



**Realizar la estructuración integral del proyecto Línea 2 del Metro de Bogotá, incluyendo los componentes legal, 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\_VD



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\_VD

## CONTROL DE CAMBIOS

### ÍNDICE DE MODIFICACIONES

| Versión | Fecha                    | Sección Modificada         | Observaciones  |
|---------|--------------------------|----------------------------|--|
| A       | 18-02-2022               | -                          | Versión Inicial  |
| B       | 14-03-2022               |                            | -  |
| C       | 24-05-2022               |                            | Ajustes validación inicial   |
| D       | 16-06-2022<br>22-06-2022 | Descripción de indicadores | 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

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 8.      | JUSTIFICACIÓN DE LA PRIORIZACIÓN DEL PROYECTO                                    | 4  |
| 8.1     | CONTEXTO Y MARCO TEÓRICO   | 4  |
| 8.1.1   | CONPES de movilidad de la Región Bogotá - Cundinamarca                           | 4  |
| 8.1.2   | Instrumentos de planeación Distritales   | 6  |
| 8.1.3   | Modelo de transporte de Bogotá   | 6  |
| 8.1.4   | Marco Teórico  | 7  |
| 8.1.4.1 | Evaluación multicriterio   | 7  |
| 8.1.4.2 | Evaluación de Montecarlo   | 9  |
| 8.2     | METODOLOGÍA  | 9  |
| 8.2.1   | Definición de proyecto   | 10 |
| 8.2.2   | Definición de criterios de evaluación  | 13 |
| 8.2.3   | Modelo de transporte para la obtención de indicadores                            | 14 |
| 8.2.4   | Aplicación de Montecarlo   | 15 |
| 8.3     | RESULTADOS   | 18 |
| 8.3.1   | Indicadores  | 18 |
| 8.4     | GENERALIDADES PROYECTO DE MOVILIDAD  | 23 |
| 8.4.1   | Descripción del proyecto de movilidad que la entidad territorial busca priorizar | 23 |
| 8.4.2   | Cronograma   | 25 |

## LISTA DE TABLAS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabla 1.  | Proyectos considerados para la evaluación.....                            | 11 |
| Tabla 2.  | Proyectos considerados en el documento conpes 4034 de 2020.....           | 12 |
| Tabla 3.  | Descripción de indicadores .....  | 14 |
| Tabla 4:  | Ejemplo de tabla de orden de prioridad de los proyectos.....              | 17 |
| Tabla 5.  | Valoración de indicadores por proyecto.....                               | 18 |
| Tabla 6.  | Valoración de criterios por proyecto .....                                | 19 |
| Tabla 7.  | Tabla de indicadores de correlaciones .....                               | 21 |
| Tabla 8.  | Calificación global multicriterio aplicando simulación de Montecarlo..... | 22 |
| Tabla 9   | Cronograma de entrada en operación de proyectos priorizados.....          | 22 |
| Tabla 10. | Descripción general de estaciones L2MB.....                               | 24 |

## 8. JUSTIFICACIÓN DE LA PRIORIZACIÓN DEL PROYECTO

**El contenido de este documento fue elaborado en su totalidad por la EMB en el marco del contrato interadministrativo 136 de 2021 con base en información aportada por la SDM.**

En el marco de los procesos que se llevan a cabo para la identificación y definición de proyectos de movilidad para la región Bogotá- Cundinamarca, se hace necesario contar con herramientas y procesos que permitan comparar y tomar decisiones para priorizar los proyectos. Estas herramientas deben permitir la comparación en escenarios futuros y estimar los impactos de los proyectos, y tomar decisiones en la incertidumbre. En este sentido, los modelos de transporte de cuatro etapas son herramientas de simulación que permiten estimar los impactos de proyectos en escenarios futuros. En paralelo, el proceso de toma de decisiones comúnmente se apoya con evaluaciones ex-ante de los proyectos como las evaluaciones multicriterio.

En línea con lo anterior, este documento describe el proceso que se ha realizado para comparar y priorizar los proyectos de movilidad aplicando el modelo de cuatro etapas de la ciudad de Bogotá y la evaluación multicriterio aplicada incorporando la simulación de Montecarlo para variabilidad de los pesos de los indicadores.

Finalmente, el documento presenta, primero un contexto de documentos de política y planes de desarrollo que presentan diferentes proyectos para la ciudad; segundo, un marco teórico de las herramientas y análisis utilizadas para la evaluación multicriterio en complemento con la simulación de Montecarlo. Posteriormente se presenta la metodología aplicada, seguida por los resultados y las conclusiones del ejercicio.

### 8.1 CONTEXTO Y MARCO TEÓRICO

#### 8.1.1 CONPES de movilidad de la Región Bogotá - Cundinamarca

En apoyo a las medidas tomadas por la Administración Distrital para el desarrollo del sistema de movilidad, el Consejo Nacional de Política Económica y Social ha expedido documentos CONPES relacionados con el sistema de transporte masivo en el Distrito Capital, como lo son el CONPES 2999 de 1998 “Sistema del servicio público urbano de transporte masivo de pasajeros de Santafé de Bogotá”; el CONPES 3093 de 2000 “Sistema de servicio público urbano de transporte masivo de pasajeros de Bogotá -Seguimiento-”;y el CONPES 3368 de 2005 “Política nacional de transporte urbano y masivo - seguimiento”.

En 2010, se expidió el CONPES 3677 CONPES de Movilidad Integral para la Región Capital Bogotá - Cundinamarca (CONPES, 2010) que contiene una visión integral de la movilidad para la Región Capital, presenta el diagnóstico de las condiciones de transporte y describe el grado de avance en la estructuración de algunos de los proyectos dentro del Programa Integral Movilidad de la Región Capital (PIMRC) que podrían ser cofinanciados por la nación. El documento establece los requisitos técnicos y financieros que debería satisfacer cada uno de los proyectos postulados por el Distrito Capital o la Gobernación de Cundinamarca para acceder a la cofinanciación de la Nación, planteando un posible perfil de aportes de la Nación. En particular, la visión plantea continuar con la implementación de mecanismos de desarrollo limpio y hacia el uso de vehículos amigables con el medio ambiente. Entre estos proyectos se presentaron el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), la Primera Línea de Metro, el Regiotram de occidente, y las troncales de la Av. 68, Ciudad de Cali, Calle 13/Calle 19 y Av. Boyacá, como proyectos para continuar sus estudios y desarrollos (CONPES, 2010).

El documento CONPES 3882 y su actualización 3899 del año 2017, precisan y aclaran el alcance de los diez (10) requisitos técnicos que debería satisfacer cada uno de los proyectos postulados por el Distrito o la Gobernación de Cundinamarca para acceder a la cofinanciación de la nación, enunciados inicialmente en el CONPES 3677. Adicionalmente, presenta la Primera Línea de Metro para Bogotá (PLMB), proyecto compuesto por la PLMB-Tramo 1 y sus troncales alimentadoras (Avenida 68, Avenida Boyacá y Avenida Ciudad de Cali); TransMilenio Soacha fases II y III; y el Regiotram de Occidente como los proyectos priorizados por las entidades territoriales que pueden ser susceptibles de acceder a la cofinanciación de la nación, describiendo su estado, beneficios y costos, así como los pasos para acceder a la cofinanciación. Mediante el CONPES 3882 de 2017, se declara de importancia estratégica el sistema TransMilenio Soacha Fases II y III (CONPES, 2017).

Posteriormente, los documentos CONPES 3900, 3902 y 3945 definen la participación de la nación en los proyectos priorizados en el CONPES 3882, al declarar de importancia estratégica el proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá-Tramo 1, el Regiotram de Occidente y las troncales de la Avenida 68 y la Av. Ciudad de Cali como alimentadoras de la PLMB, respectivamente.

Finalmente, el documento CONPES 4034 de 2021, actualizó los componentes institucionales, de movilidad y financiamiento del Programa Integral de Movilidad de la Región Bogotá - Cundinamarca para establecer una visión a 2027, 2035 y de largo plazo, que contribuya a satisfacer las necesidades de movilidad de los habitantes de la región. Lo anterior en búsqueda de conformar un sistema de movilidad urbano y regional de pasajeros integrado, interoperable e intermodal, que prioriza los medios de transporte sostenibles en Bogotá Cundinamarca.

Este documento menciona en el desarrollo de un sistema integral de movilidad de pasajeros con el sistema de transporte público como base estructurante, la importancia de consolidar importantes corredores de transporte, tanto en el ámbito urbano, como en el regional; incluyendo no solo trenes de cercanías que conectan Bogotá con los municipios aledaños, sino también la red de metro en el ámbito urbano de Bogotá, así como troncales de Transmilenio, donde las condiciones de movilidad de la ciudad lo exijan, para responder a los flujos de mayor demanda según los análisis de líneas de deseo y modelación, articulado con la disponibilidad de recursos y la planeación territorial.

Asimismo, dentro de esta política pública de 2021, se priorizan la línea de metro en las localidades de Suba – Engativá, presentando la gestión que ha realizado la Empresa Metro de Bogotá suscribiendo un Convenio Interadministrativo No. 068 de 2020 junto a la FINANCIERA DE DESARROLLO NACIONAL S.A.- FDN cuyo objeto fue la 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. Por su parte, para ejecutar dicho convenio, la FDN suscribió el Contrato No. 33 de Consultoría, en el que se desarrollaron las siguientes tres fases: (i) Análisis de transporte y formulación de alternativas, (ii) Evaluación de alternativas y definición de nodo de terminación y (iii) Estudios y diseños a nivel de prefactibilidad de la(s) alternativa(s) priorizada(s).

De igual manera, prioriza Borde Occidental - Troncal Calle 13 del Límite Occidente del Distrito a Carrera 50, como un “proyecto estratégico para la Región Bogotá-Cundinamarca, al ser el principal corredor de conexión de la ciudad, con un alto flujo de vehículos de pasajeros y carga”.

También, la extensión Troncal Alimentadora Avenida Ciudad de Cali, ampliando la red de transporte masivo y generando un corredor de movilidad eficiente que satisfaga la demanda de transporte de la ciudad región. Esto al conectar el territorio primero entre la Avenida Manuel Cepeda y la Calle 80, y posteriormente, la integración con el municipio de Soacha (dando continuidad al tramo de este corredor troncal ya cofinanciado por el Gobierno nacional), cruzando las localidades de Bosa, Kennedy, Fontibón y Engativá e integrando los usuarios de las localidades mencionadas con la línea 2 de metro. Así mismo, se crea un corredor que permite optimizar las conexiones operacionales de rutas al unir las troncales de la Calle 26 con la Calle 80.

Otro de los proyectos priorizados es Regiotram Norte, inicia en el km 5 del actual corredor férreo en cercanía al Centro Comercial Gran Estación (Calle 26) de Bogotá y continua hacia Chía, Cajicá y Zipaquirá, en donde termina en el km 53. El corredor se encuentra actualmente en estudios de factibilidad.

Finalmente, la extensión PLMB al norte, este proyecto está considerado para ser extendido hacia el norte más allá de la Calle 72. El Distrito buscará priorizar los estudios de preinversión de dicha extensión, que permita llevar la línea hasta la Calle 100, para conectar con la troncal de la Av. 68 y una posterior prolongación por la autopista norte. Dado el desarrollo urbano del sector norte de la ciudad y el potencial desarrollo del Plan Parcial en el sector de Lagos de Torca, se considera contemplar en el análisis la ampliación hacia la altura del Portal Norte o posterior.

### **8.1.2 Instrumentos de planeación Distritales**

En el Plan Distrital de Desarrollo— PDD 2020-2024 Un nuevo contrato social y ambiental para la Bogotá del siglo XXI, adoptado mediante Acuerdo Distrital No. 761 de 2020 se propone hacer de Bogotá – Región un modelo de movilidad multimodal, incluyente y sostenible, promocionando los modos sostenibles, mejorando los tiempos y la experiencia del desplazamiento (propósito 4). Entre las estrategias se plantea mejorar la experiencia y los tiempos de desplazamiento en Bogotá- Región, teniendo un sistema de transporte masivo multimodal, regional, sostenible, limpio, complementado por el mejoramiento integral de la red de ciclorrutas de la ciudad de manera que favorezca las condiciones de accesibilidad y seguridad de la red, aumentando así el número de personas que utilizan la bicicleta para transportarse.

En el programa 49 Movilidad segura, sostenible y accesible, se propone mejorar la experiencia de viaje en los componentes de tiempo, calidad y costo, con enfoque de género, diferencial, territorial y regional, teniendo como eje estructurador la red de metro regional, el SITP, la red de ciclorrutas y priorizando la seguridad vial. En el Programa 50, se plantea la definición de la red de metros como eje estructurador de la movilidad y de transporte de pasajeros en la ciudad, avanzando en el ciclo de vida de la PLMB- Tramo 1 y realizar los estudios y actividades requeridos para contratar la ejecución de la Fase 2 de la PLMB, así como apoyar la estructuración de todos los proyectos férreos que permitan la integración regional, entre estos la optimización del Regiotram de Occidente y la construcción del Regiotram del Norte y del Sur.

### **8.1.3 Modelo de transporte de Bogotá**

De acuerdo con el documento Generalidades del Modelo de Transporte de Cuatro Etapas de Bogotá (MTCEB), en la ciudad se ha venido desarrollando y actualizando un modelo de cuatro etapas para el análisis de viajes de pasajeros en Bogotá y los municipios aledaños. Esta herramienta se ha venido empleando para el análisis de proyectos de transporte público para Bogotá analizando sus indicadores de movilidad para diferentes escenarios temporales.

De esta forma se determina el impacto y desempeño de los diferentes proyectos identificados mediante la consulta a las diferentes entidades distritales y departamentales que tienen injerencia en el sistema de transporte de la ciudad y la región (i.e. TRANSMILENIO S.A., Empresa Metro de Bogotá, Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá y Empresa Férrea Regional).

Las simulaciones, permiten estimar diferentes indicadores de impacto y desempeño tales como ahorros en tiempo de viaje, aumento en cobertura del sistema de transporte masivo, reducción en el costo generalizado de transporte, redistribución de la demanda de viajes en los diferentes corredores de transporte, entre otros.

Adicionalmente, con la herramienta de modelación se ha realizado un análisis estructurado de sensibilidad a los resultados del modelo con las proyecciones de población y actividades económicas de la ciudad, de esta forma se detectó la variación de los resultados en función de los posibles escenarios de desarrollo urbano y se redujo la incertidumbre relacionada a esta variable.

La combinación de proyectos con escenarios de sensibilidad y análisis para los cortes temporales relevantes, en el proceso de priorización de proyectos, representan alrededor de 90 (noventa) escenarios de modelación del sistema de transporte de Bogotá y la región que alimentan documentos de política de movilidad. En los escenarios de modelación realizados por el Distrito para el proyecto L2MB en términos generales se evidencian beneficios asociados a la disminución de los tiempos de viaje principalmente por las condiciones operativas de este proyecto, sumado a beneficios ambientales por la reducción de kilómetros recorridos producto de la redistribución de demanda que es absorbida por la L2MB. Estos beneficios sumados a otros se encuentran detallados, cuantificados y valorados en el requisito D. correspondiente a la evaluación Social y Económica.

### **Modelo de cuatro etapas de transporte - MTCEB**

En línea con lo anterior como soporte del proceso de análisis y priorización de proyectos de transporte, se han desarrollado diferentes herramientas de simulación que permiten obtener indicadores de desempeño de los proyectos, en diferentes periodos de análisis y escenarios. El modelo de cuatro etapas considera cuatro etapas o submodelos secuenciales que se denominan 1. Generación y atracción de viajes 2. Distribución de viajes 3. Partición modal y 4. Asignación (Ortuzar, Willumsen, 2001).

De manera general, el MTCEB se puede entender como un grupo de procesos donde confluyen e interactúan dos grandes bloques de información; por un lado están los insumos externos, constituidos por todos aquellos datos y procesos que están por fuera del MTCEB pero que son necesarios para alimentarla y asegurar su correcto funcionamiento, y por otro, todos los procesos y resultados intermedios que hacen parte de la lógica interna del modelo y que en términos prácticos terminan siendo cada una de las cuatro etapas que en conjunto forman la estructura del modelo de transporte de la ciudad.

En la etapa de Generación y atracción de viajes se puede obtener, para los diferentes escenarios temporales y de desarrollo de la ciudad que se vayan a analizar, una estimación de los viajes que se originan y atraen en cada zona de análisis de transporte (ZAT). Esta etapa requiere insumos de proyecciones poblacionales, usos del suelo y supuestos del número de viajes generados y atraídos para dichos usos del suelo.

En la etapa de Distribución, se obtiene la estimación de viajes que van de cada una de las ZAT a las demás ZAT. En esencia esto constituye una matriz de viajes origen y destino que se obtiene para los diferentes escenarios de análisis.

En la etapa de Partición modal, se obtiene la estimación de viajes que se realizan en cada modo de transporte de pasajeros, de acuerdo con el modelo de selección modal que considera la valoración de costos, tiempos y otros factores que las personas consideran a la hora de decidir el modo de transporte para su viaje.

Finalmente, en la etapa 4 se realiza la Asignación de viajes, que consiste en asignar los viajes de cada modo en la red u oferta de transporte de cada modo para cada escenario. Esto permite determinar la ruta, corredor o camino que los viajes tomarían para ir desde su origen hasta su destino final en el modo seleccionado. Esta última etapa permite estimar indicadores de movilidad para la red de transporte como tiempos de viaje, costo generalizado de viaje, velocidad por segmentos viales, y demanda máxima por corredor, entre otros indicadores con los que se pueden comparar escenarios del sistema de transporte en diferentes periodos de tiempo.

#### **8.1.4 Marco Teórico**

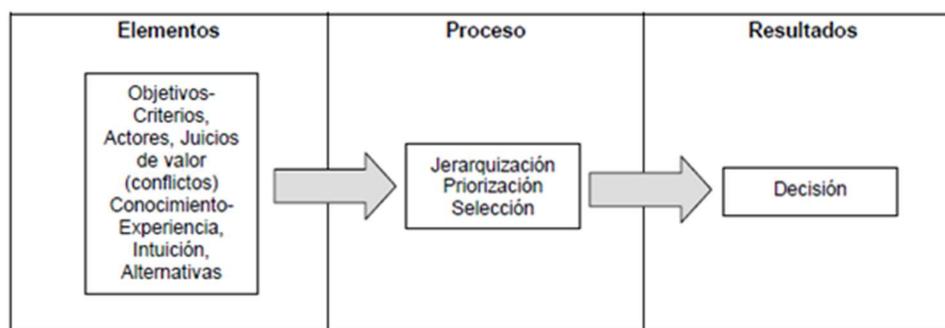
##### **8.1.4.1 Evaluación multicriterio**

Para diferentes programas de inversión pública y toma de decisión, es necesario comparar proyectos para seleccionar o priorizar un orden de desarrollo y definir su viabilidad, teniendo en cuenta que los recursos económicos suelen ser escasos y no es posible desarrollar todos los proyectos al mismo tiempo.

En el caso particular de proyectos de transporte, ya sea infraestructura vial o sistemas de transporte, los proyectos tienen diferentes costos y beneficios que varían en las diferentes etapas del proyecto: Preconstrucción, Construcción, Desarrollo y Operación. Estos costos y beneficios se pueden agrupar en diferentes criterios que permitirán comparar racionalmente los proyectos para tomar decisiones sobre su priorización.

De manera esquemática, este proceso se puede observar de la siguiente manera:

FIGURA 1: PROBLEMA DE DECISIÓN (ESQUEMA)



Fuente: Arancibia, Sara y Contreras, Eduardo, 2006. Evaluación Multicriterio, Aplicaciones al ámbito público. Presentación.

Como un primer ejercicio, se deben definir los elementos que están compuestos por los objetivos, criterios, actores involucrados, juicios de valor (conflictos), conocimiento, experiencia, intuición, alternativas a comparar. En un proceso de decisión, los elementos por lo general se miden en escalas diferentes dependiendo de la unidad del indicador (Ej. distancia o tiempo), por lo que se requiere transformar estas unidades en una unidad abstracta que sea válida para todas las escalas (CEPAL, 2008).

Posteriormente, sigue el proceso, que consta de la evaluación que se integra por la jerarquización y priorización. En primera instancia, la jerarquización consiste en la relación de orden entre las alternativas, se requiere de un modelo de decisión para organizar unas alternativas frente a las otras. Por su parte, la priorización, implica una razón de proporcionalidad, en términos de cuánto mejor es una alternativa que otra y por lo general requiere de un proceso de evaluación y calificación de los indicadores y criterios (CEPAL, 2008). Finalmente, el resultado del proceso es la decisión sobre selección de una alternativa, jerarquización o priorización de proyectos.

El uso de estas técnicas debe seguir algunos pasos para aplicar ordenadamente el proceso, para ello se debe tener en cuenta lo siguiente (CEPAL, 2008):

1. Definir los criterios (objetivos intermedios) y sus respectivas restricciones.
2. Definir tipos de variables: discretas o continuas.
3. Modelamiento de las preferencias. Existen básicamente dos alternativas: optimizar por separado para cada objetivo y luego agregar los subconjuntos de soluciones o asignar pesos a los distintos objetivos y encontrar una sola solución.

4. Definir si se usan modelos determinísticos (sin incertidumbre) o aleatorios. En el último caso se aplica la teoría de preferencias sobre contingencias:
  - a. Programación dinámica
  - b. Simulación
  - c. Análisis probabilístico.
5. Si se opta por agregar objetivos se deben definir los métodos de agregación, tales como:
  - a. Método de "juicio de expertos"
  - b. Funciones de utilidad multiatributadas: transforman los múltiples criterios en uno sólo.
  - c. Factor análisis
  - d. Escalamiento Multidimensional
  - e. Analytic Hierarchy Process (AHP)
  - f. Otros

#### 8.1.4.2 Evaluación de Montecarlo

Este método de evaluación, desarrollado hace varias décadas, busca apoyar el proceso de valoración de proyectos de inversión teniendo en cuenta que las variables que se utilizan para el estudio no son ciertas, sino que en ocasiones pueden referirse a varios valores. Su principal aporte ha sido para la gestión de proyectos, permitiendo incorporar el concepto de riesgo y la incertidumbre a la hora de entrar a valorar una inversión.

El origen de este método se remonta a la década de 1940, haciendo referencia al Casino de Montecarlo, considerada tradicionalmente la capital "del azar". En esa época, los matemáticos Neuman y Ulam aplicaron el método de simulación aleatoria al campo de experimentación de las armas nucleares. Posteriormente, en 1964 Hertz aplica esta práctica técnica de simulación al análisis de las inversiones. Controlar la aleatoriedad es uno de los objetivos que ha buscado el hombre, y esta técnica llega para servir en este proceso y poder trabajar aun cuando existe aleatoriedad en un determinado proceso. Para llevarla a cabo se produce a estudiar una muestra, generada de forma aleatoria (Cerem-Martn, 2017).

El método es una solución práctica especialmente cuando es difícil encontrar información, o en los que la experimentación es difícilmente posible. Permite evaluar escenarios aleatorios, y los análisis se adaptan a la variabilidad del mundo real. En su aplicación, la simulación de Montecarlo realiza el análisis con "la creación de modelos de posibles resultados mediante la sustitución de un rango de valores —una distribución de probabilidad— para cualquier factor con incertidumbre inherente" (Palisade, 2020). Con cada modelo se calcula el resultado del riesgo o evaluación y una y otra vez, se emplea un grupo diferente de valores aleatorios. Dependiendo del número de incertidumbres y de los rangos especificados para las variables, completar una simulación de Montecarlo puede requerir la realización de miles o decenas de miles de cálculos (Palisade, 2020).

En el caso de una evaluación multicriterio, la simulación de Montecarlo se puede aplicar a la variabilidad de los pesos de los criterios e indicadores, buscando incorporar en el proceso la variabilidad que pueden tener estos entre sectores, expertos y demás actores que se podrían considerar en el proceso. Al generar esta variabilidad a través de la simulación Montecarlo, permite ver los resultados ante un mayor espectro de pesos.

## 8.2 METODOLOGÍA

### 8.2.1 Definición de proyecto

A partir de diferentes documentos de política, como el CONPES 3677 de 2010, actualizado por el CONPES 3882 y 3899, CONPES 4034 de 2021, el Plan Maestro de Movilidad, el Plan de Ordenamiento Territorial, el Plan Marco de Transmilenio y los estudios de la red de Metro de Bogotá, se han identificado diferentes proyectos que se pueden desarrollar en el corto, mediano y largo plazo para mejorar la movilidad de pasajeros de la región Bogotá- Cundinamarca.

Cabe destacar que varios proyectos identificados en documentos previos ya se encuentran adjudicados y en proceso de desarrollo como lo son:

- Primera línea del Metro de Bogotá (PLMB)- Tramo 1 (hasta la Calle 72)
- Troncal Av. Carrera 68 desde la autopista sur hasta la carrera 7ma
- Troncal Av. Ciudad de Cali - Tramo alimentador de la PLMB desde la Av. de Las Américas y la Av. Circunvalar del Sur
- Regiotram de occidente
- Implementación del SITP
- Cable San Cristóbal

Estos proyectos constituyen los proyectos en el escenario base. Adicionalmente, considerando los proyectos comprometidos dentro de los corredores complementarios a la PLMB se encuentra el Corredor de la Carrera 7 que se encuentra en su fase final de estudios y que cuenta con los recursos disponibles para su ejecución, se incluyen en el escenario base.

En paralelo, también se destacan proyectos viales como la ampliación de la Autopista norte y la ampliación de la salida de Bogotá por la Carrera 7 que hacen parte de los proyectos que se desarrollarán por parte de la Concesión Vial de Accesos Norte de Bogotá - Accenorte S.A.S. proyecto que fue adjudicado el 10 de marzo de 2022 y dado su etapa de avance también hacen parte del escenario base

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación, se presenta una tabla con los proyectos considerados en la evaluación que adicionalmente han sido discutidos y retroalimentados por los equipos técnicos del Sector Movilidad<sup>1</sup>, la Alcaldía Mayor de Bogotá y la Gobernación de Cundinamarca, varios de los cuales se encuentran en el Plan Distrital de Desarrollo 2020-2024, el Plan Departamental de Desarrollo 2020-2024 y el Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá.

<sup>1</sup> Secretaría Distrital de Movilidad, TransMilenio S.A., Empresa Metro de Bogotá, Instituto de Desarrollo Urbano, Unidad de Mantenimiento Vial

TABLA 1. PROYECTOS CONSIDERADOS PARA LA EVALUACIÓN

| Proyecto                                      | CONPES 4034 | Plan Maestro Movilidad vigente | Plan Marco Transmilenio 2019 | Plan Desarrollo Distrital 2020-2024 |
|---|-------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Línea 2 del metro L2MB                        | X           | X                              |                              | X                                   |
| Extensión Troncal Av. Ciudad de Cali          | X           |                                | X                            |                                     |
| Corredor Avenida Boyacá                       | X           | X                              | X                            |                                     |
| Regiotram del Norte                           | X           | X                              |                              | X                                   |
| Troncal Calle 13 (Río Bogotá - Puente Aranda) | X           | X                              | X                            | X                                   |
| Troncal Av Boyacá CONPES (Autosur- Cll. 26)   | X           |                                | X                            |                                     |
| Regiotram Sur/ Corredor férreo del sur        | X           | X                              |                              | X                                   |
| Extensión PLMB hasta la Calle 200             | X           | X                              |                              | X                                   |
| Extensión troncal Cll. 80                     | X           | X                              | X                            |                                     |
| Extensión troncal Cll. 26                     | X           | X                              | X                            |                                     |

Fuente: Elaboración Secretaría Distrital de Movilidad

De la tabla anterior, es importante resaltar que se determinó un horizonte de tiempo para realizar un ejercicio comparativo equitativo y mitigar la incertidumbre respecto a la ejecución de los proyectos. Cabe indicar que la definición del corte temporal se alinea con alguno de los escenarios contenidos en el documento CONPES 4034 de 2021, y que se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 2. PROYECTOS CONSIDERADOS EN EL DOCUMENTO CONPES 4034 DE 2020

| Componente                             | 2027*  | 2035  | Largo plazo  |
|--|--|---|--|
| Red Regional de Corredores Férreos     | <u>Red de metro</u><br>PLMB – Tramo 1                | <u>Red de metro</u><br>Metro a Suba- Engativá                                   | <u>Red de metro</u><br>Corredor férreo del Sur       |
|  | <u>Trenes de cercanías</u><br>Regiotram de Occidente | Extensión PLMB al norte<br><u>Trenes de cercanías</u><br>Regiotram del Norte    | Tte. masivo Av. Boyacá                               |
| SITP                                   | <u>Red corredores troncales</u><br>Av. Carrera. 68   | <u>Red corredores troncales</u><br>Borde Occ. - Calle 13                        | <u>Red corredores troncales</u><br>Extensión CII. 80 |
|  | Av. Ciudad de Cali Soacha- Américas                  | Extensión Troncal Av. Ciudad de Cali  | Extensión CII 26                                     |
|  | Carrera 7  | <u>Cable</u><br>Cable San Rafael  | Continuación Plan Marco                              |
|  | Cicloalameda   | Cable S. Cristóbal Juan Rey   | Extensión Av. Ciudad de Cali                         |
|  | Medio Milenio  | Cable Ciudadela Sucre   | Soacha   |
|  | <u>Cable</u><br>Cable Usaquén- El Codito             | Cable Potosí- Sierra Morena   |  |
|  | Cable Reencuentro                                    |   |  |
|  | Monserate<br>Cable S. Cristóbal- Altamira            |   |  |
| Conectividad y competitividad regional | Ampliación Autonorte<br>Ampliación Carrera 7         | Perimetral de la Sabana<br>Vía Suba – Cota<br>Calle 63<br>Borde Occ. ALO Centro |  |

<sup>180</sup> Esto considera haber finalizado estudios y diseños, contratación de obra, construcción y haber iniciado el contrato de operación.

Fuente: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4034.pdf>

El escenario 2027 descrito en la tabla anterior es el escenario base. Los proyectos allí mencionados tienen garantizados su financiación y se encuentran en la fase final de estudios o fueron adjudicados y otros en construcción.

Los proyectos mencionados en el corte temporal de largo plazo requieren de un proceso de maduración tanto en los estudios técnicos como en las fuentes de financiación para su ejecución, generando un mayor grado de incertidumbre respecto a su ejecución.

En el corte temporal 2035 se encuentran los proyectos que cuentan con estudios más avanzados y se tiene algún grado de certeza respecto a las fuentes para financiar su ejecución. Siendo este el escenario más adecuado para realizar la priorización de proyectos.

Ahora bien, es importante mencionar que respecto a los proyectos del corte temporal 2035, se excluyen los proyectos que no van cofinanciados por Ley 310 de 1996 y los que su ejecución no depende exclusivamente del Distrito.

En razón a lo descrito anteriormente los proyectos seleccionados del corte temporal 2035 para realizar la priorización son:

- Línea 2 del metro (L2MB)
- Av. Calle 13 o Av. Centenario desde la carrera 50 o Avenida Batallón Caldas hasta límite del Distrito

- Extensión PLMB al norte (Calle 200)
- Extensión Troncal Av. Ciudad de Cali desde (Av. Manuel Cepeda Vargas hasta Cll 80)

### 8.2.2 Definición de criterios de evaluación

A partir de una reunión entre las diferentes entidades del Sector Movilidad y el acompañamiento de expertos, se determinaron los siguientes criterios para el ejercicio de priorización:

#### 1. Estado de Avance de los Estudios

Para el primer criterio, se definió un indicador numérico que representa el estado de avance de los estudios de cada proyecto en el cual, a menor número, menor el avance en los estudios. De esta manera, se calificó cada proyecto considerando los siguientes valores:

- 1 = Conceptual
- 2 = Prefactibilidad
- 3 = Factibilidad
- 4 = Estudios y diseños a detalle

#### 2. Facilidad constructiva:

En cuanto a la facilidad constructiva del proyecto, hace referencia al sistema constructivo, es decir, al conjunto de materiales, equipos, componentes y elementos constructivos articulados mediante procedimientos o técnicas específicas. Para lo anterior, se diseñó una encuesta a través de google forms para que los proyectos fueran calificados por diferentes expertos<sup>2</sup> en temas de infraestructura y transporte de las entidades del Sector Movilidad y Alcaldía, considerando la escala numérica de 1 a 9 donde 9 representa muy fácil y 1 muy difícil por medio de una encuesta en formulario de google forms.

#### 3. Aporte a la competitividad Ciudad – País

El aporte en cuanto a la competitividad ciudad - país, es entendido como el aporte sostenido del mejoramiento del bienestar de las personas beneficiadas por la implementación del proyecto donde la calificación iba de 1 a 5, donde 1 es nada importante y 5 es muy importante.

#### 4. Disponibilidad de área para la ejecución del proyecto:

El último criterio utilizado fue establecido como la disponibilidad de área para ejecución del proyecto, donde la calificación va de 1 a 4, donde 1 es nada disponible y 4 muy disponible.

Adicionalmente a los 4 criterios mencionados, se realizó una evaluación de impacto de movilidad de los proyectos considerando los siguientes indicadores asociados a cambios en la demanda de pasajeros del sistema, el nivel de servicio, los tiempos de viaje, el costo generalizado y la población beneficiada. En la siguiente tabla se presentan los indicadores considerados, su descripción y unidades

---

<sup>2</sup> Los expertos consultados son los equipos directivos de las entidades del Distrito relacionados con la planeación, construcción y seguimiento de proyectos de infraestructura para el transporte.

**TABLA 3. DESCRIPCIÓN DE INDICADORES**

| <b>Indicador</b>                                      | <b>Unidad</b>          | <b>Descripción</b>  |
|---|------------------------|---|
| Carga máxima  | pasajeros/hora/sentido | Pasajeros por hora por sentido en el punto más cargado del corredor. Valor medio esperado para diferentes escenarios de modelación.   |
| Mejora Nivel de Servicio - NdS troncales actuales (%) | Porcentaje (%)         | Mejora porcentual en la relación volumen/capacidad en las troncales actualmente existentes estimado por la herramienta de modelación comparando el escenario con proyecto con un escenario base sin proyecto          |
| Mejora costo generalizado transporte público (%)      | Porcentaje (%)         | Mejora porcentual del costo generalizado estimado por la herramienta de modelación para todos los usuarios del sistema de transporte público, comparando el escenario con proyecto con un escenario base sin proyecto |
| Mejora tiempo total de viaje                          | Miles de horas         | Mejora de tiempo de viaje (reducción de tiempo de viaje) para todos los usuarios de los modos motorizados (i.e. T. Público, Auto, Moto y Taxi)  |
| Mejora tiempo viaje transporte privado                | Miles de horas         | Mejora de tiempo de viaje (reducción de tiempo de viaje) en transporte privado  |
| Abordajes   | Unidad (Pasajeros)     | Abordajes totales del sistema de transporte público   |
| Cobertura- Población potencialmente beneficiada       | Miles de habitantes    | Cantidad de personas que potencialmente percibirán reducción en tiempos de viaje.   |
| Costo del proyecto                                    | millones COP           | Costo estimado de inversiones del proyecto - CAPEX  |
| Longitud  | km                     | Longitud del proyecto (según estado actual de diseño)   |
| Costo por km  | Millones de COP/km     | Costo del proyecto dividido por la longitud   |

Fuente: Elaboración Secretaría Distrital de Movilidad

Los criterios facilidad en la construcción, competitividad y disponibilidad de área, se pueden definir como el componente flexible que se alimenta principalmente del criterio de los expertos consultados, mientras el criterio de estado de avance de diseños se determina para cada proyecto. Ahora bien, los indicadores mencionados en la tabla 3 Descripción de Indicadores, corresponden a datos objetivos obtenidos a partir de análisis realizados en herramientas de modelación que se alimentan y soportan con estudios técnicos que se desarrollan para avanzar en la maduración de los proyectos.

### 8.2.3 Modelo de transporte para la obtención de indicadores

Tomando como principal insumo los resultados del modelo de transporte para la evaluación de los proyectos, es importante identificar los escenarios temporales que se van a considerar, así como los escenarios de desarrollo urbano futuros que deberían tenerse en consideración. Esto se describe en mayor detalle en el numeral referente a generalidades del modelo que se encuentra detallado en el requisito A1-Modelo de transporte, asimismo, se resaltan algunos aspectos importantes del modelo, siendo este una herramienta de modelización del sistema de transporte para analizar proyectos de transporte de pasajeros, y específicamente se concentra en la hora pico de la mañana (6:30-7:30), dado que esta es la hora de mayor demanda de viajes para un día hábil típico. Adicionalmente, se resalta que los modos no motorizados (bicicleta y caminata), aún no son parte integral de los elementos incluidos en esta herramienta dentro del proceso de selección modal y asignación, lo cual se debe a la dificultad técnica y alto nivel de incertidumbre

asociados a las representaciones matemáticas del proceso de toma de decisiones de viaje por parte de los usuarios de estos modos.

En la aplicación del modelo para este proceso de priorización, se definió como corte temporal estratégico el año 2035, con el cual se desea identificar los proyectos que generan mejores indicadores de impacto y desempeño para este corte temporal y, por lo tanto, ser priorizados para su desarrollo. Este corte temporal se determinó en alineación con el periodo de actualización del POT y el documento CONPES 4034 de 2021. Empleando el modelo de transporte descrito, se realizaron análisis con y sin cada uno de los proyectos para determinar el impacto del proyecto en la red con los cuales se obtuvieron los indicadores que se presentan en la sección de Resultados.

#### 8.2.4 Aplicación de Montecarlo

Como se mencionó anteriormente, la evaluación multicriterio en el proceso de la decisión sobre alternativas, o priorización de proyectos, requiere en algunas ocasiones de la generación de pesos o ponderaciones para cada uno de los criterios, de manera tal que a partir de estos se pueda tener una descripción de la importancia de estos y su influencia sobre los resultados de la priorización.

Se han aplicado diferentes métodos para la determinación de pesos en las evaluaciones multicriterio, algunos de los métodos se centran en cuantificar la importancia de los valores de los atributos que caracterizan a cada proyecto, métodos como el del vector propio en el análisis del proceso jerárquico, los mínimos cuadrados ponderados o el método de entropía son algunos ejemplos de ello. En esta aplicación, los pesos se generan estocásticamente, generando vectores de pesos aleatorios con distribución uniforme, los cuales son analizados mediante simulaciones de Montecarlo.

Lo anterior radica en el hecho de que los diseñadores del proyecto o las modelaciones de estos pueden tener diferentes puntos de vista, en el caso del primero o generar una serie de resultados que dependen de diversos parámetros que pueden ser subjetivos en el caso del segundo, transfiriendo así, una importancia subjetiva que se puede reflejar en los criterios de los proyectos.

Dado que orden de priorización se ve influenciada por los pesos otorgados a los criterios, es necesario garantizar que la elección de pesos no premia a un criterio en particular, sino que todos los criterios están siendo tratados con ecuanimidad. Para ello, se generan un gran número de vectores con diferentes pesos que representan todos los diferentes puntos de vista que tienen los diseñadores al momento de escoger tanto los criterios como sus valores, lo anterior garantiza que cada uno de los proyectos tiene una probabilidad de ocupar el primer lugar de prioridad (Kolios et al., 2016). Posteriormente, se predice el resultado de la priorización para cada selección de pesos mediante el principio de Simulación de Montecarlo.

Es importante recordar en este punto que la simulación de Montecarlo es una técnica estadística que genera variables aleatorias provenientes de una determinada distribución de probabilidad, con el fin de modelar la incertidumbre de un sistema. En general, se tiene un número dado de observaciones  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \sim f(x)$  que representan muestras provenientes de un modelo probabilístico, el cual es usualmente desconocido, pero puede aproximarse a través de  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  (Barbu and Zhu, 2020).

La aplicación del método en problemas de decisión multicriterio, requiere en primer lugar la disponibilidad de la matriz multicriterio ( $X$ ), con  $n$  cantidad de alternativas y  $p$  criterios para cada una:

#### ECUACIÓN 1: MATRIZ MULTICRITERIO

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{Proyecto 1} \\ \text{Proyecto 2} \\ \vdots \\ \text{Proyecto } n \end{matrix}$$

Sobre los  $j$  criterios se aplica una función que permite identificar cuál alternativa maximiza la preferencia de alternativas. Dichos criterios pueden encontrarse en diferente escala ya que cada uno de ellos le apuntan a diferentes dimensiones del problema a solucionar, dichas escalas afectan a menudo el problema de optimización, por lo que se deben estandarizar los criterios de decisión ( $z_{ip}$ ) para que todos tengan una escala común. Entonces, la matriz de criterios estandarizados es:

**ECUACIÓN 2: MATRIZ DE CRITERIOS ESTANDARIZADOS**

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1p} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2p} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{np} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{Proyecto 1} \\ \text{Proyecto 2} \\ \vdots \\ \text{Proyecto } n \end{matrix}$$

En el siguiente paso, se genera un valor  $\alpha_p \sim U(0,1)$  para  $p = \{1,2, \dots, p\}$  los  $p$  criterios de la matriz de decisión. En el sentido matemático, la generación de pesos debe estar restringida a  $\sum_{j=1}^p \alpha_j = 1$ . Lo anterior garantiza que no se premia a criterios en particular, así como tampoco penalizarlos, adicionalmente, los criterios no tienen peso nulo en ningún momento.

A continuación, se calcula la función de utilidad como la suma agregada de cada alternativa según la correspondiente generación de pesos:

**ECUACIÓN 3: FUNCIÓN DE UTILIDAD**

$$u_i(\alpha) = \sum_{j=1}^p \alpha_j z_{ij} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

El valor  $u_i$  representa desde el punto de vista de la teoría de la decisión, a la utilidad obtenida por el  $i$ -ésimo proyecto y  $z_{ij}$  a los diferentes criterios estandarizados. La alternativa de mayor utilidad se considera entonces como la primera en el orden de prioridades, sin embargo, ordenando las utilidades se puede crear un ranking de proyectos a considerar (Chýna et al., 2012).

Se realizan  $B$  cantidad de ensayos del procedimiento descrito, en cada uno de ellos, un nuevo juego aleatorio de pesos es generado, e igualmente, en cada de ellos se calculan los estadísticos de orden según las utilidades de los proyectos con el fin de obtener el orden de preferencia de ellos en cada ensayo. La convergencia de los resultados del método se estudió midiendo la consistencia de los resultados de los proyectos y sus probabilidades relacionadas.

Dado que en cada ensayo, los proyectos pueden ocupar una diferente posición en el orden de utilidades dada la configuración de pesos, se calcula una medida global que busca ordenar la preferencia agregada de cada proyecto, con el fin de generar una matriz  $P_{ij}$  de preferencias de orden  $n$ , por ejemplo:

Tabla 4: Ejemplo de tabla de orden de prioridad de los proyectos

| Proyecto   | Puesto 1 | Puesto 2 | Puesto 3 | Puesto 4 | Puesto 5 | Puesto 6 | Puesto 7 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Proyecto_1 | 32.5%    | 17.4%    | 23.8%    | 24.4%    | 1.8%     | 0.0%     | 0.0%     |
| Proyecto_2 | 30.3%    | 45.9%    | 22.6%    | 1.1%     | 0.0%     | 0.0%     | 0.0%     |
| Proyecto_3 | 19.9%    | 16.4%    | 19.8%    | 38.3%    | 5.0%     | 0.3%     | 0.2%     |
| Proyecto_4 | 17.3%    | 20.3%    | 33.5%    | 28.8%    | 0.0%     | 0.0%     | 0.0%     |
| Proyecto_5 | 0.4%     | 0.0%     | 0.3%     | 7.2%     | 82.9%    | 8.0%     | 1.3%     |
| Proyecto_6 | 11.8%    | 1.2%     | 0.2%     | 0.0%     | 0.0%     | 45.0%    | 41.7%    |
| Proyecto_7 | 0.1%     | 1.5%     | 20.9%    | 64.7%    | 12.8%    | 0.0%     | 0.0%     |

Fuente: Elaboración SDM

Finalmente, dado que los proyectos pueden ocupar diferente ranking según la configuración de pesos, se calcula un score global, que busca ordenar la preferencia agregada de cada proyecto, de la siguiente forma:

$$v_j = \frac{1}{X_{(j)}}$$

$V_j$  representa el nivel de importancia otorgado según el lugar del ranking ocupado según la utilidad en cada ensayo B, dicho nivel de importancia afecta a la probabilidad de que un proyecto ocupe un determinado lugar en el ranking de proyectos. Dado lo anterior, el score global  $c_i$  de cada proyecto se calcula como:

$$c_i = \sum_{j=i}^p v_j p_{ij} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

El algoritmo de cálculo se puede resumir entonces de la siguiente manera:

$$\max c_i = \sum_{j=i}^p v_j p_{ij} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

sujeto a:

$$\sum_{j=1}^p \alpha_j = 1$$

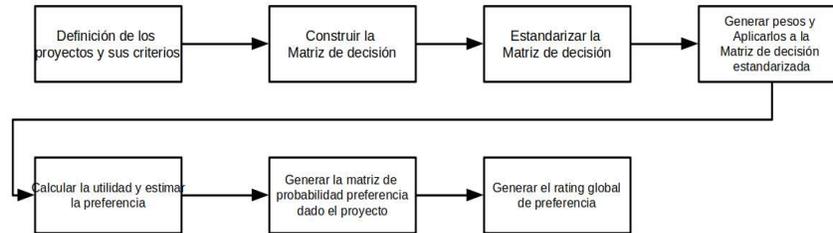
$$u_i(\alpha) = \sum_{j=i}^p \alpha_j z_{ij} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

$$v_j = \frac{1}{X_{(j)}}$$

$$c_i > 0, v_j > 0, u_i > 0, \alpha_j > 0$$

en tanto que el proceso se esquematiza así:

FIGURA 2: PROCESO DE DECISIÓN



Fuente: Elaboración Secretaría Distrital de Movilidad

Ya en la aplicabilidad de la teoría, el análisis propuesto consiste en ejecutar B veces (100,000) el siguiente algoritmo, teniendo criterios estandarizados (zik):

$$z_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{\sigma_k}$$

Adicionalmente se realizaron los siguientes pasos:

a) Generar un valor  $a_k \sim U(0,1)$  para  $k=\{1,2,\dots, k\}$ , los K criterios considerados.

b) Hacer:

$$w_k = \frac{a_k}{\sum_{k \in K} a_k}$$

c) Calcular el puntaje agregado de cada proyecto como:

$$s_i = \sum_{i \in I} w_k z_{ik}$$

## 8.3 RESULTADOS

### 8.3.1 Indicadores y criterios

Luego de la estimación de las modelaciones con los diferentes proyectos en el corte temporal definido se obtuvieron los siguientes valores para cada indicador objetivo por cada proyecto.

TABLA 5. VALORACIÓN DE INDICADORES POR PROYECTO

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\_VD

|  | Carga máxima            | Mejora NDS troncales actuales | Mejora costo generalizado de Transporte público | Mejora tiempo total de viaje | Mejora tiempo viaje transporte privado | Abordajes | Población potencialmente beneficiada | Costo de inversión estimado | Longitud | Costo por km       |
|--|-------------------------|-------------------------------|---|------------------------------|--|-----------|--------------------------------------|-----------------------------|----------|--------------------|
| Proyecto   | pasajero s/hora-sentido | (%)                           | (%)   | Miles de horas               | Miles de horas                         | Pasajeros | Miles de habitantes                  | millones COP                | km       | Millones de COP/km |
| Línea 2 del metro (L2MB)                                       | 45000                   | 18,1                          | 1   | 1.396                        | 172                                    | 1.083.494 | 1.445                                | \$15.300.000                | 15.5     | 987.096            |
| Troncal Av. Ciudad de Cali (Av. Manuel Cepeda Vargas a Cll 80) | 25000                   | 13,1                          | 1,1   | 490                          | -76                                    | 1.107.693 | 2.016                                | \$ 2.751.746                | 9.3      | 295.886            |
| Troncal Borde Occ. Calle 13 (Río Bogotá - Puente Aranda)       | 15000                   | 1,4                           | 0,6   | 343                          | 157                                    | 1.095.392 | 643                                  | \$ 3.390.000                | 11.4     | 297.368            |
| Extensión PLMB Norte (Cll 200)                                 | 30000                   | 7,61                          | 0,14  | 401                          | 0                                      | 1.096.156 | 498                                  | \$ 8.303.876                | 8.1      | 1.025.169          |

Fuente: Elaboración Secretaría Distrital de Movilidad, 2021

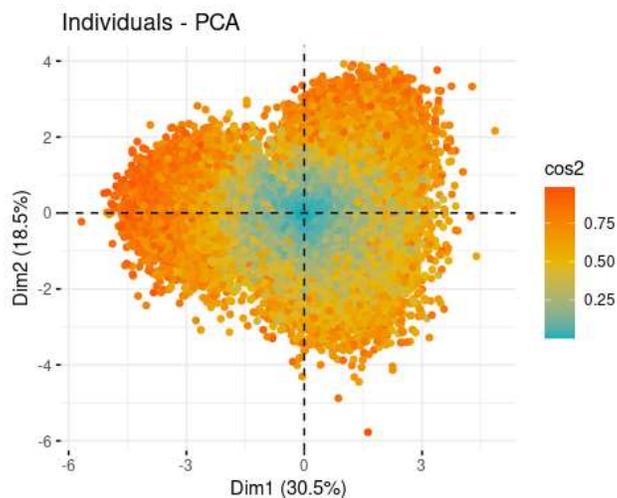
TABLA 6. VALORACIÓN DE CRITERIOS POR PROYECTO

|  | Estado de Avance de los Estudios  | Facilidad constructiva  | Aporte a la competitividad Ciudad – País                                | Disponibilidad de área para la ejecución del proyecto                   |
|--|---|---|---|---|
| Proyecto   | 1 = Conceptual -2 = Prefactibilidad -3 = Factibilidad -4 = Estudios y diseños a detalle | Escala numérica de 1 a 9 donde 9 representa muy fácil y 1 muy difícil | Calificación de 1 a 5, donde 1 es nada importante y 5 es muy importante | Calificación va de 1 a 4, donde 1 es nada disponible y 4 muy disponible |
| Línea 2 del metro (L2MB)                                       | 3   | 3   | 3   | 3   |
| Troncal Av. Ciudad de Cali (Av. Manuel Cepeda Vargas a Cll 80) | 4   | 4   | 4   | 1   |
| Troncal Borde Occ. Calle 13 (Río Bogotá - Puente Aranda)       | 4   | 5   | 5   | 4   |
| Extensión PLMB Norte (Cll 200)                                 | 2   | 3   | 3   | 1   |

Fuente: Elaboración Secretaría Distrital de Movilidad, 2022

Los anteriores valores de cada indicador, en conjunto con los obtenidos de los criterios del componente flexible se simularon mediante la montecarlo, a través de la implementación de un modelo de máquina de aprendizaje supervisada, conocida como Análisis de Componentes Principales - ACP; ésta máquina logra la proyección de los datos simulados sobre un plano de factores que resumen tanto la información simulada como las variables incluidas y su interpretación consiste en que los puntos al medio tienen una menor incidencia sobre la asignación de puntajes finalmente obtenidos para la clasificación de los proyectos, lo cual es usual, ya que los puntos cercanos al cruce de los ejes son los menos característicos de los obtenidos o asociados en mayor medida con la opinión o puntajes promedio que no tienen en mayor incidencia en la preferencia de un proyecto en relación a otro, tal como se muestra en la siguiente figura:

FIGURA 3: PUNTOS INDIVIDUALES SIMULADOS



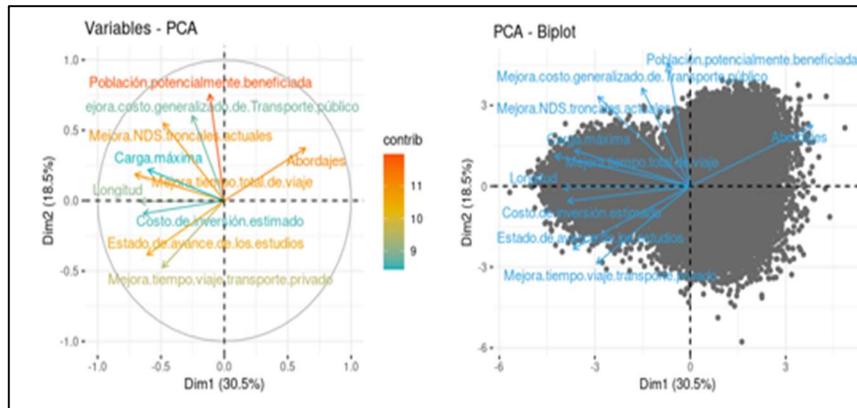
Fuente: Elaboración SDM-DIM 2022

Con respecto a la proyección sobre el primer plano factorial y en relación con la proyección de las variables consideradas; se encuentra que, dada la proyección obtenida, aquellos programas que se ubiquen a la izquierda del cruce de los ejes tienden a tener un mayor valor de las variables consideradas más relevantes, salvo la cantidad de abordajes, y es por esto que aquellos proyectos ubicados en la parte izquierda del cruce de los ejes, para el plano factorial, cuentan con mayores posibilidades de ser proyectos más viables o factibles; de forma análoga se concluye con respecto a los proyectos que proyectados sobre este plano se encuentren por encima del eje horizontal.

Figura 4: Proyección sobre el primer plano factorial

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\_VD



Fuente: Elaboración SDM-DIM 2022

Como conclusión, y tal como se mencionó anteriormente; al proyectar tanto los datos simulados como las variables o indicadores considerados; se encuentra que aquellos datos simulados que se ubican a la izquierda del cruce de ejes dan cuenta de mayores valores para dichas variables o indicadores y por ende de proyectos asociados a la condición de ser más preferidos que aquellos caracterizados por puntos que se encuentren al otro lado de dicho eje o a la derecha; según la proyección obtenida y así mismo aquellos dentro del plano por encima de la línea horizontal o primer eje.

Luego de la obtención de los indicadores con los ejercicios de modelación y valoración de criterios, se realizó un análisis de correlación de los indicadores. En este ejercicio se observó que el indicador de Abordajes totales en el Sistema de Transporte Público y el de Transferencias totales en el Sistema de Transporte Público, tienen una correlación de 99%, esto puede causar problemas al momento de realizar la simulación ya que se puede sobreestimar la influencia de dichos criterios, por lo que se elimina del análisis el criterio de transferencias y los criterios de tiempo en modos y abordajes iniciales.

TABLA 7. TABLA DE INDICADORES DE CORRELACIONES

| Correlación    | avance | pax_hp | nds   | costo_gen | tiempo_modos | tiempo_viaje | mejora_privado | aborda      | aboda_inicial | transfere | cobertura | facilCons | costo_tot | longitud | costo_km |
|----------------|--------|--------|-------|-----------|--------------|--------------|----------------|-------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| avance         | 1.00   |        |       |           |              |              |                |             |               |           |           |           |           |          |          |
| pax_hp         | -0.24  | 1.00   |       |           |              |              |                |             |               |           |           |           |           |          |          |
| nds            | -0.13  | 0.91   | 1.00  |           |              |              |                |             |               |           |           |           |           |          |          |
| costo_gen      | 0.11   | 0.56   | 0.71  | 1.00      |              |              |                |             |               |           |           |           |           |          |          |
| tiempo_modos   | -0.13  | 0.74   | 0.68  | 0.76      | 1.00         |              |                |             |               |           |           |           |           |          |          |
| tiempo_viaje   | -0.18  | 0.84   | 0.70  | 0.56      | <b>0.93</b>  | 1.00         |                |             |               |           |           |           |           |          |          |
| mejora_privado | -0.11  | 0.11   | -0.17 | -0.10     | 0.45         | 0.54         | 1.00           |             |               |           |           |           |           |          |          |
| aborda         | -0.17  | 0.22   | 0.46  | 0.58      | 0.12         | -0.07        | -0.57          | 1.00        |               |           |           |           |           |          |          |
| aboda_inicial  | 0.36   | 0.33   | 0.61  | 0.84      | 0.34         | 0.14         | -0.50          | 0.74        | 1.00          |           |           |           |           |          |          |
| transfere      | -0.26  | 0.18   | 0.41  | 0.50      | 0.06         | -0.11        | -0.54          | <b>0.99</b> | 0.64          | 1.00      |           |           |           |          |          |
| cobertura      | 0.12   | 0.56   | 0.78  | 0.87      | 0.48         | 0.34         | -0.45          | 0.77        | <b>0.93</b>   | 0.69      | 1.00      |           |           |          |          |
| facilCons      | -0.36  | -0.53  | -0.64 | -0.39     | -0.30        | -0.29        | 0.45           | -0.16       | -0.50         | -0.08     | -0.50     | 1.00      |           |          |          |
| costo_tot      | -0.26  | 0.86   | 0.73  | 0.21      | 0.48         | 0.65         | 0.02           | 0.10        | 0.05          | 0.10      | 0.33      | -0.57     | 1.00      |          |          |
| longitud       | -0.18  | 0.29   | 0.36  | 0.72      | 0.40         | 0.23         | -0.16          | 0.62        | 0.57          | 0.59      | 0.72      | 0.09      | 0.05      | 1.00     |          |
| costo_km       | -0.28  | 0.61   | 0.42  | -0.18     | 0.19         | 0.47         | 0.19           | -0.12       | -0.27         | -0.08     | -0.06     | -0.28     | 0.83      | -0.24    | 1.00     |

Fuente: Elaboración propia SDM-DIM 2022

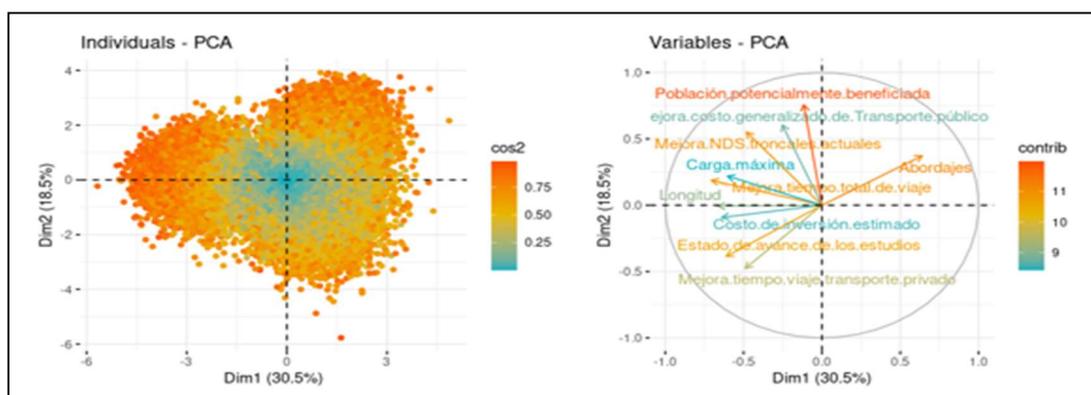
REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

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

Eliminando los indicadores mencionados, que pueden distorsionar el ejercicio a continuación se presentan los resultados obtenidos para el ejercicio de priorización:

TABLA 8. CALIFICACIÓN GLOBAL MULTICRITERIO APLICANDO SIMULACIÓN DE MONTECARLO

| Proyecto   | Ponderación | Ajuste eje | Constan k | Porcentaje |
|--|-------------|------------|-----------|------------|
| Línea 2 del metro (L2MB)                                       | -2,7        | 2,7        | 6,2       | 44,30 %    |
| Troncal Borde Occ. Calle 13 (Río Bogotá - Puente Aranda)       | 0,692       | -0,692     | 2,808     | 20,07 %    |
| Extensión PLMB Norte (CII 200)                                 | 0,794       | -0,794     | 2,706     | 19,34 %    |
| Troncal Av. Ciudad de Cali (Av. Manuel Cepeda Vargas a CII 80) | 1,22        | -1,22      | 2,28      | 16,29 %    |



Fuente: Elaboración SDM

De acuerdo con lo anterior, el proyecto con mejores resultados es la Línea 2 del metro (L2MB), teniendo en cuenta que su calificación es de 44,30%. Dentro de los criterios que más peso específico tienen se encuentran los relacionados con el efecto sistema producido por la alta demanda que se moviliza en periodos de tiempo muy cortos. Lo anterior, es un beneficio en la disminución en los tiempos de viajes de la población como producto de la mejora en la oferta de transporte público en la ciudad. En segundo lugar está la Troncal de la calle 13 la cual ofrece una alternativa de transporte público en el borde occidental de la ciudad, atendiendo la necesidad de movilidad de cerca de 1 millón de personas de las localidades de Kennedy y Fontibón, así como una mejora significativa del corredor vial por el cual se moviliza el 25 % de la carga que ingresa o sale de la ciudad y que en la mayoría de los casos corresponde a actividades económicas y logísticas de carácter Nacional.

Así las cosas, la propuesta de implementación de los proyectos priorizados producto de un análisis de criterios técnicos y que se encuentre acorde a lo propuesto en el documento CONPES 4034 y quedaría de la siguiente manera:

TABLA 9 CRONOGRAMA DE ENTRADA EN OPERACIÓN DE PROYECTOS PRIORIZADOS

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\_VD

| Proyecto   | Fecha entrada en operación | Fecha CONPES 4034 |
|--|----------------------------|-------------------|
| Línea 2 del metro (L2MB)                                       | 2032                       | 2035              |
| Troncal Borde Occ. Calle 13 (Río Bogotá - Puente Aranda)       | 2026                       | 2035              |
| Extensión PLMB Norte (CII 200)                                 | 2035*                      | 2035              |
| Troncal Av. Ciudad de Cali (Av. Manuel Cepeda Vargas a CII 80) | 2032*                      | 2035              |

\*Fechas estimadas sujetas a la disponibilidad presupuestal y al avance de los estudios técnicos exigidos en la Resolución No. 20203040013685 de 2020 del Ministerio de Transporte.

En este orden de ideas y dado el resultado de la priorización es importante mencionar que adicional a los beneficios descritos en el requisito D.Evaluación Social y Económica, en el marco de los acuerdos a los que se llegue con el Gobierno Nacional referente al perfil de aportes en un convenio de cofinanciación para los proyectos, el Distrito Capital obtiene unos beneficios generales asociados a los siguientes componentes:

1. El beneficio económico para la ciudad, ya que el Gobierno Nacional realiza aportes al proyecto en un orden de magnitud de entre 40 y 70% del total del proyecto lo que conlleva a una disminución de recursos que debe aportar el Distrito.
2. La viabilización de recursos por parte del Gobierno Nacional, aparte de liberal la presión fiscal del distrito, beneficia en el acompañamiento técnico constante y riguroso en las diferentes fases del proyecto, sin que ello implique la pérdida de la autonomía en la administración, si no por el contrario es un mecanismo mediante el cual en esfuerzos conjuntos se llevan a etapas de implementación proyectos de transporte masivo en beneficio de la movilidad de la ciudad.
3. Al contar con visiones de diferentes escalas territoriales (Nación - Distrito) en la ejecución de proyecto de transporte masivo, se favorece la concurrencia de diferentes disciplinas que redundan en la formulación e implementación de proyectos integrales que atienden realidades de aspectos sociales, ambientales, técnicos, jurídicos, tecnológicos.

## 8.4 GENERALIDADES PROYECTO DE MOVILIDAD

### 8.4.1 Descripción del proyecto de movilidad que la entidad territorial busca priorizar

La L2MB inicia en la Avenida Caracas con Calle 72, integrándose con la PLMB a través de una estructura peatonal entre la Estación 16 PLMB y Estación No 1 de la L2MB, permitiendo la interfaz entre la tipología elevada y la tipología subterránea. El trazado de la L2MB se plantea de manera subterránea para 10 de sus once estaciones, siendo la estación de Fontanar la única elevada.

En la siguiente figura y tabla se muestra la ubicación y tipología de estaciones de la L2MB.

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\_VD



Fuente: Contrato 136 de 2021

Tabla 10. Descripción general de estaciones L2MB

| Estación | Localización              | Tipología de la línea | Tipología de la estación | Conexión con otros modos                          |
|----------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|---|
| E1       | Calle 72 - Carrera 11     | Subterránea           | Andenes laterales        | TM, Zonal, Bicicletas, Peatonal y PLMB            |
| E2       | Calle 72 - Avenida NQS    | Subterránea           | Andén central            | RegioTram Norte, TM, Zonal, Bicicletas y Peatonal |
| E3       | Calle 72 - Avenida 68     | Subterránea           | Andén central            | TM, Zonal, Bicicletas y Peatonal                  |
| E4       | Calle 72 - Avenida Boyacá | Subterránea           | Andén central            | TM, Zonal, Bicicletas y Peatonal                  |

| Estación | Localización                        | Tipología de la línea | Tipología de la estación | Conexión con otros modos         |
|----------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|
| E5       | Calle 72 - Avenida Ciudad de Cali   | Subterránea           | Andén central            | Zonal, Bicicletas y Peatonal     |
| E6       | Avenida Ciudad de Cali - Calle 80   | Subterránea           | Andén central            | TM, Zonal, Bicicletas y Peatonal |
| E7       | Avenida Ciudad de Cali - Calle 90   | Subterránea           | Andén central            | Zonal, Bicicletas y Peatonal     |
| E8       | Avenida Ciudad de Cali - Carrera 93 | Subterránea           | Andén central            | Zonal, Bicicletas y Peatonal     |
| E9       | ALO - Calle 130A                    | Bajo nivel terreno    | Andenes laterales        | Zonal, Bicicletas y Peatonal     |
| E10      | ALO - Calle 143A                    | Bajo nivel terreno    | Andenes laterales        | Zonal, Bicicletas y Peatonal     |
| E11      | Calle 145 (Av. Suba) - Carrera 145  | Elevada               | Andenes laterales        | Zonal, Bicicletas y Peatonal     |

Fuente: Contrato 136 de 2021

#### 8.4.2 Cronograma

A partir del ejercicio de priorización realizado por el distrito, y teniendo en cuenta que la línea 2 del metro de Bogotá quedó en el primer lugar de priorización, se ha venido adelantando por parte de la ciudad el ciclo de planeación del proyecto con el fin de lograr la adjudicación de este mediante una licitación pública internacional contemplada para 2023. A continuación, se muestra el cronograma establecido con este fin:

| I<br>D | PRODUCTOS   | 2020 |    |     |    | 2021 |    |     |    | 2022 |    |     |    | 2023 |    |     |    |  |
|--------|---|------|----|-----|----|------|----|-----|----|------|----|-----|----|------|----|-----|----|--|
|        |   | I    | II | III | IV |  |
| 1      | Proceso de selección estructurador legal, técnico, financiero, riesgos e interventoría  |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |  |
| 2      | Análisis estudios y diseños de factibilidad para cumplir requisitos cofinanciación sistemas de transporte masivo del Ministerio de Transporte |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |  |
| 3      | Presentación requisitos aval técnico y aval fiscal  |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |  |
| 4      | CONPES Importancia estratégica  |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |  |
| 5      | Aprobación vigencias futuras y convenio de cofinanciación   |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |  |
| 6      | Elaboración de documentos técnicos, especificaciones y documentos contractuales   |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |  |
| 7      | Aprobación cupo de endeudamiento y negociación créditos con la banca  |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |  |
| 8      | Licitación pública internacional  |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |      |    |     |    |  |

Fuente: EMB,2021