público para Bogotá, D.C., Diario Oficial § (2009).
- Arcelor Mittal. (2019). Carril 60R1 (Ri60).
- Bogotá Cómo Vamos. (2017). *Informe de Calidad de Vida en Bogotá 2017*.
- Cal y Mayor Asociados. (2006). *Formulación del Plan Maestro de Movilidad para Bogotá*.
- Caliper Corporation. (2015). Travel demand modeling with TransCAD - Users guide.
- Conejo Feliu, J. (2015). *Nueva línea de tranvía entre Montcada y UAB- Tramo Río Ripoll Montcada*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona.
- Contraloría de Bogotá. (2017). *Informe estructural "Evaluación al Plan Maestro de Movilidad - PMM."* Bogotá.
- CrabCAD. (2019). Low floor tram bogie.
- Departamento Nacional de Planeación. CONPES 3093 de 2000 - Sistema de Servicio Público Urbano de Transporte Masivo de Pasajeros de Bogotá (2000). Colombia.
- Frankó Rubber. (2019). Phoenix camber fill element.
- German Federal Regulations. Verordnung über den Bau und Betrieb der Strassenbahnen - BOStrab (1987).
- Institute for Transportation Development Policy. (2010). *Guía de planificación de sistemas BRT*. Nueva York.
- Jiménez, D. (2018). ¿Por qué se presentan los incidentes con el tranvía? *El Colombiano*.
- Kuby, M., Barranda, A., & Upchurch, C. (2004). Factors influencing light-rail station boardings in the United States. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(3), 223–247. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.10.006>

- Melis Maynar, M., & González Fernández, F. J. (2008). *Ferrocarriles metropolitanos*. (Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Ed.) (3rd ed.). Madrid.
- Ministerio de Transporte. (1998). *Manual para estudios de origen y destino de transporte de pasajeros y mixto en áreas municipales, distritales y metropolitanas*. Bogotá.
- Ministerio de Transporte. (2013). *Manual de Normatividad Férrea Parte I*. Bogotá.
- Ministerio de Transporte. (2015). *Manual de señalización vial y dispositivos uniformes para la regulación de tránsito en calles, carreteras y ciclorrutas de Colombia* (Vol. 44). Bogotá.  
<https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Ministerio de Transporte. Resolución 6249 de 2017 - Por la cual se reglamenta las condiciones mínimas que debe tener la infraestructura del sistema de metro ligero, tren ligero, tranvía y tren-tram. (2017).
- Molinero, Á., & Sánchez, I. (1998). *Transporte público: planeación, diseño, operación y administración* (3ra ed.). México D. F.: Fundación ICA.
- NTL. (2019). Translohr tramway on tyres.
- Presidencia de la República de Colombia. Decreto 1008 de 2015 - Por el cual se reglamenta el Servicio de Transporte Público Masivo de Pasajeros por metro ligero, tren ligero, tranvía y tren-tram. (2015). Colombia.
- Rietveld, P., & van Nierop, J. (1995). Urban growth and the development of transport networks: the case of the Dutch railways in the nineteenth century. *Flux*, 11(19), 31–43.  
<https://doi.org/10.3406/flux.1995.1016>
- SITP. (2012). Información General. Retrieved July 15, 2019,
- TransConsult. (2015). *Encuesta de Movilidad 2015*.
- Translohr. (2013). *Transport systems comparison. Trams on tires & trams on rails*.
- TransMilenio S.A. (2018). TransMilenio en cifras - Agosto 2018.
- Tranvía de Zaragoza. (2016). *Guía de la nueva movilidad urbana en Zaragoza*. Zaragoza: Prensa Diaria Aragonesa.

# **Maestría en Ingeniería Civil**

**Determinación de los corredores factibles para la implementación  
de un sistema de transporte de pasajeros tipo tranvía en la ciudad  
de Bogotá**

**Anexo 1 – Modelos de asignación**

**Iván Camilo Barahona Rodríguez**

**Bogotá, D.C., 11 de diciembre de 2019**

## **Maestría en Ingeniería Civil**

**Determinación de los corredores factibles para la implementación  
de un sistema de transporte de pasajeros tipo tranvía en la ciudad  
de Bogotá**

**Anexo 2 – Trazado en planta de los corredores seleccionados**

**Iván Camilo Barahona Rodríguez**

**Bogotá, D.C., 11 de diciembre de 2019**

## **Maestría en Ingeniería Civil**

**Determinación de los corredores factibles para la implementación  
de un sistema de transporte de pasajeros tipo tranvía en la ciudad  
de Bogotá**

**Anexo 3 – Registro fotográfico de los corredores seleccionados**

**Iván Camilo Barahona Rodríguez**

**Bogotá, D.C., 11 de diciembre de 2019**