



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA DETERMINAR SI LA INFRAESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO DEBE SER SUBTERRÁNEA, A NIVEL O EN VIADUCTO.

Alexander Jiménez Laverde

Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2018

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA DETERMINAR SI LA INFRAESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO DEBE SER SUBTERRÁNEA, A NIVEL O EN VIADUCTO

Alexander Jiménez Laverde

Tesis de grado para optar el título de:

Magíster en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas de Transporte

Director:

John Jairo Posada Henao, Doctor en Ingeniería

Grupo de Investigación:

Vías y Transporte - VITRA

Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2018

A mi esposa e hija que fueron la energía que me motivó a hacer posible este proyecto. A mis padres por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

A John Jairo Posada Henao, profesor de la Universidad Nacional de Colombia y director de este proyecto, por su apoyo, valiosos aportes y orientación.

Al equipo de trabajo del Metro de Medellín Ltda. por todo el apoyo que me brindaron durante mis estudios.

A todas aquellas personas que contribuyeron de alguna manera con la realización de este trabajo.

Resumen

En la literatura especializada y de acuerdo con la investigación sobre metodologías para la selección de la infraestructura a implementar en un sistema de transporte de mediana y alta capacidad en varias ciudades de América Latina, se evidencia la carencia de una metodología sólida para tomar este tipo de decisiones de forma independiente a intereses particulares. Se plantea entonces como objetivo de esta investigación, desarrollar una metodología que permita conocer cuál alternativa de infraestructura (subterránea, a nivel o en viaducto) se debe definir para la implementación de sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad en ciudades. Metodológicamente, el trabajo parte de una investigación de los criterios tenidos en cuenta para este tipo de decisiones en varias ciudades de América Latina, así como la realización de un grupo focal con profesionales especializados que actualmente trabajan en la planeación, diseño, construcción y operación de sistemas de transporte masivo, para hallar los criterios consolidados con base en los cuales se plantea el análisis.

De forma paralela, se estudian diferentes metodologías de análisis multicriterio para seleccionar la que más se ajuste a las necesidades de esta investigación en particular, para aplicarla a los criterios mencionados, y así conocer las ponderaciones de importancia de cada criterio respecto a la decisión de la alternativa a seleccionar, por lo que se plantea una metodología multicriterio basada en el AHP que permite identificar la alternativa de infraestructura más adecuada para un corredor de transporte de mediana o alta capacidad.

Se aplicó la metodología a dos proyectos en desarrollo en la ciudad, identificando que el tipo de infraestructura más adecuado para implementarlos es a nivel, coincidiendo con la que están promoviendo las entidades respectivas; lo que indica que es una decisión acertada, de acuerdo con la metodología desarrollada.

Palabras clave: Análisis multicriterio, Infraestructura de transporte, AHP, Selección de tipo de infraestructura.

Abstract

In the specialized literature and in accordance with the research on methodologies for the selection of the infrastructure to be implemented in a medium and high capacity transport system in several cities of Latin America, the lack of a solid methodology for taking this type of decisions independently to particular interests. The objective of this research is to develop a methodology that allows us to know which infrastructure alternative (underground, at the level or viaduct) should be defined for the implementation of medium and high capacity mass transport systems in cities. Methodologically, the work is based on an investigation of the criteria taken into account for this type of decision in several cities of Latin America, as well as the realization of a focus group with specialized professionals who currently work in the planning, design, construction and operation of mass transport systems, to find the consolidated criteria based on which the analysis is presented.

In parallel, different multicriteria analysis methodologies are studied to select the one that best suits the needs of this particular research, to apply it to the aforementioned criteria, and thus to know the weightings of importance of each criterion with respect to the decision of the alternative to be selected, for which a multi-criteria methodology based on the AHP is proposed, which makes it possible to identify the most appropriate infrastructure alternative for a medium or high capacity transport corridor.

The methodology was applied to two projects under development in the city, identifying that the most appropriate type of infrastructure to implement them is at a level, coinciding with the one being promoted by the respective entities; which indicates that it is an appropriate decision, according to the methodology developed.

Keywords: Multicriteria analysis, Transport infrastructure, AHP, Selection of type of infrastructure

Contenido

	Pág.
1. Planteamiento del problema, Justificación y Aporte esperado	5
1.1 Planteamiento del problema.....	5
1.2 Justificación y aporte.....	6
1.3 Pregunta de la investigación	8
2. Objetivos, alcance e hipótesis	9
2.1 Objetivo General	9
2.2 Objetivos específicos	9
2.3 Alcance del trabajo.....	9
2.4 Hipótesis	10
3. Marco teórico.....	11
3.1 Descripción de sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad en América Latina.....	11
3.1.1 El metro urbano	14
3.1.2 El metro regional y tren metropolitano	14
3.1.3 El metro ligero o liviano (término usado en Europa) o el LRT	14
3.1.4 El tranvía	15
3.1.5 El BRT	15
3.2 Teoría de la decisión	18
3.2.1 Promedio simple de juicios individuales.....	19
3.2.2 Promedio ponderado de juicios individuales	20
3.2.3 Agregación de juicios de probabilidad.....	20
3.2.4 Agregación de órdenes de preferencia	21
3.2.5 Agregación de valores y utilidades.....	22
3.2.6 Procesos de grupo no estructurados	22
3.2.7 Procesos de grupo estructurados	22
3.2.8 Conferencias de decisión.....	23
3.2.9 Toma de decisiones multicriterio.....	24
3.3 Métodos usados en la toma de decisiones multicriterio	25
3.3.1 Método de suma ponderada (WSM)	26
3.3.2 Método de producto ponderado (WPM)	26
3.3.3 Método de organización de clasificación de preferencias para la evaluación de enriquecimiento (PROMETHEE)	27
3.3.4 La eliminación y la elección de la traducción de la realidad (ELECTRE).....	27
3.3.5 La técnica de preferencia de orden por similitud a soluciones ideales (TOPSIS)	28
3.3.6 Programación de compromiso (CP)	29

3.3.7	La teoría de la utilidad de múltiples atributos (MAUT)	30
3.3.8	Proceso de jerarquía analítica (AHP)	30
3.4	Selección de método de análisis multicriterio	33
3.4.1	Descripción del método a utilizar	34
3.4.2	Análisis de sensibilidad de Monte Carlo en el apoyo a la decisión multicriterio	38
3.4.3	Grupos focales	39
3.4.4	Encuesta a expertos	41
4.	Estado del Arte	43
4.1	Infraestructura de movilidad de las ciudades en América Latina	45
4.2	Hacia donde van las ciudades en materia de sistemas de transporte	46
4.2.1	Sistemas Metro	47
4.2.2	Sistemas de ferrocarriles	51
4.2.3	Metros Ligeros y tranvías	53
4.2.4	Sistemas BRT	54
4.3	Cómo se han tomado las decisiones del tipo de infraestructura	55
4.3.1	Elección del tipo de infraestructura para el Metro de Medellín (Colombia).....	55
4.3.2	Elección del tipo de infraestructura para el Metro de Bogotá (Colombia).....	56
4.3.3	Elección del tipo de infraestructura en Quito (Ecuador)	59
4.3.4	Elección del tipo de infraestructura en Ciudad de Panamá (Panamá)	61
5.	Metodología	63
5.1	Fuentes de Información	64
5.1.1	Información secundaria	64
5.1.2	Información primaria	65
5.2	Proceso de elaboración de la matriz	73
6.	Planteamiento de la propuesta metodológica	83
6.1	Guía metodológica para la selección del tipo de infraestructura	83
6.1.1	Caracterización del proyecto	83
6.1.2	Identificación de criterios de selección del tipo de infraestructura a implementar	85
6.1.3	Identificación de ponderaciones de los criterios y subcriterios	86
6.1.4	Evaluación del tipo de infraestructura a implementar	87
6.2	Corredor Línea F de Metro de Medellín	88
6.3	Corredor Avenida 80 de Medellín	93
6.4	Análisis de Sensibilidad	99
7.	Conclusiones y recomendaciones	103
7.1	Conclusiones	103
7.2	Recomendaciones	106
8.	Bibliografía	109

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3-1: Árbol de jerarquía.....	31
Figura 3-2: Proceso para aplicar la AHP	35
Figura 4-1: Pesos por componentes en la evaluación del tipo de infraestructura del Metro de Bogotá.....	59
Figura 4-2: Estructura jerárquica selección de alternativas de trazado Quito.....	60
Figura 5-1: Modelo de pregunta tipo 1 para encuesta a expertos.....	72
Figura 5-2: Modelo de pregunta tipo 2 para encuesta a expertos.....	73
Figura 6-1: Localización Corredor Línea F.	90
Figura 6-2: Localización Corredor Avenida 80.....	95

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Características técnicas y operativas de los sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad.....	16
Tabla 3-2: Comparaciones pareadas propuestas por el AHP.	32
Tabla 3-3: Ejemplo de matriz de comparación de pares.	35
Tabla 3-4: Ejemplo de totales por columnas de la Matriz de comparación de pares. ...	36
Tabla 3-5: Ejemplo de matriz normalizada.	36
Tabla 3-6: Ejemplo de vector de prioridades.	36
Tabla 3-7: Índice de consistencia aleatorio.	38
Tabla 4-1: Pesos relativos de cada componente del análisis de Metro de Bogotá.	59
Tabla 4-2: Criterios Básicos de Inserción del Sistema Metro de Ciudad de Panamá. .	61
Tabla 4-3: Características de los tramos de la línea 1 de Metro de Panamá.....	62
Tabla 5-1: Resumen de resultados del grupo focal.	67
Tabla 5-2: Resumen de criterios y subcriterios.	70
Tabla 5-3: Expertos encuestados.	71
Tabla 5-4: Matriz de comparación pareada de selección del tipo de infraestructura (diligenciada).	74
Tabla 5-5: Matriz de selección del tipo de infraestructura normalizada.	74
Tabla 5-6: Vector de prioridades de criterios de selección del tipo de infraestructura .	75
Tabla 5-7: Proceso de síntesis para la selección del tipo de infraestructura	75
Tabla 5-8: Relación de consistencia de la selección del tipo de infraestructura	76
Tabla 5-9: Pesos globales de criterios y subcriterios de selección de tipo de infraestructura.....	77
Tabla 5-10: Ponderación por tipo de infraestructura.....	78
Tabla 5-11: Evaluación de Criterios, Subcriterios y factores de importancia de infraestructura	79
Tabla 6-1: Evaluación criterios y subcriterios proyecto Línea F.....	92
Tabla 6-2: Evaluación del tipo de infraestructura a implementar en el Corredor Avenida 80	98
Tabla 6-3: Análisis de sensibilidad de la aplicación de la metodología para el Corredor Línea F	100
Tabla 6-4: Análisis de sensibilidad de la aplicación de la metodología para el Corredor Avenida 80	101

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
AFD	Agencia Francesa de Desarrollo
AHP	Analytical hierarchy process
BRT	Bus Rapid Transit
CBA	Cost-benefit analysis
CBTC	Communications-Based Train Control
CP	Compromise programming
ELECTREX	Compromise programming
ETMVA	Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá
FDN	Financiera de Desarrollo Nacional
FTA	Federal Transit Administration
IPEA	Instituto de Pesquisa Económica Aplicada
LRT	Light Rail Transit
MADM	Toma de decisiones de atributo múltiple
MAUT	Multi-attribute utility theory
MCDM	multi-criteria decision-making
MODM	Toma de decisiones multiobjetivo
NATM	New Austrian Tunneling Method
PLMB	Primera Línea del Metro de Bogotá
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
PROMETHEE	Preference ranking organization method for enrichment evaluation
SITM	Sistemas Integrados de Transporte Masivo
TBM	Tunnel Boring Machine
TOPSIS	The technique for order preference by similarity to ideal solutions
UITP	International Organisation of Public Transport
WPM	Weighted product method
WSM	Weighted sum method

Introducción

La presente investigación brinda una herramienta de análisis para la identificación del tipo de infraestructura a implementar en un corredor para un sistema de transporte masivo de mediana y alta capacidad en zonas urbanas.

Se identifica la necesidad de desarrollar esta propuesta metodológica, debido a que en la actualidad se han generado controversias sobre si la decisión de implementar un tipo de infraestructura en sistemas de transporte en ejecución fue la más adecuada, y no hay un consenso entre las diferentes especialidades sobre cuál debería ser el tipo de infraestructura más viable para el desarrollo de un sistema de transporte masivo de mediana y alta capacidad.

Por otra parte, se consultaron proyectos de infraestructura de transporte de mediana y alta capacidad desarrollados en América Latina, con el fin de identificar la metodología utilizada para la definición del tipo de infraestructura que, aunque han hecho análisis para definirlo, no se tiene una metodología única que permita esta identificación.

Se desarrolla entonces una metodología independiente de intereses políticos, económicos particulares o de algún otro tipo, de forma que la decisión tomada por los planificadores del proyecto pueda ser la más adecuada desde todo punto de vista, para ello, se construye una matriz multicriterio mediante el uso de la metodología AHP desarrollada por Saaty (1980) que se basa en la descomposición de un problema complejo en una jerarquía con objetivo en la parte superior de ella, criterios y subcriterios en niveles y subniveles intermedios de la jerarquía, y alternativas de decisión en la parte inferior de ella. Los elementos a un nivel de jerarquía dado se comparan en pares para evaluar su preferencia relativa con respecto a cada uno de los elementos en el siguiente nivel superior.

Para la identificación de los criterios a evaluar mediante la metodología mencionada, se lleva a cabo un grupo focal con la participación de profesionales que actualmente laboran

en la planificación, diseño, construcción y operación de sistemas de transporte de mediana y alta capacidad, y como resultado de este ejercicio, se identificaron ocho grandes criterios a tener en cuenta en el análisis del tipo de infraestructura a implementar.

Una vez hallados los criterios a evaluar, se procede a encuestar a profesionales de diferentes especialidades y con amplia experiencia en el desarrollo de proyectos con las características mencionadas. El objeto de esta encuesta es identificar, de acuerdo con la metodología AHP, los niveles de importancia de cada criterio frente a los demás y así poder establecer las ponderaciones de los criterios para el análisis de cada alternativa. Para efectos de esta investigación, el tipo de muestreo seleccionado es el no probabilístico, específicamente el muestreo por juicio en el cual se seleccionaron a juicio del equipo investigador los profesionales a encuestar por la especificidad del tema a desarrollar.

Se plantea entonces una metodología que reúne todos los criterios y subcriterios identificados y que se basa en la metodología AHP para la estimación de las ponderaciones de importancia de cada uno de ellos que permite identificar el tipo de infraestructura más adecuado para la implementación de un sistema de transporte masivo de mediana o alta capacidad en zonas urbanas.

Posteriormente, se hizo uso de la metodología desarrollada para el análisis del tipo de infraestructura a implementar en dos proyectos de la Ciudad de Medellín, incluidos en el Plan Rector de expansión del Metro de Medellín Ltda.

El documento presenta en el Capítulo 1 el Planteamiento del problema, la justificación y el aporte de esta investigación, posteriormente en el Capítulo 2 de presentan los objetivos, el alcance y la hipótesis, en el capítulo 3 se presenta el marco teórico donde se describen los sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad de América Latina, en este mismo capítulo se presenta un breve resumen de las teorías de decisión y metodologías de decisión multicriterio más conocidas para proceder con la selección de la metodología a utilizar en esta investigación. El capítulo 4, contiene el estado del arte en materia de cómo se han tomado las decisiones del tipo de infraestructura a implementar en proyectos de las características de esta investigación para tener en cuenta en el desarrollo de la Metodología descrita en el capítulo 5.

Finalmente, en el capítulo 6, como parte fundamental del alcance de esta investigación, se presenta un planteamiento metodológico para la selección del tipo de infraestructura a implementar en un sistema de transporte masivo de mediana y alta capacidad que permita adelantar estudios similares o la utilización de la metodología propuesta.

1. Planteamiento del problema, Justificación y Aporte esperado

1.1 Planteamiento del problema

Algunas de las soluciones de movilidad disponibles para el desplazamiento de personas, en zonas urbanas, pueden requerir inversiones cuantiosas, obras de ingeniería complejas, trastornos al tráfico e impactos sociales, económicos y ambientales, entre otros, además de dificultades a los ciudadanos durante su implementación, lo que ha generado una discusión respecto a la conveniencia o no de implementar un sistema de transporte y, en caso de hacerlo, se generan preguntas como las siguientes: ¿cuál sería la forma más adecuada de ejecutarlo? ¿a nivel, en viaducto o subterráneo?

Los adelantos tecnológicos en beneficio de la Ingeniería permiten actualmente cambiar paradigmas respecto a si es más viable implementar un sistema de transporte a nivel, en viaducto o en túnel, sin embargo aún hay escepticismo en algunos gobernantes, quienes permiten que las decisiones de ejecución de estos sistemas se centren simplemente en cuál requiere menor inversión inicial o, peor aún, cuál se puede construir más rápido, sin importar los costos operativos que acarreen estos sistemas y las consecuencias que su implementación puede generar a los vecinos del corredor, durante la fase constructiva y, posteriormente en la operación del sistema.

La pregunta ahora es: ¿Qué tipo de infraestructura (subterránea, a nivel o en viaducto) para la implementación de los sistemas de movilidad de mediana y alta capacidad es más costosa en un medio urbano?

La respuesta a esta inquietud suele darse teniendo en cuenta sólo el análisis del valor de las obras civiles necesarias para la implementación del proyecto, que cada vez son menores gracias a los adelantos tecnológicos para su implementación. Pero ¿Qué tal si al

análisis del tipo de infraestructura a implementar se le suman los impactos generados por las obras a los habitantes? o ¿Qué tal si también se incluye el valor de oportunidad de desarrollos urbanos en los terrenos que deberían utilizarse, de implementarse a nivel? o ¿Se ha incluido en los análisis temas tales como los cambios en el valor del suelo de los predios que queden cerca del proyecto a causa de las obras ejecutadas? Es posible considerar también otras situaciones.

Ante esta situación, se encuentra necesario plantear una metodología con la que se tomen decisiones motivadas por análisis conjunto de las variables que inciden en la construcción y operación de sistemas de transporte, considerando al ejecutor o dueño del proyecto, el constructor, el operador urbano, los futuros usuarios y los vecinos al proyecto.

1.2 Justificación y aporte

Las ciudades actualmente se enfrentan a diferentes retos en materia de movilidad, de conectividad y de competitividad, que han llevado a los planificadores a buscar alternativas de atención a estos retos, los cuales cada vez son más ambiciosos. Sin embargo, mientras más crece la población, más difícil es la implementación de cualquier alternativa y, por ende, los costos asociados a ellas se incrementan (AFD et al, 2014).

En materia de movilidad, las ciudades requieren garantizar la posibilidad de que sus habitantes puedan desplazarse entre los diferentes lugares de su territorio (que en los viajes se denominan orígenes y destinos) ya sea por motivos de estudio, trabajo, ocio u otro, de una manera segura, ágil, cómoda y económica. Adicionalmente, el uso del vehículo particular cada vez es más difícil para estos desplazamientos, debido a que las vías se congestionan más y el espacio disponible para la construcción de nuevas es más escaso.

Para el caso del desplazamiento de personas se han desarrollado tecnologías que permiten movilizarlas de forma más eficiente, al poder desplazar más personas por vehículo, generar corredores troncalizados, e incluso con sistemas guiados, que reducen las necesidades de espacio para su implementación. Lo anterior, a su vez, genera disminución en los niveles de contaminación de las ciudades.

En busca de competitividad, uno de los retos que enfrentan las ciudades es la disminución del tiempo que invierten sus habitantes en desplazarse, el cual se ve afectado por la congestión de las vías. Las principales ciudades del mundo han buscado la solución a esta dificultad con el fortalecimiento de corredores de transporte masivo de mediana y alta capacidad, que permiten transportar gran número de personas de forma más eficiente, lo que genera que bajen los precios de moverse, disminuyan los tiempos de viaje y que no sean altos los niveles de contaminación ambiental producto de estos desplazamientos. Sin embargo, en ciudades como Medellín, esta posibilidad se ha visto limitada por el escaso espacio disponible en el cual podrían ubicarse estas soluciones de movilidad; lo anterior aunado a que, en algunos casos, se implementan obras sin dejar reservadas las fajas necesarias para el paso de estos sistemas o su posible posterior ampliación o modificación.

Ante estas dificultades, en algunas ciudades se ha optado por implementar estos sistemas en viaducto (elevados) sin analizar de forma detallada las implicaciones que esta decisión puede tener en temas como el valor de los predios vecinos del proyecto. Adicionalmente, la implementación de los sistemas de transporte en viaducto tendrá una afectación a redes de servicio público que en algunos casos pueden ser incluso mayor que si se ejecutara el proyecto subterráneo o a nivel (AFD et al, 2014). De igual forma, en lo relacionado con el componente ambiental, este tipo de infraestructura también limita la posibilidad de conservar la vegetación existente y futura.

Si bien las obras subterráneas evitan algunas dificultades, en temas prediales, sociales, de valorización, ambientales y en algunos casos en redes de servicio público, entre otras, en cierta medida también las generan, por lo cual es necesario tenerlas en cuenta y analizar los costos de operación de un sistema subterráneo en comparación con el sistema a nivel o en viaducto, dado que requieren sistemas de ventilación especializados, iluminación durante el período de operación y, durante su implementación, se deben considerar los riesgos asociados a la construcción de un túnel en un medio urbano.

Esta investigación se orienta a la implementación de Sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad en zonas urbanas que permita conocer cuál alternativa de infraestructura: subterránea, a nivel o en viaducto, conviene más para un corredor en estudio, y así permitir que las inversiones se hagan analizando los diferentes factores que

podría acarrear la construcción y operación del sistema, y no sólo aquel que indique que su construcción pueda ser menos costosa o más rápida, independiente de otros factores.

Para lograr esto se consultan las variables que se han considerado para la toma de esta decisión en ciudades que hayan implementado sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad subterráneos, a nivel o en viaducto, de forma que se puedan tener en cuenta y comparar estas variables, y agregar algunas más que el conocimiento actual de los sistemas pueda aportar, para que puedan analizarse conjuntamente y así apoyar la toma de decisión respecto al tipo de infraestructura a diseñar y construir.

Así mismo, se elabora un documento que sirva de base o guía para el análisis de variables en la toma de decisión sobre el tipo de infraestructura a ejecutar en un sistema de transporte masivo de mediana o alta capacidad.

Los resultados de esta investigación, como aporte al conocimiento, se podrán aplicar a diferentes proyectos similares, de forma que se logre tomar decisión adecuada para los proyectos trascendentales de infraestructura de sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad; adicionalmente, estos resultados podrían ser objeto de estudios posteriores de forma que se utilicen para otras decisiones relacionadas con la implementación de este tipo de proyectos.

1.3 Pregunta de la investigación

¿La metodología de análisis multicriterio aplicada a alternativas de infraestructura a implementar (subterránea, nivel o viaducto) para sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad (o un tramo del mismo) permite encontrar la alternativa más viable para su implementación?

2.Objetivos, alcance e hipótesis

2.1 Objetivo General

Diseñar una metodología multicriterio que permita conocer cuál alternativa de infraestructura (subterránea, a nivel o en viaducto) se debe definir para la implementación de sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad en ciudades.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar las variables tenidas en cuenta para la toma de decisión sobre el tipo de infraestructura (a nivel, en viaducto o subterránea) para la implementación de sistemas de transporte masivo, en ciudades que hayan requerido este tipo de decisión.
- Explorar y analizar nuevas variables que puedan ser incluidas dentro del análisis multicriterio, de acuerdo con criterios de profesionales de diferentes especialidades y de experiencias en el desarrollo de este tipo de proyectos.
- Elaborar una guía metodológica para el análisis multicriterio de selección de tipo de infraestructura, que sirva de herramienta para la toma de esta decisión.

2.3 Alcance del trabajo

Esta investigación busca estudiar las variables utilizadas, y nuevas variables a ser tenidas en cuenta, para la toma de decisiones en materia de la determinación del tipo de infraestructura necesaria para la implementación de sistemas de transporte de mediana y alta capacidad, en particular para ciudades latinoamericanas.

La metodología se desarrollará con base en análisis multicriterio para aplicar a la determinación del tipo de infraestructura a implementar en tramos de estudio de al menos dos proyectos, preferiblemente en Colombia e idealmente uno de ellos de mediana capacidad y el otro de alta capacidad.

Para esta investigación se considerarán los sistemas de alta capacidad tipo Metro Urbano, Metro Regional y Tren Metropolitano; y sistemas de mediana capacidad, como los Tranviarios, Metro Liviano y BRT.

2.4 Hipótesis

La propuesta metodológica desarrollada permite identificar la alternativa más viable para implementar el tipo de infraestructura (a nivel, subterránea o en viaducto) para un sistema de transporte masivo o un tramo de éste en ciudades.

3.Marco teórico

A continuación, se presenta un corto análisis de la infraestructura de transporte de alta y mediana capacidad que se tiene en la región, al igual que algunos de los proyectos de expansión de estos sistemas, se describen algunos de los métodos de toma de decisiones que se han desarrollado y finalmente la selección del método con el cual se ejecuta esta investigación.

3.1 Descripción de sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad en América Latina

Velásquez (2015) identifica que hay una estrecha relación entre la infraestructura y la actividad económica en la región donde se encuentra dicha infraestructura, que es conveniente distinguir los impactos económicos originados en la fase de construcción que en esencia están relacionados al corto plazo, de los que van surgiendo durante la fase de utilización de la infraestructura que hacen referencia al largo plazo y eventualmente son permanentes.

El perfeccionamiento de los medios de transporte mecánicos como el ferrocarril y el tranvía fue desde finales del siglo XIX insuficiente para garantizar la movilidad de las personas ante el acelerado crecimiento urbano. Estos elementos a su vez, condicionaron la morfología y funcionalidad urbana, dado que el crecimiento urbano fue considerable pero sólo hasta donde la implementación de los sistemas de transporte lo permitió (Velásquez, 2015). Posterior a la primera guerra mundial, estos sistemas fueron reemplazados paulatinamente por sistemas más flexibles en sus recorridos como el autobús lo que facilitó el ahorro de tiempo y multiplicó las posibilidades de acceso a nuevos sectores urbanos.

Millares (citado por Velásquez, 2015) manifiesta que la inducción a la utilización del automóvil, se planteó a partir de la promoción de una necesidad de consumo influenciada por las grandes industrias sobre los agentes públicos.

Lo anterior originó un aumento en la comercialización del automóvil, que generó a su vez la transformación de las ciudades, permitiendo que los usuarios de transporte urbano tuvieran alternativas de elección entre diferentes modos de transporte, originando la proliferación de ciudades aisladas y un aumento importante del vehículo privado respondiendo a las nuevas necesidades de desplazamiento de las personas, que a su vez produjo aumento en los niveles de congestión. “La calle deja de ser un espacio para el peatón para ser ocupado por la máquina” (Velásquez, 2015).

En la actualidad, el desordenado crecimiento de las ciudades, la preocupación por el medio ambiente y la pobreza son los tres factores más destacados de la sociedad urbana, en tal sentido Velásquez (2015) manifiesta que el transporte público juega un papel esencial de inclusión social y son las autoridades públicas quienes tienen la responsabilidad de garantizar movilidad para todos los ciudadanos fomentando las alternativas sostenibles de transporte público.

Existen algunas similitudes entre los diferentes sistemas de transporte del sector metro ferroviario, su principal diferencia radica principalmente en su capacidad de transporte, la oferta de servicio y el tipo de usuario que será atendido con el sistema. La escogencia del modo de transporte a implementar en un corredor específico está determinada por la capacidad que ofrece cada tecnología para el transporte de usuarios en la hora pico, de igual forma, esto es condicionado por el nivel de confort mínimo aceptable para la región específica (Velásquez, 2015), lo anterior, sin desconocer parámetros como las condicionantes que ofrece el territorio para el desarrollo del sistema y las limitantes tecnológicas tales como pendiente máxima admisible.

Al respecto, Ludwig (2005) afirma que las normas europeas y americanas proponen para el diseño de los sistemas metro ferroviarios un nivel de confort de cuatro pasajeros por metro cuadrado (algo rara vez logrado fuera de Europa y Estados Unidos). Con base en esto, para lograr un buen desempeño en la atención de las necesidades de movilización

de personas en las grandes metrópolis, se encuentra que los sistemas de transporte de alta capacidad son los más adecuados y entre ellos la alternativa más viable el Metro urbano y sus líneas o corredores.

Basados en las experiencias exitosas en varias ciudades del mundo, algunas ciudades de América Latina realizaron un primer esfuerzo encaminado a la mejora del sistema de transporte público invirtiendo en la construcción de sistemas férreos de alta capacidad buscando contrarrestar los impactos negativos del transporte público tradicional que venían experimentando (Pardo, 2009). Sin embargo, estos proyectos requieren inversiones cuantiosas y en muchos casos subsidio a la operación por lo que las inversiones en este tipo de proyectos disminuyeron después de la década de 1980 y se comenzó a explorar otras alternativas de menor costo.

Ante esta necesidad surgió una solución basada en buses que circulan por carriles exclusivos denominada BRT, implementada inicialmente en Curitiba (Brasil) en la década de 1970 y posteriormente replicada en varias ciudades de Latinoamérica y posteriormente replicada en todo el mundo. Al respecto, Pardo (2009) manifiesta que gracias al éxito que han tenido estos sistemas, principalmente en ciudades en desarrollo, se tiende a comparar a los BRT con otras formas de transporte masivo en ocasiones con argumentos parcializados hacia un sistema u otro y pocas veces este análisis se ha acompañado de un análisis cuidadoso del tema.

Lo realmente importante, resalta Pardo (2009), no es cual sistema es mejor que el otro, lo que ha generado un debate constante entre los profesionales que defienden una u otra tecnología, sino el mejoramiento del transporte público. Esta discusión lo que ha generado es que las ciudades pierdan entusiasmo en la implementación de sistemas de transporte público masivo más eficientes que el transporte público convencional.

Se considera que un sistema de transporte masivo puede considerarse de alta capacidad cuando es capaz de movilizar más de 20.000 pasajeros por hora y sentido. Para una mejor diferenciación de las tecnologías consideradas de alta y mediana capacidad, con base en el análisis hecho por Velásquez (2015) se presenta una breve descripción de algunas de ellas:

3.1.1 El metro urbano

Es un sistema que atiende generalmente zonas urbanas con demandas aproximadas entre 40 y 80 mil pasajeros/hora/sentido, generalmente es un sistema eléctrico sobre rieles lo que implica unas restricciones importantes en pendiente pero también se pueden utilizar ruedas neumáticas lo que permite pendientes un poco mayores.

Este tipo de sistemas no permite la interferencia directa con ningún otro modo de transporte, por lo cual las redes de metro son segregadas, generalmente elevadas o subterráneas en las zonas más consolidadas de las ciudades y por fuera de estas zonas generalmente se tienen vías a nivel. Las distancias entre estaciones varían entre 500 y 2000 metros, y pueden tener configuraciones de 3 a 10 vagones dependiendo de las necesidades de atención de la demanda, esta configuración puede variar dependiendo de la hora del día y generalmente la operación de estos sistemas es centralizada con conducción semi o automática.

3.1.2 El metro regional y tren metropolitano

Al igual que el metro urbano, este sistema puede atender demandas entre los 40 y 80 mil pasajeros/hora/sentido, sin embargo, se contempla para conectar centros urbanos con municipios o barrios alejados entre sí. Una característica frecuente de estos sistemas es que los picos de demanda son más acentuados en las mañanas en el sentido municipios o barrios hacia el centro urbano y en sentido contrario en las tardes a diferencia del metro urbano que normalmente la demanda tiene unas horas pico menos marcadas durante el día. Las estaciones normalmente se ubican entre 1200 y 4000 metros de distancia y la configuración de vagones al igual que la operación del sistema es muy similar al metro urbano.

3.1.3 El metro ligero o liviano (término usado en Europa) o el LRT

El desarrollo de estos sistemas de tipo metro ferroviarios, generalmente se presenta para atender a usuarios dentro de zonas urbanas y con demandas entre los 15 y 35 mil pasajeros/hora/sentido. Es un sistema que se adapta fácilmente a las condiciones del territorio generando procesos de renovación urbana en los alrededores del sistema haciéndolo muy atractivo respecto a otros sistemas. De igual forma, es un sistema

favorable con el medio ambiente dado que para la tracción se utiliza energía eléctrica, la cual no produce contaminación para la operación.

El material rodante es más liviano en comparación con los otros sistemas metro ferroviarios, de allí el término de metro liviano o ligero, al igual que la oferta de transporte que es menor en comparación con esos otros sistemas.

3.1.4 El tranvía

Es un sistema que opera con vehículos similares al metro ligero o liviano, pero con características de operación de marcha a la vista, es decir, que la señalización de la vía no condiciona la marcha del vehículo sino el criterio del conductor. Puede ser implementado en calles o carriles reservados o compartidos con otros vehículos o peatones y para el control de su operación utiliza la semaforización y señalización pública, lo que condiciona su velocidad de operación y por ende su capacidad que por estas condiciones ronda entre los 6 mil y los 12 mil pasajeros/hora/sentido la cual es aún menor al metro ligero o liviano.

3.1.5 El BRT

Una nueva alternativa de transporte conocida como los BRT, o autobuses expresos, es un sistema de transporte masivo de mediana capacidad que presenta características similares a los sistemas de metro liviano, y aunque puede requerir inversiones menores en su implementación, los costos de operación son superiores a estas otras tecnologías (Velásquez, 2015).

Los BRT se caracterizan por la circulación de autobuses expresos por carriles exclusivos en zonas urbanas, con la particularidad que el pago y el ingreso a los vehículos se lleva a cabo en estaciones cuyo nivel es igual al nivel del piso de los buses, disminuyendo los tiempos de pago, embarque y desembarque y haciendo el sistema accesible para personas de movilidad reducida.

En la **Tabla 3-1** se presentan algunas de las principales características técnicas de los sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad objeto de estudio en esta investigación.

Tabla 3-1: Características técnicas y operativas de los sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad.

Característica	Metro urbano	Tren Metropolitano	Metro ligero o LRT	Tranvía	BRT
Capacidad de pasajeros	Alta	Media o alta	Media	Media	Media
Capacidad del vehículo (pasajeros/vehículo a 6 pasajeros/m ²)	1.800 a 6.000	1.800 a 6.000	250 a 660	250 a 360	80-180
Capacidad del sistema pasajeros por hora por sentido	40.000 a 80.000	40.000 a 80.000	15.000 a 35.000	6.000 a 12.000	5.000 a 9.000
Instalaciones fijas					
Exclusividad de la vía (%)	100	90 a 100	10 a 40	0 a 40	10 a 40
Control del vehículo	Sistema de señalización automática	Sistema de señalización automática	Manual	Manual	Manual
Estación, altura de la plataforma	Alta	Baja o Alta	Baja o Alta	Baja	Baja o Alta
Control de acceso a la estación	Pleno	Ninguno o pleno	Ninguno o pleno	Ninguno o pleno	Ninguno o pleno
Características operacionales					
Máxima velocidad (km/h)	80 a 100	80 a 130	50 a 70	50 a 70	50 a 70
Velocidad operacional o comercial (km/h)	25 a 60	40 a 70	12 a 40	12 a 40	12 a 40
Aspectos sistemáticos					
Distancia entre estaciones (km)	0,5 - 2	1.2 - 4.5	0,35 – 0,8	0,35 – 0,8	0,35 – 0,8
Distancia media de viaje	Media hacia larga	Larga	Media hacia larga	Media hacia larga	Media hacia larga
Aspectos socio-urbanos					
Corto plazo de implementación	No	No	No	No	No
Impacto en el desarrollo urbano	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio
Facilita cambios culturales	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia a partir de Velásquez, 2015

Tal como se aprecia en la **Tabla 3-1**, las diferentes tecnologías de transporte ofrecen características que permiten la toma de decisión respecto a su implementación en determinada región la cual depende, adicionalmente, de criterios técnicos, financieros,

ambientales y sociales, entre otros. Esta investigación ofrece un criterio adicional para la toma de decisión en materia del tipo de infraestructura a considerar.

De acuerdo con la tecnología de transporte seleccionada para la implementación en determinada región, se deben tener en cuenta diferentes aspectos relacionados con los impactos que podría tener la construcción de un sistema de transporte en el sector específico. Dentro de los criterios principales a tener en cuenta y que serán ampliados a través de esta investigación, se identifican:

- Condiciones medioambientales
 - Fuentes hídricas: Interferencia con cuerpos de agua
 - Suelo: Generación de escombros durante la obra
 - Paisajismo Afectación arbórea
 - Ruido y vibraciones
 - Generación de ruido por la operación del sistema
 - Generación de vibraciones por la operación del sistema
- Condiciones urbanas
 - Renovación urbana
 - Potencial de generación de espacio público
 - Potencial de desarrollo de proyectos inmobiliarios
 - Potencial de recuperación de zonas deprimidas
 - Integración/des-integración urbana
 - Afectación de barrios con interés arquitectónico y/o urbanístico
 - Proximidad con edificaciones
 - Impacto visual
- Condiciones de accesibilidad
 - Accesibilidad en estaciones
 - Accesibilidad de los vehículos
 - Condiciones de accesibilidad durante incidentes
- Condiciones constructivas
 - Rendimiento tiempo total de construcción
 - Daño emergente y lucro cesante
 - Perturbaciones
 - En el tráfico vehicular

- En la operación del sistema
 - Generación de ruido y vibración por la construcción del sistema
 - Interferencias con redes principales
- Costos
 - Costos de inversión en la construcción del sistema y equipos
 - Costos de operación
- Impactos al sistema vial existente
 - Cierres de vías necesarios para la construcción
 - Cierres de vías definitivos
 - Posibilidades de soluciones a desnivel
- Impactos al comercio del sector durante las obras
- Impactos a los predios cercanos durante la construcción y posteriormente en operación
- Experiencia al usuario
 - Percepción en el uso del sistema de transporte
 - Apropiación de la ciudad
 - Percepción de seguridad
 - Salubridad e higiene
 - Iluminación

De igual forma, en esta investigación se identifican otros aspectos que normalmente no han sido tenidos en cuenta dentro de los análisis para la toma de decisiones sobre el tipo de infraestructura a construir para sistemas de transporte de mediana y alta capacidad, tales como reducción de la polución durante la construcción, accidentalidad y tiempos de viaje, entre otros.

3.2 Teoría de la decisión

Las personas se enfrentan constantemente a tomar decisiones frente a circunstancias simples o cuestiones trascendentales o complicadas, y de una u otra manera se hacen análisis de las implicaciones que estas decisiones puedan generar a diferentes aspectos tenidos en cuenta dentro de la decisión y este análisis depende de factores psicológicos, la experiencia, y la información disponible (Smith et al., 2000).

Cuando los problemas de decisión involucran una serie de objetivos, los encargados de tomar decisiones sin ayuda tienden a evitar hacer concesiones entre estos objetivos. Esto puede conducir a la selección de opciones que funcionan bien en un solo objetivo o al rechazo de opciones relativamente atractivas debido a que su buen desempeño en varios objetivos no permite compensar el mal desempeño en otros lugares. Estos problemas surgen porque el tomador de decisiones sin ayuda tiene “capacidad limitada de procesamiento de información” (Wilkins, et al., 1984). Cuando se enfrenta a un problema grande y complejo, puede haber demasiada información para manejar simultáneamente, por lo que el tomador de decisiones se ve obligado a usar estrategias mentales simplificadas, para llegar a una elección.

Es probable que al tomar decisiones basadas en múltiples criterios se puedan pasar por alto posibles situaciones o acontecimientos, lo cual puede evitarse con la conformación de grupos de personas que aporten experiencia, conocimientos e ideas creativas para tomar la decisión. De hecho, “la sinergia de los individuos puede hacer que la calidad global de la decisión del grupo sea mayor que la suma de las partes” (Goodwin, 2004). La creación de jurados, paneles o foros como estrategia para lograr llegar a la toma de decisión se basa en la premisa anterior.

Las ventajas que surgen de la creación de grupos de análisis para la toma de decisiones son la obtención de mayor cantidad de información sobre los temas específicos con lo cual se puede realizar análisis de sensibilidad para evaluar los posibles cambios de la decisión con las modificaciones en las variables analizadas.

A continuación, se describen algunos métodos para la toma de decisiones:

3.2.1 Promedio simple de juicios individuales

Se analiza el evento en que los juicios personales pueden considerarse imparciales, con la estimación de cada persona igual al valor verdadero más un error aleatorio e independiente. En este caso la media simple de las estimaciones individuales es la mejor manera de agregar juicios. La confiabilidad de este promedio mejorará a medida que el tamaño del grupo aumenta debido a que el error respectivo de cada juicio será promediado.

La situación anterior rara vez se encuentra en la práctica. Normalmente los miembros del grupo generarán opiniones correlacionadas porque a menudo su experiencia es en áreas de conocimiento similares o trabajan en el mismo ambiente o mismas fuentes de información. Por lo anterior, en estos casos la inclusión de nuevos miembros al grupo añadirá poca información nueva (Goodwin, 2004).

3.2.2 Promedio ponderado de juicios individuales

En los casos en que las apreciaciones de algunos miembros del grupo son consideradas de mayor importancia que los otros, se puede asignar un mayor peso a sus estimaciones y usar un promedio ponderado para representar el juicio del grupo. Sin embargo, el principal problema de usar promedios ponderados es que se requiere evaluar los conocimientos de los miembros del grupo para poder asignar los pesos.

Goodwin (2004) manifiesta que “la investigación en esta área ha indicado constantemente que los promedios simples producen estimaciones que son tan buenas o tan sólo ligeramente inferiores a los promedios ponderados”. Ferrell (citado por Goodwin, 2004) sugiere una serie de razones para esto. Sostiene que los grupos tienden a estar compuestos por individuos que tienen niveles muy similares de experiencia y acceso a la misma información. En el caso de grupos pequeños, aunque tengamos la suerte de identificar la mejor estimación individual, es improbable que su precisión sea mucho mejor que la del promedio simple de los juicios del grupo completo. Ferrell (1990) también señala que pocos experimentos proporcionan las condiciones donde la ponderación podría ofrecer ventajas. Sugiere que estas condiciones existen cuando hay:

“Un grupo moderadamente grande de individuos bien conocidos que con frecuencia trabaja en conjunto y tiene una amplia gama de diferentes tipos de experiencia para hacer frente a las preguntas que requieren una amplia gama de conocimientos. En ausencia de estas condiciones, un promedio simple de juicios individuales será probablemente suficiente”.

3.2.3 Agregación de juicios de probabilidad

Un enfoque consiste en considerar la estimación de probabilidad de un miembro del grupo como información que puede hacer que otro miembro revise su estimación usando el

teorema de Bayes. Algunos de los métodos basados en este enfoque también requieren una evaluación de la experiencia de cada individuo y todos son sustancialmente más complicados que el promedio simple. Otro enfoque es tomar un promedio ponderado de las probabilidades individuales. Sin embargo, nuevamente parece que hay poca evidencia de que la ponderación conduzca a una mejora en el rendimiento sobre el promedio (Goodwin, 2004).

3.2.4 Agregación de órdenes de preferencia

De acuerdo con Goodwin (2004), una manera de agregar las preferencias individuales es usar un sistema de votación simple. Sin embargo, puede resultar en resultados paradójicos.

En muchos problemas prácticos, las alternativas no se comparan simultáneamente, como antes, sino secuencialmente. Por ejemplo, el comité podría comparar primero A con B, eliminar la opción inferior y luego comparar la opción preferida con C. Sin embargo, el orden de comparación tiene un efecto directo sobre la opción que se elige.

Este tipo de problemas llevó a Arrow (citado por Goodwin, 2004) a preguntarse si existe un método que permita analizar de forma satisfactoria las preferencias de un grupo expresadas como ordenamientos, e identificó las siguientes cuatro condiciones que se deben considerar para establecer un procedimiento satisfactorio:

- El método debe producir un orden de preferencia de grupo transitivo para las opciones consideradas.
- Si cada miembro del grupo prefiere una opción a otra, entonces el grupo debe hacerlo.
- La opción de grupo entre dos opciones, A y B, depende sólo de las preferencias de los miembros entre estas opciones y no de las preferencias de ninguna otra opción (variables independientes).
- No hay dictador. Ningún individuo puede imponer sus preferencias al grupo.

Arrow (citado por Goodwin, 2004) demostró que ningún procedimiento de agregación puede garantizar que se cumplan las cuatro condiciones.

Dado que ningún método puede ser perfecto, ¿es posible concebir un enfoque razonablemente aceptable? Ferrell (citado por Goodwin, 2004) sostiene que el voto de

aprobación es simple y robusto. En este sistema, los individuos votan por todas las opciones que consideran al menos aceptables. La opción de grupo será entonces la opción que recibe la mayoría de los votos. Sin embargo, este método ignora gran parte de la información disponible acerca de las preferencias individuales.

3.2.5 Agregación de valores y utilidades

Una declaración que da el orden de preferencia de una persona no le dice sobre la intensidad de preferencia de esa persona para las alternativas. El problema con la agregación de los valores o utilidades de un grupo de individuos es que las intensidades de preferencia de los individuos tienen que ser comparadas (Goodwin, 2004).

3.2.6 Procesos de grupo no estructurados

La presencia de individuos poderosos puede inhibir la contribución de aquellos que están más abajo en la jerarquía. Los miembros habladores o extrovertidos pueden dominar las discusiones. De hecho, las variaciones en los asientos pueden tender a dirigir o inhibir las contribuciones de los individuos (Goodwin, 2004).

Al respecto, Janis (citado por Goodwin, 2004) ha documentado un fenómeno que ha denominado "pensar en grupo" dentro de los procesos de decisión del grupo. El pensar en grupo es esencialmente la supresión de ideas que son críticas a la "dirección" en la que se mueve un grupo. Se refleja en una tendencia a coincidir con la posición o puntos de vista que son percibidos como favorecidos por el grupo.

3.2.7 Procesos de grupo estructurados

Goodwin (2004) considera que la toma de conciencia de los factores que pueden degradar la toma de decisiones en grupo combinada con la creencia implícita de que el juicio grupal puede potencialmente mejorar la toma de decisiones, ha llevado a una serie de métodos estructurados para mejorar la toma de decisiones colectivas eliminando o restringiendo la interacción interpersonal y controlando el flujo de información. Uno de estos métodos principales ha sido Delphi (citado por Goodwin, 2004). Este método consiste en un proceso iterativo para hacer juicios cuantitativos. Las fases de Delphi son:

- Los panelistas emiten opiniones sobre la probabilidad de eventos futuros, o cuando ocurrirán esos eventos, o cuál será el impacto de tal evento (s). Estas opiniones se suelen dar como respuestas a los cuestionarios que se completan individualmente por los miembros del panel.
- Los resultados de este sondeo de panelistas se contabilizan y se proporciona una retroalimentación estadística de las opiniones de todo el panel (por ejemplo, rango o medianas) a los panelistas individuales.
- El resultado de este método es un grupo cuantificado de "consenso", que generalmente se expresa como la respuesta mediana del grupo de panelistas.

3.2.8 Conferencias de decisión

En contraste con las técnicas descritas, se presenta un enfoque socialmente interactivo para la toma de decisiones con el fin de generar una comprensión compartida de un problema y producir un compromiso con la acción.

La conferencia de decisión fue inventada a finales de los 70 por Cameron Peterson en una firma de consultoría con sede en los Estados Unidos llamada Decision and Designs Incorporated. (Goodwin, 2004). Esta técnica reúne análisis de decisiones, procesos de grupo y tecnología de la información durante una sesión intensiva de dos o tres días a la que asisten personas que desean resolver una cuestión o decisión compleja.

En segundo plano, otro analista de decisiones utiliza tecnología de ayuda a la toma de decisiones interactiva para modelar opiniones individuales y de grupo sobre cuestiones como la evaluación de opciones de múltiples atributos y la asignación de recursos. A medida que los resultados del modelo se ponen a disposición de los participantes, comparan estos resultados con sus juicios holísticos. Son las inevitables discrepancias que surgen, especialmente en los primeros momentos del proceso de modelado, que impulsan la dialéctica (Goodwin, 2004).

Al explorar estas discrepancias, la comprensión profundiza y cambia, y las nuevas perspectivas se reflejan como cambios en el modelo.

Goodwin (2004) considera que el objetivo fundamental detrás de la conferencia de decisión es proporcionar una síntesis de las técnicas de análisis de decisión y las características positivas y la dinámica de la toma de decisiones en grupos pequeños. La comprensión compartida de los problemas se genera con la ayuda de técnicas de análisis de decisión y facilitación social. Los participantes adquieren un sentido de propósito común y un compromiso con la acción. El análisis de sensibilidad permite a los participantes ver si los desacuerdos individuales hacen una diferencia en la alternativa o decisión final preferida. Los principios analíticos de la decisión proporcionan una guía para la acción, no una receta de “caja negra” para la acción.

3.2.9 Toma de decisiones multicriterio

La toma de decisiones multicriterio se refiere a una clase de métodos de análisis de decisiones con base en los que se evalúa un número de alternativas considerando ciertos criterios o parámetros. Macharis y Bernardini (Annema, 2015) mencionan que los métodos MCDM han ganado importancia como método de evaluación de los proyectos de transporte. De igual manera, manifiestan que el CBA es una técnica que es utilizada por los tomadores de decisiones (en su mayoría organismos gubernamentales) para evaluar la eficacia de una política.

La evaluación de proyectos de transporte requiere hoy en día la incorporación de varios objetivos adicionales como la reducción del ruido, el impacto social, incluso las prioridades políticas, que son difíciles de poner en valores monetarios. Las dificultades que se presentan al medir todos los impactos relevantes de un proyecto en términos monetarios, en particular en lo referente a aspectos intangibles y externalidades, han llevado a la complementación de la evaluación monetaria con métodos que utilizan más de un criterio según Tsamboulas et al. (Citado por Macharis 2015).

La toma de decisiones multicriterio es una rama bien conocida de la toma de decisiones; es una rama de una clase general de modelos de investigación de operaciones que se ocupan de problemas de decisión bajo la presencia de una serie de criterios de decisión. Esta clase importante de modelos es muy a menudo llamado MCDM. Esta clase se divide en la toma de decisiones multiobjetivo (MODM) y la toma de decisiones de atributo múltiple (MADM), según Climaco (Citado por Pohekar, 2003).

Cada método tiene sus propias características y los métodos también pueden clasificarse como métodos determinísticos, estocásticos y difusos. Puede haber combinaciones de los métodos anteriores. Dependiendo del número de tomadores de decisiones, los métodos pueden clasificarse como métodos de toma de decisiones individuales o de grupo. La toma de decisiones bajo la incertidumbre y los sistemas de apoyo a la decisión son también prominentes técnicas de toma de decisiones (Pohekar, 2003).

Estas metodologías comparten características comunes de conflicto entre criterios, unidades incomparables y dificultades en la selección de alternativas. En la toma de decisiones objetiva múltiple, las alternativas no están predeterminadas, sino que un conjunto de funciones objetivo está optimizado sujeto a un conjunto de restricciones. Se busca la solución más satisfactoria y eficiente. En esta solución eficiente identificada no es posible mejorar el rendimiento de ningún objetivo sin degradar el rendimiento de al menos otro objetivo. En la toma de decisiones de atributo múltiple, se debe evaluar un pequeño número de alternativas frente a un conjunto de atributos que a menudo son difíciles de cuantificar. La mejor alternativa se selecciona generalmente haciendo comparaciones entre las alternativas con respecto a cada atributo.

Según Cooper (Citado por Macharis, 2015), una revisión más sistemática y objetiva contiene una estructura principal de cinco etapas. La primera etapa es la formulación del problema, que guiará todo el documento. En la segunda etapa, se determina la estrategia de recolección de datos. La tercera etapa gira en torno a la evaluación de los datos recuperados. En la cuarta etapa, se analiza e interpretan los resultados. Finalmente, los resultados se presentan en la quinta etapa.

3.3 Métodos usados en la toma de decisiones multicriterio

Aunque casi todos estos métodos fueron diseñados para hacer frente a una gran variedad de problemas, es claro que, en la práctica, algunas técnicas son más populares y, por tanto, más aplicadas que otras (Macharis, 2015). A continuación, se presenta la descripción hecha por Pohekar (2004) de algunos de los principales métodos más usados

para la toma de decisiones multicriterio de forma que se pueda seleccionar alguno de ellos para el análisis específico que se requiera hacer:

3.3.1 Método de suma ponderada (WSM)

El WSM es el enfoque más utilizado, especialmente en problemas de una sola dimensión. Si hay M alternativas y N criterios entonces la mejor alternativa es la que satisface la ecuación (3.1). Donde A_{WSM}^* es la puntuación WSM de la mejor alternativa, N es el número de criterios de decisión, a_{ij} es el valor normalizado de la i-ésima alternativa en términos del j-ésimo criterio y w_j es el peso de importancia del j-ésimo criterio.

$$A_{WSM}^* = \text{Max}_i \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (3.1)$$

El valor total de cada alternativa es igual a la suma de los productos, Solnes (Citado por Pohekar, 2004).

3.3.2 Método de producto ponderado (WPM)

El WPM es muy similar a WSM. La principal diferencia es que, en lugar de la adición en el modelo, hay multiplicación. Cada alternativa se compara con las otras multiplicando un número de razones, una para cada criterio. Cada relación se eleva a la potencia equivalente al peso relativo del criterio correspondiente.

En general, para comparar las alternativas A_K y A_L se utiliza la ecuación (3.2). Donde n es el número de criterios, a_{ij} es el valor real de la i-ésima alternativa en términos del j-ésimo criterio y w_j es el peso de importancia del j-ésimo criterio. Si $R(A_K/A_L)$ es mayor que uno, entonces la alternativa A_K es más deseable que la alternativa A_L (en el caso de la maximización):

$$R(A_K/A_L) = \prod_{j=1}^n (a_{Kj}/a_{Lj})^{w_j} \quad (3.2)$$

La mejor alternativa es la que es mejor que, o al menos igual, a todas las otras alternativas. Chang (Citado por Pohekar, 2004).

3.3.3 Método de organización de clasificación de preferencias para la evaluación de enriquecimiento (PROMETHEE)

Este método utiliza el principio de superación para clasificar las alternativas combinadas permitiendo un uso más fácil del método. Realiza una comparación por pares de alternativas para clasificarlas con respecto a una serie de criterios. Este método utiliza la función de preferencia $P_j(a, b)$ que es una función de la diferencia d_j entre dos alternativas para cualquier criterio j , $d_j = f(a, j) - f(b, j)$ donde $f(a, j)$ y $f(b, j)$ son valores de dos alternativas a y b para el criterio j . Los umbrales de indiferencia y preferencia q' y p' también se definen dependiendo del tipo de función de criterio, Brans et al. (Citado por Pohekar, 2004). Dos alternativas son indiferentes para el criterio j siempre y cuando d_j no supere el umbral de indiferencia q' . Si d_j se hace mayor que p' , hay una preferencia estricta. Ver ecuaciones (3.3), (3.4), (3.5) y (3.6):

$$\pi(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^J w_j P_j(a, b)}{\sum_{j=1}^J w_j} \quad (3.3)$$

$$\phi^+(a) = \sum_A \pi(a, b) \quad (3.4)$$

$$\phi^-(a) = \sum_A \pi(b, a) \quad (3.5)$$

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (3.6)$$

Donde w_j es el peso asignado al criterio j ; $\phi^+(a)$ es el índice de superación de a en el conjunto alternativo A ; $\phi^-(a)$ es el índice sobrepasado de a en el conjunto alternativo A ; $\phi(a)$ es la clasificación neta de a en el conjunto alternativo A . El valor que tiene el máximo $\phi(a)$ se considera como el mejor.

Una superación b si $\phi(a) > \phi(b)$; a es indiferente a b si $\phi(a) = \phi(b)$

3.3.4 La eliminación y la elección de la traducción de la realidad (ELECTRE)

Existen métodos cuya aplicación es exclusiva de alternativas discretas, los cuales eligen una alternativa entre un conjunto de alternativas no dominadas o las ordena de mejor a peor de acuerdo con la preferencia del decisor. Entre estos métodos los más conocidos son los métodos ELECTRE. Los métodos ELECTRE más destacados son los ELECTRE I,

II, III y IV, los cuales son muy similares en su estructura, aunque presentan importantes diferencias (Smith et al., 2000).

Los métodos ELECTRE son capaces de manejar criterios discretos de naturaleza tanto cuantitativa como cualitativa y proporcionan un ordenamiento completo de las alternativas. El problema debe ser formulado de tal manera que elija alternativas que sean preferidas sobre la mayoría de los criterios y que no causen un nivel inaceptable de descontento por ninguno de los criterios. En esta técnica se utilizan los índices de concordancia, discordancia y umbral. Basándose en estos índices, se desarrollan gráficos para relaciones fuertes y débiles. Estos gráficos se utilizan en un procedimiento iterativo para obtener la clasificación de las alternativas. Roy (Citado por Pohekar, 2004). Este índice se define en el rango (0-1), proporciona un juicio sobre el grado de credibilidad de cada relación de superación y representa una prueba para verificar el desempeño de cada alternativa. El índice de concordancia global C_{ik} representa la cantidad de evidencia para apoyar la concordancia entre todos los criterios, bajo la hipótesis de que A_i supera a A_k . Se define de acuerdo con la ecuación (3.7):

$$C_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m W_j c_j(A_i A_k)}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (3.7)$$

Donde W_j es el peso asociado con los criterios j . Por último, el método ELECTRE produce un sistema completo de relaciones binarias superiores entre las alternativas.

De acuerdo con Goicoechea et al (Citado por Pohekar, 2004), el método ELECTRE es a veces incapaz de identificar la alternativa preferida. Sólo produce un núcleo de alternativas principales. Este método tiene una visión más clara de las alternativas eliminando las menos favorables, especialmente conveniente al encontrarse con unos pocos criterios con un gran número de alternativas en un problema de toma de decisiones.

3.3.5 La técnica de preferencia de orden por similitud a soluciones ideales (TOPSIS)

Este método es desarrollado por Huang y Yoon (Citado por Pohekar, 2004). El concepto básico de este método es que la alternativa seleccionada debe tener la distancia más corta

de la solución ideal negativa en sentido geométrico. El método asume que cada atributo tiene una utilidad creciente o decreciente. Así, el orden de preferencia de las alternativas se obtiene comparando las distancias euclidianas.

Inicialmente, se formula una matriz de decisión de M alternativas y N criterios. Se elabora la matriz de decisión normalizada y la construcción de la matriz de decisión ponderada. A esto le siguen las soluciones ideal y negativa-ideal. Para los criterios de beneficio el tomador de decisiones quiere tener el máximo valor entre las alternativas y por criterios de costo que quiere valores mínimos entre las alternativas. Esto es seguido por la medida de separación y el cálculo de la cercanía relativa a la solución ideal. La mejor alternativa es aquella que tiene la distancia más corta a la solución ideal y la distancia más larga a la solución ideal negativa.

3.3.6 Programación de compromiso (CP)

La programación de compromiso define la mejor solución como la del conjunto de soluciones eficientes cuyo punto es la menor distancia desde un punto ideal. Zeleny (Citado por Pohekar, 2004). El objetivo es obtener una solución lo más cercana posible al ideal. La medida de distancia utilizada en CP es la familia de L_p - métricas y se expresa en la ecuación (3.8):

$$L_p(a) = \frac{\sum_{j=1}^J w_j^p |f_j^* - f(a)|}{|M_j - m_j|} \quad (3.8)$$

Donde $L_p(a)$ es la métrica de L_p para la alternativa a , $f(a)$ es el valor del criterio j para la alternativa a , M_j es el valor máximo (ideal) del criterio j en el conjunto A , m_j es el valor mínimo (anti ideal) de Criterio j en el conjunto A , f_j^* Es el valor ideal del criterio j , w_j es el peso del criterio j , p es el parámetro que refleja la actitud del tomador de decisiones con respecto a la compensación entre desviaciones. Para $p = 1$, todas las desviaciones de f_j^* se tienen en cuenta en proporción directa a sus magnitudes, lo que significa que existe una compensación (ponderada) completa entre las desviaciones.

3.3.7 La teoría de la utilidad de múltiples atributos (MAUT)

La Teoría de Utilidad de Múltiples Atributos toma en consideración las preferencias del tomador de decisiones en la forma de la función de utilidad que está definida sobre un conjunto de atributos. El valor de utilidad puede determinarse mediante la determinación de funciones de utilidad de un solo atributo seguido por la verificación de condiciones independientes preferenciales y de utilidad y Derivación de funciones de utilidad de múltiples atributos. Las funciones de utilidad pueden ser aditivamente separables o multiplicativamente separables con respecto a la utilidad de atributo único. El valor de utilidad se define de acuerdo con la ecuación (3.9):

$$1 + ku(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{j=1}^n (1 + k k_j u_j(x_j)) \quad (3.9)$$

Aquí j es el índice de atributo, k es constante de escalado global (mayor o igual a -1), k_j es la constante de escala para el atributo j , $u_j(.)$ es el operador de la función general de utilidad, $u_j(.)$ es la utilidad Operador de función para cada atributo j . Keeny, (Citado por Pohekar, 2004).

3.3.8 Proceso de jerarquía analítica (AHP)

Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) es desarrollado por el Profesor Saaty (1980). La esencia del proceso es la descomposición de un problema complejo en una jerarquía con objetivo en la parte superior de la jerarquía, criterios y subcriterios en niveles y subniveles intermedios y alternativas de decisión en la parte inferior de la jerarquía. El método tiene las siguientes características principales:

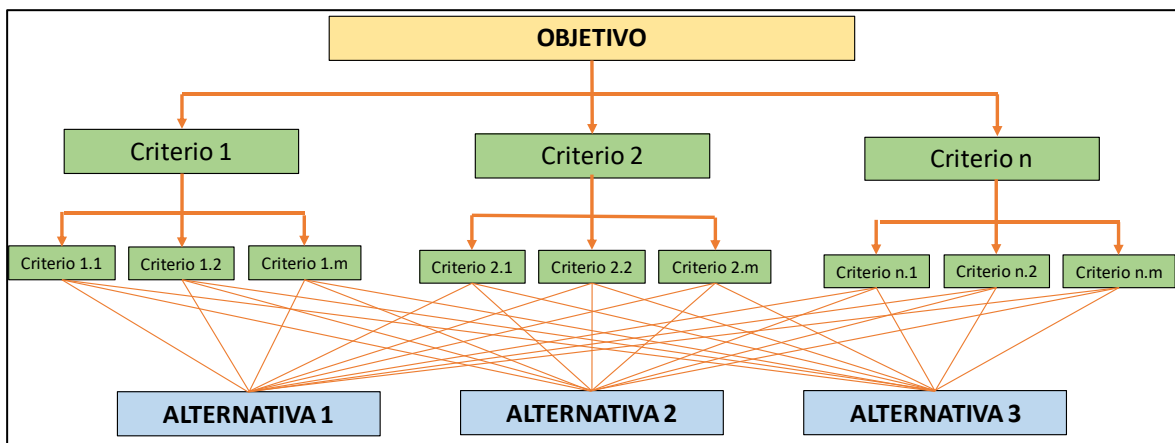
- Descomponer un problema o situación no estructurado y complejo en ciertas partes
- Construir un orden jerárquico
- Valorar numéricamente la importancia relativa de cada variable
- Sintetizar los juicios para determinar las variables que tengan mayor prioridad

Árbol de jerarquía: Es una de las principales características del método. Se sitúa en la parte superior el objetivo principal que se quiera alcanzar. En nuestro caso la selección del tipo de infraestructura. En el siguiente nivel en orden descendente se sitúan los criterios

de decisión, los cuales son atributos o parámetros que constituyen los ejes fundamentales a partir de los cuales el decisor argumenta su preferencia.

En ocasiones un criterio puede dividirse en varios subcriterios integrando otro nivel jerárquico. Finalmente, en el último nivel jerárquico se ubican las diferentes alternativas que son el conjunto de posibles soluciones sobre las que se realiza una decisión. Para mayor comprensión se presenta la **Figura 3-1**.

Figura 3-1: Árbol de jerarquía



Fuente: Elaboración propia

Modelado el problema, se procede a hacer una comparación por pares mediante juicios que se refieren a la importancia relativa de cada elemento respecto a otro en un mismo nivel. Esta comparación mide cuanto más o cuanto menos aporta un elemento de un nivel al logro del nivel inmediatamente superior.

Los elementos a nivel de jerarquía dado se comparan en pares para evaluar su preferencia relativa con respecto a cada uno de los elementos en el siguiente nivel superior. Los términos verbales de la escala fundamental de Saaty (1980) de 1-9 se utilizan para evaluar la intensidad de la preferencia entre dos elementos. El valor de 1 indica una importancia igual, 3 moderadamente más, 5 fuertemente más, 7 muy fuerte y 9 indica una importancia extrema. Los valores de 2, 4, 6 y 8 se asignan para indicar valores de compromiso de importancia. En la **Tabla 3-2** se presentan las comparaciones pareadas propuestas por este método.

Tabla 3-2: Comparaciones pareadas propuestas por el AHP.

Valor	Definición	Comentarios
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia Grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente al criterio A sobre el B
7	Importancia Muy grande	El criterio A es mucho más importante que el criterio B
9	Importancia Extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2, 4, 6, 8	Importancia Intermedia	Valor intermedio para cuando es necesario matizar
Recíprocos de lo Anterior		Si el criterio A es de importancia grande frente al criterio B las notaciones serían las siguientes: Criterio A Frente al Criterio B → 5/1 Criterio B Frente al Criterio A → 1/5

Fuente: Saaty, 1980

La escala de razón y el uso de comparaciones verbales se utilizan para la ponderación de elementos cuantificables y no cuantificables. El método calcula y agrega sus vectores propios hasta que se obtiene el vector final compuesto de coeficientes de peso para alternativas. Las entradas del vector de coeficientes de peso final reflejan la importancia relativa (valor) de cada alternativa con respecto al objetivo indicado en la parte superior de la jerarquía. Un tomador de decisiones puede usar este vector debido a sus necesidades e intereses particulares.

Para obtener comparaciones realizadas a un nivel dado, se crea una matriz A , a su vez poniendo el resultado de la comparación de pares de elemento i con el elemento j en la posición a_{ji} como se muestra en la expresión (3.10).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdot & a_{2n} \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdot & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Después de obtener el vector de peso, se multiplica con el coeficiente de peso del elemento a un nivel más alto (que se usó como criterio para comparaciones de pares). El procedimiento se repite hacia arriba para cada nivel, hasta que se alcanza la parte superior

de la jerarquía. A continuación, se obtiene el coeficiente de peso global, con respecto al objetivo para cada alternativa de decisión. La alternativa con el valor del coeficiente de peso más alto debe tomarse como la mejor alternativa. Una de las principales ventajas de AHP es que calcula el índice de inconsistencia como una proporción de la inconsistencia de la persona que toma las decisiones y el índice generado al azar. Este índice es importante para que el tomador de decisiones se asegure que sus juicios son consistentes y que la decisión final se hace bien. El índice de inconsistencia debe ser inferior a 0,10.

Aunque un valor más alto del índice de inconsistencia requiere una reevaluación de las comparaciones entre pares, las decisiones obtenidas en ciertos casos también podrían considerarse la mejor alternativa.

3.4 Selección de método de análisis multicriterio

Luego del análisis de diferentes métodos utilizados para la toma de decisiones, se selecciona el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) como el método a utilizar para el análisis de alternativas de infraestructura a implementar en un sistema de transporte masivo de mediana o alta capacidad a desarrollar en esta investigación. Lo anterior debido a que proporciona medidas de coherencia de juicio, analiza prioridades entre criterios y alternativas y simplifica las calificaciones de preferencia entre los criterios de decisión utilizando comparación por pares, ofreciendo ventajas frente a los otros métodos en lo relacionado a análisis multicriterio.

Una ventaja del método AHP es que es aplicable para analizar criterios cuantitativos y cualitativos lo que para las decisiones del tipo de infraestructura para un sistema de movilidad es muy útil dado que intervienen criterios económicos, sociales, ambientales y demás, los cuales pueden ser muy compleja su comparación sin el uso de este tipo de herramientas. El método AHP permite combinar criterios de percepción, interés y experiencia para priorizar alternativas en situaciones complejas.

De igual forma, el método permite analizar el grado de consistencia de los resultados, lo cual nos permite tener un nivel de confianza en los resultados obtenidos con su aplicación. Adicionalmente, hace posible la toma de decisiones donde existen múltiples objetivos, criterios, participantes y alternativas permitiendo establecer el orden de prioridades.

3.4.1 Descripción del método a utilizar

Con base en el análisis presentado en el numeral 3.4, se procede a describir con mayor detalle el procedimiento para la selección basado en la metodología AHP:

Los tres principios sobre los que se basa el AHP son:

- Principio 1: Construcción de las jerarquías, el cual consiste en la definición de los componentes, criterios y variables
- Principio 2: Establecimiento de prioridades, el cual establece la Importancia relativa por pares de variables o pesos de las variables

- Principio 3: Consistencia lógica

Reciprocidad: Si $a_{ij} = x$, entonces $a_{ji} = 1/x$, con $1/9 \leq x \leq 9$

Homogeneidad: Si los elementos ij son considerados igualmente importantes, entonces $a_{ij} = a_{ji} = 1$. Adicionalmente, $a_{ii} = 1$ para todo i .

Consistencia: Se satisface que $a_{ik} * a_{kj} = a_{ij}$ para todo $1 \leq i, j, k \leq n$. (ideal)

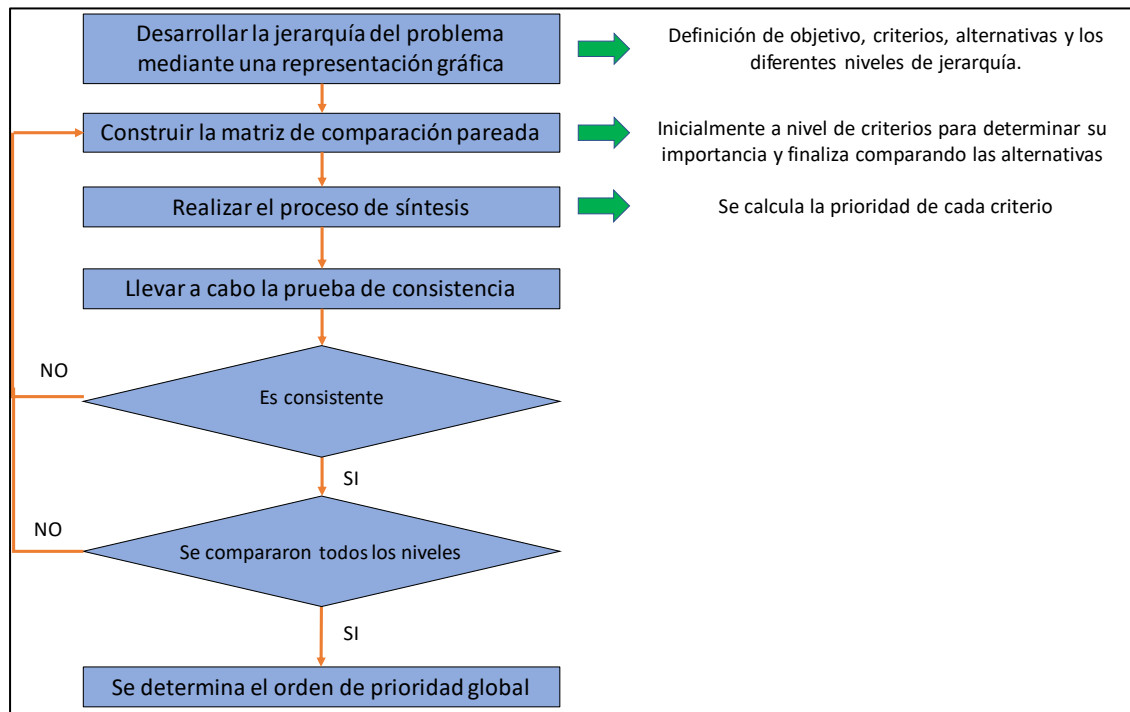
- Transitividad de las preferencias: Si $C1 > C2 \wedge C2 > C3 \rightarrow C1 > C3$
- Proporcionalidad entre las preferencias: Si $C1 > nC2 \wedge C2 > mC3 \rightarrow C1 > nmC3$

El procedimiento a emplear para el análisis se resume en el diagrama de flujo presentado en la **Figura 3-2**.

Si bien el decisor puede emitir juicios verbales, para operar con ellos se requiere valorarlos y para ello el método posee su propia escala de comparación de a pares presentada en la **Tabla 3-2**.

A partir de los juicios y su valoración se construye la matriz de comparación por pares, la cual es de tamaño $n \times n$ donde n es el número de criterios a evaluar se construye la matriz de comparación de pares que se presenta en la **Tabla 3-3**.

Figura 3-2: Proceso para aplicar la AHP



Fuente: Elaboración propia a partir de Saaty, 1980

Tabla 3-3: Ejemplo de matriz de comparación de pares.

Criterios	Criterio i	Criterio j	Criterio k
Criterio i	1	1/3	1/5
Criterio j	3	1	1/7
Criterio k	5	7	1

Fuente: Saaty, 1980

Dónde: $A \cdot w = \lambda \cdot w$

A = Matriz de comparaciones de pares

w = Vector propio que representa la ponderación de cada criterio

λ = Máximo valor propio que representa una medida de la consistencia de los juicios

Una vez finalizada la construcción de la matriz de comparación por pares, se debe estimar el vector de prioridad, lo cual se hace obteniendo en primer lugar la matriz normalizada utilizando el procedimiento de normalización denominado proporción total, que establece que se deben sumar las columnas de la matriz (Ver **Tabla 3-4**) y posteriormente se calculan

los elementos de la matriz normalizada dividiendo cada elemento de la matriz original por la suma que se acaba de hallar (Ver **Tabla 3-5**).

Tabla 3-4: Ejemplo de totales por columnas de la Matriz de comparación de pares.

Criterios (r_i)	Criterio i	Criterio j	Criterio k
Criterio i	1	1/3	1/5
Criterio j	3	1	1/7
Criterio k	5	7	1
$\sum r_i$	9	8,33	1,34

Fuente: Elaboración propia a partir de Saaty, 1980

Tabla 3-5: Ejemplo de matriz normalizada.

Criterios (v_i)	Criterio i	Criterio j	Criterio k
Criterio i	0,11	0,04	0,15
Criterio j	0,33	0,12	0,11
Criterio k	0,56	0,84	0,74
$\sum v_i$	1,00	1,00	1,00

Fuente: Elaboración propia a partir de Saaty, 1980

Para calcular los datos de la matriz normalizada (v_i) se divide cada valor de r_i por la sumatoria de cada columna, de acuerdo con la expresión (3.11).

$$V_i = \frac{r_i}{\sum r_i} \quad (3.11)$$

Para estimar el vector de prioridades o pesos, se calcula el promedio simple de cada fila, tal como se presenta en la **Tabla 3-6**. En este vector se puede identificar cuál es el criterio más influyente en la selección de la alternativa.

Tabla 3-6: Ejemplo de vector de prioridades.

Criterios	Criterio i	Criterio j	Criterio k	Vector de prioridades
Criterio i	0,11	0,04	0,15	10,00%
Criterio j	0,33	0,12	0,11	18,66%
Criterio k	0,56	0,84	0,74	71,34%
$\sum v_i$	1,00	1,00	1,00	100%

Fuente: Elaboración propia a partir de Saaty, 1980

Del mismo modo en que estimamos la prioridad de los criterios respecto del objetivo general, se procede con la estimación de las prioridades de cada subcriterio respecto al criterio y el de las alternativas respecto a cada subcriterio. De esta forma se encuentra la prioridad en cada nivel de jerarquía.

Consistencia de la matriz: Así como las prioridades o pesos obtenidos se obtienen a partir de la agregación de las matrices de comparación pareada, para que los vectores de prioridades indiquen que una alternativa es mejor que la otra, la matriz de comparación pareada debe ser consistente, es decir, los juicios deben ser lo más coherentes posibles, para lo cual se debe ejecutar el procedimiento expresado en la ecuación (3.12):

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda w_1 \\ \lambda w_2 \\ \vdots \\ \lambda w_n \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Donde:

W = Matriz de comparación pareada

w = Vector de prioridades

λ = Escalar

Se dice que W es consistente si y solo si:

$$W * w = \lambda * w \quad (3.13)$$

De acuerdo con

$$W * \bar{w} = \lambda_{max} * w \quad (3.14)$$

Donde:

$$\lambda_{max} \geq \lambda \quad (3.15)$$

λ_{max} se calcula como el promedio de los valores del vector columna λ . El máximo valor propio, es decir, λ_{max} nos permite estimar el grado de consistencia de la matriz (IC) y se calcula de acuerdo con la expresión (3.16):

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.16)$$

Para determinar si el grado de consistencia es admisible, se utiliza como referente un índice de consistencia aleatorio (IA) obtenido por simulación para diferentes números de criterios a analizar y que se resume en la **Tabla 3-7**.

Tabla 3-7: Índice de consistencia aleatorio.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0	0	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484	1,513	1,535	1,555	1,57	1,583	1,595

Fuente: Saaty, 1980

Finalmente, la relación de consistencia (RC) mide el grado de consistencia de la matriz de comparación pareada y se halla como el cociente entre el índice de consistencia y el índice de consistencia aleatorio. Ver ecuación (3.4).

$$RC = \frac{IC}{IA}; \text{ Si } \begin{cases} RC = 0,10 \rightarrow \text{Consistente} \\ RC \leq 0,10 \rightarrow \text{Inconsistencia admisible} \\ RC > 0,10 \text{ Inconsistente} \end{cases} \quad (3.17)$$

Si la relación de consistencia es igual a cero se considera la matriz consistente, si es menor o igual a 0,10 se considera que tiene una inconsistencia admisible, pero si el valor es mayor que 0,10 se considera que la matriz es inconsistente.

3.4.2 Análisis de sensibilidad de Monte Carlo en el apoyo a la decisión multicriterio

Un proceso de toma de decisiones en la práctica está sujeto a diferentes fuentes de incertidumbre cuyo manejo es una parte fundamental de la buena toma de decisiones Basson (Citado por Bertsch, 2006). Según su fuente respectiva, se puede distinguir entre:

- Incertidumbres de datos: Incertidumbres de las consecuencias potenciales calculadas de las alternativas consideradas
- Incertidumbres de parámetros: Incertidumbres relacionadas con los parámetros, tales como los factores de ponderación, de un MCDA
- Incertidumbres del modelo: Incertidumbres resultantes del hecho de que los modelos son en última instancia sólo simplificaciones/aproximaciones de la realidad

Dado que las “Incertidumbres del Modelo” son difíciles de cuantificar y también pueden considerarse inherentes a la naturaleza de cualquier modelo, no se consideran en este trabajo.

3.4.3 Grupos focales

De acuerdo con Malhotra (2008), la Investigación Exploratoria tiene como objetivo explorar o examinar un problema o situación para brindar conocimientos y comprensión y puede utilizarse para formular problemas o definirlos con mayor precisión, identificar cursos alternativos de acción, desarrollar hipótesis, aislar variables y relaciones clave para un examen más minucioso, obtener ideas para desarrollar un enfoque del problema y establecer prioridades para la investigación posterior principal, probar hipótesis específicas y examinar relaciones particulares.

De acuerdo con Escobar et al. (2009) los grupos focales son una técnica de recolección de datos basada en entrevistas grupales, para el análisis de un tema específico propuesto por el investigador. El objeto principal del uso de esta técnica es obtener múltiples miradas dentro de un grupo de acuerdo con las creencias, sentimientos, actitudes y experiencias de los participantes.

- **Tamaño del grupo focal**

Myers (citado por Escobar, 2009) propone que, sin exceder las 12 personas, el tamaño del grupo focal se define dependiendo de sus características, complejidad de los temas a tratar y la experiencia del moderador. De igual forma, recomienda que, dependiendo de la profundidad y los objetivos de la investigación, para tratar temas sensibles o controvertidos se pueden utilizar grupos pequeños entre 5 y 8 participantes.

▪ Duración de las sesiones

De acuerdo con la investigación realizada por Escobar (2009) la recomendación de varios investigadores al respecto es que las sesiones duren entre 1 y 2 horas, de forma que se permita un espacio para las observaciones de la apertura y para el cierre de la sesión.

▪ Pasos para preparar un grupo focal

Escobar (2009) propone, de acuerdo con la recopilación de varios autores, los siguientes pasos para la realización de grupos focales:

- Establecer los objetivos: Deben responderse interrogantes tales como ¿Qué se quiere lograr?, ¿Qué se busca con la investigación?, ¿Qué información es posible obtener del grupo analizado?, y ¿Qué información es necesaria para satisfacer los objetivos del estudio?
- Desarrollar el cronograma.
- Seleccionar los participantes.
- Seleccionar el moderador, el cual debe ser miembro del equipo de investigación involucrado en el desarrollo del grupo focal y su función principal es propiciar la diversidad de opiniones en el grupo. De igual forma, se puede optar por un moderador que no pertenezca al equipo investigador para lo cual se recomienda que sea un experto en el tema y que esté en capacidad de generar controversia (Vogt, et al y Boucher et al, citados por Escobar, 2009).
- Preparar preguntas estímulo.
- Seleccionar el sitio de la reunión: Según Diaz (Citado por Escobar, 2009) este lugar debe ser privado, cómodo y en lo posible, libre de ruidos y distracciones externas, al cual sólo deben acceder los participantes y el equipo de investigadores.
- Logística del evento: Es recomendable que haya un responsable de esta actividad, el cual deberá encargarse de brindar los alimentos y bebidas a los asistentes, así como los estímulos que se entreguen como agradecimiento a los participantes (Prieto, citado por Escobar 2009).
- Desarrollar la sesión, durante la cual es importante observar la reacción de los participantes, ya que esto puede generar la aparición de otras preguntas que

no estaban contempladas en la planeación inicial y que pueden aportar a la investigación. Entre tanto, Rigler (citado por Escobar, 2009) manifiesta que es importante la participación de uno o varios expertos en el grupo focal que puedan resolver dudas o hacer aclaraciones, en caso de presentarse, ya sea al moderador o a los participantes. Así mismo, se aconseja concluir solamente con base en el análisis de la información recolectada y no sacar conclusiones durante la sesión.

- Analizar la información hallada en el proceso.

3.4.4 Encuesta a expertos

De acuerdo con Malhotra (2008), la Investigación Concluyente tiene como objetivo principal probar hipótesis específicas y examinar relaciones particulares; la cual se divide en dos tipos, la descriptiva y la causal.

El tipo de investigación a utilizar es la descriptiva ya que ésta se caracteriza por el planeamiento claro del problema, hipótesis explícitas y especificación detallada de las necesidades de información y utiliza métodos tales como el análisis cuantitativo de datos secundarios, las encuestas, los paneles y los datos por observación. Para esta investigación, la herramienta a utilizar será la encuesta y será aplicada a un grupo de expertos en diferentes áreas del conocimiento.

Malhotra (2008) define la encuesta como un cuestionario estructurado que se da a una muestra de la población y está diseñado para obtener información específica de los entrevistados.

Teniendo en cuenta que la encuesta requiere de la definición de una muestra para la recolección de la información, es importante indicar que las técnicas de muestreo pueden clasificarse en general como probabilístico y no probabilístico. El primero es el procedimiento de muestreo donde cada elemento de la población tiene una oportunidad probabilística fija para ser elegido en la muestra, mientras que el segundo es una técnica que no usa procedimientos de selección al azar, si no que se basa en el juicio personal del investigador.

Para efectos de esta investigación, el tipo de muestreo seleccionado es el no probabilístico, específicamente el muestreo por juicio el cual es una forma de muestreo por conveniencia en que los elementos de la población se seleccionan de forma deliberada con base en el juicio del investigador.

4.Estado del Arte

La construcción de un sistema de transporte público masivo de mediana y alta capacidad, es una de las soluciones disponibles para el mejoramiento de las condiciones de desplazamiento de las personas en un medio urbano. Este tipo de soluciones requieren de inversiones cuantiosas y análisis técnicos, legales y económico-financieros, que permitan llevar a feliz término el proyecto, sin descuidar la sostenibilidad del mismo en el largo plazo.

A la hora de diseñar un proyecto de movilidad urbana, se deben tener en cuenta diferentes aspectos que permitan que el proyecto beneficie al mayor número de personas y que las afectaciones durante su construcción puedan ser mitigadas o evitadas en lo posible. Sin embargo, ante la poca reserva de espacios para su ubicación se hacen necesarias importantes inversiones en materia de infraestructura, y las afectaciones a los vecinos del proyecto o al medio ambiente cada vez son más difíciles de evitar.

Un caso muy publicitado en nuestro país en los últimos años es la discusión respecto al tipo de infraestructura que deberá tener el “Metro de Bogotá,” donde una administración municipal diseñó el proyecto subterráneo y otra administración cambió los criterios iniciales del mismo considerando que es más viable su implementación en infraestructura elevada.

Al respecto se ha generado un debate sin final en el que diferentes especialistas afirman que la mejor solución para la ciudad de Bogotá es una u otra opción (subterránea o en viaducto) pero que finalmente al parecer la decisión se está tomando basado sólo en los costos de implementación del sistema y no en un análisis completo de todos los aspectos identificados en esta investigación.

En un artículo publicado por la Alcaldía de Bogotá el 22 de agosto de 2016, se manifiesta que las excavaciones profundas generan riesgos permanentes de colapso de las obras causado por los suelos variables y la presencia de aguas subterráneas, adicionalmente

resalta que no se cuenta con mapas que permitan ubicar las diferentes redes. De igual forma, asegura el artículo que construir en Bogotá un tren subterráneo tardaría tres veces más que la opción de construirlo elevado y que la opción de construirlo subterráneo afectará mayor cantidad de suelo, así como en operación, los sistemas subterráneos tienen mayor consumo de energía en sistemas como iluminación y ventilación durante todo el día. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2016).

Posteriormente, en un nuevo artículo publicado por Publimetro, se presenta el concepto de otro experto que indica que hace unos años cuando se hicieron los estudios para saber si el metro se debía dejar elevado o subterráneo, se dieron cuenta que los suelos de Bogotá son malos desde el punto de vista de posibilidades de cimentación y eso es un problema. Por eso la cimentación del metro elevado va a ser supremamente costosa y difícil de desarrollar (López, 2016).

Del mismo modo, en una nueva publicación, expertos de la Universidad Nacional de Colombia presentaron un nuevo concepto en el que mencionan que el Metro elevado afectaría la arquitectura de la ciudad y que no se requieren compras importantes de predios. De otro lado, manifiestan que por el tipo de suelo que tiene la ciudad de Bogotá, en caso de un sismo se afectarían las estructuras elevadas. Sugieren construir el sistema, en lo posible, debajo de las vías existentes de forma que ante un evento se agrieten las vías y no edificaciones, adicionalmente, actualmente existen avances tecnológicos importantes para la construcción de obras subterráneas en suelos blandos (Flechas, 2016).

Como se aprecia, existen diferencias marcadas entre profesionales de varias especialidades e incluso de las mismas. Sin embargo, consultada a la FDN, entidad que apoya a la Alcaldía de Bogotá en la estructuración de este proyecto, manifiestan que con base en los objetivos del proyecto y algunas de las lecciones internacionales, para el caso de Bogotá se determinó cuáles serían tanto las alternativas de trazado como de tipología de infraestructura, para compararlas con la alternativa base o proyecto de PLMB original. La metodología utilizada para este ejercicio se detalla en el numeral 4.3.2 de este documento.

Ante discusiones como estas, se hace necesaria la elaboración de una metodología que permita integrar todos los criterios en discusión y evaluarlos de forma conjunta de forma tal que la decisión final sea la más adecuada para el corredor en estudio.

Las decisiones multicriterio en el desarrollo o implementación de sistemas de transporte han estado enfocadas principalmente en la selección del trazado que más conviene para determinado sistema de transporte y a la tecnología a implementar en un corredor específico. Sin embargo, no se tiene conocimiento, de que se haya aplicado este tipo de análisis a la selección del tipo de infraestructura a implementar en un corredor en estudio (Macharis et al, 2015).

En materia de infraestructura y, en general, cualquier decisión en la ejecución de sistemas de transporte de mediana y alta capacidad requiere el análisis conjunto de variables haciendo difícil el ejercicio de toma de decisiones. Por tanto, es importante disponer de una herramienta capaz de analizar de forma conjunta los criterios a tener en cuenta a la hora de tomar decisiones.

De acuerdo con la investigación de De Luca (2012) se tienen casos de implementación de este tipo de metodologías para la toma de decisiones trascendentales en la implementación de sistemas de transporte que han considerado opciones de alineamientos alternativos, combinando criterios de ingeniería, sociales, ambientales, y los factores económicos en la toma de decisiones para justificar las opciones de trazado de carreteras. De igual forma, se ha utilizado este tipo de análisis para el diseño y evaluación de redes de movilidad alternativa, que, en combinación con los otros sistemas de transporte, puede cumplir con los requisitos futuros, socio-económicos y ambientales.

4.1 Infraestructura de movilidad de las ciudades en América Latina

La primera ciudad latinoamericana en contar con un sistema de Metro (subterráneo) fue Buenos Aires, posteriormente se implementaron sistemas en México D.F., Caracas, Santiago, Sao Pablo y Río de Janeiro (Clemente, 2013).

A finales del siglo pasado, otras ciudades con alto crecimiento demográfico y dificultades de movilidad optaron por sistemas Metro; Medellín en Colombia, Lima en Perú, Monterrey y Guadalajara en México y más recientemente en Valencia y Maracaibo en Venezuela, Valparaíso en Chile, Santo Domingo en República Dominicana, San Juan de Puerto Rico, Ciudad de Panamá en Panamá y en varias ciudades de Brasil como Recife, Fortaleza, Brasilia y Porto Alegre.

Otras ciudades optaron por sistemas de buses segregados denominados BRT, la primera en implementarlo fue la ciudad de Curitiba en Brasil, posteriormente en Bogotá Colombia, ambas ciudades con éxito, sin embargo, ambas ciudades actualmente proyectan la construcción de sistemas Metro. El modelo BRT se ha implementado en otras ciudades latinoamericanas (Clemente, 2013).

En su investigación, Clemente (2013) resalta que, si bien las inversiones en sistemas Metro urbano han ido en aumento, con la infraestructura ferroviaria (interurbana) ha sucedido lo contrario produciéndose un deterioro gradual de la infraestructura existente, lo anterior sumado al crecimiento permanente de transporte por camión y buses lo que ha suplido las necesidades de transporte de pasajeros y carga que anteriormente se hacía por medios férreos.

4.2 Hacia donde van las ciudades en materia de sistemas de transporte

A continuación, se presenta un breve resumen de los sistemas en planeación, diseño, ejecución y operación en América Latina, basado en la investigación llevada a cabo por Clemente (2013) y actualizada de acuerdo con la información de algunos operadores y administraciones municipales.

Es importante resaltar que algunos de los planes de expansión de los sistemas de movilidad existentes se encuentran en continuo desarrollo por lo que algunos datos pueden cambiar en pocos días. Sin embargo, se presenta esta información como evidencia del importante interés que se tiene en la actualidad por fortalecer, en las principales ciudades de América Latina, los sistemas de movilidad de mediana y alta capacidad, ante las

condiciones de congestión, contaminación y demás factores que motivan las inversiones en estos sistemas.

4.2.1 Sistemas Metro

Actualmente en América Latina, fundamentalmente en ciudades con mayor concentración demográfica, se tienen proyectos de nuevas redes de Metro y ampliación de las redes existentes, algunos de ellos con avance importante respecto a otros como consecuencia de la realidad económica de cada país y las complejidades de su implementación. Entre los proyectos destacados se pueden citar a Ciudad de Panamá, Quito y Bogotá (Clemente, 2013).

Igualmente, es importante resaltar que en la actualidad se dispone de importantes desarrollos tecnológicos para la construcción de estos nuevos sistemas, tales como:

- Construcción de túneles con TBM ó NATM
- Vías con fijaciones doblemente elásticas
- Línea de contacto: catenaria/tercer riel
- Sistemas de señales del tipo CBTC

Con base en la investigación hecha por Clemente (2013), a continuación, se hace un recuento de las ampliaciones de las líneas de metro que se adelantan en algunas ciudades de América Latina y el Caribe:

- **Argentina**

Cuenta con una red en operación desde hace más de 100 años en la ciudad de Buenos Aires que actualmente tiene 6 líneas de Metro denominadas con letras de la A a la E y la H con alrededor de 51,9 km de vías para servicio comercial subterráneas y no posee ningún tramo a nivel o en viaducto. Igualmente cuenta con la línea P de tranvía con dos ramales, denominada “Premetro” inaugurada el 27 de agosto de 1987 con una longitud de 7.4 km de infraestructura a nivel.

El desarrollo de la red de “subtes”, de la ciudad de Buenos Aires, así como su expansión y el control operacional se encuentra a cargo de la empresa estatal Subterráneos de Buenos Aires. Dentro de su plan de expansión se tiene:

- Línea H: Se inauguraron tres nuevas estaciones y se sumaron dos kilómetros al recorrido de esta línea en expansión.
- Línea E: Actualmente se adelantan las obras de tres nuevas estaciones, que durarán aproximadamente dos años.
- Línea F: Ésta línea será la próxima a construir y conectará las estaciones de Plaza Italia con Constitución. Se espera que transporte a quinientos mil pasajeros por día lo que prevé que sea la línea más importante de la red.

▪ **Brasil**

Es el país latinoamericano que más sistemas de metro tiene en operación, destacándose las principales ciudades como Sao Paulo y Río de Janeiro y se han incorporado otras ciudades entre las que se destacan (Clemente, 2013):

- Brasilia: Dos líneas de metro en operación desde 2001 (Subterráneo).
- Belo Horizonte: Una línea en operación (La línea 1 con infraestructura a nivel). La Línea 2 está en construcción. A su vez está proyectada la línea 3 que unirá la ciudad de Norte a Sur desde el aeropuerto regional de Pampulha a Svassi. También está planificada la extensión de la línea 1.
- Curitiba: Actualmente se encuentra en construcción la primera línea de Metro subterráneo en esta ciudad (17,6 km, 15 estaciones).
- Fortaleza: Tiene la Línea Sur y Oeste en operación. En 2014 comenzó la construcción de la línea Este, la cual se proyectó subterránea.
- Recife: El sistema posee actualmente un total de 39,5 km de extensión en dos líneas de Metro. Adicionalmente, está integrada una línea de tren urbano a Diesel.
- Salvador: Dos líneas en operación. Con infraestructura en viaducto.
- Porto Alegre: Una línea en operación, actualmente, otra en planificación (la línea 2) con un tramo de 19 km (de los cuales 16 km serán subterráneos) y 19 estaciones.

- Sao Paulo: Cinco líneas en operación. Se proyecta extender la línea 5 en 11,4 kilómetros y construir una nueva línea de 28 kilómetros hasta el Aeropuerto Internacional de São Paulo-Guarulhos. Las líneas en operación son en su mayoría subterráneas.
- Rio de Janeiro: Tiene tres líneas subterráneas en operación con 41 estaciones y 57 kilómetros. 2 líneas y 35 estaciones. A su vez, como complemento tiene una red de tren suburbano. Longitud total 40,9km.

▪ México

En ese país, tres ciudades cuentan con sistemas de metro:

- México, D.F.: Actualmente cuenta con una red de 226 kilómetros con doce líneas en operación. El metro está construido con las siguientes características: 115 estaciones subterráneas, (54 estaciones en superficie y 26 estaciones en viaducto elevado. Actualmente se construye la extensión de la línea 12 en 3.5 km, adicionalmente se proyecta la ampliación de la línea A en 13.2 kilómetros y se analizan ampliaciones de las líneas 4 y 9.
- Guadalajara: Tiene en operación dos líneas, y en construcción hay una tercera. La longitud del sistema en operación es de 24 kilómetros. La línea 1 Cuenta con 19 estaciones, 12 superficiales y 7 subterráneas y la línea 2 cuenta con 10 estaciones todas subterráneas.
- Monterrey: Tiene en operación dos líneas con 32 estaciones y 31.5 kilómetros de longitud en total y en construcción una tercera de 7.5 km y 8 estaciones todas en viaducto.

▪ Chile

Actualmente dos ciudades chilenas cuentan con un sistema de metro:

- Santiago: Cinco líneas subterráneas en operación, 108 estaciones y una extensión de 103 km. Actualmente se encuentran dos líneas en construcción y una línea más proyectada.
- Valparaíso: Posee una línea de Metro subterráneo en operación con 20 estaciones y 43 km de longitud.

▪ Colombia

Cuenta con un sistema en operación y otro en fase de diseño:

- Medellín: cuenta con dos líneas operación (Línea A y Línea B) con una longitud total de 31.30 km y 27 estaciones, con infraestructura mixta, a nivel en los extremos y en viaducto en la zona central de Medellín. Posee además cuatro sistemas de teleféricos, una línea de tranvía de ruedas neumáticas (Línea TA) y dos BRT denominados Línea 1 y Línea 2 todos integrados en un mismo sistema.
- Bogotá, Actualmente tiene una línea proyectada la cual ha sufrido un cambio en la concepción inicial (inicialmente subterráneo ahora se plantea en viaducto) lo que generó el reinicio de los estudios y diseños y se espera que inicie fase constructiva en 2018.

▪ Perú

Cuenta actualmente con una línea operativa en la ciudad de Lima en viaducto con una extensión de 35 km y 26 estaciones. Se proyecta la construcción de cinco líneas nuevas que serán totalmente subterráneas para una extensión estimada total 165 km.

▪ Panamá

Tiene en operación la Línea 1 en la ciudad de Panamá con una extensión de 15,8 km y cuenta con 15 estaciones, de las cuales 8 son soterradas, seis son elevadas y una está a nivel de superficie.

Actualmente se ha iniciado la construcción de la línea 2 inicialmente de 21 kilómetros de longitud en vía elevada y contará con 16 estaciones y se adelantan los estudios y diseños para la construcción de una línea más (línea 3) de 26.7 kilómetros y 14 estaciones elevadas con tecnología Monorriel.

▪ Venezuela

Tres ciudades de Venezuela actualmente cuentan con sistemas de metro:

- Caracas: Cinco líneas en operación: La Línea 1 con 22 estaciones, la Línea 2 con 14 estaciones, la Línea 3 con 9 estaciones, la Línea 4 con 14 estaciones y la línea 5 con un trayecto de 1.3 km y una estación, que inicialmente se trataba de una extensión de la línea 4, pero que fue renombrada a línea 5. Para un futuro está proyectada la línea 6. En total toda la red de metro suma 70.5 kilómetros, en su mayoría subterránea.
 - Valencia: En operación la línea 1 subterránea con 6.2 km y 9 estaciones.
 - Maracaibo: En operación la línea 1, con 8,1 km, parte de ellos subterráneos y parte en viaducto, y cuenta 6 estaciones.
- **Ecuador**

Actualmente construye la primera línea con un recorrido de 22 kilómetros totalmente subterráneos a profundidades entre los 15 y 26 metros, con un total de 15 estaciones. Adicionalmente, se tienen otras dos líneas adicionales en planificación.
 - **República Dominicana**

Santo Domingo: Se encuentra en operación la Línea 1 en su mayoría es en viaducto compuesta de 16 estaciones y tiene una longitud de 14.5 km, y la línea 2 soterrada, 34 km de longitud y 14 estaciones. Actualmente se encuentra en estudio la construcción de una tercera línea que tendrá 20 kilómetros de largo y 21 estaciones.
 - **Puerto Rico**

Puerto Rico: Posee una línea en operación con 16 estaciones, la mayoría sobre superficie, aunque cuenta con algunas subterráneas con una longitud total de 17.2 km.

4.2.2 Sistemas de ferrocarriles

En la actualidad, varios países han evidenciado que, para mejorar su competitividad, es necesario mejorar su red de transporte de mercancías, en ese sentido, se justifican las inversiones que se están dando para la reactivación de los ferrocarriles luego de que la red férrea latinoamericana se había paralizado casi en su totalidad (Clemente, 2013).

En Argentina, se adelantan planes de modernización en la red de cargas del Ferrocarril Belgrano y en la de pasajeros suburbanos e interurbanos. De igual forma, en el caso de

suburbanos se han hecho importantes inversiones para incrementar su nivel de seguridad. (Clemente, 2013).

Brasil, actualmente adelanta una serie de proyectos de infraestructura ferroviaria, entre los que se destaca en materia de pasajeros interurbanos, el tren de alta velocidad Río de Janeiro-São Paulo, debido al alto tráfico de pasajeros entre estas dos ciudades lo que en ocasiones satura el puente aéreo.

En Bolivia, se encuentra en ejecución un estudio que permitiría materializar el Corredor Ferroviario Bioceánico Central que permitiría conectar sus dos redes férreas, la Andina de 2274 km y la Occidental de 1423 km, que busca unir puertos del Pacífico chileno y/o peruano, con el puerto de Santos (Brasil) en el Atlántico.

En Chile, varias iniciativas de construcción de una red ferroviaria han fracasado por los altos costos de inversión requerida para estos proyectos. Sin embargo, el tren a Rancagua ha logrado mantenerse en operación con buenos niveles de servicio (Clemente, 2013). De igual forma, el gobierno chileno junto con el argentino, apoya una iniciativa privada para el transporte de mercancías conocido como el Corredor Bioceánico Central.

En Colombia se están haciendo inversiones en la infraestructura ferroviaria, que se espera reducirán los costos del transporte de mercancías que actualmente se hace por carretera. Sin embargo, el avanzado deterioro de la red férrea hace que las inversiones en su recuperación sean cuantiosas por lo que no se viable una recuperación completa en el corto plazo.

En Ecuador, La empresa Ferrocarriles del Ecuador ha iniciado un plan de recuperación del sistema férreo con el fin de fomentar el turismo mediante el fortalecimiento de actividades productivas asociadas a la infraestructura ferroviaria (Clemente, 2013).

En Centroamérica, los gobiernos han identificado la importancia que tiene el mejoramiento de la infraestructura de transporte en la economía de sus países, por tal motivo se han identificado proyectos que contribuyan a ese objetivo. Entre los proyectos que se destacan

en esta región se encuentran el Corredor Interoceánico de Guatemala (CIG) y el Proyecto Ferroviario México-Panamá (Clemente, 2013).

En México, se tienen proyectos de construcción de trenes de pasajeros entre los que se destacan:

- Tren de alta velocidad Ciudad de México – Querétaro
- Ferrocarril Matamoros - Brownsville.
- Proyecto Ciudad de México - Toluca.
- Conexión transpeninsular entre Yucatán y Quintana Roo.

Uruguay ha anunciado la realización de inversiones para la rehabilitación de la red ferroviaria (Clemente, 2013).

4.2.3 Metros Ligeros y tranvías

La implementación de sistemas de metro ligero y tranvías benefician en el desarrollo sostenible de las regiones donde se han implementado. Potencializan y ordenan el crecimiento en el área de influencia del corredor brindando una mejor percepción de los sectores por donde transita (Clemente, 2013).

Algunas ciudades en desarrollo de Latinoamérica tuvieron sistemas tranviarios a lo largo de sus principales corredores, los cuales fueron desmantelados para dar paso a las vías vehiculares dado el incremento del tráfico de automóviles particulares (Velásquez, 2015).

Vuchic (citado por Velásquez, 2015) manifiesta que los sistemas de LRT son más atractivos comparados con los sistemas de autobuses, dado que presentan ventajas en términos de uso de energía por pasajero por kilómetro y resulta más atractivos para los pasajeros.

En la actualidad, los sistemas tranviarios o de Metro ligero se han convertido en símbolo de modernidad de las ciudades donde se han implementado, incrementando el atractivo urbano sin requerir de costosas inversiones en infraestructura y proporcionando una elevada seguridad vial y una movilidad más sostenible (Clemente, 2013).

En Colombia, actualmente se tiene en operación el primer sistema tranviario moderno conocido como tranvía de Ayacucho o línea TA de 4.3 Km, en la ciudad de Medellín, con un total de 9 estaciones, una de ellas de transferencia con el sistema Metro de la ciudad y dos más de transferencia a sistemas de cables aéreos, o teleféricos, que alimentan el sistema.

En esta misma ciudad, actualmente se tiene el proyecto de construcción de una nueva línea de metro liviano de 13,5 kilómetros de longitud, que atenderá la parte occidental de la ciudad con un sistema que a su vez se conectaría con tres estaciones de Metro y una de integración con el sistema BRT en operación de la ciudad.

En Argentina, actualmente se tiene un sistema tranviario en la ciudad de Mendoza, implementado en una antigua vía del ferrocarril, el cual tiene una longitud de 12,5 kilómetros y 15 estaciones. Adicionalmente, se tiene en construcción una nueva línea que conectará con el Aeropuerto de esta localidad y otras dos líneas más las cuales se espera que extiendan la red en 10 kilómetros más de tranvía.

En Brasil, se cuenta actualmente con los tranvías de Río de Janeiro y Cuiaba, cada uno de ellos con 28 kilómetros los cuales fueron inaugurados previo al inicio de los juegos Olímpicos que se desarrollaron en ese país en 2014.

En Ecuador, actualmente se encuentra en implementación un sistema tranviario en la ciudad de Cuenca, el cual tendrá una longitud de 14 kilómetros y 20 estaciones.

4.2.4 Sistemas BRT

Los sistemas BRT han tenido un amplio desarrollo en las ciudades de América Latina en los últimos años, a continuación, se hace un resumen de algunos de ellos. Sin embargo, se aclara que no se considera necesario dentro del alcance de esta investigación, describir todos los sistemas BRT, sino aquellos relevantes para el análisis objeto de esta investigación:

- Curitiba, es denominado el primer BRT del mundo, fue inaugurado en 1972 y actualmente tiene 81,4 kilómetros en operación y moviliza un promedio de 2.300.000 pasajeros por día.
- Quito, a partir de la experiencia de Curitiba, esta ciudad desarrolló un sistema con características similares, pero a baja escala buscando reducir los costos (Pardo, 2009). El sistema actualmente tiene 83,8 kilómetros en operación y moviliza aproximadamente 800.000 pasajeros por día.
- Bogotá, a este sistema se le ha denominado “el único sistema BRT completo” (Pardo, 2009) debido a su amplia cobertura y sus características de servicio. Actualmente tiene en operación 113 kilómetros de troncales y 663 kilómetros de alimentadores y moviliza alrededor de 2.500.000 pasajeros por día.
- Buenos Aires, tiene actualmente en operación 7 líneas con un total de 59,7 kilómetros y moviliza un promedio de 842.000 pasajeros por día. A diferencia de otros BRT existentes en el mundo, la circulación por las líneas de este sistema no es exclusiva para una línea, sino que funcionan como carriles exclusivos para diferentes líneas. Muchas de las líneas que lo utilizan no lo hacen en forma total, sino parcial.

4.3 Cómo se han tomado las decisiones del tipo de infraestructura

Las decisiones en materia de infraestructura para la implementación de sistemas de movilidad han sido un tema de discusión en diversos proyectos, se han seleccionado dos proyectos de Metro en el país y dos más por fuera de él como ejemplo de los procedimientos que se han seguido para la toma de esta decisión. De igual forma, se toma como referencia estos proyectos para la identificación de algunos de los criterios a considerar en la propuesta metodológica objeto de esta investigación.

4.3.1 Elección del tipo de infraestructura para el Metro de Medellín (Colombia)

En el caso del Metro de Medellín el proyecto (trazados y tipologías) se definió a través de un estudio de factibilidad contratado en el año 1980 con la firma Mott Hay & Anderson de Inglaterra. Cabe anotar que el trazado, en gran parte, se definió a partir de Plan Multimodal del Río definidos en la década de los años 60. Este corredor definió una faja de 18 m a cada lado del río con el propósito de implantar corredores férreos.

No obstante, una vez contratado el proyecto (EPC – contrato llave en mano) la ETMVA con sus asesores y Planeación Metropolitana planteó un cambio de trazado para acceder directamente al centro de la ciudad. Incluso esta fue una alternativa planteada desde los mismos pliegos de licitación.

El estudio fue realizado directamente por la ETMVA, quienes estudiaron diferentes alternativas de trazado para las líneas A (Industriales – Caribe, originalmente seguía el borde de río a nivel con estación de transferencia Macarena) y línea B (Río hacia el centro, originalmente en viaducto hasta Carabobo y luego subterránea en Parque de Berrio). En este caso se definieron como criterios de evaluación la demanda, el impacto urbano, la afectación predial, los costos, impactos durante construcción. Los resultados se presentaron a la Junta Directiva y Planeación Metropolitana y de ahí se tomó la decisión del cambio de trazado, optando por ingresar al centro de la ciudad con la Línea A en viaducto, y se cambia el ingreso de la Línea B que ya no ingresaría subterránea sino en viaducto y se integraría a la Línea A en la estación San Antonio.

4.3.2 Elección del tipo de infraestructura para el Metro de Bogotá (Colombia)

Tal como se manifiesta en este documento, la discusión sobre la mejor alternativa de infraestructura a implementar en el Metro de Bogotá ha sido tema de discusión durante varios años, adicionalmente, debido a la devaluación masiva de la moneda colombiana y por los planteamientos de la nueva Administración Distrital, se identifica la necesidad de optimizar los diseños de la PLMB (FDN, 2016) basados en los siguientes parámetros:

- Maximizar las ideas surgidas durante el proceso de Ingeniería de Valor realizado por la FDN en el primer semestre del año 2015.
- Considerar la devaluación que ha sufrido la moneda local frente al dólar americano, que ha causado un aumento en el costo del proyecto
- Generar beneficios que se verán reflejados en una mejora del Sistema de Transporte Masivo de la ciudad, movilizandando un mayor número de pasajeros, con mayor calidad, pero sin exceder las restricciones fiscales de la Nación y el Distrito, para financiar esta nueva oferta de infraestructura.

Por tal motivo, se adelantó un análisis multicriterio de comparación de trazados y de diferentes configuraciones de infraestructura en el cual se compararon 8 alternativas, la primera de las cuales corresponde al trazado y configuración planteado por el Consorcio CL1 (100% subterráneo), para luego combinar infraestructura subterránea y de viaducto en diferentes porcentajes y trazado hasta llegar a una alternativa 100% viaducto.

Para lograr este ejercicio, fueron analizados los corredores previstos para la PLMB en el proyecto de ingeniería básica terminados en 2015 con el fin de establecer la viabilidad de una inserción diferente a la subterránea. Resultado de este análisis fue la confirmación, de acuerdo a las características urbanas de estos corredores, de la factibilidad de la inserción de la infraestructura viaducto a lo largo de las avenidas Villavicencio, Primero de Mayo, NQS, Calle 8 Sur y Calle 1. No es el caso en las avenidas Carrera 10a, Carrera 13 y Carrera 11 hasta la Calle 127, en la continuación del trazado original, porque sus características urbanas no son propicias para la inserción de este tipo de infraestructura. Por tanto, se consideró la opción de la Avenida Caracas para conformar escenarios de trazado alternativos cuando se considera la inserción de la infraestructura en tipología viaducto.

Como metodología de selección de alternativas se utilizó una Matriz Multicriterio, dentro de la cual se analizaron los siguientes componentes:

- Componente Impacto Ambiental
 - Fuentes hídricas: Interferencia con cuerpos de agua
 - Suelo: Generación de Escombros durante la obra
 - Paisajismo Afectación arbórea
 - Ruido y vibraciones
 - Generación de ruido por la operación del sistema
 - Generación de vibraciones por la operación del sistema
- Componente Proceso Constructivo
 - Rendimiento Tiempo total de construcción
 - Daño emergente y lucro cesante
 - Perturbaciones
 - En el tráfico vehicular
 - En la operación del BRT
 - Generación de ruido y vibración por la construcción del sistema

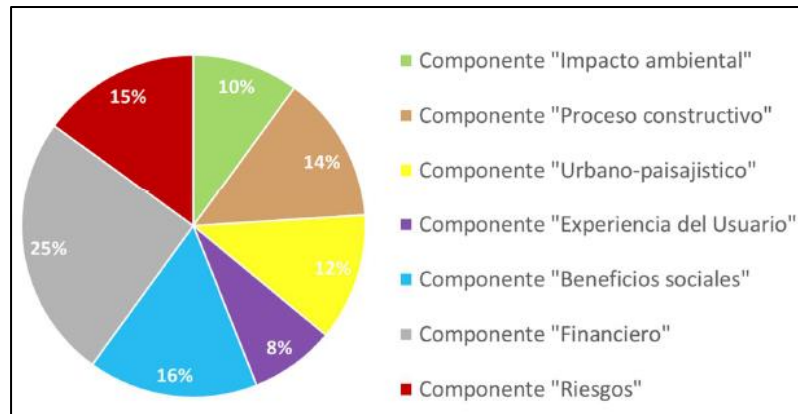
- Redes Interferencias con redes principales
- Componente Urbano-Paisajístico
 - Renovación urbana
 - Potencial de generación de espacio público
 - Potencial de desarrollo de proyectos inmobiliarios
 - Potencial de recuperación de zonas deprimidas
 - Integración/des-integración urbana
 - Afectación de barrios con interés arquitectónico y/o urbanístico
 - Proximidad con edificaciones
 - Impacto visual
- Componente Experiencia al usuario
 - Percepción en el uso del sistema de transporte
 - Apropiación de la ciudad
 - Percepción de seguridad
 - Salubridad e higiene
- 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.

Los pesos relativos para los componentes, criterios e indicadores del análisis multicriterio, fueron definidos por autoridades del gobierno nacional y autoridades del nivel de la Alcaldía de Bogotá, mediante un proceso liderado por el Comité de Seguimiento de la Consultoría. (FDN, 2016).

En la **Figura 4-1** se presentan los pesos por componentes definidos para el análisis multicriterio de selección del tipo de infraestructura para el Metro de Bogotá (FDN 2016). Con base en lo establecido en este ejercicio, el criterio financiero prevalece sobre el resto, al tener un peso de 25%, seguido por el componente social con un 16% y el componente de riesgos con un 15%.

Posteriormente, cada componente se dividió en varios criterios con sus respectivos indicadores los cuales también tienen un peso específico dentro de cada criterio tal como se presenta en la **Tabla 4-1**.

Figura 4-1: Pesos por componentes en la evaluación del tipo de infraestructura del Metro de Bogotá.



Fuente: FDN, 2016

Tabla 4-1: Pesos relativos de cada componente del análisis de Metro de Bogotá.

Componente Impacto Ambiental										
CRITERIO	INDICADOR	MEDIDA	UNIDAD	NACIÓN	DISTRITO	FDN	PROMEDIO			
Fuentes hídricas	Cruces con cuerpos de agua	Cuantitativo	UN	25	20	19	21,3			
Suelo	Generación de escombros durante la obra	Cuantitativo	M3	15	30	14	19,7			
Paisajismo	Afectación de árboles	Cuantitativo	UN	20	20	20	20,0			
Ruido y vibraciones	Generación de ruido por la operación del sistema	Cuantitativo	dB	20	10	24	18,0			
	Generación de vibraciones por la operación del sistema	Cualitativo	Alto (3), Medio (2), Bajo (1)	20	20	23	21,0			
Componente Proceso Constructivo										
CRITERIO	INDICADOR	MEDIDA	UNIDAD	NACIÓN	DISTRITO	FDN	PROMEDIO			
Rendimiento	Tiempo total de construcción	Cuantitativo	Meses	14	30	22	22,0			
Daño emergente y lucro cesante	Perturbación a vecinos comerciales	Cuantitativo	No. De predios comerciales/rendimiento	10	10	12	10,7			
Perturbaciones al tráfico	En el tráfico vehicular	Cuantitativo	Mi vías cerradas/rendimiento	14	10	15	13,0			
	En la operación del BRT	Cuantitativo	Mi troncales afectadas/rendimiento	18	10	18	15,3			
Ruido y vibraciones	Generación de ruido por la construcción del sistema	Cuantitativo	dB/rendimiento	14	10	11	11,7			
	Generación de vibraciones por la construcción del sistema	Cualitativo	Alto (3), Medio (2), Bajo (1)	14	10	11	11,7			
Redes de servicio público	Interferencia con redes principales	Cuantitativo	Mi de redes	16	20	11	15,7			
Componente Urbano-Paisajístico										
CRITERIO	INDICADOR	MEDIDA	UNIDAD	NACIÓN	DISTRITO	FDN	PROMEDIO			
Renovación urbana	Potencial de generación de espacio público	Cuantitativo	M2 de espacio público	16	20	18	18,0			
	Potencial de desarrollo de proyectos inmobiliarios	Cuantitativo	M2 de edificios	16	20	17	17,7			
Impacto urbano	Potencial de recuperación de zonas deprimidas	Cuantitativo	M2	15	20	12	15,7			
	Afectación de barrios con interés arquitectónico y/o urbanístico	Cuantitativo	M2 impactados	16	20	12	16,0			
	Proximidad con fachadas (debajo de 10m)	Cuantitativo	Mi fachadas	20	10	18	16,0			
	Impacto visual	Cualitativo	-	17	10	23	16,7			
Componente Experiencia del Usuario										
CRITERIO	INDICADOR	MEDIDA	UNIDAD	NACIÓN	DISTRITO	FDN	PROMEDIO			
Percepción en el uso del sistema de transporte	Apropiación de la ciudad	Cualitativo	-	25	40	37	34,0			
	Percepción de seguridad	Cualitativo	-	40	30	35	35,0			
	Salubridad e higiene	Cuantitativo	Mi de túnel, trinchera, viaducto	35	30	28	31,0			
Componente Beneficios Sociales										
CRITERIO	INDICADOR	MEDIDA	UNIDAD	NACIÓN	DISTRITO	FDN	PROMEDIO			
Mejoras de transporte	Apropiación de la ciudad	Cualitativo	-	25	40	37	34,0			
	Percepción de seguridad	Cualitativo	-	40	30	35	35,0			
Integración BRT	Salubridad e higiene	Cuantitativo	Mi de túnel, trinchera, viaducto	35	30	28	31,0			
Componente Financiero										
CRITERIO	INDICADOR	MEDIDA	UNIDAD	NACIÓN	DISTRITO	FDN	PROMEDIO			
Costos inversión y explotación	Costos inversión proyecto metro por km (con predios)	Cuantitativo	SCOP/km	48	40	37	34,0			
	Costos de operación y mantenimiento	Cuantitativo	SCOP/tren.kilometro	52	30	35	35,0			
Componente Riesgos										
CRITERIO	INDICADOR	MEDIDA	UNIDAD	NACIÓN	DISTRITO	FDN	PROMEDIO			
Riesgo geotécnico	Subsistencia y derrumbes	Cuantitativo	Mi	20	10	20	16,7			
Riesgo sísmico	Riesgo sísmico para las estructuras	Cuantitativo	Mi	20	10	17	15,7			
Riesgo sobre el cronograma	Incertidumbre sobre el rendimiento de construcción	Cuantitativo	Mi/día	23	30	21	24,7			
Riesgo gestión predial	Riesgo sobre la gestión predial	Cuantitativo	UN predios	16	20	17	17,7			
Riesgo financiero	Incertidumbre sobre el costo del proyecto	Cualitativo	-	21	30	25	25,3			

Fuente: FDN, 2016

4.3.3 Elección del tipo de infraestructura en Quito (Ecuador)

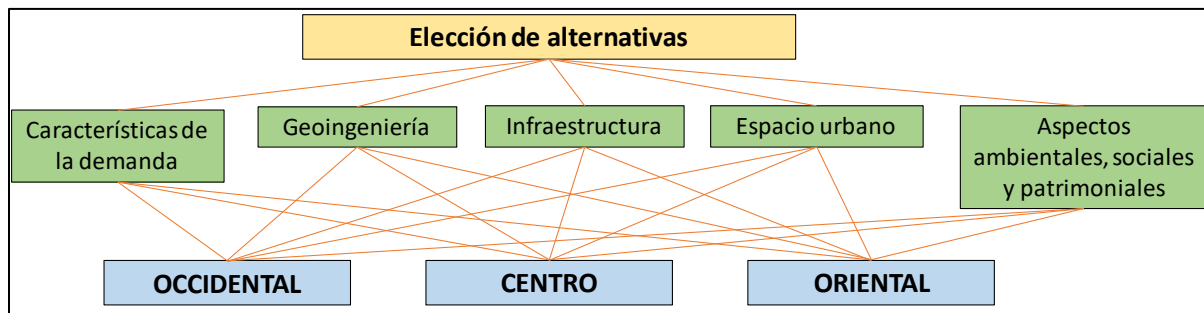
El de toma de decisión respecto al trazado del Metro de Quito tuvo una metodología para el análisis sobre si era subterráneo o elevado (en superficie fue descartado por considerarlo inapropiado por la afección que le causaría a la ciudad), la cual se incluyó en

análisis de alternativas de trazado. De tal forma, se avanzó en las zonas que debía atender tanto por demanda como por oferta, se analizaron los modos de transporte existentes con los cuales podía haber conexión o intercambio modal y se procedió a planificar la ubicación de las estaciones, para finalmente estudiar por donde iría el túnel o el viaducto y la forma como resolver los accidentes topográficos, adquisiciones prediales y obstáculos de edificios que se encontraran en el trazado.

Se utilizó el método AHP para la toma de decisión sobre la alternativa de trazado a implementar, con una estructura jerárquica determinada por la **Figura 4-2**.

Con base en este análisis, se toma la decisión de implementar el proyecto por la alternativa de trazado “Centro”, además el estudio concluye que el tren metropolitano o metro es la única opción, de entre los sistemas de transporte masivo, capaz de convertirse en el eje central, articulador y vertebrador del Sistema Integrado de Transporte de la ciudad y de transportar los volúmenes de pasajeros requeridos a las velocidades deseadas en la ciudad de Quito, adicionalmente, sería capaz de atender la demanda esperada del proyecto sin ocupar el espacio actual de vías, que es altamente apreciado por la condición longitudinal de la ciudad y, según el estudio, en algunos tramos incluso podría liberar espacios sin paralizar el tráfico en amplias zonas de la ciudad durante su desarrollo y construcción (Metro de Quito, 2012).

Figura 4-2: Estructura jerárquica selección de alternativas de trazado Quito.



Fuente: Metro de Quito (2012)

4.3.4 Elección del tipo de infraestructura en Ciudad de Panamá (Panamá)

Los principales criterios tomados en cuenta para decidir el tipo de infraestructura a implementar (elevado, a nivel o subterráneo) en la Línea 1 de Metro de Panamá se muestran en la **Tabla 4-2**. Se analizó la Línea 1 en su recorrido en cada avenida afectada. La alternativa a nivel, se descartó por el hecho de tener que compartir la vía con el transporte superficial, lo que no permitiría alcanzar las velocidades y capacidades necesarias para satisfacer la demanda esperada. Se concluye entonces, que la inserción tendrá dos opciones: elevado o subterránea (Cajiao, 2010).

Tabla 4-2: Criterios Básicos de Inserción del Sistema Metro de Ciudad de Panamá.

CAPACIDAD FÍSICA DEL CORREDOR
Este criterio se refiere al ancho disponible de los derechos de vía, la cantidad, dificultad y costo de posibles expropiaciones, la configuración actual de los servicios públicos existentes en los corredores.
CALIDAD DE LOS SUELOS
La calidad de los suelos es otro factor que también puede entorpecer o imposibilitar la inserción subterránea, haciéndola demasiado costosa.
RESTRICCIONES FÍSICAS Y DEL ÁREA DEL SISTEMA – PRESERVAR AREAS PARA FUTURAS MEJORAS
Las de restricciones físicas de otros tipos, como puentes vehiculares y peatonales en el alineamiento seleccionado, puede obligar al promotor a seleccionar un tipo de inserción subterránea, que resulte menos costosa, en este caso por el menor impacto urbano. Otro factor a evaluar es la facilidad para preservar los derechos de vía para futuras ampliaciones de la vialidad y de intersecciones conflictivas.
IMPACTO AMBIENTAL
Este se usa para evaluar el efecto que causa la intrusión urbana en un corredor cuyos usos del suelo sean predominantemente comerciales o residenciales, tanto por el impacto visual y el efecto de barrera física, como por el impacto en los niveles de ruido.
COSTOS DE CONSTRUCCIÓN
Los costos de construcción dependen del sistema constructivo que a su vez depende de las características del corredor. Este criterio es uno de los más importantes a evaluar para tomar la decisión sobre el tipo de inserción en el caso de la generalidad de los Metro latinoamericanos.
IMPACTO EN SECTORES ESTABLECIDOS
Evalúa el impacto que la intrusión urbana (vía, como de las estaciones y los Patios y Talleres) pueda tener sobre sectores de población, comercio o industria establecidos a lo largo del alineamiento seleccionado.

Fuente: Cajiao, 2010

En la **Tabla 4-3** se resumen las principales características de los tramos de la línea 1 de Metro de Panamá, que fueron analizadas para la toma de decisión respecto al tipo de infraestructura a construir para el sistema.

Tomando en cuenta todos los factores, se concluyó que la manera óptima de implementar la Línea 1 del Metro era mediante un sistema combinado de inserción urbana con parte de la línea como metro subterráneo, en aquellos sectores de mayor densidad de actividades comerciales, y parte como metro elevado, en aquellas secciones de menor actividad comercial y residencial (Cajiao, 2010).

Tabla 4-3: Características de los tramos de la línea 1 de Metro de Panamá.

Criterio	TRAMO ESTUDIADO	
	Tramo: Avenida Transístmica – Fernández de Córdoba	Tramo: Avenida Fernández de Córdoba - Vía España - Avenida Justo Arosemena
Derecho de vía	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Derechos de vía suficientes para alojar el sistema elevado, implantado en el eje central de la vía. ▪ Los requerimientos de las bases de las pilas o columnas del sistema menores a 3,00 metros de ancho. ▪ Impactos bajos en afectaciones a las propiedades adyacentes por reubicación de redes. ▪ Fácil solución a las restricciones físicas. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Espacios disponibles limitados ▪ Una inserción superficial tendría un fuerte impacto en la capacidad de movilizar el tránsito. ▪ Una estructura elevada podría haber reducido la capacidad vial del corredor
Costos de construcción:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Criterio determinante para seleccionar el tipo de inserción en este tramo ▪ Estudios preliminares mostraron que construir un Metro subterráneo es de dos a tres veces más costoso que construir un Metro elevado 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Atraviesa varias de las zonas más antiguas de la ciudad ▪ Malla de servicios públicos soterrada una a menos de cuatro metros de profundidad que se tendría que ser reubicado de seleccionar un tipo de inserción elevado, causando grandes perjuicios a la comunidad ▪ Grandes costos por las dificultades que se ven en este tipo de trabajo ▪ En la inserción subterránea la corona del túnel estaría de ocho a diez metros bajo la superficie y, por ende, no afectará dicha malla.
Impacto Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Impacto visual, de barrera y sonoro producido por una inserción elevada, no representa en este caso un impacto negativo importante al compararlo con la disminución en los costos de construcción. ▪ Efecto positivo: Reubicación de servicios públicos que se encuentran elevados afectando la visual de la zona 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fuerte el impacto ambiental por el tipo de uso del suelo, el carácter de las zonas y los vecindarios por los cuales discurre el alineamiento ▪ Efecto de barrera, ruido, impacto visual, en zonas altamente transitadas por vehículos y peatones. ▪ Zona de uso intensivo comercial

Fuente: Elaboración propia a partir de Cajiao, 2010

5. Metodología

En el desarrollo de la investigación, inicialmente, se analizaron las características principales de los proyectos de implementación de infraestructura de movilidad, identificando los criterios tenidos en cuenta para la toma de decisión, respecto al tipo de infraestructura a implementar en algunas ciudades, para lo cual, se contactaron diferentes entes gestores de infraestructura de transporte, agremiaciones y grupos de investigación, dentro y fuera del país.

Posteriormente, se lleva a cabo un grupo focal con la participación de profesionales de diferentes áreas del conocimiento, con amplia experiencia en el planeamiento, diseño y construcción de infraestructura, también se incluyeron encargados de la operación y mantenimiento de sistemas de movilidad, urbanistas y profesionales en áreas de conocimiento de trabajo social y de comunidad.

Producto de los anteriores análisis, se identificaron los criterios a tener en cuenta dentro de la investigación y se logra un primer ejercicio de confirmación y definición de tales criterios y de ponderación de cada uno de estos respecto al tipo de infraestructura a implementar.

A continuación, se desarrolla encuesta a expertos, los cuales han participado de la planificación, diseño, construcción y operación de sistemas de movilidad de mediana y alta capacidad en diferentes países. A este grupo de profesionales se les solicita ponderar los diferentes criterios analizándolos por pares, siguiendo el procedimiento del método AHP seleccionado para esta investigación.

Con base en la información recolectada, se definen las ponderaciones de importancia de acuerdo con los criterios de los expertos encuestados, lo que permite establecer los pesos específicos de cada criterio en la toma de decisión. Finalmente, se lleva a cabo un análisis

de sensibilidad de los resultados para identificar y corregir posibles errores en la definición de la metodología.

Con base en la información hallada, se elabora una guía metodológica de selección de variables para el análisis multicriterio, que permitirá seguir enriqueciendo la metodología de selección del tipo de infraestructura para un sistema de transporte masivo de mediana y alta capacidad.

La metodología definida, se aplica posteriormente al Corredor de la Avenida 80 (con tecnología tipo metro liviano) y la Línea F (con tecnología tipo metro), ambos proyectos incluidos en el Plan Rector de expansión del Metro de Medellín Ltda., para identificar el tipo de infraestructura que debe ser implementado en estos dos proyectos de la región.

A continuación, se presenta la descripción detallada de cada uno de los procesos realizados en esta investigación.

5.1 Fuentes de Información

Tal como se ha descrito en el presente documento, para el desarrollo de esta investigación fue necesario hacer uso de información primaria y secundaria de forma tal que pudiera abarcarse la mayor cantidad de información necesaria para que la selección de la infraestructura a implementar en un corredor en estudio, sea la más adecuada de acuerdo con los criterios identificados. En los siguientes capítulos se describe en detalle las metodologías utilizadas para identificar la información necesaria para lograr el objetivo de esta investigación:

5.1.1 Información secundaria

De acuerdo con la investigación llevada a cabo sobre las variables utilizadas para la toma de decisiones del tipo de infraestructura a implementar en varias ciudades del mundo, se identifica que comúnmente, las variables utilizadas son:

- Condiciones medioambientales: Se refiere a las afectaciones que pueda tener el proyecto en las fuentes hídricas, el paisaje, generación de ruido y vibraciones durante

construcción y operación y generación de escombros durante las obras, igualmente, sea analizada la contaminación que pueda generarse por la construcción y posterior operación del sistema, entre otras afectaciones posibles.

- Condiciones urbanas: Las posibilidades que tiene el proyecto en generación de espacio público y de renovación urbana, recuperación de zonas deprimidas, proximidad con edificaciones, potencial de desarrollo de proyectos inmobiliarios y el impacto visual.
- Condiciones de accesibilidad: en estaciones y vehículos, y las posibilidades de condiciones mínimas de accesibilidad durante incidentes.
- Condiciones constructivas: Se refiere a interferencias al tráfico vehicular y peatonal durante las obras, necesidades de intervención a redes existentes, riesgos constructivos y rendimiento o tiempo de construcción.
- Costos: Se refiere a los costos asociados a la construcción y operación del sistema.
- Impactos sociales: Son aquellos asociados a los impactos al comercio del sector durante las obras, necesidades de predios durante las obras y posteriormente durante la operación del sistema, lo que posiblemente implique desplazamientos, reubicaciones, etc.
- Experiencia al usuario: Es la percepción en el uso del sistema de movilidad, apropiación del sistema en la ciudad, percepción de seguridad, salubridad, higiene e iluminación.

Los criterios identificados, deben ser contrastados con los que se hallen en el grupo focal y así consolidar un solo grupo de criterios a tener en cuenta dentro de las siguientes etapas del proceso. En el numeral 5.1.2 se describe el procedimiento utilizado para llevar a cabo el grupo focal y se presentan los criterios consolidados que se utilizarán en las etapas posteriores del análisis.

5.1.2 Información primaria

Para la identificación de criterios y su ponderación se identifica la necesidad de llevar a cabo grupo focal y encuesta a expertos, los resultados de estos estudios y el procedimiento llevado a cabo son:

- **Grupo focal:**
Se hace la sesión del grupo focal el día 4 de abril de 2018 con la participación de nueve profesionales quienes han participado en los equipos de trabajo encargados de la

planificación, diseño, construcción y operación de sistemas de movilidad de mediana y alta capacidad. Los perfiles de los profesionales participantes del grupo focal son Especialistas en procesos urbanos, en movilidad urbana, planificación urbana, paisaje, sistemas de información geográfica, diseño de infraestructura de movilidad, operación y construcción de estos sistemas.

Con autorización de los participantes, la sesión del grupo focal quedó registrada en audio y video que sirvió para su posterior análisis.

Una vez instalado el grupo focal, se procede por parte del moderador a hacer una introducción del evento, informando a los participantes del alcance y objetivos de la investigación y los temas a tratar en este espacio. Concluida la introducción, se solicita a los participantes que se discuta acerca de las variables necesarias a tener en cuenta en un análisis multicriterio para la selección del tipo de infraestructura a implementar en un sistema de transporte de mediana y alta capacidad. Se logra un listado de variables y se procede a consolidarlas de forma que las variables que finalmente hagan parte del ejercicio no sean repetitivas o que no estén incluidas dentro de otras identificadas. Finalmente, luego del debate generado, se concluye que las variables o criterios necesarios a tener en cuenta serían los siguientes:

- Percepción sobre el tipo de infraestructura
- Interés político
- Garantizar la demanda vs oferta
- Logística de ciudad
- Costos de inversión
- Costos de operación y mantenimiento
- Selección tecnológica de movilidad
- Accesibilidad
- Efectos urbanísticos (transformación urbana)
- Afectación de servicios públicos
- Oportunidad de desarrollo territorial
- Estructura ecológica del corredor
- Condiciones constructivas
- Integración con otros modos de transporte

A continuación, se procede a solicitar a cada participante, mediante encuesta individual, analizar el nivel de importancia de cada criterio y asignar para cada tipo de infraestructura (subterránea, nivel y viaducto). Asignando una calificación de tres (3) para una alta importancia, dos (2) para una importancia media y uno (1) para una baja importancia.

A los participantes del grupo focal, se les presenta las conclusiones del evento por parte del equipo investigador y se resalta que, si la ponderación de los diferentes criterios fuera equivalente, el promedio de las calificaciones de importancia para los criterios seleccionados es prácticamente igual lo cual refleja que el grupo seleccionado no tiene una preferencia especial sobre algún tipo de infraestructura específico. Los resultados de este proceso se presentan en la **Tabla 5-1**.

Tabla 5-1: Resumen de resultados del grupo focal.

Criterio	Descripción	Invitado 1			Invitado 2			Invitado 3			Invitado 4			Invitado 5			Invitado 6			Invitado 7			Invitado 8			Invitado 9			Promedio		
		S	N	V	S	N	V	S	N	V	S	N	V	S	N	V	S	N	V	S	N	V	S	N	V	S	N	V	S	N	E
1	Percepción del usuario sobre el sistema de transporte	2	3	1	3	1	3	2	3	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	1	3	3	3	2,6	1,8	2,1
2	Interés político	3	2	1	2	3	2	3	2	3	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	3	3	3	2	2	2	2,6	1,9	2,3
3	Garantizar la demanda vs oferta	3	2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	3	3	3	2,3	2,4	2,1
4	Logística de ciudad	2	3	1	2	3	1	3	3	2	1	3	3	1	3	2	1	3	2	3	2	3	3	2	1	3	1	2	2,1	2,6	1,9
5	Costos de inversión	3	1	2	3	2	3	3	2	3	3	1	2	3	2	1	3	1	2	3	2	3	3	1	2	3	1	2	3,0	1,4	2,2
6	Costos de operación y mantenimiento de la infraestructura	3	2	1	2	2	3	2	3	1	3	1	2	3	3	3	3	1	2	3	1	3	3	3	3	2	1	3	2,7	1,9	2,3
7	Selección tecnológica de movilidad	2	3	1	2	1	3	2	3	2	3	1	2	3	1	2	1	1	1	1	3	2	3	1	2	3	1	2	2,2	1,7	1,9
8	Accesibilidad	3	2	1	3	2	3	3	3	3	3	2	3	1	3	2	1	3	2	3	1	3	3	3	3	3	3	3	2,6	2,4	2,6
9	Efectos urbanísticos (transformación urbana)	1	3	2	1	3	3	2	3	3	2	3	3	1	3	3	1	3	2	1	3	3	1	3	3	1	3	2	1,2	3,0	2,7
10	Afectación de servicios públicos	3	2	1	3	3	2	2	3	2	3	2	2	2	3	3	3	2	2	3	1	1	1	3	3	3	1	2	2,6	2,2	2,0
11	Oportunidad de desarrollo territorial	2	3	1	3	3	1	2	3	3	3	3	3	1	2	3	1	3	2	1	2	3	1	3	2	1	3	2	1,7	2,8	2,2
12	Estructura ecológica del corredor	1	2	3	3	2	1	3	3	3	1	3	2	1	3	2	1	3	3	3	1	3	2	3	1	1	3	3	1,8	2,6	2,3
13	Condiciones constructivas	2	3	1	3	1	2	2	2	2	3	3	3	1	3	1	1	3	2	3	1	3	3	3	3	3	3	2	2,3	2,4	2,1
14	Integración con otros modos de transporte	3	1	2	3	2	2	3	3	3	3	2	3	1	3	2	2	2	2	3	1	3	3	3	1	3	3	3	2,7	2,2	2,3
		Promedio																								2,3	2,2	2,2			
S = Subterráneo		N = A Nivel						V = Viaducto																							

Fuente: Elaboración propia

De igual forma, se hace un análisis de los resultados hallados, revisando la coherencia de estos y se concluye que son coherentes con las experiencias y el conocimiento de los participantes del grupo focal.

Los resultados del grupo focal, con los del análisis de la información de otros procesos de selección de infraestructura identificados en el numeral 5.1.1. De esta forma, se tienen todos los criterios a analizar dentro de la metodología propuesta para lograr el objetivo de identificar el tipo de infraestructura que más se ajuste a las necesidades de un corredor de movilidad en estudio.

A continuación, se describen los criterios identificados para ser evaluados dentro del ejercicio de selección del tipo de infraestructura a implementar en un sistema de transporte de mediana y alta capacidad son:

- **Social:** Este criterio abarca el impacto durante las obras, la percepción sobre el sistema de transporte y sobre el espacio a utilizar que tienen los habitantes del sector y futuros usuarios del sistema, las afectaciones a la logística de ciudad y al tráfico vehicular durante las obras y posteriormente durante la operación del sistema, necesidades de adquisición de predios, percepción en el uso del sistema de movilidad, apropiación del sistema en la ciudad, percepción de seguridad, salubridad, higiene e iluminación.
- **Institucional:** En este se mide la viabilidad institucional para la implementación del proyecto, así mismo, abarca el interés político y las necesidades de articulación institucional.
- **Costo inversión:** Permite la comparación de los costos de inversión del proyecto, relacionados con los costos de construcción de cada tipo de infraestructura, los costos relacionados con las compras de predios necesarios para implementar el proyecto y reposición de redes existentes, costos de material rodante y equipos fijos.

- **Costo operación:** A través de este criterio, es posible comparar los costos asociados al mantenimiento y operación de cada tipo de infraestructura y sus equipos fijos asociados, tales como iluminación, ventilación, bombeos y demás.
- **Tecnológico:** Cada tecnología de movilidad presenta una serie de restricciones que condicionan el tipo de infraestructura a implementar tales como la pendiente máxima y las necesidades de infraestructura asociada al sistema que permita una adecuada operación del mismo. De igual forma, es necesario identificar si el tipo de infraestructura seleccionada para cada tecnología específica permite garantizar una oferta suficiente para atender la demanda esperada del proyecto y una adecuada integración con los sistemas de movilidad existentes en el área de influencia del mismo.
- **Urbano:** Este indicador contempla los efectos urbanísticos o de transformación urbana que genera el proyecto, las oportunidades de desarrollo territorial, la disponibilidad y uso del suelo, la consolidación urbana donde se insertará el proyecto, disponibilidad espacial, las posibilidades de expansión del sistema y la accesibilidad en estaciones y vehículos y las posibilidades de condiciones mínimas de accesibilidad durante incidentes.
- **Ambiental:** Se refiere a las afectaciones que pueda tener el proyecto en las fuentes hídricas o cuerpos de agua, a los cambios que pueda generar a la estructura ecológica del corredor y el paisaje, generación de ruido, vibraciones y contaminación generada durante construcción y operación y generación de escombros durante las obras, entre otros.
- **Constructivo:** Este indicador contempla las interferencias al tráfico vehicular durante las obras, necesidades de intervención a redes existentes, riesgos constructivos y rendimiento o tiempo de construcción, obras necesarias relacionadas con las restricciones topográficas y constructivas.

La **Tabla 5-2** presenta un resumen de los criterios y subcriterios identificados en el grupo focal y consolidados con base en la información de los criterios tenidos en cuenta en otros ejercicios para la determinación del tipo de infraestructura a implementar.

Tabla 5-2: Resumen de criterios y subcriterios.

Criterio	Subcriterios
Social	Impacto social Percepción sobre el tipo de infraestructura Logística de ciudad Afectación al tráfico vehicular Percepción social sobre el espacio a utilizar
Institucional	Viabilidad institucional Interés político Articulación institucional
Costo inversión	Costos de infraestructura Costos por requerimiento de predios
Costo operación	Costos de operación y mantenimiento
Tecnológico	Selección tecnológica de movilidad Restricciones tecnológicas Garantizar la demanda vs oferta Integración con otros modos de transporte
Urbano	Efectos urbanísticos (transformación urbana) Oportunidad de desarrollo territorial Accesibilidad Disponibilidad del suelo Usos del suelo Preexistencias Posibilidades de expansión Consolidación urbana donde se inserta
Ambiental	Condicionantes ambientales Estructura ecológica del corredor Presencia de cuerpos de agua Clima
Constructivo	Condiciones constructivas Afectación de servicios públicos Condiciones topográficas Restricciones constructivas

Fuente: Elaboración propia

- **Encuesta a expertos**

De acuerdo con las variables identificadas con el grupo focal y contrastadas con la información identificada en el análisis de información secundaria de esta investigación (numeral 5.1.1), se procede con la elaboración de la encuesta a expertos con base en la metodología AHP, en la cual se procede con la comparación por pares de los criterios identificados, para ello se hace uso de la herramienta gratuita “*survio*” para la generación de encuestas virtuales (www.survio.com).

Se invitó a participar en la encuesta a profesionales de diferentes países, con amplia experiencia en la planeación, diseño, construcción y operación de infraestructura de transporte urbano, con diferentes especialidades, de forma tal que se pudieran tener respuestas con criterios de diverso tipo. Las especialidades y procedencia de los profesionales que atendieron la invitación a participar en la encuesta se listan en la **Tabla 5-3**.

Tabla 5-3: Expertos encuestados.

Especialidad	Colombia	Chile	España	Brasil	Argentina	Puerto Rico	Total
Movilidad urbana	8	0	3	1	1	0	13
Diseño de infraestructura de transporte	5	3	4	0	0	0	12
Gestión ambiental de sistemas de movilidad	2	0	0	0	0	0	2
Urbanismo	3	1	0	0	0	0	5
Gestión social de sistemas de movilidad	4	0	0	0	0	0	4
Construcción de infraestructura de transporte	1	0	1	0	0	1	3
Operación de infraestructura de transporte	3	0	0	0	0	0	3
TOTAL	26	5	8	1	1	1	41

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la metodología descrita en el numeral 3.4.1, se construye la encuesta de forma que los expertos encuestados expresaran, de acuerdo con su conocimiento y experiencia, el orden de importancia comparando por pares de criterios.

En la **Figura 5-1** se presenta el modelo de preguntas utilizada para la comparación por pares de criterios (pregunta tipo 1), y una breve explicación de la forma como se debían responder las preguntas de este tipo.

Figura 5-1: Modelo de pregunta tipo 1 para encuesta a expertos.

Si el criterio A es sumamente importante respecto al criterio B, se procede de la siguiente forma:

En el caso de implementación de un sistema de movilidad de mediana o alta capacidad, usted considera que:

Sumamente	Muy fuertemente	Fuertemente	Moderadamente	Igualmente	Moderadamente	Fuertemente	Muy fuertemente	Sumamente
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CRITERIO A					CRITERIO B			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CRITERIO A					CRITERIO B			

Sin embargo, si el criterio B es fuertemente importante respecto al criterio A, se debe marcar la casilla correspondiente, así:

En el caso de implementación de un sistema de movilidad de mediana o alta capacidad, usted considera que:

Sumamente	Muy fuertemente	Fuertemente	Moderadamente	Igualmente	Moderadamente	Fuertemente	Muy fuertemente	Sumamente
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CRITERIO A					CRITERIO B			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CRITERIO A					CRITERIO B			

Fuente: Elaboración propia

De igual forma, se solicita a los encuestados que, de acuerdo con su criterio, identifiquen para cada tipo de infraestructura la importancia relativa que debe tener cada criterio analizado (pregunta tipo 2). La **Figura 5-2** presenta el modelo de pregunta tipo 2 incluida en la encuesta, en la cual los encuestados califican la importancia de cada criterio para cada tipo de infraestructura comparativamente entre ellas, en caso de implementar un sistema de transporte masivo de mediana y alta capacidad en zonas urbanas, de acuerdo con el siguiente criterio:

- **Importancia baja:** si considera que el criterio considerado es poco significativo en el desarrollo del respectivo tipo de infraestructura
- **Importancia media:** si considera que el criterio considerado es medianamente significativo en el desarrollo del respectivo tipo de infraestructura
- **Importancia alta:** si considera que el criterio considerado es muy significativo en el desarrollo del respectivo tipo de infraestructura


En el Anexo A: Encuestas , se presenta la encuesta realizada y los resultados de cada encuesta.

Figura 5-2: Modelo de pregunta tipo 2 para encuesta a expertos.

12. Qué tan importante cree usted que es el criterio SOCIAL para cada tipo de infraestructura?*

Seleccione una respuesta en cada fila

	Importancia baja	Importancia media	Importancia alta
Subterráneo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nivel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Viaducto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



Fuente: Elaboración propia

Con base en los resultados de esta encuesta, se procede con la elaboración de la Matriz de comparación pareada, procedimiento que se describe en detalle en el numeral 5.2 del presente documento.

5.2 Proceso de elaboración de la matriz

De acuerdo con la metodología propuesta por Saaty (1980) descrita en los numerales 3.3.8 y 3.4.1 de este documento, para lo cual se procede a construir la matriz de comparación pareada que se presenta en la **Tabla 5-4** con los criterios definidos en el numeral 5.1.2, los cuales se hallan como el promedio de las valoraciones que los encuestados asignaron a cada comparación pareada.

A continuación, se procede con la normalización de la matriz, de acuerdo al procedimiento descrito en el numeral 3.4.1, obteniéndose los datos presentados en la **Tabla 5-5**.

Tabla 5-4: Matriz de comparación pareada de selección del tipo de infraestructura (diligenciada).

A/B	Social	Institucional	Costo inversión	Costo operación	Tecnológico	Urbano	Ambiental	Constructivo
Social	1,00	5,31	3,86	3,08	3,19	2,89	2,66	4,29
Institucional	0,19	1,00	2,42	1,63	2,02	1,53	1,04	1,90
Costo inversión	0,26	0,41	1,00	2,23	2,84	1,78	1,68	3,26
Costo operación	0,32	0,61	0,45	1,00	3,78	1,87	1,77	3,64
Tecnológico	0,31	0,50	0,35	0,26	1,00	1,47	1,54	2,54
Urbano	0,35	0,65	0,56	0,54	0,68	1,00	1,46	3,97
Ambiental	0,38	0,97	0,60	0,57	0,65	0,69	1,00	5,00
Constructivo	0,23	0,53	0,31	0,27	0,39	0,25	0,20	1,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-5: Matriz de selección del tipo de infraestructura normalizada.

A/B	Social	Institucional	Costo inversión	Costo operación	Tecnológico	Urbano	Ambiental	Constructivo
Social	0,33	0,53	0,40	0,32	0,22	0,25	0,23	0,17
Institucional	0,06	0,10	0,25	0,17	0,14	0,13	0,09	0,07
Costo inversión	0,09	0,04	0,10	0,23	0,20	0,15	0,15	0,13
Costo operación	0,11	0,06	0,05	0,10	0,26	0,16	0,16	0,14
Tecnológico	0,10	0,05	0,04	0,03	0,07	0,13	0,14	0,10
Urbano	0,11	0,07	0,06	0,06	0,05	0,09	0,13	0,16
Ambiental	0,12	0,10	0,06	0,06	0,04	0,06	0,09	0,20
Constructivo	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04

Fuente: Elaboración propia

Continuando con el procedimiento descrito en el numeral 3.4.1, se procede a hallar el vector de prioridades, calculado como el promedio simple de cada una de las filas, los resultados de este procedimiento se presentan en la **Tabla 5-6**.

En la **Tabla 5-6** se identifica que el criterio con mayor peso en el proceso de decisión del tipo de infraestructura a implementar es el Criterio Social, con un porcentaje del 31% lo que indica el alto interés que tiene este criterio frente a los demás. Este resultado es importante dada la magnitud del peso que, de acuerdo con la encuesta, se le debe dar al componente social de los proyectos.

Tabla 5-6: Vector de prioridades de criterios de selección del tipo de infraestructura

A/B	Social	Institucional	Costo inversión	Costo operación	Tecnológico	Urbano	Ambiental	Constructivo	Vector de prioridades
Social	0,33	0,53	0,40	0,32	0,22	0,25	0,23	0,17	30,8%
Institucional	0,06	0,10	0,25	0,17	0,14	0,13	0,09	0,07	12,8%
Costo inversión	0,09	0,04	0,10	0,23	0,20	0,15	0,15	0,13	13,6%
Costo operación	0,11	0,06	0,05	0,10	0,26	0,16	0,16	0,14	13,0%
Tecnológico	0,10	0,05	0,04	0,03	0,07	0,13	0,14	0,10	8,1%
Urbano	0,11	0,07	0,06	0,06	0,05	0,09	0,13	0,16	8,9%
Ambiental	0,12	0,10	0,06	0,06	0,04	0,06	0,09	0,20	9,1%
Constructivo	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04	3,7%

Fuente: Elaboración propia

El objetivo es conocer cuál alternativa contribuye mejor al objetivo general, para lo cual se debe realizar un proceso base en el procedimiento descrito en el numeral 3.4.1 para finalmente obtener los resultados presentados en la **Tabla 5-7**

Tabla 5-7: Proceso de síntesis para la selección del tipo de infraestructura

Criterio	Vector de prioridades	$\lambda * w$	λ
Social	30,8%	2,83	9,20
Institucional	12,8%	1,19	9,32
Costo inversión	13,6%	1,22	8,97
Costo operación	13,0%	1,14	8,75
Tecnológico	8,1%	0,69	8,48
Urbano	8,9%	0,76	8,55
Ambiental	9,1%	0,78	8,59
Constructivo	3,7%	0,33	8,82
	Promedio (λ_{max})		8,834

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se procede a hallar la consistencia de la matriz, para lo cual se halla la relación de consistencia, utilizando las ecuaciones (3.13) y (3.14) y los datos de la **Tabla 3-7**, obteniendo así el resultado presentado en la **Tabla 5-8**. Con base en estos resultados, se puede afirmar que la matriz tiene una inconsistencia admisible, debido al relación de consistencia hallado de 0,08.

Tabla 5-8: Relación de consistencia de la selección del tipo de infraestructura

Índice de consistencia	CI	0,12
Consistencia aleatoria	IA	1,40
Relación de consistencia	RC	0,08

Fuente: Elaboración propia

Una vez hallado el vector de prioridades de los criterios respecto al objetivo, se procede a repetir este mismo procedimiento para hallar los vectores de prioridad o pesos de los subcriterios respecto a cada criterio, hallándose las prioridades en cada nivel de jerarquía. En la **Tabla 5-9** se presentan los valores de las ponderaciones de todos los criterios y subcriterios con los cuales se procede a evaluar los proyectos para hallar el tipo de infraestructura más adecuado para el proyecto en particular.

Con el objetivo de analizar el aporte que cada subcriterio hace al objetivo, se procede a calcular el peso global de cada subcriterio respecto al objetivo principal y se identifica que, el subcriterio costos de operación y mantenimiento, único subcriterio del criterio Costo Operación, es determinante en el análisis del tipo de infraestructura a implementar, seguido por el subcriterio percepción social sobre el espacio a utilizar y costos de inversión en predios. De igual forma, se identifica que el criterio que menos aporta en la selección del tipo de infraestructura es el clima.

A continuación, se procede a analizar los resultados de la pregunta tipo 2 (Ver **Figura 5-2**) de la encuesta a expertos, para identificar los factores de importancia que, con base en las respuestas de la encuesta, se tiene para cada criterio asociado a cada alternativa de infraestructura.

Se asigna para cada encuesta un valor de 5 a las respuestas que asignaron “importancia alta” 3 para “importancia media” y 1 para “importancia baja”, se promedian los resultados dividiendo por 5 para encontrar un factor de ponderación del tipo de infraestructura a aplicar a cada ponderación de los criterios, obteniéndose así los valores registrados en la **Tabla 5-10**. Al igual que en la **Tabla 5-9**, se calcula la columna Peso Global para identificar los niveles de importancia de cada tipo de infraestructura de acuerdo con la pregunta tipo 2.

Tabla 5-9: Pesos globales de criterios y subcriterios de selección de tipo de infraestructura

Criterio	Peso Criterios	Subcriterios	Peso Subcriterios	Peso Global
Social	30,8%	Impacto social durante la construcción	16,6%	5,1%
		Percepción sobre el tipo de infraestructura	26,1%	8,0%
		Logística de ciudad	8,7%	2,7%
		Afectación al tráfico vehicular	9,3%	2,9%
		Percepción social sobre el espacio a utilizar	39,3%	12,1%
Institucional	12,8%	Viabilidad institucional	10,6%	1,4%
		Interés político	63,3%	8,1%
		Articulación institucional	26,0%	3,3%
Costo inversión	13,6%	Costos de infraestructura	16,7%	2,3%
		Costos por requerimiento de predios	83,3%	11,3%
Costo operación	13,0%	Costos de operación y mantenimiento	100,0%	13,0%
Tecnológico	8,1%	Selección tecnológica de movilidad	9,8%	0,8%
		Restricciones tecnológicas	17,4%	1,4%
		Garantizar la demanda vs oferta	32,3%	2,6%
		Integración con otros modos de transporte	40,6%	3,3%
Urbano	8,9%	Efectos urbanísticos (transformación urbana)	8,6%	0,8%
		Oportunidad de desarrollo territorial	7,5%	0,7%
		Accesibilidad	22,0%	2,0%
		Disponibilidad del suelo	8,2%	0,7%
		Usos del suelo	12,1%	1,1%
		Preexistencias	16,9%	1,5%
		Posibilidades de expansión	13,9%	1,2%
		Consolidación urbana donde se inserta	10,9%	1,0%
Ambiental	9,1%	Condicionantes ambientales	30,5%	2,8%
		Estructura ecológica del corredor	33,3%	3,0%
		Presencia de cuerpos de agua	30,5%	2,8%
		Clima	5,7%	0,5%
Constructivo	3,7%	Restricciones constructivas	32,1%	1,2%
		Afectación de servicios públicos	22,5%	0,8%
		Condiciones topográficas	45,4%	1,7%
Sumatoria	100,0%			100,0%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-10: Ponderación por tipo de infraestructura

Criterio	Peso Criterios	Subcriterios	Ponderación por tipo de infraestructura	Peso Global
Social	30,8%	Subterráneo	0,65	20,0%
		Nivel	0,87	26,9%
		Viaducto	0,79	24,2%
Institucional	12,8%	Subterráneo	0,72	9,2%
		Nivel	0,73	9,3%
		Viaducto	0,75	9,5%
Costo inversión	13,6%	Subterráneo	0,96	13,1%
		Nivel	0,70	9,5%
		Viaducto	0,86	11,8%
Costo operación	13,0%	Subterráneo	0,85	11,1%
		Nivel	0,73	9,5%
		Viaducto	0,76	9,8%
Tecnológico	8,1%	Subterráneo	0,88	7,2%
		Nivel	0,68	5,5%
		Viaducto	0,77	6,2%
Urbano	8,9%	Subterráneo	0,64	5,7%
		Nivel	0,91	8,1%
		Viaducto	0,82	7,3%
Ambiental	9,1%	Subterráneo	0,84	7,7%
		Nivel	0,84	7,7%
		Viaducto	0,87	8,0%
Constructivo	3,7%	Subterráneo	0,90	3,3%
		Nivel	0,68	2,5%
		Viaducto	0,81	3,0%

Fuente: Elaboración propia

De la **Tabla 5-10** se puede identificar que, de acuerdo con los expertos encuestados, el criterio social tiene una alta importancia respecto a los demás. A continuación, se deben unificar la **Tabla 5-9** con la **Tabla 5-10**, de forma que al evaluar los subcriterios se logre hallar el puntaje final del proyecto.

La **Tabla 5-11** presenta los valores consolidados de pesos que permite evaluar el tipo de infraestructura a implementar en un sistema de transporte masivo de mediana y alta capacidad, desarrollada en esta investigación, en dicha tabla, se debe calificar cada

subcriterio con base en cada alternativa de infraestructura y posteriormente, para hallar la evaluación por criterio, subcriterio y factor importancia se debe multiplicar los valores de las columnas Peso global criterio, Peso global subcriterio Factor de importancia por la calificación a cada tipo de infraestructura y así obtener el valor de la evaluación de la alternativa de infraestructura que más se ajuste a las necesidades del proyecto.

Tabla 5-11: Evaluación de Criterios, Subcriterios y factores de importancia de infraestructura

Criterio	Subcriterio	Peso global criterio	Peso global subcriterio	Factor de importancia por tipo de infraestructura			Calificación			Evaluación por criterio y subcriterio		
				Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto
Social	Impacto social durante la construcción	30,8%	16,6%	0,6	0,9	0,8						
	Percepción sobre el tipo de infraestructura		26,1%									
	Logística de ciudad		8,7%									
	Afectación al tráfico vehicular		9,3%									
	Percepción sobre el espacio a utilizar		39,3%									
Institucional	Viabilidad institucional	12,8%	10,6%	0,7	0,7	0,7						
	Interés político		63,3%									
	Articulación institucional		26,0%									
Costo Inversión	Costos de infraestructura	13,6%	16,7%	1,0	0,7	0,9						
	Costos por requerimiento de predios		83,3%									
Costo Operación	Costos de operación y mantenimiento	13,0%	100,0%	0,9	0,7	0,8						
Tecnológico	Selección tecnológica de movilidad	8,1%	9,8%	0,9	0,7	0,8						
	Restricciones tecnológicas		17,4%									
	Garantizar la demanda vs oferta		32,3%									

Criterio	Subcriterio	Peso global criterio	Peso global subcriterio	Factor de importancia por tipo de infraestructura			Calificación			Evaluación por criterio y subcriterio		
				Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto
	Integración con otros modos de transporte		40,6%									
Urbano	Efectos urbanísticos (transformación urbana)	8,9%	8,6%	0,6	0,9	0,8						
	Oportunidad de desarrollo territorial		7,5%									
	Accesibilidad		22,0%									
	Disponibilidad del suelo		8,2%									
	Usos del suelo		12,1%									
	Preexistencias		16,9%									
	Posibilidades de expansión		13,9%									
	Consolidación urbana donde se inserta		10,9%									
Ambiental	Condicionantes ambientales	9,1%	30,5%	0,8	0,8	0,9						
	Estructura ecológica del corredor		33,3%									
	Presencia de cuerpos de agua		30,5%									
	Clima		5,7%									
Constructivo	Restricciones constructivas	3,7%	32,1%	0,9	0,7	0,8						
	Afectación de servicios públicos		22,5%									
	Condiciones topográficas		45,4%									
Sumatoria												

Fuente: Elaboración propia

La calificación final de cada alternativa de infraestructura es la que resulta de la sumatoria de los resultados en la columna “Evaluación por criterio, subcriterio y factor importancia” correspondiente a cada alternativa de infraestructura.

En el Anexo B se presenta el archivo de Excel con los cálculos desarrollados para la evaluación del tipo de infraestructura en un sistema de transporte de alta y mediana capacidad.

6.Planteamiento de la propuesta metodológica

Con base en la investigación adelantada, y como parte del alcance de la misma, se desarrolla el siguiente planteamiento metodológico que servirá de guía para su uso en el análisis del tipo de infraestructura a implementar en un sistema de transporte masivo de mediana o alta capacidad en zonas urbanas.

6.1 Guía metodológica para la selección del tipo de infraestructura

Una vez identificada la necesidad de implementar un sistema de movilidad en determinada región, se deben seguir los siguientes pasos para lograr definir el tipo de infraestructura a implementar en un sistema de transporte de mediana o alta capacidad, de acuerdo con las necesidades del corredor específico en estudio:

6.1.1 Caracterización del proyecto

Se debe llevar a cabo un estudio de la zona a intervenir y reconocimiento de las acciones necesarias a potencializar o realizar en el mismo, el cual debe incluir una lectura y análisis territorial, conocer las potencialidades en materia urbana que tiene el corredor, las restricciones y condicionantes sociales, ambientales y características técnicas de los suelos, etc.

De acuerdo con la metodología planteada por el Metro de Medellín Ltda. (2018) las actividades de caracterización de corredores se pueden dividir por etapas, una primera etapa de diagnóstico que incluye las siguientes actividades:

- Lectura territorial y análisis de la información
- Estimación de la demanda

- Análisis de normativa y oportunidades urbanas
- Definición de trazado y ubicación de paradas del proyecto sobre cartografía
- Selección tecnológica
- Definición del área de influencia del corredor de movilidad
- Identificación de alternativas e instrumentos de gestión
- Evaluación económica del proyecto

Una vez finalizadas estas actividades, se procede con la segunda etapa de formulación y elaboración de los estudios de prefactibilidad que de acuerdo con la metodología propuesta por Metro de Medellín Ltda. (2018) incluye las siguientes actividades:

- Anuncio de proyecto y avalúos de referencia como mecanismo de control a los precios del suelo, de acuerdo con lo establecido en la Ley 388 de 1997, así como de otros instrumentos para controlar los precios del suelo en proyectos de renovación urbana
- Levantamiento topográfico
- Estudios técnicos del corredor (suelos, hidrológicos, hidráulicos, etc.)
- Elaboración de inventario forestal incluyendo valoración fitosanitaria
- Evaluación del estado de la infraestructura existente
- Estudios de arqueología del corredor
- Estudios de movilidad identificando proyectos complementarios y necesidades de reestructuración de rutas de transporte público
- Caracterización socio-económica del sector
- Diseño geométrico
- Identificación de predios posibles a afectar con el proyecto.
- Presupuesto preliminar del proyecto

En esta etapa debe seleccionarse el tipo de infraestructura a implementar de forma que pueda definirse completamente el corredor y proceder con el diseño de detalle y posterior estructuración técnica, legal y financiera del proyecto, que permita su implementación.

6.1.2 Identificación de criterios de selección del tipo de infraestructura a implementar

Para la identificación de los criterios y subcriterios a tener en cuenta en el análisis del tipo de infraestructura a implementar en un sistema de transporte de mediana o alta capacidad, se establece como el procedimiento más adecuado la ejecución de un grupo focal con la participación de profesionales con experiencia en la planeación, diseño, construcción y operación de sistemas de transporte de mediana y alta capacidad.

La metodología de trabajo del grupo focal se encuentra detallada en el numeral 3.4.3. Adicionalmente, se debe identificar los criterios utilizados en estudios similares de forma que se puedan unificar criterios y subcriterios con base en los cuales adelantar el estudio.

Si bien esta investigación identificó criterios que a juicio del equipo investigador son suficientes para la selección del tipo de infraestructura a implementar, se deja la posibilidad de incluir otros criterios que los planificadores consideren necesarios en el análisis particular del proyecto en estudio.

Se debe tener especial cuidado en la cantidad de criterios definidos para el análisis y evaluar la posibilidad de que se agrupen en criterios y subcriterios, lo anterior, debido a que se pueden generar muchas comparaciones pareadas haciendo muy extenso el proceso, y tal vez innecesario.

Con base en la ecuación (6.1) se identifica la cantidad de comparaciones pareadas que resultan con base en los criterios identificados que denominaremos D . De allí que, si se tienen muchos criterios en el análisis, es posible que se tengan dificultades para la consecución de la información.

$$D = \frac{n(n-1)}{2} \tag{6.1}$$

Donde n es el número de criterios a analizar.

Otra característica que deben tener los criterios es que sus nombres deben ser cortos y muy concretos, de forma que sean de fácil entendimiento para los encuestados, de igual

forma, deben estar definidos claramente en la encuesta, de forma que se disminuyan las posibilidades de confusión.

6.1.3 Identificación de ponderaciones de los criterios y subcriterios

Una vez identificados los criterios y subcriterios, se procede a identificar las ponderaciones o valoraciones de importancia de cada uno de ellos dentro del análisis del tipo de infraestructura a implementar.

Para identificar las ponderaciones de los criterios, se procede de acuerdo con la metodología planteada por Saaty (1980) y descrita en el numeral 3.4.1, para ello se lleva a cabo una encuesta a expertos descrita en el numeral 3.4.4, la cual puede ser presencial, telefónica o virtual. En el caso particular de esta investigación, se llevó a cabo de forma virtual, tal como se describe en el numeral 5.1.2.

Posteriormente, o de forma paralela, se procede a identificar las ponderaciones de cada subcriterio dentro de cada criterio, para ello se sugiere que se generen grupos especializados en cada criterio de forma que los pesos o ponderaciones de los subcriterios sean de acuerdo con la técnica y la experiencia de profesionales con amplio conocimiento del tema a evaluar.

Para hallar el porcentaje específico de ponderación de cada subcriterio también se utiliza la metodología planteada por Saaty (1980) y descrita en el numeral 3.4.1 comparando los subcriterios de forma pareada.

La metodología no se restringe a criterios y subcriterios, en caso de que un subcriterio deba ser desagregado en nuevos criterios, es posible aplicar la metodología propuesta para cada nivel de criterios de forma que al final la decisión abarque todas las variables posibles identificadas para el análisis del tipo de infraestructura a implementar.

Las ponderaciones o pesos hallados con esta investigación son independientes de cualquier interés político, técnico o económico particular, por lo que se sugiere mantener estos mismos pesos, sin embargo, se deja a libertad del equipo planificador la realización

de una nueva encuesta con otro equipo de expertos lo cual variará los porcentajes hallados.

Para el caso particular de esta investigación, la **Tabla 5-9** presenta los criterios identificados y sus respectivas ponderaciones o pesos. En el numeral 6.1.4 se describe el procedimiento a seguir para determinar el tipo de infraestructura con base en las ponderaciones halladas.

6.1.4 Evaluación del tipo de infraestructura a implementar

Una vez identificada la información del corredor en estudio, descrita en el numeral 6.1.1 y con base en los criterios y sus respectivas ponderaciones establecidas en la **Tabla 5-9** se procede a evaluar cada criterio para los diferentes tipos de infraestructura.

Para la evaluación de cada criterio y sus respectivos subcriterios, se define una escala de 1 a 5 en la que se le da el valor de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Criterios cualitativos: Con base en el criterio de un equipo de expertos en cada tema a analizar, se asigna una calificación de 5 a la mejor alternativa y 1 a la más desfavorable y para la tercera alternativa a evaluar (a nivel, en viaducto o subterránea) se asigna un valor de 3.
- Criterios cuantitativos: Se asigna un valor máximo de 5 a la mejor alternativa y proporcionalmente, de forma lineal, se determina calificación a las otras dos alternativas de infraestructura.

Adicionalmente, tal como se describe en el numeral 5.2, al igual que las ponderaciones mencionadas, es necesario identificar los factores de importancia de cada alternativa de infraestructura, para ello se utilizan los datos obtenidos de la pregunta tipo 2 de la encuesta (Ver **Figura 5-2**) a los cuales se califican de la siguiente forma:

- 5 a las respuestas que asignaron “importancia alta”
- 3 a las respuestas que asignaron “importancia media”
- 1 a las respuestas que asignaron “importancia baja”

Posteriormente, se promedian los resultados dividiendo por 5 para encontrar un factor de ponderación del tipo de infraestructura a aplicar a cada ponderación de los criterios, obteniendo así la **Tabla 5-10**.

Con estos datos, adicionalmente los datos hallados en la **Tabla 5-9** se construye la **Tabla 5-11** la cual permite evaluar el tipo de infraestructura a implementar en un sistema de transporte masivo de mediana y alta capacidad, calificando, de acuerdo con la información del proyecto en estudio, cada uno de los subcriterios para cada alternativa de infraestructura y posteriormente se suman todos los valores hallados por cada alternativa para hallar la calificación final por cada una de ellas.

Para mayor entendimiento, y de acuerdo con el alcance planteado para esta investigación, la metodología propuesta se aplica a dos proyectos en desarrollo, uno de alta capacidad y uno de mediana capacidad; se analizan los proyectos contemplados en el Plan Rector de Expansión del Metro de Medellín y se seleccionan los proyectos Línea F de metro y el Metro Liviano corredor de la Avenida 80.

A continuación, en los numerales 6.2 y 6.3 se presentan los resultados del análisis de la aplicación de la metodología en estos dos proyectos. Con el objeto de identificar las principales características de los corredores estudiados, se presenta para cada uno resumen de la caracterización hecha por Metro de Medellín Ltda. (2018). Mayor detalle de la caracterización de estos proyectos se encuentra en el Anexo C y en el Anexo D.

6.2 Corredor Línea F de Metro de Medellín

El Corredor Urbano de Movilidad Línea F, es una línea adicional de Metro que ha sido propuesto por la Empresa Metro de Medellín Ltda. para equilibrar la demanda actual de la Línea A del sistema Metro a través de una nueva línea de Metro que simultáneamente se plantea como un Corredor Urbano que beneficiará a la comunidad como el elemento integrador futuro de peatones y ciclistas, articulándose con los proyectos futuros planteados sobre el eje central de la ciudad, dando lugar a la creación de otras dinámicas comerciales y culturales que conformen espacios seguros para la demanda proveniente de las múltiples zonas atractoras del corredor del Río.

Consiste en la implementación de una línea férrea desde la estación Caribe hasta la estación Industriales del Metro utilizando el denominado corredor del río, lo que permitiría a los usuarios del sistema con orígenes y destinos en estaciones al Norte de Caribe y al Sur de Industriales poder desplazarse sin necesidad de pasar por las estaciones ubicadas en el centro de la ciudad.

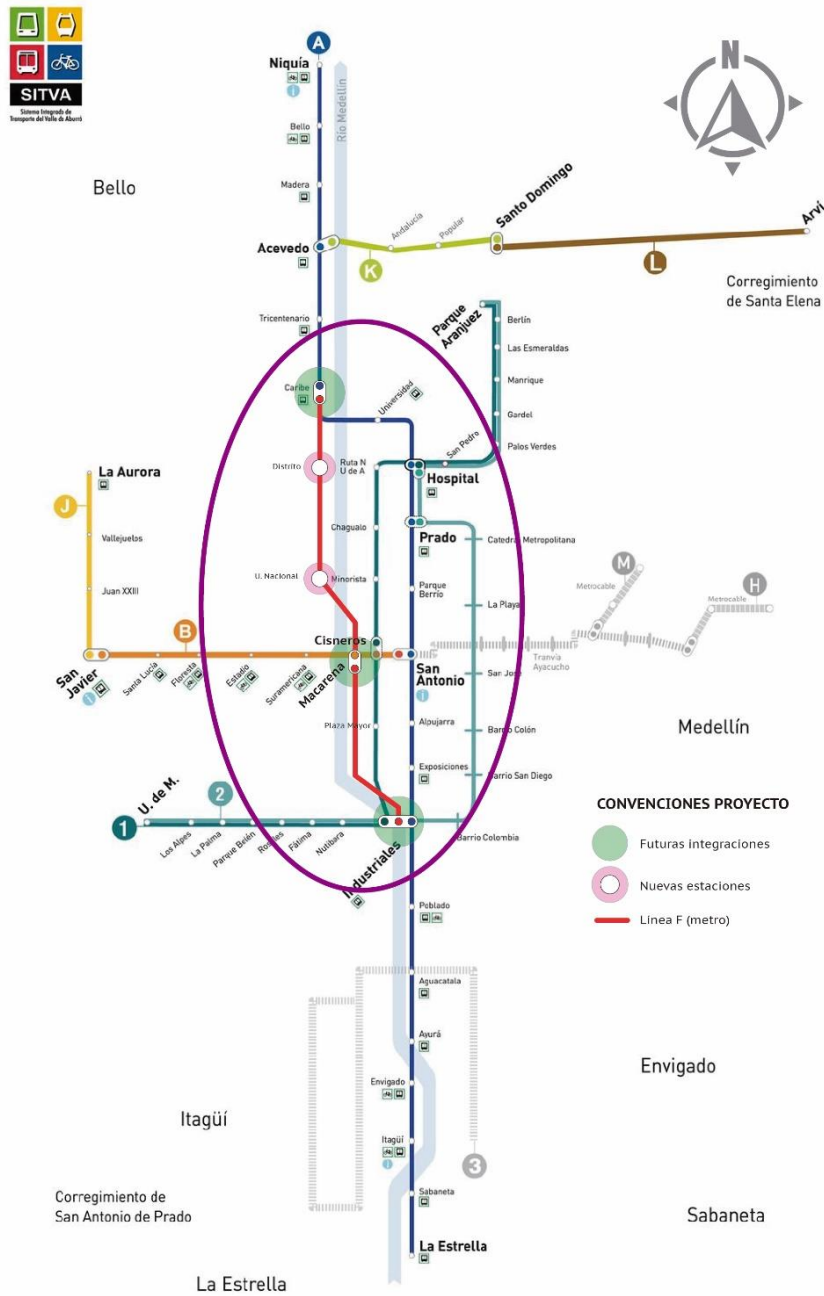
El corredor se encuentra localizado sobre el corredor del Río, partiendo desde la Calle 89 en la Terminal del Norte, cerca de la estación Caribe, hasta el Sur en la Calle 27A, en proximidad con la estación de intercambio modal de Industriales. En la **Figura 6-1** se presenta la ubicación general del corredor.

La Línea F transcurre además por un segmento importante del proyecto Parques del Río, entre la Calle San Juan y la Calle 33, finalizando en la estación multimodal de Industriales. Toda esta zona hace parte de la Centralidad Metropolitana y del corredor metropolitano del río, Metro de Medellín Ltda. (2018).

Área de influencia del proyecto conecta las comunas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, abarcando los siguientes barrios y equipamientos representativos:

- Por el costado Oriental del río: Moravia, Parque Norte, Universidad de Antioquia, Sevilla, El Chagualo, Jesús de Nazareno, Estación Villa, San Benito, Guayaquil, Corazón de Jesús, La Alpujarra, Calle Nueva, Centro Administrativo La Alpujarra, Perpetuo Socorro, Barrio Colombia. De igual forma, conecta una serie de áreas en actividad económica en transformación ubicadas especialmente en los barrios El Perpetuo Socorro, Barrio Colombia y Barrio Calle Nueva; además cuenta con áreas destinadas a Centralidades con predominancia económica, ubicadas sobre los barrios Guayaquil, Corazón de Jesús y San Benito
- Por el costado Occidental del río: Alfonso López, Terminal de Transporte, Cementerio Universal, Caribe, El Progreso, Universidad Nacional, Nueva Villa de la Iguaá, Carlos E. Restrepo, Suramericana, Naranjal, San Joaquín, Los Conquistadores, Cerro Nutibara. En este costado, predominan las áreas y corredores de media mixtura articulado con la zona residencial ubicada entre Suramericana y Carlos E. Restrepo.

Figura 6-1: Localización Corredor Línea F.



MAPA METRO

LÍNEAS DEL SISTEMA

- METRO**
- Línea A Niquía - La Estrella - Niquía
 - Línea B San Antonio - San Javier - San Antonio
 - CABLE**
 - Línea J San Javier - La Aurora - San Javier
 - Línea K Acevedo - Santo Domingo - Acevedo
 - Línea L Santo Domingo - Arví - Santo Domingo
 - BÚS**
 - Línea 1 U. de M. - Av. del Ferrocarril - Parque Aranjuez - Av. del Ferrocarril - U. de M.
 - Línea 2 U. de M. - Av. Oriental - Parque Aranjuez - Av. Oriental - U. de M.

CONVENCIONES

- Estación
- Paradero
- Transferencia directa
- Transferencia peatonal
- Ruta integrada
- Parqueaderos para bicicletas
- PAC Punto de Atención al Cliente
- Todas las estaciones son accesibles
- En construcción
- Estación fuera de servicio

HORARIOS DE OPERACIÓN

- Lunes a sábado 4:30 a.m. - 11:00 p.m.
- Domingos y festivos 5:30 a.m. - 10:00 p.m.
- Línea L (Cablemetro) 9:00 a.m. - 4:00 p.m.
- No presta servicio el primer día hábil de la semana.

MAYORES INFORMES

HOLA METRO 444 95 98



Fuente: Metro de Medellín Ltda., 2018

Así mismo, es cruzado transversalmente por las siguientes avenidas: Calle 77 "Puente del Mico", Calle 67 "Barranquilla", Calle 58 "Autopista Norte", Calle 50 "Avenida Colombia", Calle 44 "Avenida San Juan", Avenida Calle 33, Carrera 54 " Avenida Guayabal", la Calle 30.

El proyecto contempla la construcción de 3 estaciones ubicadas a lo largo del Río Medellín independientes de la Línea A del Metro (Ver **Figura 6-1**), Metro de Medellín Ltda. (2018):

- i) Estación Distrito o Universidad de Antioquia, que permitirá integración con la Universidad de Antioquia, adicionalmente, posibilitará que entidades como la Secretaría de Movilidad de Medellín, y la Fiscalía puedan integrarse al sistema Metro.
- ii) Estación Universidad Nacional ubicada entre la Universidad y la plaza Minorista que busca integrar estos dos importantes atractores de viajes al sistema. Si bien la Minorista se puede integrar a través de la Línea 1 de buses actualmente no tiene una estación de Metro cercana, y la Universidad Nacional se encuentra totalmente alejada de las líneas de Metro en operación.
- iii) Estación Macarena; generando nodos de integración y conexión peatonal longitudinal y transversal sobre el Río Medellín hacia la red de equipamientos de la ciudad. Se plantea adicionalmente, que la estación Macarena pueda tener integración con la línea B del Metro, buscando también descongestionar la estación San Antonio, que actualmente es la única que permite integrar las líneas A y B del Metro de Medellín.

Con base en la caracterización hecha, se procede a evaluar los diferentes criterios y subcriterios identificados en la **Tabla 5-11**, y con la metodología propuesta en el numeral 6.1 se obtienen los resultados que se presentan en la **Tabla 6-1**. El detalle de esta evaluación se presenta en el Anexo C.

Tabla 6-1: Evaluación criterios y subcriterios proyecto Línea F

Criterio	Subcriterio	Peso global criterio	Peso global subcriterio	Factor de importancia por tipo de infraestructura			Calificación			Evaluación por criterio y subcriterio		
				Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto
Social	Impacto social durante la construcción	30,8%	16,6%	0,6	0,9	0,8	5	1	3	0,17	0,04	0,12
	Percepción sobre el tipo de infraestructura		26,1%				1	5	3	0,05	0,35	0,19
	Logística de ciudad		8,7%				5	5	5	0,09	0,12	0,10
	Afectación al tráfico vehicular		9,3%				5	3	1	0,09	0,08	0,02
	Percepción sobre el espacio a utilizar		39,3%				5	1	3	0,39	0,11	0,28
Institucional	Viabilidad institucional	12,8%	10,6%	0,7	0,7	0,7	1	5	5	0,01	0,05	0,05
	Interés político		63,3%				5	1	3	0,29	0,06	0,18
	Articulación institucional		26,0%				1	5	3	0,02	0,12	0,07
Costo Inversión	Costos de infraestructura	13,6%	16,7%	1,0	0,7	0,9	1,3	5	3,1	0,03	0,08	0,06
	Costos por requerimiento de predios		83,3%				5	5	5	0,54	0,40	0,49
Costo Operación	Costos de operación y mantenimiento	13,0%	100,0%	0,9	0,7	0,8	2	5	2,7	0,22	0,47	0,27
Tecnológico	Selección tecnológica de movilidad	8,1%	9,8%	0,9	0,7	0,8	5	5	5	0,04	0,03	0,03
	Restricciones tecnológicas		17,4%				3	3	1	0,04	0,03	0,01
	Garantizar la demanda vs oferta		32,3%				5	5	5	0,12	0,09	0,10
	Integración con otros modos de transporte		40,6%				3	5	3	0,09	0,11	0,08
Urbano	Efectos urbanísticos (transformación urbana)	8,9%	8,6%	0,6	0,9	0,8	3	3	3	0,01	0,02	0,02
	Oportunidad de desarrollo territorial		7,5%				5	5	5	0,02	0,03	0,03
	Accesibilidad		22,0%				3	1	3	0,04	0,02	0,05
	Disponibilidad del suelo		8,2%				5	5	5	0,02	0,03	0,03
	Usos del suelo		12,1%				5	5	5	0,03	0,05	0,04
	Preexistencias		16,9%				3	3	3	0,03	0,04	0,04
	Posibilidades de expansión		13,9%				5	5	5	0,04	0,06	0,05
	Consolidación urbana donde se inserta		10,9%				3	3	3	0,02	0,03	0,02
Ambiental	Condicionantes ambientales	9,1%	30,5%	0,8	0,8	0,9	1	3	5	0,02	0,07	0,12
	Estructura ecológica del corredor		33,3%				5	1	3	0,00	0,00	0,00

Criterio	Subcriterio	Peso global criterio	Peso global subcriterio	Factor de importancia por tipo de infraestructura			Calificación			Evaluación por criterio y subcriterio		
				Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto
	Presencia de cuerpos de agua		30,5%				1	3	5	0,00	0,00	0,00
	Clima		5,7%				1	5	5	0,00	0,00	0,00
Constructivo	Restricciones constructivas	3,7%	32,1%	0,9	0,7	0,8	1	5	3	0,01	0,04	0,03
	Afectación de servicios públicos		22,5%				5	3	1	0,04	0,02	0,01
	Condiciones topográficas		45,4%				5	5	5	0,08	0,06	0,07
							Sumatoria			2,55	2,58	2,57

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, de acuerdo con los resultados presentados en la **Tabla 6-1**, se encuentra que el proyecto Línea F es viable implementarlo con infraestructura a nivel en primer lugar o en viaducto, con puntajes muy cercanos. La alternativa subterránea es fuertemente influenciada por el hecho de que el proyecto se encuentra muy cercano al río Medellín, por lo que un sistema construido con la alternativa de infraestructura soterrada tendría que mantener drenaje con uso de bombeo permanente, además de los altos costos de construcción, lo que se ve reflejado en los valores de la evaluación de los criterios Costo Inversión, Costo Operación y Constructivo.

6.3 Corredor Avenida 80 de Medellín

Dentro del Plan Maestro del Metro de Medellín, en su Plan Rector de Expansión, se contempló un corredor de movilidad por la avenida 80, por lo que esta entidad procedió a llevar a cabo estudios de prefactibilidad en convenio con el Municipio de Medellín en los años 2008 y 2009, al encontrarse la viabilidad de su implementación se procedió con la ejecución de los diseños de detalle del corredor. El proyecto no fue priorizado por el Gobierno Nacional por lo que no se contó con los recursos necesarios para su implementación y se archivó.

Posteriormente, en el año 2016, la nueva administración municipal revivió el interés por el proyecto por lo que se retomaron los diseños ejecutados inicialmente y se hizo una optimización del corredor de forma que contemplara las nuevas exigencias establecidas en la actualización del POT de la ciudad y el estado actual del corredor. En tal sentido, se contrataron los ajustes del diseño del corredor y se avanza en la elaboración de la documentación necesaria para solicitar nuevamente el apoyo del Gobierno Nacional para la ejecución del proyecto, Metro de Medellín Ltda. (2018).

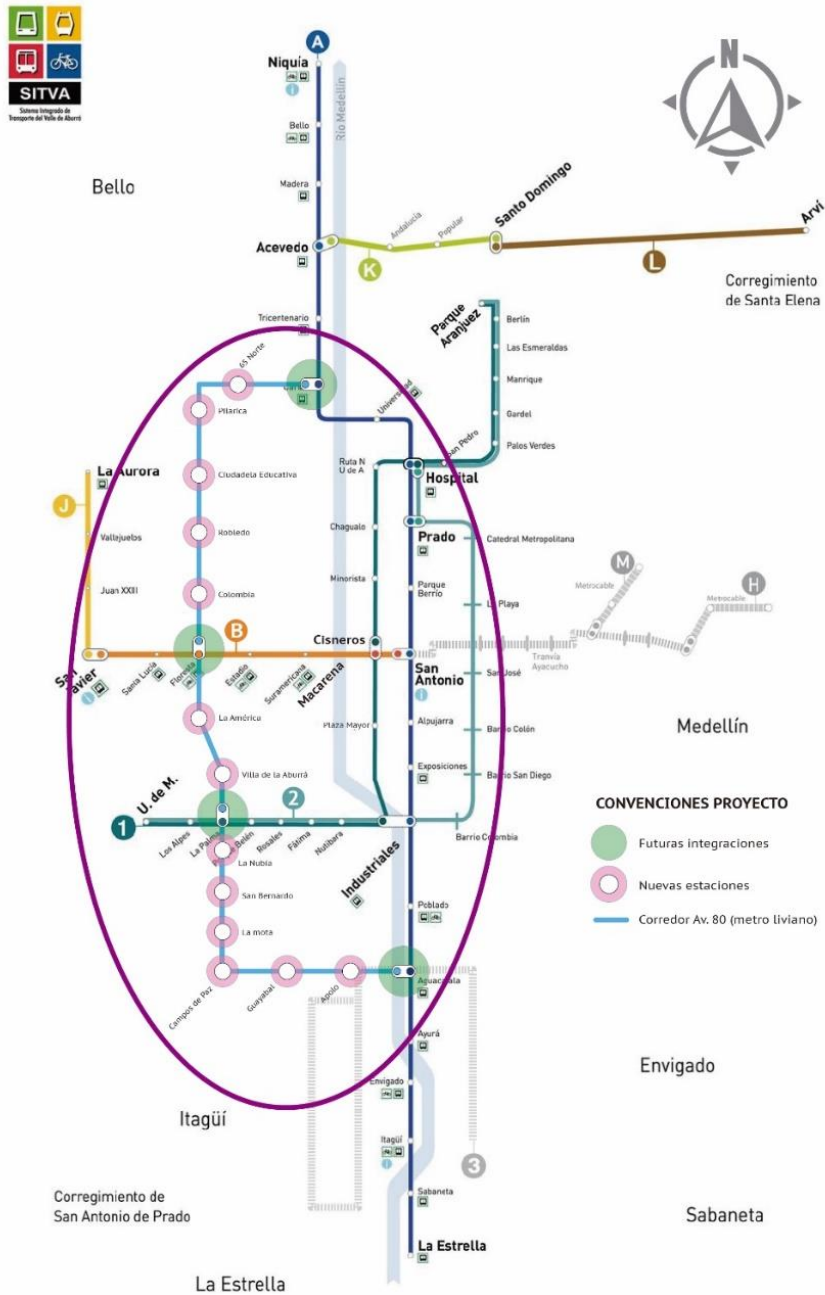
El trazado parte de la Estación Caribe, entre la Terminal de Transportes del Norte y la Autopista Regional. Una vez atraviesa el puente del Mico, para posteriormente girar hacia el occidente para cruzar la Autopista Norte y la Carrera 65; ambas vías arterias son importantes ejes de conexión en el sentido Norte-Sur.

Luego de superar la Carrera 65 el corredor continúa por la Transversal 78. Avanza hasta el cruce entre esta vía Arteria con la Carrera 72 y luego por la Carrera 72 y la Carrera 73, ambas vías arterias, hasta cruzarse con la Avenida 80 en Robledo.

Desde allí el trazado se localiza sobre la Avenida 80 hasta la Calle 12 Sur, para terminar en la Estación Aguacatala del Metro. La **Figura 6-2** presenta la ubicación general del corredor y su área de influencia.

En su recorrido, el Corredor de la Avenida 80 atraviesa las siguientes vías arterias: la Carrera 73, la Carrera 79, la Calle 50 – Colombia, la Calle 47A, la Calle 44 – San Juan, la Calle 35, la Avenida 33, la Calle 30, la Carrera 76, la Diagonal 75CC, la Carrera 70, la Carrera 65 y la Avenida Guayabal.

Figura 6-2: Localización Corredor Avenida 80



MAPA METRO

LÍNEAS DEL SISTEMA

- METRO**
 - Línea A Niquia - La Estrella - Niquia
 - Línea B San Antonio - San Javier - San Antonio
- CABLE**
 - Línea J San Javier - La Aurora - San Javier
 - Línea K Acevedo - Santo Domingo - Acevedo
 - Línea L Santo Domingo - Anf. - Santo Domingo
- BÚS**
 - Línea U de M - Av. del Ferrocarril - Parque Aranjuez - Av. del Ferrocarril - U. de M.
 - Línea M U de M - Av. Oriental - Parque Aranjuez - Av. Oriental - U. de M.

CONVENCIONES

- Estación
- Paradero
- Transferencia directa
- Transferencia peatonal
- Ruta integrada
- Parqueaderos para bicicletas
- PAC Punto de Atención al Cliente
- Todas las estaciones son accesibles
- En construcción
- Estación fuera de servicio

HORARIOS DE OPERACIÓN

- Líneas a sábado: 4:30 a.m. - 11:00 p.m.
- Domingos a festivos: 5:00 a.m. - 10:00 p.m.
- Línea L (cable): 9:00 a.m. - 4:00 p.m.
- No presta servicio el primer día hábil de la semana.

MAYORES INFORMES
HOLA METRO 444 95 98



Fuente: Metro de Medellín Ltda., 2018

El área de influencia abarca 32 barrios: Caribe y El Progreso (Comuna 5), Cerro El Volador, Bosques de San Pablo, Pilarica, San German y Robledo (Comuna 7), Los Colores, Estadio, El Velódromo, Lorena, Las Acacias, La Castellana (Comuna 11), Ferrini, Calasanz, La Floresta, La América, Los Pinos y Simón Bolívar (Comuna 12), El Pesebre (Comuna 13), La Colinita, Cristo Rey y Guayabal (Comuna 15), Miravalle, Nueva Villa del Aburrá, Belén y Diego Echavarría (Comuna 16); e incluye además, la Terminal de Transporte del Norte, El Cerro El Volador, La Facultad de Veterinaria de la Universidad de Antioquia, Institución Universitaria ITM, Institución Universitaria El Pascual Bravo, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, La Facultad de Minas de la Universidad Nacional, el Club El Rodeo, el Aeropuerto Olaya Herrera y el Parque Juan Pablo II.

En la descripción del Área de Influencia se hace indispensable la caracterización del sistema habitacional, la morfología y el componente social, especialmente de barrios tradicionales como La América, Belén y La Floresta, entre otros, cuyo origen formal y condiciones urbanas han contribuido significativamente al carácter del Corredor. Sus atributos físicos, espaciales y ambientales, sumados a su localización estratégica y céntrica en la ladera occidental del Municipio, le permiten la conexión ágil y directa con el sur, norte, occidente, centro tradicional, y el Corredor multimodal del río.

La Avenida 80 se caracteriza por su dinámica comercial, que, aunque no se da en la totalidad del corredor, permite la conservación de la actividad residencial con ambiente de vecindario en la mayoría de su extensión. Si bien la actividad residencial está presente a lo largo del corredor, hay diferentes condiciones socio-económicas y diversidad en la oferta de bienes y servicios.

Al norte, el corredor se caracteriza por el desarrollo de actividades industriales, de bodega y comercio, principalmente en los sectores de Caribe y El Volador, mientras que los sectores de Belén, Pilarica, Los Colores y Calasanz, se caracterizan por ser áreas residenciales.

La zona norte del Corredor cuenta con un alto potencial de desarrollo gracias a su localización estratégica en relación a las infraestructuras de movilidad, los equipamientos

educativos, de salud y deportivos, los espacios públicos, y por ubicarse en las planicies próximas al Río. Se resalta que gran parte de estos suelos está ubicada en suelos de renovación urbana, sujetos a procesos de transformación de sus estructuras públicas y los usos del suelo mediante procesos de gestión asociada, para hacer uso de los altos aprovechamientos urbanísticos asignados por el Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín.

El corredor tiene una longitud de 13,5 km de longitud y se proyectan 4 estaciones y 12 paradas. Se define como estación cuando hay un intercambio de modos de transporte, es decir que el sistema se conecta con la línea 1 de buses (BRT) o el actual metro de Medellín. Se define como parada cuando no hay ningún intercambio de modo de transporte de mediana o alta capacidad al cual se integre. En ambas configuraciones se debe garantizar la integración con las rutas del transporte público colectivo.

- **Cruces de corrientes de aguas superficiales**

Las cuencas mayores que se encuentran dentro del área de influencia del proyecto son: Quebrada Ana Díaz, El Cumbimbo, Altavista, La Guayabala, La Hueso, La Iguaá, La Jabalcona, La Picacha, La Matea y Caño Malpaso.

Con respecto a las cuencas menores, se considerarán las siguientes como escorrentía superficial: La Magdalena, Las Playas, Santa Rita, Zanjón América, Zanjón Ferrini, Afluente El Chumbimbo, y Afluente Guayabala.

- **Red de conectividad ecológica**

Dentro del área de influencia del proyecto, la mayoría de elementos de la estructura ecológica principal discurren de occidente a oriente, buscando conectarse al sistema del río Medellín.

En este sentido se puede observar que el eje del proyecto es transversal a múltiples elementos de esta estructura, constituyendo el corredor de la Avenida 80 como un conector transversal que relaciona el sistema ecológico de la ciudad.

Con base en la caracterización hecha, se procede a evaluar los diferentes criterios y subcriterios identificados en la **Tabla 5-11**, y a la metodología propuesta en el numeral 6.1

se obtienen los resultados que se presentan en la **Tabla 6-2**. El detalle del proceso de evaluación se presenta en el Anexo D.

Tabla 6-2: Evaluación del tipo de infraestructura a implementar en el Corredor Avenida 80

Criterio	Subcriterio	Peso global criterio	Peso global subcriterio	Factor de importancia por tipo de infraestructura			Calificación			Evaluación por criterio y subcriterio		
				Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto
Social	Impacto social durante la construcción	30,8%	16,6%	0,6	0,9	0,8	5	1	3	0,17	0,04	0,12
	Percepción sobre el tipo de infraestructura		26,1%				1	5	3	0,05	0,35	0,19
	Logística de ciudad		8,7%				5	1	3	0,09	0,02	0,06
	Afectación al tráfico vehicular		9,3%				5	1	3	0,09	0,03	0,07
	Percepción sobre el espacio a utilizar		39,3%				3	5	1	0,24	0,53	0,09
Institucional	Viabilidad institucional	12,8%	10,6%	0,7	0,7	0,7	1	3	5	0,01	0,03	0,05
	Interés político		63,3%				1	5	3	0,06	0,29	0,18
	Articulación institucional		26,0%				1	5	3	0,02	0,12	0,07
Costo Inversión	Costos de infraestructura	13,6%	16,7%	1,0	0,7	0,9	1	5	2,2	0,02	0,08	0,04
	Costos por requerimiento de predios		83,3%				5	1	1,3	0,54	0,08	0,13
Costo Operación	Costos de operación y mantenimiento	13,0%	100,0%	0,9	0,7	0,8	2	5	2,7	0,22	0,47	0,27
Tecnológico	Selección tecnológica de movilidad	8,1%	9,8%	0,9	0,7	0,8	3	5	3	0,02	0,03	0,02
	Restricciones tecnológicas		17,4%				5	3	1	0,06	0,03	0,01
	Garantizar la demanda vs oferta		32,3%				5	3	5	0,12	0,05	0,10
	Integración con otros modos de transporte		40,6%				3	5	3	0,09	0,11	0,08
Urbano	Efectos urbanísticos (transformación urbana)	8,9%	8,6%	0,6	0,9	0,8	3	5	1	0,01	0,03	0,01
	Oportunidad de desarrollo territorial		7,5%				3	5	1	0,01	0,03	0,01
	Accesibilidad		22,0%				3	5	3	0,04	0,09	0,05
	Disponibilidad del suelo		8,2%				5	3	3	0,02	0,02	0,02
	Usos del suelo		12,1%				5	5	5	0,03	0,05	0,04
	Preexistencias		16,9%				5	5	5	0,05	0,07	0,06

Criterio	Subcriterio	Peso global criterio	Peso global subcriterio	Factor de importancia por tipo de infraestructura			Calificación			Evaluación por criterio y subcriterio		
				Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto	Subterráneo	A Nivel	Viaducto
	Posibilidades de expansión		13,9%				5	5	3	0,04	0,06	0,03
	Consolidación urbana donde se inserta		10,9%				5	3	3	0,03	0,03	0,02
Ambiental	Condicionantes ambientales	9,1%	30,5%	0,8	0,8	0,9	1	3	5	0,02	0,07	0,12
	Estructura ecológica del corredor		33,3%				5	1	3	0,00	0,00	0,00
	Presencia de cuerpos de agua		30,5%				1	3	5	0,00	0,00	0,00
	Clima		5,7%				5	5	5	0,00	0,00	0,00
Constructivo	Restricciones constructivas	3,7%	32,1%	0,9	0,7	0,8	3	5	1	0,03	0,04	0,01
	Afectación de servicios públicos		22,5%				5	1	3	0,04	0,01	0,02
	Condiciones topográficas		45,4%				5	5	5	0,08	0,06	0,07
							Sumatoria	2,21	2,82	1,94		

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, de acuerdo con los resultados presentados en la **Tabla 6-2**, se encuentra que el proyecto Corredor Avenida 80 es viable implementarlo preferiblemente con infraestructura a nivel. Lo anterior, coincide con la selección tecnológica hecha por Metro de Medellín Ltda. (2018) de un sistema de Metro Liviano, y este tipo de infraestructura es muy apropiada para su implementación.

6.4 Análisis de Sensibilidad

Una vez aplicada la metodología para la evaluación del tipo de infraestructura a implementar en un corredor, se procede a llevar a cabo un análisis de sensibilidad que permita identificar situaciones tales como:

- Criterios que, en caso de asignarles una importancia alta podrían condicionar la selección del tipo de infraestructura
- Criterios que independiente de la prioridad que se les asigne, para el proyecto en particular, no serán determinantes en la selección del tipo de infraestructura en estudio.
- Proyectos en estudio que, de acuerdo con las ponderaciones determinadas, pueden estar fuertemente condicionados a algún tipo de infraestructura en particular.

Se lleva a cabo este análisis de sensibilidad a los corredores de movilidad estudiados y se encuentran los resultados presentados en la Tabla 6-3 para el Corredor Línea F, y en la Tabla 6-4 para el Corredor Avenida 80.

Tabla 6-3: Análisis de sensibilidad de la aplicación de la metodología para el Corredor Línea F

Corredor Línea F de Metro de Medellín			
Tipo de infraestructura	Subterráneo	A Nivel	Viaducto
Resultados iniciales	2,55	2,58	2,57
Poca importancia a los costos de inversión	3,25	2,99	3,20
Poca importancia al criterio constructivo	2,96	2,84	2,70
Poca importancia al criterio social	2,56	2,71	2,66
Mucha importancia a los costos de inversión	2,30	2,50	2,37
Mucha importancia al criterio constructivo	2,55	2,58	2,57
Mucha importancia al criterio Social	2,56	2,48	2,50

Fuente: Elaboración propia

Se encuentra que el Corredor Línea F de Metro de Medellín es muy sensible a la importancia que se le asigne a los criterios costos de inversión y constructivo, los cuales

en caso de asignarles poca importancia generan que la selección del tipo de infraestructura cambie a subterránea, similarmente para el caso en que se asigne mucha importancia al criterio social frente a los demás criterios, en tal caso también se cambia la selección por infraestructura subterránea.

Tabla 6-4: Análisis de sensibilidad de la aplicación de la metodología para el Corredor Avenida 80

Corredor Avenida 80 Medellín			
Tipo de infraestructura	Subterráneo	A Nivel	Viaducto
Resultados iniciales	2,21	2,82	1,94
Poca importancia a los costos de inversión	3,06	2,10	1,66
Poca importancia al criterio constructivo	2,21	2,82	1,94
Poca importancia al criterio social	2,26	2,68	2,04
Mucha importancia a los costos de inversión	1,98	3,03	2,06
Mucha importancia al criterio constructivo	2,18	2,83	1,93
Mucha importancia al criterio Social	2,16	2,92	1,88

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del corredor Avenida 80, se encuentra que, a excepción del caso de asignar poca importancia al criterio económico, al variar los otros criterios la selección del tipo de infraestructura se mantiene.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

El desarrollo de la investigación permitió diseñar metodología multicriterio para ayudar en la toma de decisión sobre cuál alternativa de infraestructura (subterránea, a nivel o en viaducto) se debe definir para la implementación de sistemas de transporte masivo de mediana y alta capacidad en ciudades.

La selección del método AHP (Analytic Hierarchy Process, por sus siglas en inglés, conocido en español como Proceso de Jerarquía Analítica) para utilizar en el análisis de alternativas de infraestructura a implementar en un sistema de transporte masivo de mediana o alta capacidad desarrollado en esta investigación, brindó la posibilidad de simplificar el estudio de múltiples variables que deben tenerse en cuenta dentro del análisis, en comparaciones por pares de ellas. Cabe resaltar que todas las comparaciones pareadas que se llevaron a cabo en esta investigación arrojaron resultados coherentes, de acuerdo con el procedimiento descrito en la misma metodología para su análisis.

Se identificaron ocho grandes criterios (Social, Institucional, Costo Inversión, Costo Operación, Tecnológico, Urbano, Ambiental y Constructivo) para la selección del tipo de infraestructura subterránea, a nivel o en viaducto a implementar en un sistema de transporte de mediana o alta capacidad; a su vez, estos criterios se dividieron en subcriterios de forma que la calificación de los mismos pueda hacerse de acuerdo con las necesidades específicas del proyecto en cada especialidad.

En la decisión del tipo de infraestructura a implementar en un corredor, entran en juego variables cualitativas y cuantitativas de diferentes áreas del conocimiento, lo que podría hacer compleja su comparación, sin embargo, el método permite combinar todos esos criterios para identificar los pesos o importancia de cada variable frente a las otras y con

esto ayudar en el proceso de toma de decisión de la infraestructura a implementar en un sistema de transporte de mediana o alta capacidad.

Dentro de los criterios identificados se confirma que deben incluirse algunos los que se han tenido en cuenta en otros análisis de estas características, adicionalmente se deben incluir otras variables o criterios, con sus respectivos pesos o ponderaciones, de acuerdo con los ejercicios de grupo focal y encuesta a expertos, lo que genera un importante aporte de esta investigación al análisis del tipo de infraestructura de transporte. El hecho de tenerlos en cuenta permite tener una visión más completa de lo que se pretende establecer, con lo que se aporta de manera significativa para la solución del sistema de transporte, considerando entre otros el análisis del territorio asociado al proyecto.

Las ponderaciones o pesos de los criterios, hallados en esta investigación son independientes de cualquier interés político o económico particular y fueron producto del trabajo hecho con expertos de diferentes áreas del conocimiento y lugares del mundo, por lo que se sugiere mantener estas mismas ponderaciones. Sin embargo, para algún proyecto en particular se deja en libertad al equipo planificador que desee adoptar la metodología que se propone en esta investigación para realizar nueva encuesta con equipo de expertos para la definición la valoración de las ponderaciones (procedimiento descrito en el numeral 5.2).

Se puede implementar un sistema de transporte a partir de los parámetros comúnmente tenidos en cuenta para la toma de decisión en materia de infraestructura. Sin embargo, lo que se busca al incorporar los nuevos criterios es aportar desde la movilidad a la conformación del territorio; y con las ponderaciones de estos parámetros aportar sin que se tengan sesgos de cualquier tipo en el proceso de planeación y definición de infraestructura, siendo totalmente técnico.

El criterio con mayor peso en el proceso de decisión del tipo de infraestructura a implementar es el Criterio Social, con un porcentaje del 31% lo que indica la importancia de analizar cómo se ve impactada la comunidad vecina de la zona de construcción durante este proceso, y la comunidad que haría uso del modo de transporte, con la implementación de sistemas de transporte que, si bien buscan mejorar la movilidad de las ciudades,

también requieren un análisis del impacto que pueda generar el proyecto al ser humano, su familia y su entorno. En segundo lugar de importancia, el criterio Costo de Inversión con un 14% y en tercer lugar el criterio Costo Operación con un 13%, indica que los costos asociados al proyecto también deben ser cuidadosamente analizados.

El subcriterio que menos peso tuvo en esta investigación fue el del Clima, probablemente se debe a que en Latino América no hay una afectación importante por cambios climáticos fuertes, estaciones y demás, sin embargo, se considera adecuado tener en cuenta este subcriterio en la metodología, pues puede ser aplicada a una región que si pueda verse impactada por estos eventos y tener relevancia en la decisión de la infraestructura a implementar.

La metodología desarrollada se aplicó para el para el análisis del tipo de infraestructura a implementar en dos proyectos de la Ciudad de Medellín (Colombia) uno de ellos de mediana capacidad (Corredor Avenida 80) y el otro de alta capacidad (Línea F de Metro) ambos contemplados en el Plan Rector de Expansión del Metro de Medellín Ltda., hallándose que la infraestructura más adecuada para implementar en ambos es la infraestructura a nivel. Para el Corredor Avenida 80, el subcriterio que más puntaje le otorgó a esta alternativa es Percepción del espacio a utilizar y para el caso de la Línea F fueron los costos de Operación, siendo por consiguiente quienes más importancia tienen en la decisión final.

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos, variando las ponderaciones de los diferentes criterios con el objeto de identificar la sensibilidad de cada criterio a los resultados obtenidos en esta investigación. Este análisis arroja que el Corredor Línea F de Metro de Medellín es muy sensible a la importancia que se le asigne a los criterios costos de inversión y constructivo, mientras que en el caso del Corredor de la Avenida 80 a excepción del caso de asignar poca importancia al criterio económico, al variar los otros criterios la selección del tipo de infraestructura se mantiene.

7.2 Recomendaciones

Esta investigación propone metodología robusta que consideró profesionales idóneos de varias disciplinas y métodos de análisis adecuados para su definición, haciendo que pueda ser aplicada a proyectos de diseño de infraestructura de transporte en diferentes ámbitos geográficos. Sin embargo, los criterios, subcriterios y ponderaciones pueden ser modificados según lo considere pertinente algún equipo planificador de acuerdo con las características particulares de cada región, sin embargo, se sugiere aplicar la metodología que se llevó a cabo en esta investigación para volver a calcular las ponderaciones de cada criterio y subcriterio.

De igual forma, la evaluación de los subcriterios en los proyectos Línea F y Avenida 80 presentada en esta investigación se llevó a cabo de acuerdo con el razonamiento y experiencia del equipo investigador con base en la caracterización de los mismos hecha por Metro de Medellín Ltda., por lo que sólo debe ser tomada en cuenta como indicador del procedimiento a seguir para el uso de la metodología desarrollada, sin embargo, para un ejercicio más completo en el análisis de estos u otros proyectos de infraestructura de mediana o alta capacidad en los que se desee aplicar esta metodología, es necesario que estas evaluaciones se hagan con equipos especializados en cada uno de los temas de forma que las evaluaciones tengan un mayor respaldo técnico de cada área del conocimiento, que el presentado en esta investigación.

Es recomendable que en el momento de iniciar el análisis del tipo de infraestructura a implementar en un proyecto en particular, se generen al menos el número de grupos de expertos relacionados con cada criterio identificado en esta investigación y se evalúen los subcriterios de acuerdo con la metodología AHP y posteriormente, con base en la caracterización hecha del corredor, se proceda a calificar cada subcriterio de acuerdo con las diferentes alternativas de infraestructura, de forma que se pueda realizar el procedimiento descrito en el numeral 5.2 y así conocer el tipo de infraestructura más recomendado.

Se recomienda estudiar a mayor profundidad cada subcriterio hallado en esta investigación de forma que cada uno de ellos podría incluso ser objeto de una investigación

independiente, de acuerdo con las diferentes especialidades, de forma que se logre una evaluación más completa de cada uno de los subcriterios respecto a cada tipo de infraestructura.

8. Bibliografía

- AFD, IPEA & Fundación Ciudad Humana (2014). El financiamiento de las ciudades latinoamericanas. Herramientas para el desarrollo sostenible.
- Alcaldía Mayor de Bogotá (22 de agosto de 2016). El mejor Metro para Bogotá. Recuperado el día 4 de septiembre de 2016 de: <http://www.bogota.gov.co/article/temas-de-ciudad/movilidad/el-mejor-metro-para-bogota>.
- Annema Jan Anne, Mouter Niek & Razaei Jafar (2015). Cost-benefit analysis (CBA), or multi-criteria decision-making (MCDM) or both: politicians' perspective in transport policy appraisal. (p. 788 – 797). Transportation Research Procedia.
- Bertsch, V., Geldermann, J., & Rentz, O. (2006). Multidimensional Monte Carlo sensitivity analysis in multi-criteria decision support. IFAC Proceedings Volumes, 39(4), 141–146. <http://doi.org/10.3182/20060522-3-FR-2904.00023>
- Cajiao J.G. & Asoc. S.A.– Panamá (2010). Perfil del proyecto Línea 1 – Metro de Panamá. Ministerio de Economía y Finanzas – Secretaría del Metro de Panamá.
- Clemente Jorge (2013). Situación actual de los metros y ferrocarriles de América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Edición No. 326, Número 10 de 2013.
- De Luca Mario, Dell'Acqua Gianluca & Lamberti Renato (2012). High-Speed Rail Track Design Using GIS And Multi-Criteria Analysis. (p. 608 – 617) Procedia - Social and Behavioral Sciences.
- Escobar Jazmine & Bonilla-Jimenez Francy Ivonne (2009). Grupos focales: una guía conceptual y metodológica. Universidad El Bosque. (p. 51-67) Cuadernos hispanoamericanos de psicología, Vol. 9 No. 1.
- Ferrell, W. R. (1990) Aggregation of Judgments or Judgment of Aggregations? in N. Moray, W. Rouse and W. R. Ferrell (eds) Robotics, Control and Society: Essays in Honor of Thomas B. Sheridan, Taylor and Francis, New York.

- Financiera de Desarrollo Nacional – FDN – (2016). 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.
- Flechas Carolina ¿Elevado, superficial o subterráneo? Agencia de noticias UN Recuperado el día 4 de septiembre de 2016 de <http://historico.unperiodico.unal.edu.co/ediciones/107/19.html>.
- Goodwin, Paul & Wright George (2004). Decision analysis for management judgment – 3rd ed. Hoboken, NJ.
- López Pamela (29 de agosto de 2016). El metro elevado y por la Caracas de Peñalosa no convence. Publimetro. Recuperado el día 4 de septiembre de 2016 de <http://www.publimetro.co/bogota/desventajas-del-metro-elevado-en-bogota/lmkphD!mRTpJTvdLOCo/>.
- Ludwig Peter (2005). Desenvolvimiento tecnológico em sistemas metroferroviários en Série Caderno. Técnicos de la ANTP Vol. 2, Brasil.
- Macharis Cathy, Bernardini Annalia (2015), Reviewing the use of Multi-Criteria Decision Analysis for the evaluation of transport projects: Time for a multi-actor approach. Transport Policy, 37, 177–186.
- Macharis C., Springael J. De Brucker K. & Verbeke A. (2004). Promethee and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening Promethee with ideas of AHP. European Journal of Operation Research.
- Malhotra, Naresh K. (2008) Investigación de Mercados. Quinta Edición. Pearson – Prentice Hall.
- Metro de Medellín Ltda. (2018). Caracterización de Corredores Urbanos de Movilidad del Plan Rector de Expansión. Colombia.
- Metro de Quito (2012), Estudio de impacto ambiental de la primera línea del metro de Quito. Quito, Ecuador.
- Pardo, Carlos Felipe (2009). Los cambios en los sistemas integrados de transporte masivo en las principales ciudades de América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Chile.
- Pilar, Jorge Víctor (2012). Herramientas para la Gestión y la Toma de Decisiones. Segunda edición. Editorial Hanne, Salta – Rep. Argentina.

-
- Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>.
 - Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York.
 - Smith Ricardo, Mesa Oscar, Dyner Isaac, Jaramillo Patricia, Poveda Germán, Valencia Darío. (2000), *Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre*. Segunda edición. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.
 - Tejero Aranda, María del Carmen. (2015), *Estudio comparativo de modelos de toma de decisión multicriterio para la selección del trazado de una vía*. Universidad de Jaén
 - Velásquez M. Carmen V. (2015), *Espacio público y movilidad urbana*. *Sistemas Integrados de Transporte Masivo*. Universitat de Barcelona, 45 – 159.
 - Wilkins, D. C., Buchanan, B. G., Clancey, W. J. “Inferring an Expert’s Reasoning by Watching.” *Proceedings of the 1984 Conference on Intelligent Systems and Machines*. (1984).

Anexo A: Encuestas

- Encuesta realizada
- Respuestas individuales de todos los encuestados

Anexo B: Hoja de cálculo para la selección del tipo de infraestructura a implementar en un sistema de transporte masivo de mediana o alta capacidad.

Anexo C: Evaluación del tipo de infraestructura Línea F

- Descripción
- Hoja de cálculo

Anexo D: Evaluación del tipo de infraestructura Corredor Avenida 80.

- Descripción
- Evaluación Avenida 80