



Contrato interadministrativo 136 de 2021
Realizar la estructuración integral del proyecto Línea 2 del
Metro de Bogotá, incluyendo los componentes legales, de
riesgos, técnico y financiero

Entregable 4
Documento de requisitos para cofinanciación Sistemas de
Transporte
Anexo A

Documento No. L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0003_VC
Elaborado por:



REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E4 – Documento de requisitos para cofinanciación Sistemas de Transporte – Anexo A – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0003_VC

CONTROL DE CAMBIOS ÍNDICE DE MODIFICACIONES

Versión	Fecha	Sección Modificada	Observaciones
A	18-02-2022	-	Versión Inicial
B	16-05-2022		Atención de radicado 20222100440511 observaciones MT y DNP L2 Aval Técnico
C	22-06-2022		Atención a comentarios a partir de comunicación del Ministerio de Transporte Radicado MT No.: 20222100640101 del 08 de junio, 2022, y radicado MT No. 20222100688681 del 17 de junio, 2022

TABLA DE CONTENIDO

CONTROL DE CAMBIOS	2
ÍNDICE DE MODIFICACIONES	2
TABLA DE CONTENIDO	3
LISTA DE TABLAS	4
LISTA DE FIGURAS	4
A. DEFINICIÓN DEL ESQUEMA OPERACIONAL Y FINANCIERO ...	5
3. VALIDACIÓN DE TECNOLOGÍAS Y TIPOLOGÍAS VEHICULARES	5
3.1 INTRODUCCIÓN	5
3.2 MARCO NORMATIVO	6
3.3 PROCESO DE SELECCIÓN DEL MODO METRO EN EL CORREDOR	7
3.4 RESUMEN CIFRAS DE DEMANDA DE LA LÍNEA CON BASE EN EL ESTUDIO DE DEMANDA	12
Tabla 1. Carga escenario 2042 - Escenario Diseño	13
3.5 VALIDACIÓN MULTICRITERIO DE TECNOLOGÍAS VEHÍCULARES	14
3.5.1 PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS	14
Tabla 2. Ponderación de Criterio	14
Tabla 3. Variables definidas por Criterio	16
3.5.2 TECNOLOGÍAS VEHÍCULARES PARA EVALUAR	17
Tabla 4. Tecnologías analizadas	17
Tabla 5. Características Tecnologías analizadas	18
3.5.3 EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE LOS CRITERIOS	18
Capacidad teórica para movilizar pasajeros	18
Velocidad comercial de operación promedio observada de la tecnología	19
Integración del sistema en su entorno urbano	20
Cantidad de CO2 emitida por pasajero transportado en la Hora Pico	25
Costo de operación y mantenimiento	26
Costo de inversión en material rodante	27
3.5.4 PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS	28
3.5.5 SELECCIÓN DE TIPOLOGÍA VEHICULAR	29
3.5.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y ROBUSTEZ	31
3.7 CONCLUSIONES y RECOMENDACIÓN	34
3.7.1 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL RODANTE DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ	35
3.8 ANEXO: REFERENCIAS	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Carga escenario 2042 - Escenario Diseño	13
Tabla 2. Ponderación de Criterio	14
Tabla 3. Variables definidas por Criterio	16
Tabla 4. Tecnologías analizadas	17
Tabla 5. Características Tecnologías analizadas	18
Tabla 5. Resultados Evaluación Criterios	29
Tabla 6. Ponderación de criterios para el análisis de sensibilidad.....	31
Tabla 8. Ponderación de criterios para el análisis de sensibilidad 2.....	32
Tabla 9. Ponderación de criterios para el análisis de sensibilidad 3.....	33
Tabla 10. Características técnicas material rodante L2MB.....	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Red de transporte colectivo urbano masivo propuesta por el Plan Distrital de Desarrollo 2020-2024	5
Figura 2. Metodología de Análisis Multicriterio	11
Figura 3. Criterios Seleccionados	12
Figura 4. Ponderación de Criterios	15
Figura 5. Sección vial BRT.....	21
Figura 6. Sección en planta Estación Metro	21
Figura 7. Sección transversal LRT.....	22
Figura 8. Perfil Típica LRT	23
Figura 9. Sección en planta Estación Metro	23
Figura 10.. Ejemplo de configuración de tracción (R: remolque, M: motor, Mp: motor con pantógrafo).....	36
Figura 11.. Arreglo de asientos	38
Figura 12.. Fijación de un asiento	39

A. DEFINICIÓN DEL ESQUEMA OPERACIONAL Y FINANCIERO ...

3. VALIDACIÓN DE TECNOLOGÍAS Y TIPOLOGÍAS VEHICULARES

3.1 INTRODUCCIÓN

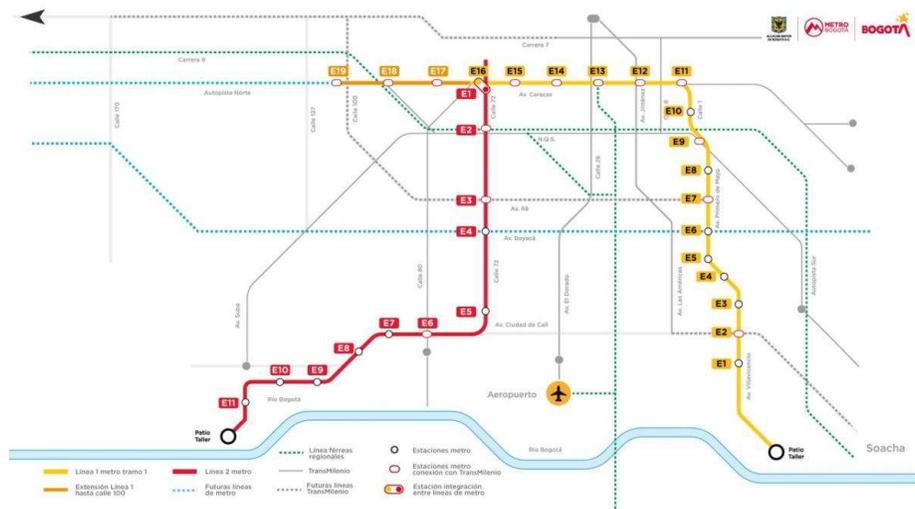
El proyecto de Línea 2 del Metro de Bogotá corresponde con el resultado de un proceso de estudios y de definición de un sistema de transporte público masivo de alta calidad. Permite ofrecer una respuesta a la carencia de sistemas de transporte colectivo atractivo al nivel del territorio que servirá y constituye una herramienta clave para la política de movilidad urbana sostenible de Bogotá.

La implementación de una red de metro en Bogotá es una necesidad que ha identificado la ciudad para la conformación de su red de transporte público urbano. Los desarrollos de proyectos de transporte urbano como el Transmilenio proporcionaron una respuesta parcial a los problemas de movilidad urbana y de congestión que siguen empeorando. Esta situación requiere una mejora en la oferta de transporte de ciertos corredores de la red de transporte público para mejorar su calidad y a su eficiencia.

No se trata solamente de ofrecer una oferta de transporte público masivo contestando a las necesidades de desplazamientos, sino también de generar una transformación del sistema de transporte público, aportándole modernidad, confort, seguridad y eficiencia. Hoy en día, ya no se trata de satisfacer las necesidades de movilidad de los ciudadanos, sino de poder ofrecerles un abanico de soluciones de movilidad sostenible, articulado sobre una red de transporte público racionalizada cuya espina dorsal corresponde con la red de metro que se está proponiendo y desarrollando.

Esta red se está materializando a través de la implementación tan esperada de la Primera Línea de Metro de Bogotá (PLMB), cuya puesta en servicio está prevista para el año 2028 y cuya extensión hasta la Calle 100 ya se encuentra en proceso de estudios, así como de los demás planes para la implementación de líneas de transporte público masivo que incluyen la Línea 2 del Metro de Bogotá y proyectos complementarios como Regiotram del Norte, Regiotram del Occidente y la implementación a corto plazo de nuevas troncales alimentadoras de Transmilenio. Esta serie de proyectos hacen parte de una ambición urbana que según el Plan Distrital de Desarrollo 2020-2024 de la Alcaldía de Bogotá permitirá que la ciudad-región se convierta en un modelo de movilidad, creatividad y productividad incluyente y sostenible.

Figura 1. Red de transporte colectivo urbano masivo propuesta por el Plan Distrital de Desarrollo 2020-2024



La definición de la tipología vehicular para el corredor del proyecto de la Línea 2 del Metro de Bogotá ha sido estudiada y analizada en la ciudad desde diferentes documentos de planeación de ciudad y que se consignan en el Plan de Ordenamiento Territorial y el Plan de Desarrollo Distrital. En dichos documentos se ha puesto en consideración que el proyecto Línea 2 del Metro sea operado como un sistema tipo metro pesado que atienda de manera eficiente la demanda que se ha identificado en este corredor y su zona de influencia.

De acuerdo con lo anterior y en cumplimiento de la Resolución número 20203040013685 del Ministerio de Transporte, donde se solicita realizar un análisis multicriterio e incluir diferentes tecnologías vehiculares y una evaluación objetiva acorde con los resultados de demanda. En este documento se presenta una comparación del metro pesado con un sistema BRT y un metro ligero con el fin de exponer las diferencias, ventajas y desventajas, entre tres tecnologías que podrían atender un corredor con necesidades de transporte público masivo, de acuerdo con la demanda potencial que se ha identificado para este proyecto.

Se presenta inicialmente una revisión normativa de los principales documentos donde se hace referencia al corredor de la calle 72 y la conexión de las localidades de Suba y Engativá con un proyecto de transporte público masivo que complemente la oferta de transporte público de la ciudad. Luego se presenta un resumen de los datos más relevantes de la demanda potencial que se ha identificado para el corredor de la calle 72 y la conexión de las localidades de Suba y Engativá. Estas cifras se presentan entendiendo que la elección de tipología vehicular debe concentrarse en analizar y validar la mejor alternativa para la atención de la relación oferta-demanda del corredor.

En los siguientes capítulos se describen los parámetros y variables utilizadas en la evaluación multicriterio que permiten de una manera objetiva validar la tecnología más adecuada para atender la demanda del corredor en estudio. Esta evaluación, se acompaña con la descripción general de cada una de las tecnologías analizadas, y el resultado de la aplicación de la matriz multicriterio y el peso de cada uno de los componentes incluidos en el análisis.

Finalmente, se presenta estos resultados junto con un resumen del número de vehículos, capacidad por vehículo y velocidad operacional propuestos en el modelo operacional del proyecto propuesto.

3.2 MARCO NORMATIVO

El documento CONPES 4034 tiene el objetivo de garantizar la continuidad del Programa Integral de Movilidad de la Región Bogotá Cundinamarca (PIMRC) para su fortalecimiento e integración, por medio de su actualización con una visión a 2027, 2035 y de largo plazo, así como establecer la priorización de proyectos para satisfacer las necesidades de movilidad de los habitantes de la región. Dada la importancia del transporte público para la Región Bogotá - Cundinamarca y de acuerdo con los lineamientos de movilidad, a partir del análisis de las necesidades de transporte de la región, así como de las condiciones proyectadas de demanda, el CONPES 4034 presenta la descripción y priorización de los proyectos a cargo de las entidades territoriales, a mediano y largo plazo para la actualización del PIMRC, como parte del mejoramiento del transporte de la región, y los cuales podrán ser susceptibles de cofinanciación una vez cumplan las condiciones del artículo 2 de la Ley 310 de 1996 modificado por el artículo 100 de la Ley 1955 de 2019, reglamentado por la Resolución 20203040013685 del Ministerio de transporte expedida el 29 de septiembre de 2020.

Es así como el documento CONPES 4034 presenta la hoja de ruta del PIMRC donde se incluyen los principales proyectos de infraestructura a desarrollar para el sistema de transporte público y la conectividad y productividad de la Región Bogotá Cundinamarca para la visión 2035 y de largo plazo, entre los cuales se encuentra la Línea 2 del Metro de Bogotá y el proyecto de extensión de la PLMB hacia el norte. A largo plazo, se proyecta que la Región Bogotá - Cundinamarca tenga un sistema de movilidad intermodal compuesto por aproximadamente 80 km de metro y 100 km de trenes de cercanías, 154 km de corredores troncales, 25 km de la Carrera 7, 20 km de Cables, 19 km de Cicloalameda y al menos 5 Centro de Intercambio Modal (CIM) incluyendo la estación central.

En términos de ordenamiento territorial, con el propósito de gestionar de la mejor manera la movilidad, y disminuir la presión ambiental y la concentración poblacional en la Sabana y Bogotá, el CONPES 4034 a través del PIMRC propone la consolidación del Modelo de Región Bogotá-Cundinamarca, el cual se basa en un sistema policéntrico de ciudades

compactas y sostenibles que fomente espacios de articulación y armonización de la regulación de los usos del suelo, y localización de equipamientos e infraestructuras, que facilite el desarrollo territorial de manera sostenible. Para alcanzar estos objetivos en la planeación de los territorios se requiere de la adecuada articulación entre los instrumentos de ordenamiento territorial y los planes de movilidad.

Por otra parte, el Plan de Desarrollo económico, social, ambiental y de obras públicas del Distrito Capital 2020-2024 “UN NUEVO CONTRATO SOCIAL Y AMBIENTAL PARA LA BOGOTÁ DEL SIGLO XXI” adoptado mediante Acuerdo Distrital 761 de 2020, en términos de movilidad tiene el propósito de hacer de la Región Bogotá-Cundinamarca un modelo de movilidad multimodal, incluyente (con enfoque de género, diferencial, territorial y regional) y sostenible que promueva la multimodalidad sostenible y de tecnologías de cero y bajas emisiones (garantizando la accesibilidad y seguridad de la red para los bicisuarios); priorice la seguridad vial, y mejore la experiencia del desplazamiento en términos de tiempo, calidad y costo.

El plan definió dentro del Programa 50 Red de metros del Artículo 15 “Definir la red de metros como el eje estructurador de la movilidad y de transporte de pasajeros en la ciudad, mediante el avance del ciclo de vida del proyecto de la Primera Línea del Metro de Bogotá PLMB – Tramo 1 y realizar las actividades, estudios técnicos y contratar la ejecución de la Fase 2 de la PLMB. Realizar las intervenciones en espacio público para la conexión del Regiotram de Occidente con el sistema de transporte público de la ciudad. Apoyar con recursos técnicos, financieros y administrativos la estructuración de todos los proyectos férreos que permiten la integración regional, entre estos los proyectos Regiotram del Norte y Regiotram del sur”

La expansión de la red de Metro contempla la realización de proyectos liderados por la EMB o proyectos férreos regionales, los cuales quedaron plasmados en el mencionado Acuerdo No. 761 de 2020 dentro del “Propósito 4: Hacer de Bogotá Región un modelo de movilidad, creatividad y productividad incluyente y sostenible”, donde se planteó el Programa General – Red de Metros con las siguientes metas:

- Alcanzar el 100% del proceso de contratación para la expansión de la PLMB-Fase 2,
- Alcanzar el 60 % del ciclo de vida del proyecto PLMB – Tramo 1
- Gestionar la inserción urbana del Regiotram de Occidente y diseñar una estrategia de apoyo a la estructuración del Regiotram del Norte.

El término proyecto de expansión de la PLMB o PLMB-Fase 2 es un término genérico usado desde la formulación del Plan de Desarrollo Distrital 20-24 y dentro del proceso de planeación de proyecto de la Empresa Metro de Bogotá para acotar inicialmente la intención de realizar un proyecto que permita el crecimiento de la red metro, a partir del alcance inicial de esta red que corresponde al proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá, cuya ejecución y operación se realizará a través del contrato de concesión 163 de 2019. Dicho término fue usado de forma amplia debido a que la funcionalidad del proyecto de expansión, si este se desarrollara a través de una línea nueva o una extensión del PLMB o una combinación de ambos, fue definido por medio de un estudio técnicos de alternativas. En este sentido, luego de culminar los estudios a nivel de prefactibilidad se determinó un proyecto de expansión de la PLMB o la fase 2 de la PLMB, correspondiente al proyecto Línea 2 del Metro de Bogotá (L2MB).

3.3 PROCESO DE SELECCIÓN DEL MODO METRO EN EL CORREDOR

Dentro del Acuerdo Distrital No. 761 de 11 de junio de 2020 “Por medio del cual se adopta el plan de desarrollo económico, social, ambiental y de obras públicas del Distrito capital 2020-2024 “Un nuevo contrato social y ambiental para la Bogotá del siglo XXI” propuesto por la alcaldesa Claudia Nayibe López, se incluye en el Artículo 46 Proyectos Estratégicos, el Propósito 4 que indica “Hacer de Bogotá - Región un modelo de movilidad multimodal, incluyente y sostenible, se prioriza: la red de metro regional, conformada por la construcción de la fase I **y la extensión de la fase II de la Primera Línea del Metro hasta Suba y Engativá, el Regiotram de Occidente**, y el Regiotram del Norte, estructurada y en avance de construcción. Cable de San Cristóbal construido y cable en Usaquén estructurado.

Iniciativas de ampliación de vías y acceso a la ciudad como son: AutoNorte, ALO Sur, Avenida Centenario, Av. 68, Av. Ciudad de Cali, extensión troncal Caracas, infraestructura de soporte del transporte público, corredor verde de la carrera Séptima, Avenida Circunvalar de Oriente, Sistema Público de Bicicletas, proyectos de infraestructura cicloinclusiva como la Cicloalameda Medio Milenio y espacio público. Una estrategia de centros de des-consolidación de carga implementada. Ampliación y mejoramiento de la red de ciclorrutas. Estaciones del sistema Transmilenio ampliadas y/o mejoradas.

Para dar cumplimiento al Plan de Desarrollo y Plan de Gobierno y en ejercicio de sus funciones, **LA EMB** elaboró un documento en el cual constan los resultados del análisis de alternativas para la expansión de la PLMB Tramo 1 denominado “*IDENTIFICACIÓN PRELIMINAR DE ALTERNATIVAS PARA LA EXPANSIÓN DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ TRAMO 1 (PLMB – T1)*”.

En el citado estudio, **LA EMB** identificó las siguientes zonas con necesidad de cobertura que podrían lograrse a partir de la expansión del proyecto PLMB Tramo 1: 1) la zona noroccidental de la ciudad, donde se ubican las localidades de Engativá y Suba, y 2) el nodo de comercio y servicio de las localidades de Usaquén y Suba. Las expansiones hacia las mencionadas zonas tienen un soporte técnico desde el punto de vista de indicadores de transporte dado que se ha estimado que generan beneficios tanto para la PLMB Tramo 1 como para el sistema de transporte de la ciudad.

Las expansiones de la PLMB-T1 hacia las zonas indicadas en el considerando anterior han sido previamente incluidas en los estudios de planeación de transporte para líneas de metro para la ciudad de Bogotá y en instrumentos de planificación urbana vigentes.

Entre los estudios mencionados en el considerando inmediatamente anterior es posible referenciar los siguientes:

- a. Estudio “*Estudio de Factibilidad y Realización de un Sistema de Transporte Masivo para Bogotá*” realizado por el grupo *INECO-SOFREU* en el año 1981 y que definió el trazado de una Línea Prioritaria de 23.6 kilómetros que recorre las localidades de Bosa, Kennedy, Puente Aranda, Los Mártires, Santa Fe, La Candelaria, Chapinero, Barrios Unidos y Engativá.
- b. Estudio “*Rehabilitación de Corredores Férreos*” realizado por el grupo *Intermetro – SPA* realizado entre el año 1981 y 1990 y que definió el trazado de una Línea Prioritaria de 23 kilómetros que recorre las localidades de Ciudad Bolívar, Bosa, Kennedy, Puente Aranda, Puente Aranda, Los Mártires, Santa Fe, La Candelaria y Teusaquillo.
- c. Estudio “*Plan Maestro de Transporte Urbano de Santafé de Bogotá*” realizado por la agencia de Cooperación Internacional de Japón realizado en el año 1996 y que definió el trazado de una Línea Prioritaria de 40 kilómetros que recorre las localidades Bosa, Kennedy, Ciudad Bolívar, Puente Aranda, Antonio Nariño, Los Mártires, Teusaquillo, Barrios Unidos, Suba y Usaquén.
- d. Estudio “*Diseño Conceptual del Sistema Integrado de Transporte Masivo de la Sabana de Bogotá*” realizado por el grupo *INGETEC- BEHCTEL – SYSTRA* en el año 1997 y que definió el trazado de una Línea Prioritaria de 29.1 kilómetros que recorre las localidades de Kennedy, Puente Aranda, Los Mártires, Santa Fe, La Candelaria, Chapinero, Barrios Unidos y Engativá.
- e. Estudio “*Diseño conceptual de la red de transporte masivo metro y diseño operacional, dimensionamiento legal y financiero de la primera línea del metro en el marco del Sistema Integrado De Transporte Público-SITP- para la ciudad de Bogotá*” realizado por la *Unión Temporal SENER, ALG, GARRIGUES, SANTANDER, INCOPLAN y TMB* en el año 2008 y que definió el trazado de una Línea Prioritaria de 27.5 kilómetros - que definió el inicio del proyecto PLMB-T1, y que recorre las localidades de Kennedy, Puente Aranda, Los Mártires, Santa Fe, La Candelaria, Chapinero, Barrios Unidos y Usaquén.

Es necesario adelantar la planeación y la estructuración integral de la línea 2 del Metro de Bogotá y su articulación con otros proyectos de transporte de la región Bogotá – Cundinamarca (en adelante “la Línea 2”).

De acuerdo con su objeto social, está en cabeza de **LA EMB** adelantar la planificación y desarrollo de la Línea 2.

Conforme a lo definido en el artículo 12 de la Ley 1682 de 2013 los “Estudios De Ingeniería” que se adelantan para la ejecución de proyectos de infraestructura son: (i) Fase 1- Prefactibilidad; (ii) Fase 2 – Factibilidad, y (iii) Fase 3 Estudios y Diseños definitivos. En armonía con esta definición es que las actividades de maduración y estructuración integral de proyectos de infraestructura desarrollan, además, los componentes legal, financiero y de riesgos para realizar el diseño de la transacción y su preparación para un proceso licitatorio.

De acuerdo con la Ley 1682 de 2013 se entiende por Prefactibilidad *“la fase en la cual se debe realizar el prediseño aproximado del proyecto, presentando alternativas y realizar la evaluación económica preliminar recurriendo a costos obtenidos en proyectos con condiciones similares, utilizando modelos de simulación debidamente aprobados por las entidades solicitantes. El objetivo de esta etapa es surtir el proceso para establecer la alternativa de trazado que a este nivel satisface en mayor medida los requisitos técnicos y financieros.”*

El 21 de febrero de 2020, **LA EMB** y **LA FDN** suscribieron el Convenio Interadministrativo 068 de 2020 cuyo objeto consistió en: *“Aunar esfuerzos técnicos, económicos y administrativos para: (i) Realizar la formulación, análisis y priorización de alternativas para la expansión del PLMB-T1, y (ii) elaborar estudios y diseños a nivel de prefactibilidad de la alternativa seleccionada para la expansión de la PLMB-T1 y su articulación con otros proyectos de transporte de la región Bogotá – Cundinamarca. Las actividades, entregables, estudios y diseños objeto del presente Convenio serán únicamente los que se detallen en la Cláusula Segunda de este Convenio”* (en adelante el “Convenio 068”).

Que en la Cláusula Segunda del Convenio 068 denominada “Alcance del objeto”, se definieron las siguientes fases para el desarrollo del estudio de alternativas y los estudios y diseños a nivel de prefactibilidad del proyecto de expansión:

a. Fase 1 “Formulación de Alternativas”: *En esta fase se adelantará:*

I. *La validación y verificación de la zona hacia la cuál debe expandirse la PLMB-T1 (PLMB- T1) teniendo en cuenta el documento técnico de soporte denominado “IDENTIFICACIÓN PRELIMINAR DE ALTERNATIVAS PARA LA EXPANSIÓN DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ TRAMO 1 (PLMB – T1)”, desarrollado por la EMB.*

II. *Identificación y caracterización de alternativas de trazado, de alineamiento vertical, tipo de conexión con tramo 1 de la PLMB y disponibilidad de patio, para la alternativa de expansión, con base en los análisis del numeral I) anterior.*

b. **Fase 2 “Análisis de Alternativas”:** *Consiste en desarrollar un análisis de alternativas a través de una evaluación multicriterio, con base en información secundaria y teniendo cuenta una matriz de criterios, indicadores y pesos que será entregada previo al inicio de esta Fase por parte de la EMB, que permita identificar la solución de mejor desempeño, entre las alternativas identificadas en la Fase 1.*

El resultado principal de esta fase debe ser la definición de un “Proyecto de Expansión Priorizado” que puede estar compuesto por uno o más tramos de red e infraestructura complementaria, y que deberá estar acotado a la disponibilidad de recursos que se identifiquen en un análisis de fuentes de pago. El “Proyecto de Expansión Priorizado” deberá ser puesto a consideración del “Comité Técnico”, quien deberá aprobar continuar con la ejecución de la Fase 3 de este Convenio. En todo caso, la longitud total del “Proyecto de Expansión Priorizado” no deberá exceder los 16 kilómetros.

c. **Fase 3. “Estudios y Diseños a nivel de prefactibilidad”:** *Consiste en el desarrollo de estudios y diseños a nivel de prefactibilidad del “Proyecto de Expansión Priorizado”, basados en información exclusivamente secundaria.”*

Como resultado de las actividades desarrolladas en virtud del Convenio 068, **LA EMB** y **LA FDN**, tal y como consta en el acta 07 del 11 de septiembre de 2020 del Comité Técnico del Convenio, identificaron 13 alternativas posibles de expansión formuladas en el alcance correspondientes al Fase 1, lo cual dio paso a la Fase 2 del Convenio 068 de 2020. El día 18 de noviembre de 2020 el Comité Técnico del Convenio, en su sesión No. 9, revisó los resultados presentados por la UT Egis-Steer y la recomendación del Panel Técnico, luego de lo cual aprobó la alternativa que corresponde a una línea nueva sobre el corredor Calle 72 – Av. Ciudad de Cali como la alternativa de mejor desempeño, en el marco de la Fase 2 del Convenio 068.

Que adicionalmente, en el marco de la Fase 2 del Convenio 068, **LA FDN** desarrolló el *Entregable 3: Análisis de fuentes de pago para definir restricción presupuestal de la alternativa seleccionada en el Entregable 2*, el cual fue aprobado por el Comité Técnico en su sesión 08 del 13 de enero de 2021, en la cual se definió, con base en los análisis de fuentes de pago, un techo presupuestal estimado entre 12 y 14 billones de pesos de 2020, según posibles fuentes de pago del Distrito y la Nación, las cuales tendrán que ser validadas posteriormente en la etapa de factibilidad cuando el Proyecto se presente para acceder a la cofinanciación en el marco de las leyes y normas aplicables.

Posteriormente, el día 12 de enero de 2021, en la reunión del Panel Técnico, conformado a instancias del Comité Técnico, se realizó la exposición de la evaluación de las alternativas Calle 72 – Av. Cali y Calle 72 – Av. Cali – ALO en sus tipologías (mixta y subterránea), así como las posibles ubicaciones del patio-taller. Como resultado de la presentación, el Panel Técnico consideró viable la recomendación del “Proyecto de Expansión Priorizado”, correspondiente a la alternativa de línea independiente Calle 72 – Av. Cali – ALO en tipología subterránea, con la ubicación del patio-taller en el polígono de Fontanar del Río.

La FDN presentó la recomendación del “Proyecto de Expansión Priorizado” ante el Comité Técnico, en sesión No 11 del 13 de enero de 2021. El Comité Técnico, una vez analizada y validada la propuesta presentada, procedió a impartir la definición del “Proyecto de Expansión Priorizado”, requerido dentro de la Fase 2 del Convenio 068 y la cual sería desarrollada en la Fase 3 Estudios y diseño de prefactibilidad.

El Comité Técnico del Convenio, en sesión número 16 del 30 de marzo de 2021, aprobó el Producto No. 03 “análisis de nodo de terminación y definición del proyecto con base en restricción presupuestal” en el cual se estableció que el “*Proyecto de Expansión Priorizado*” corresponde a una línea independiente de 16 km, que se integra con la Primera Línea de Metro de Bogotá en la estación Calle 72, que recorre el trazado seleccionada hasta la localidad de Suba donde se ubicará el nodo de terminación de la línea en su patio correspondiente.

Dado que el “*Proyecto de Expansión Priorizado*” se definió como una línea adicional a la Primera Línea del Metro de Bogotá – Tramo 1 y sus futuras extensiones al hacia el norte de la ciudad, este proyecto se configura como la Línea 2 de la red. En este sentido, de ahora en adelante, se determina que el proyecto de expansión de la PLMB o la fase 2 de la PLMB será desarrollado a través del proyecto Línea 2 del Metro de Bogotá.

En sesión No. 17 del 5 de abril de 2021 del Comité Técnico del Convenio 068 se realizó seguimiento al avance a la Fase 3. “*Estudios y Diseños a nivel de prefactibilidad*”, en la cual se evaluaron los productos entregados el 31 de marzo de 2021, determinando que se cuenta con las definiciones suficientes en lo técnico avanzar en la contratación de la etapa de factibilidad y estructuración integral del proyecto Línea 2 del Metro de Bogotá.

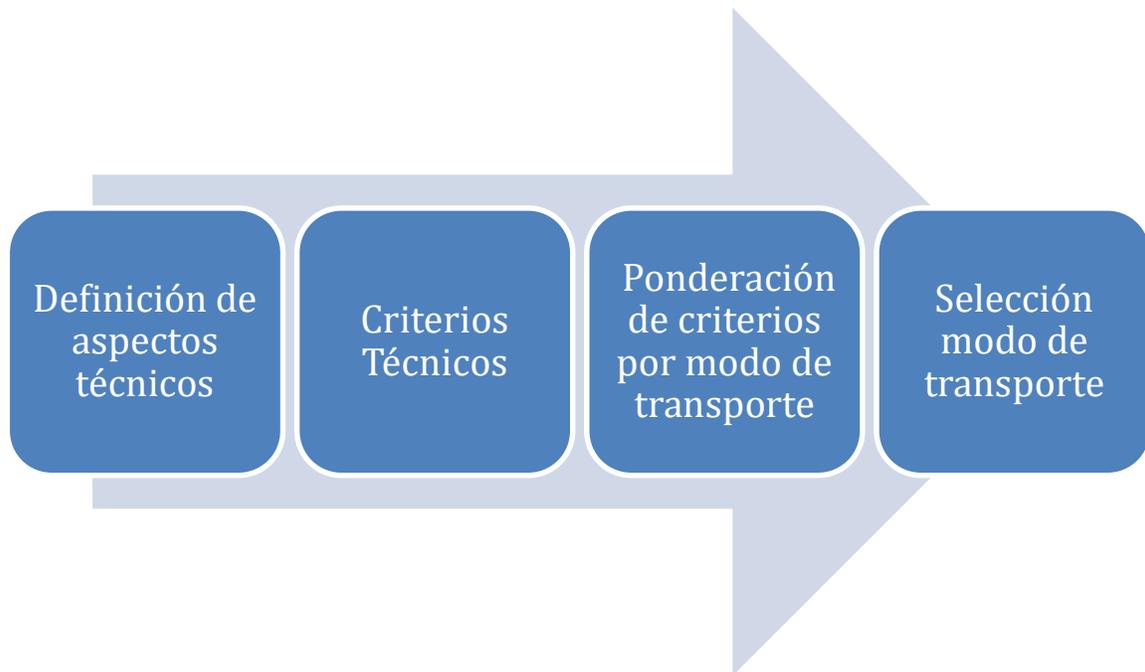
La actual estructura de **LA EMB** requiere de personal especializado y con experiencia para la planeación, estructuración y desarrollo del proyecto Línea 2 del Metro de Bogotá, lo cual hace necesario contratar una entidad que cuente con capacidad legal, técnica, institucional, así como con experiencia en la planeación y estructuración de proyectos de infraestructura de transporte en todas las etapas.

El 12 de abril de 2021, **LA EMB** y **LA FDN** suscribieron el Convenio Interadministrativo 0136 de 2021 cuyo objeto consistió en: Realizar la estructuración integral del proyecto Línea 2 del Metro de Bogotá, incluyéndolos componentes legal, de riesgos, técnico y financiero.

En el contrato Interadministrativo 0136 de 2021 viene implícito de que la tipología vehicular seleccionada es un sistema de metro pesado, pero siendo una obligación el cumplimiento de la **Resolución Número 202023040013685** del Ministerio de transporte del 29 de septiembre de 2020 por el cual se reglamenta el artículo 2 de la Ley 310 de 1996 modificado por artículo 100 de la Ley de 1955 de 2019 en el marco de la cofinanciación de los Sistemas de Transporte de Público Colectivo Masivo y se dictan otras disposiciones.

Con el propósito de dar cumplimiento al numeral **3. Validación de tecnologías y tipologías vehiculares**, en su apartado **A. Definición del esquema operacional y financiero del Anexo A** se plantearon diferentes talleres entre FDN y EMB en donde se acordó una metodología a seguir para confirmar que la tecnología seleccionada es la correcta para el proyecto.

Figura 2. Metodología de Análisis Multicriterio



Mediante los ajustes a los inventarios tecnológicos y la experiencia de los participantes en proyectos de transporte, se establecieron los aspectos técnicos principales tenidos en cuenta para desarrollar en la actualización de la matriz multicriterio. Dichos aspectos se desglosan a continuación:

- Tipo de combustible y de alimentación de los sistemas de transporte
- Vida útil de los sistemas de transporte
- Profundización del análisis sobre la relación entre el urbanismo (e integración urbana) y la capacidad de los sistemas
- Impacto ambiental
- Predios e impacto sobre el costo de los proyectos
- Impacto social o “Sombra social” asociada a las infraestructuras de transporte
- Impacto visual / arquitectónico de los sistemas de transporte

Los anteriores componentes se agruparon dentro de cinco criterios técnicos utilizados para la selección de la tecnología de transporte más pertinente para el Corredor Centro – Engativá – Suba. Los cinco criterios de selección se enuncian a continuación:

Figura 3. Criterios Seleccionados



- Satisfacción de la demanda: Criterio fundamental, relativo al diseño de un sistema de transporte, es crítico en la limitación del sistema en su capacidad de servicio a futuro
- Beneficio Social: Criterio que conjuga el conjunto de características naturales del Corredor físico de transporte, con los beneficios sociales en ahorro de tiempo para los usuarios.
- Inserción Urbana: Criterio que vincula la capacidad de transformación urbana que tiene un corredor de transporte en cuanto a las afectaciones urbanas que conlleva.
- Impacto Ambiental: Criterio que percibe los efectos positivos de la implementación de una tecnología limpia y esta impactada por las características físicas de los equipos con los cuales se opera el Corredor de transporte
- Financieros: Criterio fundamental, relativo al costo de implementación de un sistema de transporte.

3.4 RESUMEN CIFRAS DE DEMANDA DE LA LÍNEA CON BASE EN EL ESTUDIO DE DEMANDA

A partir del modelo de transporte de 4 etapas con el que cuenta la ciudad, se realizaron diferentes simulaciones de la L2MB bajo los siguientes supuestos generales, que se incluye de manera desarrollada en el *documento A1. Modelo de Transporte*:

- Periodo de modelación: Hora pico de la mañana (6:30 a.m - 7:30 a.m)
- Población y usos del suelo: Se definieron a partir de ejercicios de proyecciones de desarrollo de ciudad realizados por la Secretaría Distrital de Planeación y la Secretaría Distrital de Movilidad.
- Cortes temporales de modelación: Se definieron teniendo en cuenta lo especificado en la resolución No. 20203040013685 del Ministerio de Transporte, donde se establece que el modelo de transporte deberá ser evaluado para el año de implementación del proyecto y posteriormente cada 5 años para todo el periodo de diseño. Para cada uno de estos cortes temporales se realizó el proceso de 4 etapas.
 - 2032
 - 2037
 - 2042
 - 2047
 - 2052

Carga máxima

Con base en el análisis de cargas de los escenarios de Demanda y Sensibilidad, se concluye que el escenario crítico que se debe plasmar en los diseño es el obtenido con la sensibilidad de disminuir los tiempos acceso a estaciones a 2,5 minutos el cual tiene la carga máxima para L2MB el año 2042 de 49709 usuarios, los cual se logrará generando *acceso satelitales* ubicados en diferentes extremos del entorno urbano para generar cruces seguros de los usuarios e ingreso a las estaciones de forma rápida y organizada. Todos los módulos de acceso se proyectan con áreas para la ubicación de escaleras fijas, escaleras eléctricas y ascensores.

En las siguientes tablas se muestra la carga por cada corte temporal evaluado.

Tabla 1. Carga escenario 2042 - Escenario Diseño

Estación	Sentido Norte - Sur			Sentido Sur - Norte		
	Ascensos	Descensos	Carga	Ascensos	Descensos	Carga
1-Calle 72	0	35687	0	11989	0	11989
2 - NQS	303	6919	35687	584	491	12082
3 - Av. 68	2393	9798	42304	1877	3304	10656
4 - Av. Boyacá	2589	1263	49709	507	2478	8685
5 - Av. Cali	5088	989	48383	538	2191	7032
6 - Calle 80	4886	5154	44285	5418	1741	10709
7 - Carrera 91	10181	243	44552	430	1281	9858
8 - Humedal	4497	12	34614	115	1540	8434

Estación	Sentido Norte - Sur			Sentido Sur - Norte		
	Ascensos	Descensos	Carga	Ascensos	Descensos	Carga
9 - ALO Sur	11082	26	30128	87	2486	6035
10 - ALO Norte	12972	143	19072	1	4301	1735
11 - Fontanar	6243	0	6243	0	1735	0
Total	60234	60234		21546	21546	

3.5 VALIDACIÓN MULTICRITERIO DE TECNOLOGÍAS VEHÍCULARES

3.5.1 PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS

Para la ponderación de los criterios se basa en los pesos de criterios semejantes de análisis multicriterio realizados anteriormente, manteniendo la proporcionalidad entre dichos criterios-

La ponderación de los cinco criterios definidos para la matriz multicriterio se basa principalmente en las ponderaciones ya efectuadas en matrices multicriterio realizados en estudios anteriores ejecutados en la Empresa de Metro de Bogotá, como fueron para la sección de trazado de la PLMB y de la Expansión de la PLMB, que denotó en el corredor de la L2MB.

Los análisis multicriterio para seleccionar un trazado que se han ejecutado contiene varios criterios, entre ellos cuatro criterios considerados en el análisis multicriterio a evaluar, pero el criterio de “Satisfacción de Demanda”, va directamente relacionado con la validación de la tecnología a evaluar, siendo un criterio que en este tipo de matrices multicriterio tiene tanto peso como los financieros, como se puede revisar en los documentos de la estructuración del Metro de la 80 en Medellín.

Por las consideraciones aportadas para definir los pesos de los criterios, se obtiene un total de 89,5% en la sumatoria de pesos, los cuales deben sumar 100%, por lo que se realiza una proyección de los mismos manteniendo la proporcionalidad entre los pesos.

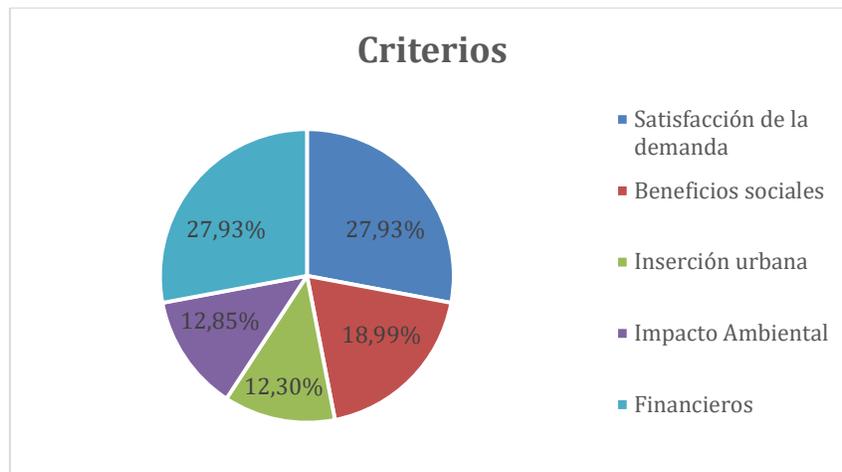
En la siguiente tabla se presente el resumen de los cálculos realizados y resultados obtenidos.

Tabla 2. Ponderación de Criterio

Criterio Técnico	PONDERACION			
	Pref. PLMB ¹	Pref. Exp PLMB ²	Pond. inicial	Pond Final
Satisfacción de la demanda	NA	NA	25,00%	27,93%
Beneficios Sociales	16%	18%	17,00%	18,99%
Inserción urbana	12%	10%	11,00%	12,29%
Impacto Ambiental	10%	13%	11,50%	12,85%
Financieros	25%	25%	25,00%	27,93%
			89,50%	100,00%

Los resultados de la ponderación son para los criterios definidos son los siguientes:

Figura 4. Ponderación de Criterios



Al insertar el Metro Pesado Subterráneo en la ciudad su impacto es menor en la arquitectura y el paisajismo del corredor de transporte y contribuye a la integración exitosa con los iconos clave de la ciudad.

La tecnología de Metro se inserta en la ciudad y se adapta en el largo plazo a las evoluciones, tanto demográficas como urbanísticas.

¹ Estudio comparativo de alternativas de ejecución por tramos y tipologías de la primera línea de metro para la ciudad de Bogotá (PLMB), con identificación y cuantificación de ahorros que optimicen el beneficio - Entregable 3, Estudios de alternativas para optimizar el diseño de la PLMB (Anexo 1)

² Contrato FDN 033 de 2020: Formulación, análisis y priorización de alternativas para la expansión del PLMB-T1, y elaborar los estudios y diseños a nivel de prefactibilidad de la alternativa seleccionada para la expansión de la PLMB-T1 y su articulación con otros proyectos de transporte de la Región Bogotá – Cundinamarca. Entregable 2 – Evaluación multicriterio de alternativas (Anexo 2)

La funcionalidad y la transformación del espacio público marca las principales características para la definición de la tecnología a utilizar. La introducción de un sistema el metro en una zona ya establecida impone grandes retos en términos espaciales, generando una verdadera transformación de la movilidad urbana.

Las variables relacionadas con la satisfacción de la demanda se consideran en mayor medida el criterio de más peso, entendiendo la importancia que tiene una tecnología de garantizar un potencial crecimiento de oferta al mediano y largo plazo para horizontes de tiempo superiores a 30 años.

De igual manera el criterio técnico relacionado con el financiamiento tiene gran importancia en relación con los costos de inversión y de operación que cada una de las tecnologías requiere.

Estos criterios son utilizados para la evaluación de cada una de las alternativas de transporte, a partir de la asignación de una ponderación realizada, Para la evaluación de cada criterio se definieron variables cuantitativas que representan de manera significativa el criterio, asignándoles un peso proporcional de las variables dentro cada criterio.

Para definir las variables cuantitativas a cada criterio se realizaron talleres entre FDN y EMB en los que se acordó seleccionar variables muy significativas y representativas de cada criterio:

1. Para Satisfacción de la demanda, se decidió la variable de revisar la capacidad teórica máxima de la tecnología, para conocer si es una tecnología factible para absorber la demanda estimada del corredor
2. Para Beneficios Sociales, se consideró la variable de comercial de la tecnología, al ser una variable que está directamente relacionada con el ahorro tiempo para el usuario.
3. Para Inserción Urbana, se consideró la afectación de área necesaria para la integración del sistema, ya que va directamente relacionado con los trabajos de urbanismo que serían necesarios a realizar.
4. Para Impacto Ambiental, como variable representativa se tomó la comparativa de emisiones de CO2 según la tecnología a implementar.
5. Para Financieros, se decidió tomar 2 variables, la de OPEX, según ratios de otros proyectos de referencia de las alternativas de tecnología seleccionada; y la de CAPEX solo de la tipología del Material Rodante asociado a la tecnología, para tener una referencia en cada caso, por ser representativa del análisis multicriterio enfocado a la validación de la tecnología y tipología requerida en la Resolución

En la siguiente tabla se muestra las variables representativas de cada criterio.

Tabla 3. Variables definidas por Criterio

Criterio Técnico	Variable	
	Descripción	Unidades
Satisfacción de la demanda	Capacidad teórica de la tecnología en hora pico	pasajeros transportados por hora por dirección (PPHPD)
Beneficios Sociales	Velocidad comercial de operación promedio observada de la tecnología	kilómetros por hora (km/h)
Inserción urbana	Integración del sistema en su entorno urbano	área ocupada en superficie para la implementación de la línea, asumiendo estaciones tipo y ancho del corredor de circulación (m ²)

Impacto Ambiental	Cantidad de CO2 emitida por el vehículo	Emisión de gramos de CO2 equivalente emitida por pasajero en hora pico (g de CO2/pasajero en HP)
Financieros	Costo de mantenimiento (COP anual)	costo promedio anual de operación y mantenimiento (COP)
	Costo de Inversión de Tecnología vehicular en los 20 años de operación	costo de inversión en material rodante requerido para cubrir la demanda requerida, asumiendo un periodo de 30 años de operación, en millones de USD

A cada variable, a partir de los resultados obtenidos de cada tecnología analizada, se definió una proporcionalidad lineal de los resultados a una asignación a una puntuación de 1 a 5 a cada variable siendo 1 la menor y 5 la de mayor puntaje, según cumplan con el parámetro o rango de cumplimiento definido.

La asignación de la calificación de 1 a 5 a las variables se define a partir de una relación lineal de intervalos iguales que incluya los resultados obtenidos de las tecnologías seleccionadas de cada variable. Los intervalos definidos son proporcionales desde un valor de cero, hasta un quinto intervalo que incluya el mayor valor obtenido. La relación lineal de la asignación de puntos respecto a la relación lineal definida va en función de la variable.

3.5.2 TECNOLOGÍAS VEHICULARES PARA EVALUAR

Entre las experiencias recientes en Colombia, se pueden considerar inicialmente tres tecnologías vehiculares o de sistema que dentro de categoría de transporte masivo.

Tabla 4. Tecnologías analizadas

Familia Tecnológica	Tecnología	Descripción
Sistemas Varios	Autobuses de Tránsito Rápido (Bus Rapid Transit - BRT):	Tecnología basada en buses que opera normalmente en carriles con derecho de vía exclusivo en superficie. Con el fin de responder a los niveles de demanda se asume una tipología de BRT de altas prestaciones con dos carriles de operación continuos por sentido, con intersecciones a desnivel en puntos críticos y con configuraciones de estaciones que permitan operar buses articulados y biarticulados.
Sistemas ferroviarios de capacidad intermedia	Tren ligero (Light Rail Transit—LRT)	Tecnología ferroviaria urbana que cuenta con derecho exclusivo de vía y opera con sistemas de control avanzados. Su capacidad depende del tamaño de material rodante, pero esta se define como intermedia, superior a la de una tecnología tranviaria y menor a la tecnología de metro pesado.
Sistemas ferroviarios de alta capacidad	Metro pesado o Convencional - MRT	Tecnología ferroviaria urbana de alta capacidad y prestaciones. Cuenta con derecho exclusivo de vía, segregación continua (a nivel, elevado o subterráneo) y sistemas de control avanzados para operar a intervalos reducidos. Su capacidad depende del tamaño de

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E4 – Documento de requisitos para cofinanciación Sistemas de Transporte – Anexo A – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0003_VC

		material rodante, pero esta es superior a la de una tecnología de metro ligero.
--	--	---

Como referencia de la tecnología analizada se toma información secundaria de proyectos en implementación en Bogotá, y con las siguientes características:

Tabla 5. Características Tecnologías analizadas

Tecnología	BRT	LRT	Metro
Proyecto de referencia	Transmilenio Av. 68 ³	Regiotram de Occidente ⁴	L2MB
Infraestructura	A nivel. 4 carriles viales exclusivos, 2 en cada sentido entre estaciones. Estaciones W1+W2+W3, con 2 carriles viales en cada sentido y andén central.	A nivel. 2 vías férreas, 1 en cada sentido. En Estaciones, 2 vías férreas, 1 en cada sentido y andenes laterales. Con pasos férreos elevados en cruce de vías principales.	Subterráneo. 2 vías férreas (1 por sentido), con 10 estaciones subterráneas. Un tramo elevado con una estación elevada.
Material Rodante y Capacidad (6 pasajeros/m2)	Buses Biarticulados con capacidad de 250 pasajeros y Buses Articulado con capacidad de 150 pasajeros	Trenes de 105 metros con capacidad de 884 pasajeros Carga por eje 12,5 tn/eje	Trenes de 145 metros con capacidad de 1.800 pasajeros Carga por eje 18 tn/eje
Tracción	Alimentación tipo diésel	Alimentación eléctrica 1500V	Alimentación eléctrica 1500V
Sistemas Complementarios	Semaforización vial, y puertas de andén	Señalización ATP (con conductor) y con talanqueras en cruces vehiculares a nivel, y puertas de andén	Señalización GoA4 (sin conductor) y puertas de andén

3.5.3 EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE LOS CRITERIOS

Capacidad teórica para movilizar pasajeros

Para la evaluación de este criterio se tomó para el LRT y MRT como referencia valores de capacidad vehicular y frecuencia máxima para cada tecnología según Proyectos de referencia de cada tipología vehicular. Para el BRT se

³ Licitación Pública IDU-LP-SGI-031-2019: Construcción para la adecuación al Sistema Transmilenio de la Avenida Congreso Eucarístico (Carrera 68) desde la Carrera 9 hasta la Autopista Sur y obras complementarias en Bogotá, D.C. - ADENDA 2 02 PARAMETROS OPERACIONALES (Anexo 3)

⁴ CONTRATO DE CONSULTORIA No. 034 DE 2018: CONSULTORÍA ESPECIALIZADA PARA LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO REGIOTRAM DE OCCIDENTE: Documento de Estructuración Técnica Proyecto Regiotram de Occidente (Anexo 4)

solicitó información a Transmilenio el cual nos remitió información de cargas máximas, siendo así la estimación de su capacidad máxima teórica.

Variable	Unidad	BRT	LRT	Metro
Referencia	Proyecto	Transmilenio Av. 68 ⁵	Regiotram de Occidente ⁶	L2MB
Capacidad	pax/veh	250 biarticulado 150 articulado	884	1.800
Intervalo mínimo	segundos		240	85
Frecuencia	veh/hora		15	42
Capacidad Máxima	pax por hora por dirección	51.610	13.260	75.600

Hay que destacar la evaluación del primer criterio: Capacidad teórica de la tecnología en hora pico en el modo de Metro Ligero. Se aprecia que no es una tecnología factible para la demanda máxima estimada para el escenario de diseño del corredor de la L2MB estimada en 49.709 pasajeros.

Siguiendo la metodología de asignación de puntuación de las variables indicada en el numeral 3.5.1, se realiza una proporcionalidad lineal entre el valor máximo mencionados en intervalos iguales. Asignando 5 al intervalo más favorable a la variable y 1 al intervalo menos favorable de la variable.

Criterio Técnico	Variable	Unidad	Peso de calificación				
			1	2	3	4	5
Satisfacción de la demanda	Capacidad teórica para movilizar pasajeros – “C”	pasajeros transportados por hora por dirección (PPHPD)	0 ≤ C < 17.000	17.000 ≤ C < 34.000	34.000 ≤ C < 51.000	51.000 ≤ C < 68.000	68.000 ≤ C < 85.000

Por lo que la variable se le asigna la siguiente puntuación

Tipología	BRT	LRT	Metro
Capacidad Máxima (pax)	51.610	13.260	75.600
Calificación criterio (1- 5)	4	1	5

Velocidad comercial de operación promedio observada de la tecnología

⁵ Radicado Transmilenio 2022-EE-06286 (Anexo 5)

⁶ CONTRATO DE CONSULTORIA No. 034 DE 2018: CONSULTORÍA ESPECIALIZADA PARA LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO REGIOTRAM DE OCCIDENTE: Documento de Estructuración Técnica Proyecto Regiotram de Occidente (Anexo 4)

Para la evaluación de este criterio se tomó como referencia valores de velocidad comercial para cada tecnología según Proyectos de referencia de cada tipología vehicular seleccionada.

- Para el BRT se toma el valor de las estadísticas de las troncales remitido por Transmilenio⁷.
- Para el LRT, se tomó la velocidad en zona urbana del Regiotram de Occidente⁸, calculándola a partir de la longitud del recorrido por el tiempo que tarda.
- Para el metro se tomó la velocidad indicada en el modelo operacional de la L2MB

Variable	Unidad	BRT	LRT	Metro
Referencia	Proyecto	Transmilenio	Regiotram de Occidente	L2MB
Velocidad Comercial	Km/hora	30,50	35,21	41,66

Siguiendo la metodología de asignación de puntuación de las variables indicada en el numeral 3.5.1, se realiza una proporcionalidad lineal entre el valor máximo mencionados en intervalos iguales. Asignando 5 al intervalo más favorable a la variable y 1 al intervalo menos favorable de la variable.

Criterio Técnico	Variable	Unidad	Peso de calificación				
			1	2	3	4	5
Beneficios Sociales	Velocidad comercial de operación promedia observada de la tecnología	kilómetros por hora (km/h)	0 km/h ≤ (V) < 10 km/h	10 km/h ≤ (V) < 20 km/h	20 km/h ≤ (V) < 30 km/h	30 km/h ≤ (V) < 40 km/h	40 km/h ≤ (V) < 50 km/h

Por lo que la variable se le asigna la siguiente puntuación

Tipología	BRT	LRT	Metro
Velocidad Comercial (Km/h)	30,50 km/h	35,21 km/h	41,66 km/h
Calificación criterio (1- 5)	4	4	5

Integración del sistema en su entorno urbano

⁷ Radicado Transmilenio 2022-EE-06286 (Anexo 5)

⁸ CONTRATO DE CONSULTORIA No. 034 DE 2018: CONSULTORÍA ESPECIALIZADA PARA LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO REGIOTRAM DE OCCIDENTE: Documento de Estructuración Técnica Proyecto Regiotram de Occidente (Anexo 4)

Para la evaluación de este criterio se estima la superficie necesaria para la implementación de la tecnología. Esto se aproxima como el área ocupada en superficie para la implementación de la línea, asumiendo estaciones tipo y ancho del corredor de circulación (m²), así como del área necesaria en Patios y Talleres para su Operación y Mantenimiento.

Para el cálculo del área afectada en el corredor de la línea se tomará la longitud total de 15,5 km según la factibilidad de la L2MB, y 11 estaciones, que según el sistema se verificará por las secciones requeridas.

Para el cálculo del área de Patios y Talleres se realizará una proporcionalidad a la flota requerida para el corredor de la L2MB según tipología respecto a la flota de cada proyecto, y el área de Patios de cada proyecto.

Para el BRT, tomando como ejemplo el documento de Parámetros Técnicos Operacionales de la Troncal Avenida 68 entre la Carrera 7 y la Autopista Sur (Av.Nqs), para Sistema Transmilenio, en donde cuando no hay estaciones se necesita un ancho de 15,0 metros y cuando hay estación de Transmilenio 19,0 metros.

Figura 5. Sección vial BRT

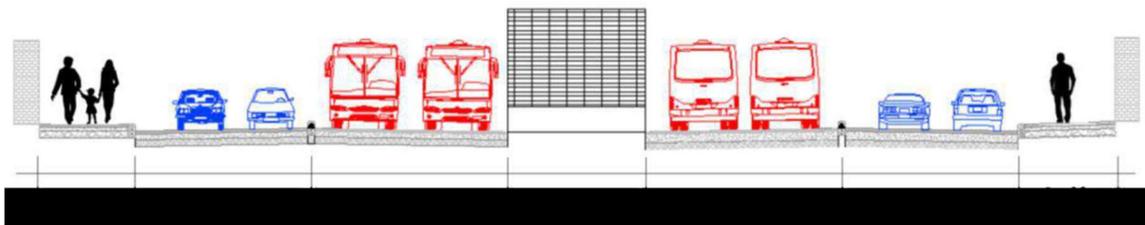
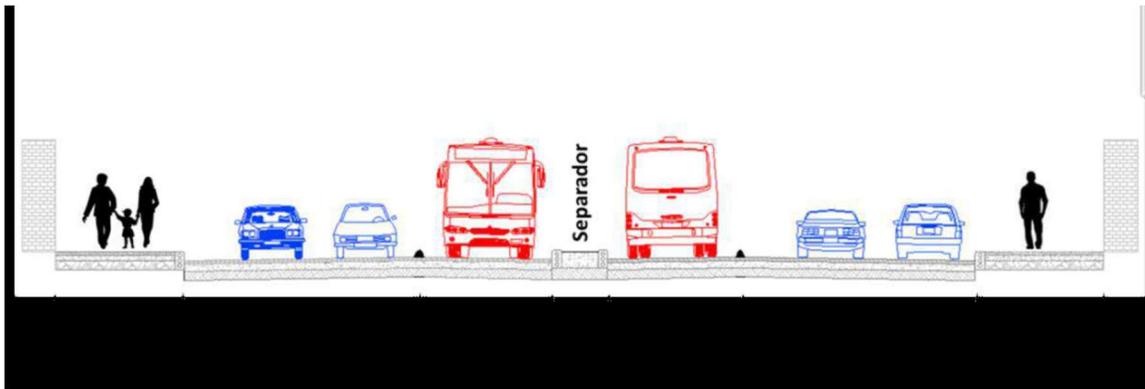
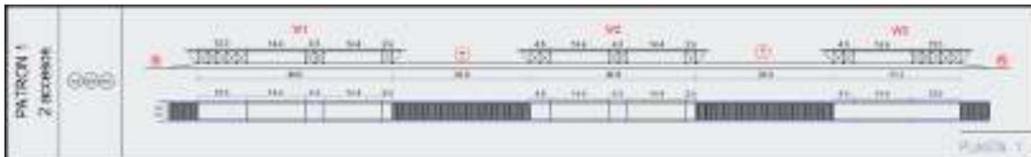


Figura 6. Sección en planta Estación Metro

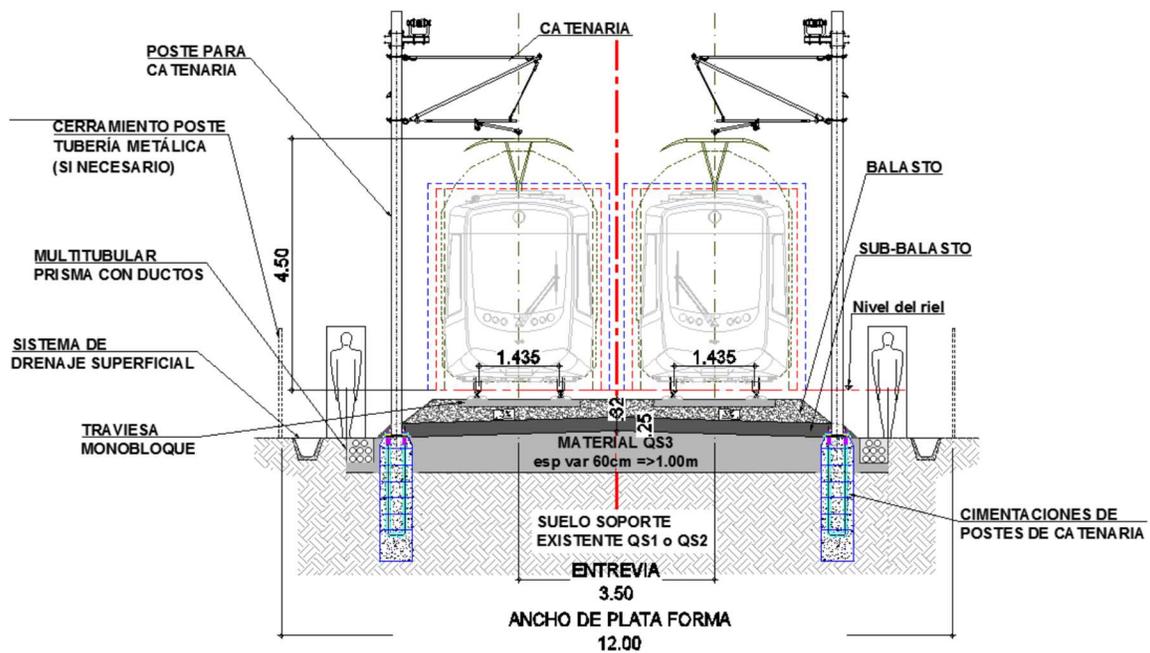


Teniendo una longitud la Estación de combinación W1+W2+W3 de 202,4 metros.

El área necesaria para los Patios y Talleres se considera a partir de la indicada en el documento de Transmilenio de la AV.68⁹, el cual indica un área de 55.683 m² para una flota operacional biarticulado equivalente de 142 buses (96 biarticulados + 64 articulados), en el supuesto para la operación en el corredor de la L2MB se considera una flota operacional biarticulada equivalente de 202 buses, por parámetros de operación y mantenimiento de tener en reserva un 10% de flota se obtiene 223 buses biarticulados equivalente, por lo que se estima un área de Patios y Taller proporcional de 87.446 m².

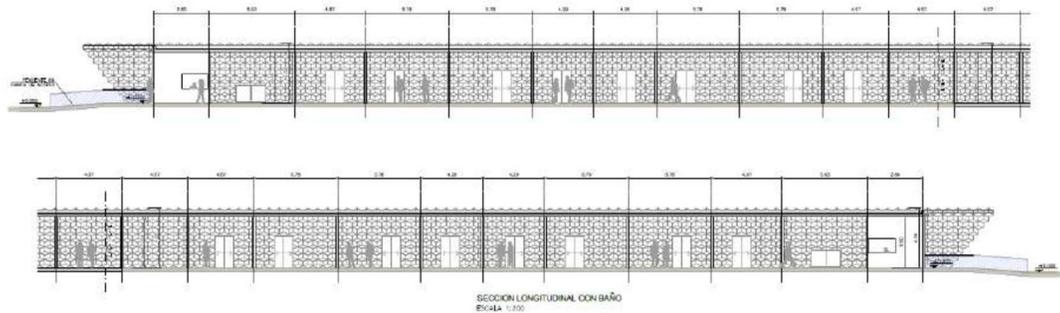
Para un LRT tomando de referencia secciones del Regiotram de Occidente se puede considerar que en donde no hay estaciones se necesita un ancho de 12 metros y cuando hay estación de se precisa 20 metros, añadiendo un andén central de 8 metros., siendo la longitud de las estaciones de LRT de 120 metros.

Figura 7. Sección transversal LRT



⁹ Licitación Pública IDU-LP-SGI-031-2019: Construcción para la adecuación al Sistema Transmilenio de la Avenida Congreso Eucarístico (Carrera 68) desde la Carrera 9 hasta la Autopista Sur y obras complementarias en Bogotá, D.C. - ADENDA 2 02 PARAMETROS OPERACIONALES (Anexo 3)

Figura 8. Perfil Típica LRT

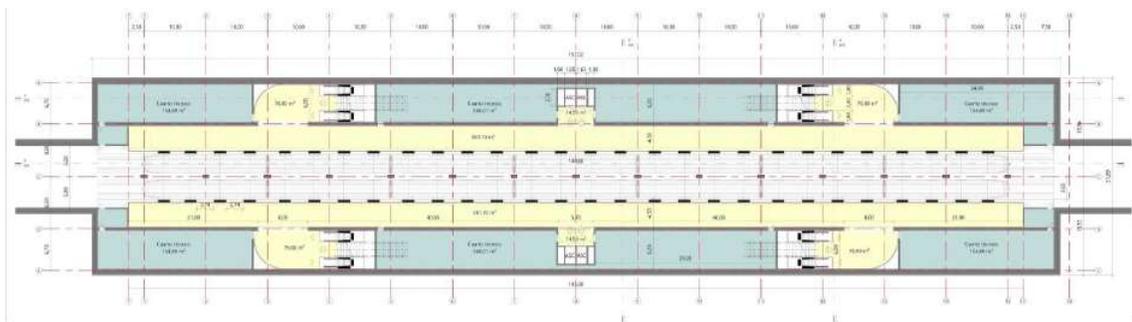


Para el cálculo de Patios y Talleres se indica que en el ANEXO 16 - TALLERES Y COCHERAS¹⁰ del proyecto del Regiotram Norte, que se necesita un área en el predio denominado El Corzo de 66.752 m², para estacionar 18 trenes de 100 metros. En el supuesto no factible, por el intervalo entre trenes necesarios (65 segundos) que no cumpliría la tecnología de LRT para poder satisfacer la demanda de 49.709 pphps del corredor de la L2MB, con la capacidad de los trenes de 884 pasajeros y a una velocidad comercial de 35,21 km/h, se requerirían se requeriría en Hora punta una flota de 50 trenes, por parámetros de mantenimiento y operación, sería un total de 56 trenes. Efectuando la proporcionalidad al área de cocheras, sumándosela al resto de instalaciones necesarias para el Patio y Taller, se obtendría un área total de 207.672 m².

En el sistema Metro de la L2MB, al ser una infraestructura principalmente subterránea y luego elevada, la afectación de la línea es en la transición de subterráneo a elevado, de una longitud de 300 por 12 metro de ancho.

Para el Metro siendo subterráneo, dado que se precisa realizar las estaciones a cielo abierto, afectando una superficie aproximada de 160 metros por 30 metros, se asume esta condición crítica, aun cuando esta área se restituye posteriormente.

Figura 9. Sección en planta Estación Metro



Según la información de factibilidad el predio requerido para las instalaciones del Patio y Taller para el sistema Metro de la L2MB es de 20,39 hectáreas para 25 trenes.

¹⁰ CONTRATO DE CONSULTORIA No. 034 DE 2018: CONSULTORÍA ESPECIALIZADA PARA LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO REGIOTRAM DE OCCIDENTE - Plano de Talleres y Cocheras de Regiotram de Occidente UT09_PL_T&C_V2 (Anexo 6)

En resumen, consolidando toda esta información se obtiene por medio de los siguientes cálculos el área de intervención urbana de cada sistema considerado.

Tipología		BRT	LRT	Metro
Corredor	Longitud (A)	15.500 m	15.500 m	15.500 m
Estaciones	No. (B)	11 ud	11 ud	11 ud
	Long. ©	202,4 m	120 m	160 m
	Long. Total (D) = (B * C)	2.226,4 m	1.320 m	1.760 m
	Ancho (E)	19 m	20 m	30 m
	Área Estaciones (D * E)	42.301,6 m ²	26.400 m ²	52.800 m ²
Línea	Longitud (A – D)	13.273,6 m	14.180 m	300 m
	Ancho	15	12	12
	Área Línea	199.104 m ²	170.160 m ²	3.600 m ²
Patios y Taller	Datos	87.446 m ²	207.672 m ²	203.900 m ²
Total		328.851 m ²	404.233 m ²	260.300 m ²

Siguiendo la metodología de asignación de puntuación de las variables indicada en el numeral 3.5.1, se realiza una proporcionalidad lineal entre el valor máximo mencionados en intervalos iguales. Asignando 5 al intervalo más favorable a la variable y 1 al intervalo menos favorable de la variable.

Criterio Técnico	Variable	Unidad	Peso de calificación				
			1	2	3	4	5
Inserción urbana	Integración en su entorno urbano (IU)	área ocupada en superficie para la implementación de la línea, asumiendo estaciones tipo y ancho del corredor de circulación, más el área estimada para Patios y Talleres (m ²)	450.000 > (IU) > 360.000	360.000 >(IU) ≥ 270.000	270.000 > (IU) ≥ 180.000	180.000 >(IU) > 90.000	90.000 >(IU)> 0

Por lo que la variable se le asigna la siguiente puntuación

Tipología		BRT	LRT	Metro
Inserción Urbana	(m ²)	328.851	404.233	260.300
Calificación criterio (1- 5)		2	1	3

Cantidad de CO2 emitida por pasajero transportado en la Hora Pico

Al ser el metro convencional y el metro ligero tecnologías limpias de tracción eléctrica, la emisión de CO2 se contabiliza por medio factor de emisión de CO2 por generación eléctrica del Sistema Interconectado. Según Resolución 000383 de 2011 de la UPME¹¹.

Para ello es necesario estimar el consumo de energía a partir del consumo de la flota en operación circulando en la hora pico. En ese sentido se estima los kilómetros recorridos por la flota y el consumo necesario para tracción se toma por datos de los proyectos de referencia. Para la tracción de los trenes de metro pesado se toma el estimado en la factibilidad de L2MB y para LRT se pondera según carga por eje y longitud de trenes de los proyectos de referencia.

Para el cálculo del BRT, se basa en el documento “INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MOVILES Y FUENTES FIJAS INDUSTRIALES AÑO 2018”¹², de la Secretaría Distrital de Ambiente, que nos indica los factores de emisión estimados por las tipologías vehiculares de articulados y biarticulados. En función de la flota requerida y los pasajeros anuales se obtiene la media de pasajeros transportados por vehículo, obteniendo los gramos CO2 por pasajero y kilómetro.

Una vez calculado la emisión de CO2 por la flota en la hora pico, se calcula respecto a los abordajes que se producen en la hora pico.

	BRT	LRT	MRT
Abordajes	81.780 pax	81.780 pax	81.780 pax
Velocidad Comercial	30,50 km/h	35,21 km/h	41,66 km/h
Flota Operacional HP	202 ud	50 ud.	21 ud
Distancia Operacional HP	7.393 km	2.113 km	1.050 km
Consumo		9,86 kWh/km ¹³	19,6 kWh/km
Factor CO2	1.490 gCO2/km		
Factor CO2		203 gCO2/kWh	203 gCO2/kWh
Emisión CO2 en HP	11.015.868 gCO2		
Emisión gCO2eq/pax	134,70 gCO2eq/pax	51,59 gCO2eq/pax	51,07 gCO2eq/pax

Siguiendo la metodología de asignación de puntuación de las variables indicada en el numeral 3.5.1, se realiza una proporcionalidad lineal entre el valor máximo mencionados en intervalos iguales. Asignando 5 al intervalo más favorable a la variable y 1 al intervalo menos favorable de la variable.

Criterio Técnico	Variable	Unidad	Peso de calificación				
			1	2	3	4	5

¹¹ Resolución 000383 de 2021 de UPME: Por la cual se actualiza el factor de emisión del Sistema Interconectado Nacional del año 2020 para inventarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y proyectos de mitigación de GEI (Anexo 7)

¹² SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE –SDA - Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual - INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MOVILES Y FUENTES FIJAS INDUSTRIALES AÑO 2018 (Anexo 8)

¹³ Factor estimado a partir de la L2MB ponderado según carga y longitud de trenes

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E4 – Documento de requisitos para cofinanciación Sistemas de Transporte – Anexo A – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0003_VC

Huella medioambiental	Cantidad de CO2 emitida por pasajero transportado (Ep)	gramos de CO2 equivalente emitida por pasajero en Hora Pico (g de CO2/pasajero)	150 >CO2≥ 120	120 >CO2≥ 90	90 >CO2≥ 60	60 >CO2≥ 30	30 >CO2≥ 0
-----------------------	--	---	---------------------	--------------------	-------------------	-------------------	------------------

Por lo que la variable se le asigna la siguiente puntuación

Tipología		BRT	LRT	Metro
Factor de emisión	(g de CO2/pasajero)	134,70	51,59	51,07
Calificación criterio (1- 5)		1	4	4

Costo de operación y mantenimiento

Para la evaluación de este criterio, se toma información de los diferentes proyectos de factibilidad últimos que sean estructurado en la ciudad de Bogotá:

- Para el BRT, se toma los datos de la estructuración del Transmilenio para los nuevos contratos de renovación de flota de fase I y II.¹⁴
- Para el LRT, se toma como referencia información de la estructuración del Regiotram de Occidente¹⁵
- Para Metro Pesado, se toma información e la estructuración del proyecto L2MB

Para conocer se parte del valor promedio anual de los años de operación de cada proyecto, respecto a la longitud recorrida anual en los proyectos de referencia, con la obtención de costo de referencia de OPEX/año*km, se estima los kilómetros recorridos anuales por cada tipología para poder atender la operación de la L2MB definida, para ello se revisa el factor de expansión entre los kilómetros recorridos en Hora Pico y anuales según los cálculos de L2MB

Por parte de Transmilenio se consiguió la información del costo de operación de los últimos 5 años de las troncales como de la longitud recorrida por la flota anual.

Por parte del proyecto de Regiotram de Occidente, se obtuvo el OPEX total en los 25 años de operación y los kilómetros recorridos por la flota anualmente,

En los estudios de factibilidad de la L2MB, se tiene el OPEX estimado total en los 30 años de operación y los kilómetros recorridos por la flota anualmente,

	BRT	LRT	MRT
OPEX total Proyecto de referencia	5.836.384.516.665	1.887.387.000.000	4.697.550.000.000
Años Proyectos de referencia	5 años	25 años	30 años
Kilómetros recorridos Proyectos de referencia	133.625.147 km	4.091.655	2.887.100 km

¹⁴ Radicado Transmilenio 2022-EE-03232 (Anexo 9)

¹⁵ Contrato de Consultoría Regiotram de Occidente - Anexo 2.1 Actualización Modelo Estudio Socioeconómico (Anexo 10)

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E4 – Documento de requisitos para cofinanciación Sistemas de Transporte – Anexo A – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0003_VC

OPEX/km*anual	8.735	18.451	54.236
Distancia Operacional HP	7.393 km	2.113 km	1.050 km
Factor de expansión Anual/HP	2,750	2.750	2.750
OPEX anual (Millones de COP)	177.618	107.204	156.585

Siguiendo la metodología de asignación de puntuación de las variables indicada en el numeral 3.5.1, se realiza una proporcionalidad lineal entre el valor máximo mencionados en intervalos iguales. Asignando 5 al intervalo más favorable a la variable y 1 al intervalo menos favorable de la variable.

Criterio Técnico	Variable	Unidad	Peso de calificación				
			1	2	3	4	5
Financiamiento	Costo de operación y mantenimiento (Op)	costo promedio anual de operación y mantenimiento (Millones de COP)	200.000 >(Op)≥ 160.000	160.000 >(Op)≥ 120.000	120.000 >(Op)≥ 80.000	80.000 >(Op)≥ 40.000	40.000 >(Op) ≥ 0

Por lo que la variable se le asigna la siguiente puntuación.

Tipología		BRT	LRT	Metro
Costo de Operación y Mantenimiento	(Millones de COP)	177.618	107.204	156.585
Calificación criterio (1- 5)		1	3	2

Costo de inversión en material rodante

Para la evaluación de este criterio, se toma información de los diferentes proyectos de factibilidad últimos que sean estructurado en la ciudad de Bogotá:

- Para el BRT, se toma los datos de la estructuración para la renovación de flota de fase I y II de Transmilenio, siendo un valor por Vehículo de 500.000 USD¹⁶ por bus biarticulado y 400.000 USD por bus articulado para el año 2016.
- Para el LRT, se toma información de la estructuración del Regiotram de Occidente, que tiene un costo de inversión de tecnología de 6.3000.000 USD¹⁷ por tren en el año 2018
- Para Metro Pesado, se toma información de la factibilidad de la L2MB, que tiene un costo de inversión de tecnología de 17.240.798 USD por tren. En el año 2022.

Para actualizar el valor por tren, se toma la inflación histórica de Estados Unidos.

¹⁶ 20160314_El Espectador Artículo Transmilenio vs. metro, en tarifas (Anexo 11)

¹⁷ Contrato de Consultoría Regiotram de Occidente - Anexo 2.1 Actualización Modelo Estudio Socioeconómico (Anexo 10)

Para hallar el valor del costo de inversión se tiene que calcular un número de vehículos según la demanda de hora pico definida, valores ya calculados en la variable de Integración del sistema en su entorno urbano, asumiendo un periodo de evaluación de 30 años. Se presenta en la siguiente tabla los parámetros requeridos y el resultado obtenido.

Tipología	BRT	LRT	Metro
Costo Material Rodante	500.000 USD	6.300.000 USD	17.240.798 USD
Año dato (2,7% inflación)	2016	2018	2022
Costo Material Rodante	589.385 USD	7.125.301 USD	17.240.000 USD
Flota Operacional	223 ud	56 ud	25 ud
Renovación	15 años	30 años	30 años
Total	262.865.709 USD	399.016.871 USD	431.019.950 USD

Siguiendo la metodología de asignación de puntuación de las variables indicada en el numeral 3.5.1, se realiza una proporcionalidad lineal entre el valor máximo mencionados en intervalos iguales. Asignando 5 al intervalo más favorable a la variable y 1 al intervalo menos favorable de la variable.

Criterio Técnico	Variable	Unidad	Peso de calificación				
			1	2	3	4	5
Financiamiento	Costo de inversión material rodante (MR)	costo de inversión en material rodante requerido para cubrir la demanda requerida, asumiendo un periodo de 20 años de operación, en miles de millones (M USD)	500 >(MR)≥ 400	400 >(MR)≥ 300	300 >(MR)≥ 200	200 >(MR)≥ 100	100 >(MR) ≥ 0

Por lo que la variable se le asigna la siguiente puntuación.

Tipología	BRT	LRT	Metro
Costo de inversión en material rodante (MR) (Millones de USD)	263	399	431
Calificación criterio (1- 5)	3	2	1

3.5.4 PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS

De acuerdo con las ponderaciones realizadas para cada una de las variables asociadas cada tecnología, se obtuvieron los siguientes resultados comparativos para cada uno de los criterios técnicos:

Se presenta a continuación el resumen de los resultados obtenidos en la evaluación de cada criterio según la asignación de los puntos a las variables:

Tabla 6. Resultados Evaluación Criterios

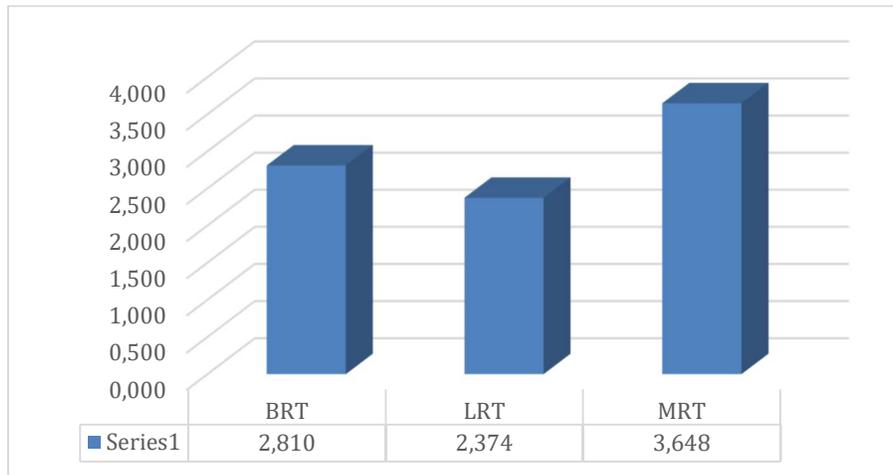
Criterio	Evaluación Criterios		
	BRT	Metro ligero	Metro convencional
Satisfacción de la demanda	4	1	5
Beneficios Sociales	4	4	5
Inserción urbana	2	1	3
Impacto Ambiental	1	4	4
Financieros	2	2,5	1,5

3.5.5 SELECCIÓN DE TIPOLOGÍA VEHICULAR

Para determinar la mejor alternativa de transporte se utilizó el análisis de la matriz multicriterio, la cual recogía los criterios técnicos presentados anteriormente.

En total se evaluaron 6 variables con diferentes métricas de evaluación, las cuales arrojaron como resultado que la tecnología de Metro Pesado es la alternativa más idónea para implementar en el Corredor de L2MB. Esto como resultado de evaluar dos condiciones: una con la demanda con el escenario 2042 con el proyecto del ferrocarril para una demanda de 49.709 PPHPS.

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación:



Los resultados de la ilustración anterior continúan validando que la tecnología más adecuada para implementarse en el Corredor de L2MB es el Metro Convencional o Pesado. Es importante considerar que la valoración tecnológica no solo debe estar considerada para satisfacer la demanda para el año de puesta a punto (2032), sino también a permitir el crecimiento de la oferta para las demandas potenciales que tiene su área de influencia, siendo esta un nodo de desarrollo de la ciudad, como lo propone el Plan de Ordenamiento Territorial, definiendo que un gran porcentaje de la edificabilidad de la vivienda derivada de la aplicación del Índice de Construcción y los usos diferentes a ella; de lo contrario se estaría limitando la capacidad de crecimiento si se considera una tecnología que solo se ajuste a la demanda proyectada a un solo horizonte de tiempo. Por esta razón también es importante considerar el escenario 2042 sin el ferrocarril, para considerar que puede haber una demanda mayor en caso de no realizarse el proyecto de ferrocarril y de esta manera garantizar que la tecnología seleccionada esté en capacidad de satisfacerla. Tipología que LRT no satisface, y con BRT se encuentra en los límites de satisfacerla.

Un proyecto de transporte colectivo subterráneo conlleva una remodelación de las vías por las que discurre, específicamente en las ubicaciones de las estaciones. Su ámbito de influencia no sólo está circunscrito a dichas vías, sino también a su entorno más próximo. Para apreciar el impacto de la inserción urbana de un metro pesado, se puede equiparar el espacio público a un ecosistema, donde cualquier modificación de un parámetro cambia el estado de equilibrio global. La mayor parte de proyectos de metro pesado se desarrollan en ecosistemas ya creados; con el objetivo de llegar a un nuevo equilibrio es necesaria la concertación de los diferentes agentes del ecosistema. Por tanto, el impacto de la implantación de un sistema metro pesado debería estar alineado con la consecución de una serie de propósitos relacionados con la mejora de la calidad de vida de los habitantes. Con este sistema, se persigue contribuir a dar respuesta a los derechos de los ciudadanos, actores fundamentales de la movilidad, y el desarrollo del entorno comunitario.

El Metro Convencional da respuesta a las restricciones que se relacionan con la segregación con el viario urbano y que está directamente relacionada con su alineamiento y con ello la posibilidad de implementarlo en diferentes niveles (subterráneo y elevado), que permite además una fácil accesibilidad tanto a estaciones como vehículos de metro pesado de personas, además de la conexión con otro tipo de movilidad como las bicicletas o las rutas del Sistema Integrado de Transporte Público - SITP.

La funcionalidad y la transformación del espacio público marca las principales características para la definición de la tecnología a utilizar. La introducción de un sistema el metro pesado en una zona ya establecida impone grandes retos en términos espaciales, conlleva la definición de un trazado que reequilibra la sección pública para dar espacio a los distintos actores: peatón, bicicleta, transporte público y la incorporación del paisaje, generando una verdadera transformación de la movilidad urbana.

La inserción urbana de un proyecto de transporte requiere de un ciclo de análisis de las tecnologías aplicables a las características físicas del terreno, a la demanda estimada y a la relación con las demás familias de variables de la matriz multicriterio, encontrando finalmente una tecnología que permita suplir las necesidades futuras tanto de la inserción como de los demás tópicos.

Comparar el metro pesado con un sistema BRT o con un Metro Ligero expone diferencias en su inserción urbana, calificadas dentro de la matriz. El sistema BRT requiere de una plataforma mucho más amplia para el sobrepaso o adelantamiento de los vehículos, mientras que el metro ligero logra insertarse en entornos urbanos complejos, optimizando la estructura existente teniendo una mayor velocidad de servicio.

El metro ligero requiere en su sección de un máximo de 16,00 metros, mientras el BRT requiere un máximo de 21,00 metros, es decir, éste requiere de espacio para poder operar en buenas condiciones con carril de sobrepaso necesario en el futuro como posibilidad de ampliación sin demeritar los niveles de servicio.

Esto significa que el BRT para alcanzar su máxima capacidad requiere de mayor uso de espacio (4 carriles en total, dos por sentido), que en algunos de los tramos del corredor pudiera existir la no disponibilidad de espacio sin afectar la movilidad activa y otros componentes del mobiliario urbano. Además, al ser los BRT vehículos con menor capacidad (150 pasajeros en configuración articulado o 250 en biarticulado) con respecto a los metros ligeros (442 pasajeros en configuración simple, 884 pasajeros en configuración doble acoplada), en las estaciones y paradas se da una cola de vehículos BRT, generando una mayor ocupación de la vía y colas al interior de las estaciones y paradas.

Con la concepción del metro pesado subterráneo se evita las complicaciones de espacio viario y urbano identificados en las tecnologías de BRT y LRT.

3.5.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y ROBUSTEZ

Mediante este análisis se pretende explorar al inducir cambios en las condiciones de partida del análisis multicriterio, para estudiar y descubrir el grado de sensibilidad de la solución óptima ante estos cambios.

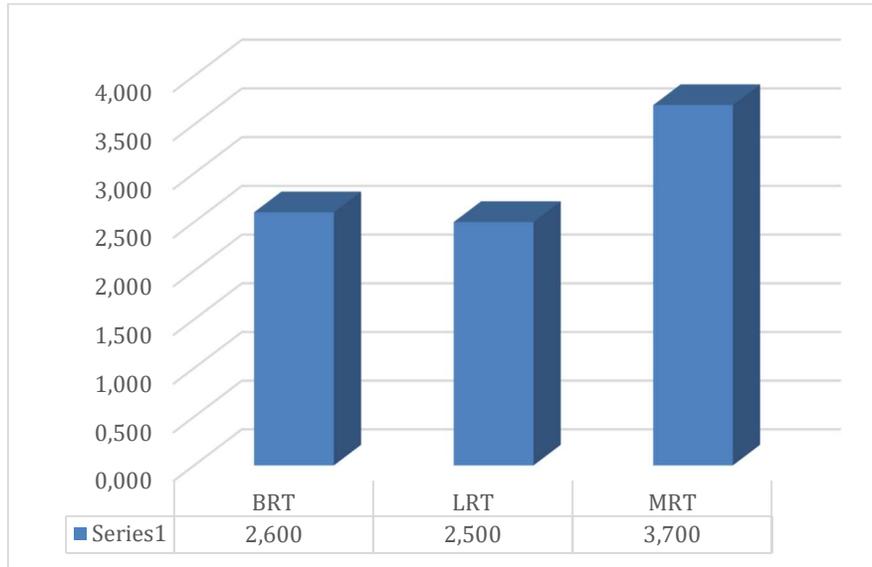
El proceso que lleva a una decisión a través de un análisis multicriterio depende de situaciones o proyecciones de situaciones que no se conocen y que obedecen a criterios de expertos o análisis puntuales de encuestas, indicadores o experiencias en situaciones similares para cada criterio en particular. En este sentido, un análisis multicriterio brinda herramientas que permite analizar de forma conjunta varias variables para tener en cuenta en la toma de una decisión. Sin embargo, con el fin de brindar una robustez al análisis de la tecnología a implementar en el Corredor, se plantea un escenario en el que se le brinde una ponderación igual a los diferentes criterios analizados de forma que se puedan comparar las diferentes variables independientes del peso específico que deba tener en la toma de la decisión.

Dado lo anterior, se procede a fijar un porcentaje de ponderación equitativa a todos los criterios, así:

Tabla 7. Ponderación de criterios para el análisis de sensibilidad

PONDERACIÓN	PESO CRITERIO
Satisfacción de la demanda potencial actual y futura	20,00%
Gestión de las limitaciones técnicas inherentes al Corredor	20,00%
Inserción urbana	20,00%
Huella medioambiental	20,00%
Financiamiento	20,00%

De acuerdo con las ponderaciones realizadas para cada una de las variables asociadas cada tecnología, se obtuvieron los siguientes resultados comparativos para cada uno de los criterios técnicos:



De acuerdo con el resultado anterior, permite afirmar que los criterios de ponderación establecidos por la metodología son acertados y permiten seleccionar la tecnología óptima para el corredor.

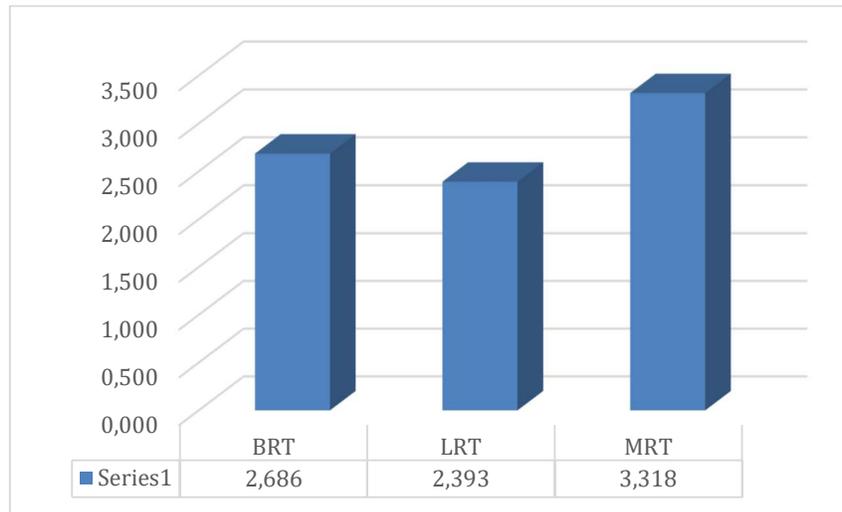
Adicional al análisis anterior, con el fin de identificar si la ponderación arroja una selección de alternativa estable, se llevan a cabo otras sensibilidades, variando levemente algunos de los pesos establecidos de cada criterio.

Primero se realiza una sensibilidad con un aumento del 40% al criterio financiero, siempre teniendo una relevancia significativa en las decisiones, teniendo que disminuir un 15% al resto de criterios.

Tabla 8. Ponderación de criterios para el análisis de sensibilidad 2

PONDERACIÓN	Peso Criterio	Sensibilidad
Satisfacción de la demanda	33,52%	Disminuye 15%
Beneficios Sociales	14,19%	Disminuye 15%
Inserción urbana	9,19%	Disminuye 15%
Impacto Ambiental	9,60%	Disminuye 15%
Financieros	33,52%	Aumenta 40%

De acuerdo con las ponderaciones realizadas para cada una de las variables asociadas cada tecnología, se obtuvieron los siguientes resultados comparativos para cada uno de los criterios técnicos:

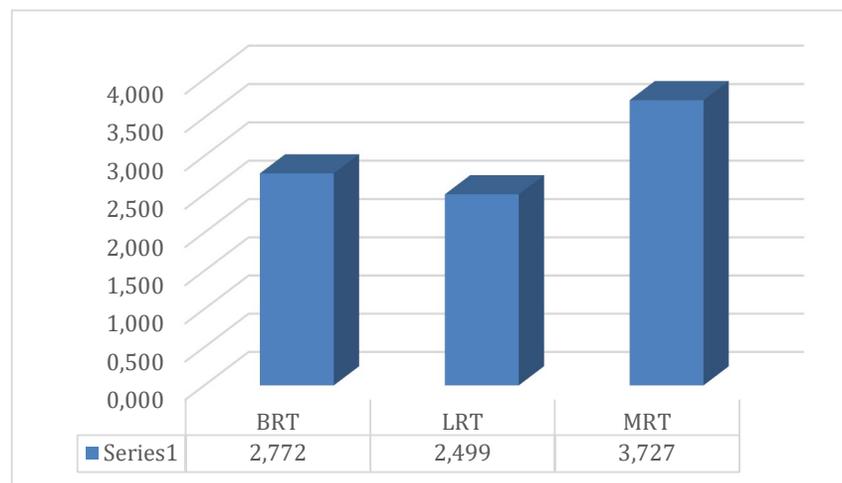


Se realiza una tercera sensibilidad, en donde se da una mayor importancia a los criterios sociales, ambientales y de urbanismo, respecto al costo del proyecto, y respecto al criterio de demanda.

Tabla 9. Ponderación de criterios para el análisis de sensibilidad 3

PONDERACIÓN	Peso Criterio	Sensibilidad
Satisfacción de la demanda	23,52%	Disminuye 16%
Beneficios Sociales	22,79%	Aumenta 20%
Inserción urbana	14,76%	Aumenta 20%
Impacto Ambiental	15,42%	Aumenta 20%
Financieros	23,52%	Disminuye 16%

De acuerdo con las ponderaciones realizadas para cada una de las variables asociadas cada tecnología, se obtuvieron los siguientes resultados comparativos para cada uno de los criterios técnicos:



Tal como se puede observar, de acuerdo con el análisis de sensibilidad realizado, se identifica que el Metro es la tecnología más apropiada para el corredor.

Con las tres sensibilidades realizadas a la matriz multicriterio se obtiene como tecnología vehicular más adecuada para el corredor de L2MB la de metro convencional o metro pesado, la cual tiene una mejor calificación en los indicadores de capacidad, velocidad comercial, integración con el entorno urbano y cantidad de CO2 emitida por pasajeros, mientras que tiene la menor calificación en los indicadores de costo de operación y mantenimiento y costo de inversión del material rodante. De todas formas, es de resaltar, que desde el punto de vista de capacidad y su relación con la demanda esperada del corredor, este indicador, que es principal para validar la pertinencia de un proyecto de transporte, muestra claramente que la tipología de metro es la única que permitiría suplir satisfactoriamente el nivel de demanda resultante del corredor.

3.7 CONCLUSIONES y RECOMENDACIÓN

Tras la evaluación de la matriz multicriterio realizada para validar las tecnologías y tipologías vehiculares consideradas: Metro, BRT y LRT, para el corredor de la L2MB. Para la cual se han definido 5 criterios:

- Satisfacción de la demanda
- Inserción urbana
- Impacto Ambiental
- Beneficios Sociales
- Financieros

Los cuales se han evaluado a partir de unas variables cuantitativas representativas de cada criterio, basados en los datos para cada tipología principalmente en los proyectos de referencia:

- Transmilenio de la Av. Cra 68 para la tecnología BRT
- Regiotram de Occidente para la tecnología de LRT ó Metro Ligero
- Metro de la L2MB para Metro Convencional

Con los resultados obtenidos en las variables que dan una valorización para los criterios, que según los pesos de ponderación de los criterios definida se obtiene como tecnología mejor valorada la de Metro Convencional.

Igualmente se realizaron tres (3) ejercicios de sensibilidad para dar robustez al ejercicio de multicriterio realizado, de equiparar los pesos de los criterios, aumentando un 40% el peso del criterio financiero, y aumentando un 20% los criterios de urbanismo, ambiental y social.

En todas las sensibilidades realizadas la tecnología mejor valorada sigue siendo la de Metro Convencional.

Con ello se concluye, que la tecnología y tipología de metro convencional se válida para el corredor de la L2MB, siendo la misma:

1. La que más satisface la demanda, al ser la que mayor capacidad podría transportar respecto a la demanda de 49.709 pax estimada en el escenario de diseño
2. La que menos impacto ambiental tiene, al ser la que menos contaminación de CO2 produce.
3. La que menos inserción urbana tiene sobre la ciudad, ya que es la que menos área requiere, al ser una infraestructura subterránea.
4. La de mayor beneficio social obtiene, al ser la de mayor velocidad comercial
5. Pero si siendo la de mayor costo tanto en inversión, como en operación de la tecnología.

3.7.1 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL RODANTE DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ

Las características de los vehículos con los cuales operará el sistema son las siguientes:

Tabla 10. Características técnicas material rodante L2MB

Características	Datos
1. Tipo de material rodante	Metro
2. Tipo de operación	Automática con CBTC
3. Localización de la línea	Bogotá
4. Número de coches por tren	7
5. Configuración de los trenes	MC-T-M-M-M-T-MC (configuración con 7 coches) - indicativo y por precisar por el proveedor de material rodante
6. Capacidad de pasajeros:	
6.1. Capacidad del tren a 6p/m ² (px)	1778 mínima
6.2. Capacidad por coche (px)	Mc: 268, T/M: 253 (configuración con 7 coches)
6.3. Asientos por coche (px)	Mc: 36, T/M: 36 (configuración con 7 coches)
6.4. Pasajeros de pie (px)	Mc: 232, T/M: 217 (configuración con 7 coches)
7. Dimensiones generales	
7.1. Longitud del tren	145 m máximo
7.2. Longitud de los coches	20m - indicativo y por precisar por el proveedor de material rodante
7.3. Altura de los coches	3,89 m - indicativo y por precisar por el proveedor de material rodante
7.4. Anchura de los coches	2,9 m - indicativo y por precisar por el proveedor de material rodante
7.5. Distancia del pivote del bogie	por definir
7.6. Distancia entre ejes	+/- 2,1 m
7.7. Altura del piso	1100 mm 0/+50 mm
7.8. Altura del enganche	por definir
7.9. Ancho de vía	1435 mm
7.10. Diámetro de las ruedas (mm)	Max: 860, Min: 790
8. Puertas	
8.1. Número de puertas por lado por coche	4

Características	Datos
8.2 Dimensiones de las puertas	1600 mm x 1900 mm
8.3. Distancia de las puertas	por definir
9. Carga máxima por eje	18 ton /eje máximo
10. Alimentación	1500 Vcc
11. Prestaciones dinámicas	
11.1. Velocidad máxima de servicio UTO (Km/h)	80 km/h
11.2. Aceleración (m/s ²)	0,86 m/s ² (1,2m/s ² de 0 a 35km/h)
11.3. freno de urgencia	-1,3 m/s ²
11.4. Freno de servicio	-1 m/s ²
11.5. Jerk de tracción	Inferior a 1 m/s ³

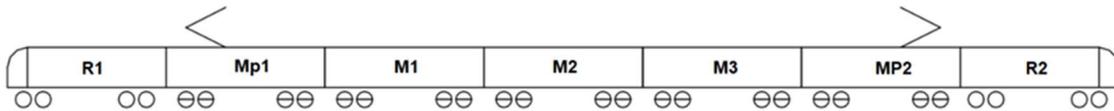


Figura 10.. Ejemplo de configuración de tracción (R: remolque, M: motor, Mp: motor con pantógrafo)

- Los vehículos, incluidos todos sus subsistemas y equipos, serán de diseño probado, es decir comparables con productos estándares ya producidos en el mundo, con soluciones probadas y modernas.
- Su vida útil será de al menos 40 años y 5 millones de km.
- Los subsistemas y equipos instalados demostrarán su fiabilidad en líneas y redes de metros que se encuentren en operación desde hace por lo menos 3 años.
- Los vehículos estarán dotados del nivel de automatización GOA 4.
- El sentido normal de circulación de los vehículos será el lado derecho. Sin embargo, para efectos de funcionamiento, los vehículos tendrán la posibilidad de circular tanto por el lado derecho como por el izquierdo.
- Se posibilitará el rescate de un vehículo averiado por otro vehículo.
- Los vehículos operarán sin restricciones a las condiciones ambientales y climáticas específicas de Bogotá. Los rangos de temperatura cumplirán con la clase T1 según la norma EN 50125-1, con el requisito especial de considerar -10°C en lugar de -25°C como temperatura mínima.
- Podrán ser estacionados al aire libre, independientemente de las condiciones atmosféricas.
- Funcionarán normalmente después de su permanencia en condiciones de intemperie (calor, sol, etc.).

- No se fabricarán con materiales perjudiciales para el medio ambiente y podrán desmontarse al final de su ciclo de vida.
- La operación nominal se realizará con un vehículo compuesto por siete coches.
- La capacidad de los vehículos y su reparto entre pasajeros sentados y pasajeros de pie será la siguiente:

Criterios básicos	7 coches
Pasajeros sentados	252
Pasajeros de pie	1.594
Total pasajeros	1.846 (sin PRM)

- Los vehículos serán de tecnología probada, de última generación.
- Serán seguros, fiables, duraderos, dotados de una redundancia adecuada, fáciles de usar y atractivos, con capacidad para satisfacer las demandas previstas, buenas cualidades de conducción y comodidad para los usuarios, incluido un bajo nivel de ruido.
- Dispondrán de acabados exteriores e interiores atractivos de material apropiado resistente al fuego y retardante que envejezca de manera adecuada.
- Garantizarán una alta disponibilidad, con bajos costes de mantenimiento a lo largo de todo el ciclo de vida, un bajo desgaste de las ruedas, un mantenimiento mínimo, una alta intercambiabilidad de piezas y componentes modulares con pocos tiempos de indisponibilidad, basados en diagnósticos adecuados y en unos tiempos mínimos de sustitución de componentes.
- Garantizarán un fácil acceso para personas discapacitadas con silla de ruedas y personas que lleven coches de niños.
- Dispondrán de un alto rendimiento y satisfarán las demandas de pendientes y de curvas tanto en funcionamiento normal como degradado y de emergencia, optimizando el equilibrio entre el tiempo de viaje, el número total de vehículos, el consumo de energía, el suministro de energía, el equipo de tracción y los ejes motorizados.
- Ofrecerán facilidad de limpieza exterior e interior y se verán libres de trampas de suciedad y polvo.
- Su apariencia exterior, y el módulo frontal, será de perfil moderno y estéticamente agradable, con acabados de alto nivel.
- La zona de pasajeros podrá transportar todo tipos de viajeros, incluidos inválidos, niños, pasajeros con equipaje, personas mayores, personas con discapacidades leves y discapacitados, así como personas no ambulantes en silla de ruedas.
- La configuración de los asientos será de tipo longitudinal para lograr la capacidad de transporte.
- Se dispondrá de un total de dos espacios para sillas de ruedas por tren.

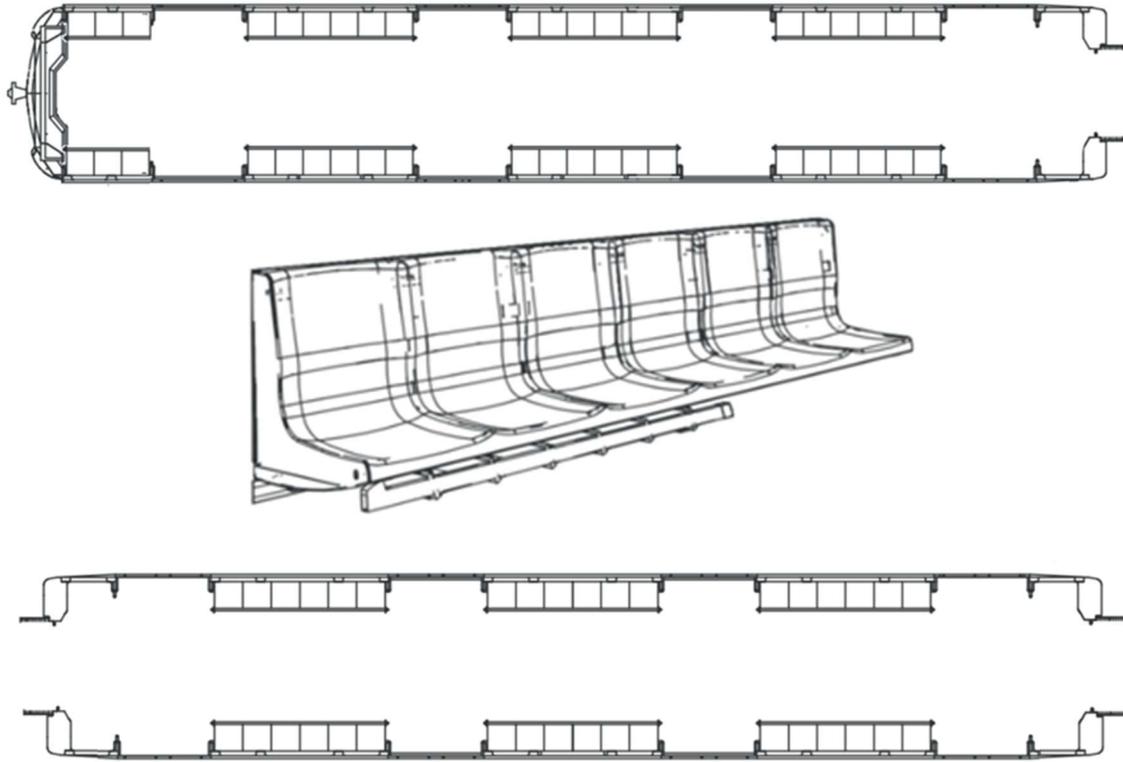


Figura 11.. Arreglo de asientos

- Los pasajeros transportados podrán moverse dentro de todo el vehículo (incluidas las zonas de pasillo) sin ningún obstáculo fijo en su camino, tales como componentes del vehículo o asientos.

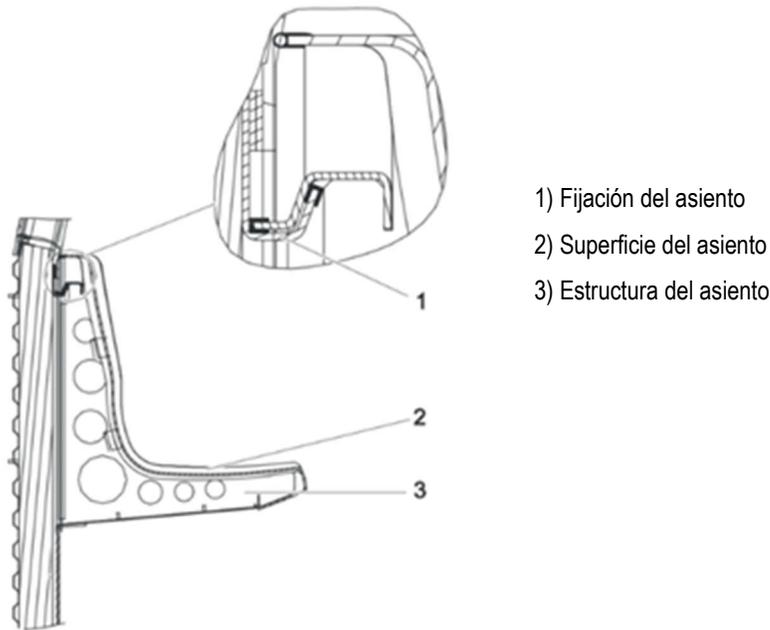


Figura 12.. Fijación de un asiento

- Las zonas de uso especial para la silla de ruedas y los coches de bebé se situarán contra la pared lateral adyacente a una puerta y estarán equipadas con un soporte ciático que se empleará cuando no haya ninguna persona con una necesidad especial.
- La combinación de colores del interior maximizará la visibilidad. Dispondrá de colores contrastados para mejorar la visibilidad de las personas con discapacidad visual.
- En lo relacionado con la transferencia de pasajeros entre vehículos y andenes de estación:
 - Se posibilitará el transbordo en el menor tiempo posible.
 - Los espacios vacantes se distribuirán uniformemente en toda la longitud del vehículo.
 - Se garantizará una transferencia segura y cómoda.
 - Se dispondrá de aperturas amplias.
 - Se disminuirán al máximo los tiempos de apertura y cierre de las puertas.
- En lo relacionado con las puertas de los vehículos:
 - Se espera una tasa de transferencia de alrededor del 20-30% (tasa de la longitud total de las aperturas de las puertas respecto a la longitud del vehículo), ofreciendo un intercambio de pasajeros fácil y rápido en las estaciones para satisfacer los tiempos de permanencia especificados y el tiempo de ida y vuelta previsto.
 - Las puertas de pasajeros permitirán la evacuación completa del tren cargado en EL4 en menos de 30 segundos. En cada lado, el vagón dispondrá de al menos 4 puertas de doble hoja de una anchura mínima de 1.600 mm, situadas una frente a la otra.

- El flujo mínimo de pasajeros por puerta será de 80 pasajeros/minuto.
- La altura de apertura de las puertas será de al menos 1,95 m.
- Los tiempos de apertura y cierre, incluido el bloqueo de las puertas, serán de hasta 3 segundos, pero ajustables.
- La diferencia de altura máxima hacia arriba entre el andén y la entrada del vehículo será de 50 mm. La diferencia hacia abajo será de 0 mm.
- La diferencia horizontal entre el umbral del vehículo y el borde del andén estará limitada a 50 mm.
- Los materiales, componentes y construcción cumplirán las normas y códigos aplicables en materia de seguridad contra incendios, así como la norma EN 45545 con categoría de funcionamiento 2.
- Cada compartimento de pasajeros tendrá detectores de humo que cuando se activen enviarán una alarma al puesto de conducción de emergencia.
- La propagación del fuego se evitará mediante barreras contra el fuego en el suelo, las paredes de los laterales y los extremos, así como en las carcasas de los equipos resistentes al fuego. El suelo del tren proporcionará una barrera contra el fuego ensayada de acuerdo con la norma EN 45545-3. Cada coche dispondrá de un extintor.
- No habrá interferencias con los distintos componentes de sistemas (sistemas electrónicos y de telecomunicaciones). La compatibilidad de las interferencias electromagnéticas de los vehículos estará ajustada a la serie EN 50121.
- El índice de confort (índice entre el número de asientos y la capacidad total) estará entre el 12% y el 15% en caso de carga EL6.
- La altura mínima del techo central de las zonas de pasajeros será de 2,1 m.
- La apertura de la pasarela entre los módulos tendrá una anchura mínima de 1,3 m y una altura de 1,95 m.
- Los coches estarán dotados de pantallas que todos los pasajeros puedan ver.
- Tendrán sistema de aire acondicionado.
- Las condiciones de medición del ruido cumplirán los requisitos de las normas internacionales ISO 3381 para el interior del vehículo e ISO 3095 para el exterior. Los niveles de ruido provendrán de cargas ELE y EL4.
- El interior del vehículo evitará la resonancia de los paneles y otros componentes del vehículo. Los soportes de los equipos minimizarán la transmisión de vibraciones. Las vibraciones serán suficientemente alejadas de las frecuencias de excitación primarias para evitar cualquier tipo de vibración resonante en las distintas condiciones de velocidad y de alimentación eléctrica de la línea. La calidad de la conducción se evaluará de acuerdo con la norma ISO 2631 o EN 12299.
- Se satisfarán los siguientes requisitos de confort acústico:

Velocidad	Parada	40 km/h	60 km/h
-----------	--------	---------	---------

Unidad (LpAeq)		T dBA	500ms dBA	500ms dBA
Ruido al interior del coche a 1,2 m sobre el piso	Zonas de pasajeros	62	67	70
	Pasillo	64	72	75
Ruido al exterior del coche a 7,5 m desde la línea central de la vía y a 1,20 m sobre el nivel de la vía		60	74	80

- El rendimiento dinámico estará definido por la estabilidad, la velocidad máxima, las aceleraciones/desaceleraciones y el jerk.
- Los requisitos relativos a las aceleraciones se darán a nivel y en alineación recta, con una alimentación nominal de 1500 Vdc y una relación de adherencia máxima de las ruedas del carril del 25 %:
 - Velocidad máxima de funcionamiento: 80 km/h con EL6 y ruedas totalmente desgastadas;
 - Velocidad de diseño: 90 km/h
 - La aceleración media de 0 a 40 km/h (aceleración media de arranque) será de al menos 1,1 m/s²;
 - La aceleración media de 0 a 80 km/h será de al menos 0,8 m/s².
- Los requisitos relacionados con modos degradados como la carga de pasajeros, tipos de fallos y aspectos de rendimiento serán los siguientes:
 - En caso de fallo de un inversor de tracción, los sistemas de tracción y de freno serán capaces de continuar el servicio con pasajeros hasta el final del día incluso con una ligera degradación de la velocidad comercial.
 - En caso de que falle más de un inversor de tracción, el vehículo podrá continuar el servicio con pasajeros hasta el final del viaje o hasta la siguiente estación.
 - En caso de un fallo grave, después de descargar a los pasajeros en la estación más cercana, el vehículo en condición de carga vacía podrá realizar el arranque y el frenado en un pendiente de hasta 4%.
 - Un vehículo vacío podrá volver a arrancar en una pendiente del 4% al tirar o empujar a otro vehículo vacío, con una aceleración mínima de 0,1 m/s².
- El rendimiento de frenado satisfará los requisitos de la norma EN 13452-1 y cumplirá las siguientes funciones:
 - Frenado de servicio: frenado utilizado normalmente bajo el control del conductor o de la ATO para controlar la velocidad del vehículo. Será de tipo electrodinámico o mecánico.
 - Frenado de emergencia: freno mecánico basado en el objetivo principal de maximizar la seguridad de los pasajeros, el personal y de los no usuarios del sistema.
 - Freno de retención: freno que mantiene parado un vehículo con pasajeros durante un tiempo y una carga definidos.

- Freno de estacionamiento: freno que puede mantener permanentemente un vehículo con una carga definida en una pendiente definida durante un periodo de tiempo indefinido.
- El vehículo podrá terminar su recorrido incluso aceptando una limitación del límite de velocidad máxima, a pesar de los fallos eventuales de algunos de sus equipos:
 - En caso de fallo de una unidad de frenado, las prestaciones del freno de servicio se mantendrán hasta el final del recorrido;
 - En caso de avería de los frenos, las unidades de frenado defectuosas deberán poder aislarse y desactivarse de manera remota desde el panel de gestión de emergencia;
 - En el caso de los vehículos de recuperación push-pull, será posible aislar la unidad dañada del sistema de frenado.
- El sistema de protección contra el deslizamiento de las ruedas mejorará las prestaciones de tracción y frenado al proporcionar un uso optimizado de la adherencia en todas las condiciones de las ruedas y los carriles.
- No habrá interoperabilidad de trenes entre la PLMB y la L2MB, puesto que la integración de requerimientos de interoperabilidad entre ambas líneas de Metro generaría más desventajas (limitación del mercado, complejidades contractuales) que ventajas (potenciales ahorros de costos OPEX). Sin embargo, una parte importante de los criterios de diseño y operación del material rodante retomó numerosos aspectos y especificaciones técnicas de la PLMB.

3.8 ANEXO: REFERENCIAS

1. Estudio comparativo de alternativas de ejecución por tramos y tipologías de la primera línea de metro para la ciudad de Bogotá (PLMB), con identificación y cuantificación de ahorros que optimicen el beneficio - Entregable 3, Estudios de alternativas para optimizar el diseño de la PLMB
2. Contrato FDN 033 de 2020: Formulación, análisis y priorización de alternativas para la expansión del PLMB-T1, y elaborar los estudios y diseños a nivel de prefactibilidad de la alternativa seleccionada para la expansión de la PLMB-T1 y su articulación con otros proyectos de transporte de la Región Bogotá – Cundinamarca. Entregable 2 – Evaluación multicriterio de alternativas
3. Licitación Pública IDU-LP-SGI-031-2019 - ADENDA 2 02 PARAMETROS OPERACIONALES
4. CONTRATO DE CONSULTORIA No. 034 DE 2018: CONSULTORÍA ESPECIALIZADA PARA LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO REGIOTRAM DE OCCIDENTE: Documento de Estructuración Técnica Proyecto Regiotram de Occidente
5. Radicado Transmilenio 2022-EE-06286
6. CONTRATO DE CONSULTORIA No. 034 DE 2018: CONSULTORÍA ESPECIALIZADA PARA LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO REGIOTRAM DE OCCIDENTE - Plano de Talleres y Cocheras de Regiotram de Occidente_(UT09_PL_T&C_V2)
7. Resolución 000383 de 2021 de UPME: Por la cual se actualiza el factor de emisión del Sistema Interconectado Nacional del año 2020 para inventarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y proyectos de mitigación de GEI
8. SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE –SDA - Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual - INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MOVILES Y FUENTES FIJAS INDUSTRIALES AÑO 2018
9. Radicado Transmilenio 2022-EE-03232

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E4 – Documento de requisitos para cofinanciación Sistemas de Transporte – Anexo A – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0003_VC

10. Contrato de Consultoría Regiotram de Occidente - Anexo 2.1 Actualización Modelo Estudio Socioeconómico
11. 20160314_El Espectador Artículo Transmilenio vs. metro, en tarifas
12. Memoria de cálculos de las variables y de la matriz multicriterio.