

**MONORRIEL COMO ALTERNATIVA DE INTERCONEXIÓN ENTRE LOS
AEROPUERTOS EL DORADO I Y II Y EL CENTRO INTERNACIONAL DE
BOGOTÁ**

MARÍA CAMILA MORENO CARRILLO
JESÚS ALBERTO RENGIFO LOZANO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.

2017

**MONORRIEL COMO ALTERNATIVA DE INTERCONEXIÓN ENTRE LOS
AEROPUERTOS EL DORADO I Y II Y EL CENTRO INTERNACIONAL DE
BOGOTÁ**

MARÍA CAMILA MORENO CARRILLO
JESÚS ALBERTO RENGIFO LOZANO

Monografía de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Ph. D. HERNAN CARVAJAL OSORIO
Asesor disciplinar

MARY LUZ PARRA GÓMEZ
Asesora metodológica

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.

2017

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Un trabajo dedicado a las personas que con su amor y solidaridad izaron las posibilidades de realizarlo. A mi familia por ser mi apoyo, fuerza y motor.

Dedico este paso final hacia la consecución del título de Ingeniero Civil, a toda una familia que fue el soporte para este importante paso en mi vida personal, muy especialmente al sacrificio de mis hijas Amy y Emily, ellas son la razón de mi propósito de superar barreras y mi motor para seguir adelante. No puedo dejar de mencionar a mis padres, mis hermanas, sobrinos y a todos aquellos que ocuparon un espacio conmigo en las aulas de clase. Aprendí mucho de cada uno de mis compañeros.

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a nuestros directores, tanto disciplinar, Ingeniero Hernán Carvajal Osorio, Phd Ingeniería Nuclear, como a nuestra asesora metodológica Mary Luz Parra Gómez, Licenciada en Educación; sin su apoyo y transmisión de conocimientos no hubiésemos podido lograrse el resultado final de esta investigación.

Agradecer a Dios por habernos permitido llegar a la fase final de nuestra carrera universitaria.

A nuestras familias que fueron el apoyo incondicional y el soporte diario de cada una de nuestras necesidades.

Al compañero Milton Fredy Rodríguez por su colaboración en la parte preliminar de esta investigación.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	19
2. OBJETIVOS.....	20
2.1. GENERAL	20
2.2. ESPECÍFICOS	20
3. JUSTIFICACIÓN.....	21
3.1. ASPECTOS DEMOGRÁFICOS	22
3.2. ASPECTOS ECONÓMICOS	23
3.3. INFRAESTRUCTURA	25
3.4. PRONÓSTICOS DE DEMANDA.....	26
4. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	31
4.1. SISTEMAS DE TRANSPORTE	31
4.2. EL AEROPUERTO EL DORADO EN LATINOAMÉRICA	35
4.3. GEOLOGÍA EDI.....	37
4.3.1. Litoestatigrafía	37
4.3.2. Microzonificación sísmica	39
4.3.2.1. Recomendaciones geotécnicas.	42
4.4. GEOTECNIA EDII.....	43
4.4.1. Recopilación información existente.....	43
4.4.2. Exploraciones de campo y ensayos.....	44
4.4.3. Marco geológico.....	45
4.4.3.1. Caracterización de suelos.....	47
4.4.3.2. Parámetros de resistencia	48
4.4.3.3. Recomendaciones geotécnicas.	50
5. MARCO TEÓRICO	54
5.1. ¿QUÉ ES UN MONORRIEL?.....	54

5.1.1. Tipos.	54
5.1.2. Aspectos técnicos.	54
5.1.3. Ventajas.	55
5.1.4. Desventajas.	57
5.1.5. Características.	57
5.1.5.1. Velocidad.	57
5.1.5.2. Costos.	58
5.1.5.3. Experiencia.	60
5.1.6. Algunos monorrieles en el mundo.	60
5.1.6.1. Monorriel en Chiba, Japón.	60
5.1.6.2. Monorriel en Shonan, Japón.	61
5.1.6.3. Monorriel en Sydney, Australia.	62
5.1.6.4. Monorriel en Medellín, Colombia.	62
5.1.6.5. Monorriel en Sao Pablo, Brasil.	63
6. MARCO LEGAL Y NORMATIVO.	65
6.1. RESOLUCIÓN 2176 DE 2015.	65
6.2. PLAN MAESTRO DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL EL DORADO.	66
6.3. DECRETO 1008 DE 2015.	67
6.4. DECRETO 765 DE 1999.	68
6.5. DECRETO 301 DE 1990.	68
6.6. RESOLUCIÓN 06815 DE 2013.	69
6.7. DECRETO 523 DE 2010.	69
7. MARCO GEOGRÁFICO.	70
8. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.	72
8.1. ENFOQUE.	72
8.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.	72
8.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.	73
8.4. VARIABLES.	73
8.5. FASES DE INVESTIGACIÓN.	74
9. RESULTADOS Y ANÁLISIS.	76

9.1. PARTICULARIDADES TÉCNICAS Y ENTORNOS DE UN SISTEMA MONORRIEL PARA LA INTERCONEXIÓN CON ED I Y ED II.....	77
9.1.1. Sistema de tracción.....	83
9.2. DIFERENCIAS ENTRE LOS MODOS DE TRANSPORTE SOBRE RIELES.	85
9.2.1. Estética	86
9.2.2. Construcción	86
9.2.3. Costo.....	87
9.2.4. Eficiencia y eficacia.....	88
9.2.5. Seguridad.....	89
9.3. CONDICIONES ESTRUCTURALES Y CONSTRUCTIVAS BÁSICAS DEL MONORRIEL.....	90
9.3.1. Condiciones estructurales.....	90
9.4. ALTERNATIVAS DE TRAZADO	98
9.5. MOVIMIENTO DE PASAJEROS AEROPUERTOS	107
9.5.1. Movimiento de pasajeros y proyección para aeropuertos EDI y EDII	107
9.5.2. EDI/EDII: Conectividad de terminales independientes:.....	108
9.5.3. EDI/EDII: Conectividad con EDII como terminal remota del EDI:	109
9.5.4. Tiempos de desplazamiento desde el CIB y entre EDI y EDII	110
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	112
ANEXOS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
BIBLIOGRAFÍA.....	117

CONTENIDO DE IMÁGENES

Imagen 1 – Primeros tranvías con tracción animal en el Reino Unido.....	32
Imagen 2 – Primer tranvía eléctrico por Werner Von Siemen.....	32
Imagen 3 – Ferrocarril en México.	33
Imagen 4 – Wuppertaler Schwebebahn.....	34
Imagen 5 – Cheshunt Railway.	35
Imagen 6 – Tráfico de pasajeros (millones), principales aeropuertos Suramérica.	36
Imagen 7 – Mapa geológico de Bogotá.	37
Imagen 8 – Mapa microzonificación sísmica de Bogotá.	40
Imagen 9 – Localización exploraciones geotécnicas.	44
Imagen 10 – Geología del área del proyecto EDII.	46
Imagen 11 – Materiales identificados con CPTu.....	47
Imagen 12 – Envolvente de resistencia al corte no drenada Zona 1.	49
Imagen 13 – Envolvente de resistencia al corte no drenada Zona 2.	49
Imagen 14 – Capacidad portante admisible con condición drenada.....	51
Imagen 15 – Capacidad portante admisible con condición no drenada.....	52
Imagen 16 – Ábaco de diseño para pilotes Zona 1.....	53
Imagen 17 – Ábaco de diseño para pilotes Zona 2.....	53
Imagen 18 – Comparativo de capacidad sistemas monorriel.	56
Imagen 19 – Monorriel Chiba, Japón.	61
Imagen 20 – Monorriel Shonan, Japón.	61
Imagen 21 – Monorriel Sydney Australia.	62
Imagen 22 – Monorriel Medellín, Colombia.	63
Imagen 23 – Localización proyecto.....	70
Imagen 24 – Localización proyecto.....	71
Imagen 25 – Sistema monorriel típico.....	77
Imagen 26 – Vista lateral del vagón típico.	83
Imagen 27 – Isométrico del motor.....	84

Imagen 28 – Vista derecha motor.	84
Imagen 29 – Vista frontal motor.	84
Imagen 30 – Motor Bombardier.	85
Imagen 31 – Capacidad de carga de los diferentes sistemas de transporte.....	91
Imagen 32 – Esquema de modelo Hitachi de monorriel.	92
Imagen 33 – Monorriel Innovia 300.....	94
Imagen 34 – Sección transversal vía guía monorriel.	97
Imagen 35 – Alternativas de conectividad.	98
Imagen 36 – Alternativas de conectividad.	100
Imagen 37 – Alternativas de conectividad.	101
Imagen 38 – Propuesta intersección Carrera 68.....	102
Imagen 39 – Propuesta llegada EDI.	103
Imagen 40 – Conexión Carrera 103.....	104
Imagen 41 – Alternativas propuestas.....	105
Imagen 42 – Estaciones propuestas.....	106
Imagen 43 – Alternativa Plan Maestro EDII.	106
Imagen 44 – Conexión aeropuertos Plan Maestro EDII.....	116

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1 – Resumen del pronóstico del Plan Maestro de 2012.....	18
Tabla 2 – Crecimiento poblacional.....	23
Tabla 3 – Pronóstico de operaciones del Plan Maestro de 2012.....	28
Tabla 4 – Pronóstico de operaciones día del Plan Maestro de 2012.....	29
Tabla 5 – Pronóstico de pasajeros día del Plan Maestro de 2012.....	30
Tabla 6 – Descripción de las zonas geotécnicas.....	41
Tabla 7 – Resultados determinación parámetros de resistencia al corte drenada.	50
Tabla 8 – Ventajas del monorriel.....	55
Tabla 9 – Desventajas del monorriel.....	57
Tabla 10 – Velocidades promedio de operación comparativa.....	58
Tabla 11 – Factores que influyen en el costo del monorriel.....	58
Tabla 12 – Costo monorrieles en el mundo.....	59
Tabla 13 – Algunos monorrieles en operación en el mundo.....	63
Tabla 14 – Coordenadas modificadas nuevo aeropuerto EDII.....	66
Tabla 15 – Variables.....	73
Tabla 16 – Fases.....	74
Tabla 17 – Monorrieles más importantes y recientes en el mundo.....	80
Tabla 18 – Comparación estructural vigas monorriel.....	95
Tabla 19 – Pronóstico de pasajeros del Plan Maestro de 2012.....	108
Tabla 20 – Pronóstico de pasajeros del Plan Maestro de 2012.....	108
Tabla 21 – Pronóstico de pasajeros del Plan Maestro de 2012.....	109

GLOSARIO

AERONÁUTICA CIVIL: organismo estatal colombiano encargado del control y regulación de la aviación civil en Colombia.

AEROPUERTO: terminales en tierra donde se inician y concluyen los viajes de transporte aéreo, aterrizaje y despegue de aeronaves, embarque y desembarque de pasajeros, equipaje y mercancías, etc.

ANI: (Agencia nacional de infraestructura). Agencia gubernamental colombiana, parte del Ministerio de Transporte, que está a cargo de las concesiones a alianzas público-privadas para el diseño, construcción, mantenimiento, operación y administración de la infraestructura de transporte en Colombia.

APM: (automated people mover). Sistema de transporte ferroviario ligero totalmente automatizado formado por lanzaderas que viajan en pequeñas líneas.

FERROCARRIL: o transporte ferroviario. Es un sistema de transporte de personas y mercancías guiado sobre una vía férrea.

INFRAESTRUCTURA URBANA: realización humana diseñada y dirigida por profesionales, que sirven de soporte para el desarrollo de otras actividades y su funcionamiento, necesario en la organización estructural de las ciudades y empresas.

LRT: (light rail transit). El tren ligero es un sistema de transporte que utiliza el mismo material rodante que el tranvía, pero que incluye segmentos parcial o totalmente segregados por el tráfico, con carriles reservados, vías apartadas y en

algunos casos túneles en el centro de la ciudad de características similares a las de un ferrocarril convencional.

METRO PESADO: se encarga de conectar los distintos barrios de una misma ciudad utilizando una infraestructura exclusiva para el transporte de viajeros, generalmente subterránea aunque puede haber tramos en superficie o en viaducto.

MONORRIEL: sistemas de transporte en los que los vagones están suspendidos o se desplazan sobre una estructura de un solo riel para transportar mercancías o personas.

PLAN MAESTRO: documento en el que los responsables de una organización reflejan cual será la estrategia a seguir por su compañía en el medio plazo.

RIEL: barras metálicas sobre las que se desplazan las ruedas de los trenes y tranvías. Son parte de las vías férreas y actúan como soporte, dispositivo de guiado y elemento conductor de la corriente eléctrica.

TRANVÍA: también llamado Tram, en un medio de transporte de pasajeros que circula sobre rieles y por la superficie en áreas urbanas, sin separación del resto de la vía o sector reservado.

TREN: vehículo compuesto por una serie de vagones o coches, acoplados entre si y remolcados por una locomotora o por autopropulsión. Generalmente circulan sobre carriles.

RESUMEN

Esta monografía está basada en la investigación de las experiencias internacionales en la adopción del sistema monorriel como medio de transporte con propósito al transporte de pasajeros. Se demostró que actualmente existe un número apreciable de países que están seleccionando este sistema como una herramienta útil para el transporte masivo de pasajeros bajo el cumplimiento de condiciones básicas para este propósito.

Dentro de las condiciones favorables para un sistema monorriel están la disminución de accidentalidad, el uso de una franja delgada de terreno para su implementación, su economía en la adquisición de terrenos, su contribución a la no contaminación auditiva, su capacidad de superar cuestas de hasta el 6% y su capacidad de superar obstáculos en zonas ya urbanizadas como puentes, rodear edificaciones, entre otros.

De acuerdo a la experiencia internacional se encuentra que el sistema monorriel es uno de los sistemas óptimos para el transporte de pasajeros desde los centros urbanos y hacia los aeropuertos. Actualmente en Bogotá se ejecuta la ampliación del Aeropuerto El Dorado I (EDI) con la construcción de un aeropuerto complementario a las afueras de la ciudad. En esta investigación se plantean dos rutas de conexión para estos aeropuertos por medio de sistema monorriel.

Con los resultados de esta propuesta se buscan un transporte seguro y rápido de pasajeros entre aeropuertos, teniendo en cuenta las proyecciones del Plan Maestro del Aeropuerto El Dorado II (EDII).

PALABRAS CLAVE: Monorriel, LRT, APM, Metro Pesado.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como objetivo realizar un estudio preliminar para la interconexión de los aeropuertos EDI y EDII, utilizando un sistema monorriel para el transporte de pasajeros desde el Centro Internacional de Bogotá (CIB). Se plantean dos rutas de conexión con sus respectivas estaciones, basados en las proyecciones de pasajeros que se movilizarán hasta el año 2041.

EDI es el aeropuerto más importante del país y está presentando un crecimiento significativo de transporte de pasajeros. Es por esto que se plantea como solución la movilización de los mismos por medio de sistema monorriel.

El monorriel es un sistema de transporte utilizado en su mayoría para conexión de aeropuertos en el exterior y presenta ventajas sobre otros sistemas de transporte a nivel o sobre rieles.

Esta investigación plantea dos rutas de conexión que irán desde el CIB, conectarán con EDI y terminarán su recorrido en el EDII. En ellas se toman en cuenta las posibles interferencias con el tráfico de Bogotá, su estructura elevada, su capacidad y transporte de pasajeros, entre otros.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El EDI, el más importante del país, ha registrado un crecimiento importante en movilización de pasajeros, operaciones en pista y transporte de carga tanto nacional como internacional.

Es por lo anterior que se ha tomado la iniciativa de generar una propuesta para la implementación de un sistema alternativo de transporte que conecte el aeropuerto existente con el centro internacional de Bogotá y con su aeropuerto complementario, aeropuerto EDII, que estará ubicado en el departamento de Cundinamarca, entre los municipios de Madrid y Facatativá, y que constará con un radio de 60 km, una pista de 3600 metros de longitud, un área de 1350 hectáreas y que estará ubicado a 15 kilómetros de Bogotá.¹

El sistema de transporte requerido debe ser un sistema de transporte terrestre que les permita a los pasajeros aéreos movilizarse entre la futura terminal y la terminal existente de forma eficiente, segura, amigable con el medio ambiente y sobre todo con altos estándares de puntualidad.

Existen diversos sistemas de transporte para comunicar terminales aeroportuarias, con el inconveniente de que la gran mayoría son subsistemas ferroviarios que se diseñan y se construyen de acuerdo a la demanda identificada, la distancia entre las terminales y el diseño operacional del aeropuerto. El sistema más básico, económico y simple se compone de una flota de buses que proporcionan servicios expresos entre las terminales aeroportuarias; sin embargo, su capacidad es muy

¹ AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Contratación de un consultor de negocios de aviación que lleve a cabo estudios iniciales de prefactibilidad de carácter estratégico, financiero y jurídico, que sirvan como insumo para el desarrollo de la estructuración del proyecto de asociación público privada de iniciativa pública que integre el aeropuerto El Dorado existente, con el proyecto aeropuerto El Dorado II, de conformidad con el alcance del objeto. Bogotá. 2015, p. 15.

limitada y es altamente sensible al tráfico si sus rutas se realizan a lo largo de vías de tráfico particular, como es el caso actual entre la Terminal 1 y el Puente Aéreo.

Las principales ciudades del mundo cuentan con aeropuertos que disponen de varias terminales y gran flujo de pasajeros entre ellas, razón por la cual la interconexión de las terminales requiere de sistemas robustos y eficientes como los ferroviarios, los monorrieles y trenes ligeros. El monorriel es un sistema de transporte en el que los vagones están suspendidos o se desplazan sobre una estructura de un solo riel, y que ofrece servicios especiales para atender las demandas generadas por aeropuertos, con o sin servicios sin paradas entre las terminales.²

Para la proposición de la implementación del monorriel para la conexión de los dos aeropuertos se tuvo en cuenta las previsiones elaboradas en el Plan Maestro de 2012 que se basaron en datos históricos del aeropuerto EDI de los años 2000 a 2011.³ En este Plan se desarrollaron análisis de tendencias y de regresión a fin de establecer una correlación entre las series de datos aeroportuarios primarios y datos históricos independientes disponibles, así como sus pronósticos. Se utilizaron diversas variables de datos socioeconómicos para complementar los datos aeroportuarios tradicionales de pasajeros, tonelaje de carga y operaciones. Además, se tuvieron en cuenta el PIB colombiano, IPC (índice de precios), población, tasas de cambio, exportaciones totales, e importaciones totales como posibles variables independientes en distintos análisis de regresión.⁴ En la Tabla 1 se observa el resumen de las previsiones elaboradas en el Plan Maestro del aeropuerto EDII.

² UNIVERSIDAD DE LA SALLE. Monorriel. [En línea].

http://evirtual.lasalle.edu.co/info_basica/nuevos/guia/GuiaClaseNo.3.pdf. [citado el 24 de marzo de 2016].

³ AERONÁUTICA CIVIL. Análisis técnico de la viabilidad operacional y elaboración del plan maestro aeroportuario para el proyecto de infraestructura El Dorado II. Bogotá. 2016.

⁴ AERONÁUTICA CIVIL. Análisis técnico de la viabilidad operacional y elaboración del plan maestro aeroportuario para el proyecto de infraestructura El Dorado II. Capítulo 3 – estrategias de desarrollo y pronósticos de la demanda. Bogotá. 2016, p. 7.

Tabla 1 – Resumen del pronóstico del Plan Maestro de 2012.

Año	Pasajeros totales	Carga (Toneladas métricas)	Operaciones totales
2011	20.286.144	615.254	309.708
<u>Pronóstico</u>			
2012	21.705.228	649.555	321.345
2013	23.416.031	679.485	341.530
2014	25.405.572	711.055	364.840
2015	27.264.721	744.345	386.990
2016	29.303.385	779.335	411.160
2021	37.988.614	978.805	512.560
2026	45.788.111	1.232.170	591.335
2031	53.193.850	1.513.850	682.110
2036	60.962.244	1.822.995	759.265
2041	69.232.028	2.152.730	845.930
2011-2041	4,2%	4,3%	3,4%

Fuente: <https://goo.gl/FVOVUu>

La información de la Tabla 1 permite inferir que si no se toman acciones en el corto y mediano plazo, el EDI no podrá recibir el número de operaciones y pasajeros previsto, ya que la capacidad de las pistas de este aeropuerto están llegando rápidamente a su punto de saturación, donde la eficiencia operativa comienza a degradarse, lo cual provoca retrasos y limitaciones al crecimiento de la demanda. Es por esto que se adelanta en la actualidad un plan de choque en el EDI, que permitirá absorber el crecimiento de los próximos años.

Es necesario iniciar el desarrollo del EDII para suplir las necesidades de expansión en términos de capacidad y eficiencia operativa, y para atender el crecimiento de la demanda de viajeros y de carga a corto y mediano plazo. La expansión de la infraestructura existente requiere de infraestructura complementaria que asegure eficiencia y seguridad de acuerdo a las proyecciones de demanda anteriormente nombradas; y requiere de un sistema de transporte terrestre que comunique las dos terminales.

La necesidad de interconectar estos dos aeropuertos y el Centro Internacional de Bogotá (CIB), es primordial para los pasajeros que se verán beneficiados por una rápida y segura movilidad entre ellos. Es por esto que se planteó como alternativa para ello la implementación de un monorriel, que brinde facilidad en su construcción, pues los tiempos están estimados en 1/3 menos de lo que puede durar cualquier otro sistema, es poco invasivo y no interfiere con el tráfico de vehículos.

1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo la implementación de un sistema tipo monorriel suple la necesidad de transporte expreso y efectivo para los pasajeros en conexión entre los aeropuertos EDI y EDII y el Centro Internacional de Bogotá?

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Desarrollar un estudio preliminar de un sistema de interconexión que, utilizando tecnología tipo monorriel, preste servicio expreso ágil y de calidad para los pasajeros de los Aeropuertos EDI y EDII de Bogotá, en conexión desde el Centro Internacional y con proyección al año 2041.

2.2. ESPECÍFICOS

Identificar, mediante información sobre sistemas monorriel internacionales, características técnicas y condiciones favorables y no favorables, en consideración a las necesidades de transporte ágil y cómodo para los pasajeros de los Aeropuertos EDI y EDII, con proyección al año 2041.

Establecer las características físicas principales del monorriel a proponer, junto con condiciones estructurales y constructivas básicas que se requieran para su implementación en las condiciones indicadas para servicio rápido y de calidad.

Determinar, con base en información secundaria y criterios básicos aplicables, el trazado de dos rutas alternativas para interconexión con el monorriel de los dos Aeropuertos EDI y EDII, y la ruta de conexión con el Centro Internacional de Bogotá.

3. JUSTIFICACIÓN

Esta propuesta proviene de la necesidad de un medio de transporte que sea eficiente, seguro y cómodo en cuanto a los tiempos en la movilización desde el aeropuerto EDI, hacia el aeropuerto EDII y viceversa, y con la conexión con el centro internacional de Bogotá. Busca, mediante el análisis de diferentes variables operacionales, geomorfológicas, de análisis de obstáculos, ambiental, operacional y de conectividad, determinar la viabilidad operativa de un nuevo sistema de transporte para la interconexión de los aeropuertos y el Centro Internacional de Bogotá.

Dentro de los estudios de pre-factibilidad para la construcción del EDII de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), se estima que un *Airport Rail Link* (ARL), es la forma más viable para mover los pasajeros entre aeropuertos.⁵ Un ARL es un enlace ferroviario a aeropuertos, comúnmente conocido con Air Link. Es un servicio de trenes que conecta el aeropuerto con el centro de la ciudad, y permite realizar los desplazamientos en tiempos cortos. El Air Link más conocido es el implementado en Bangkok, que conecta el aeropuerto Suvarnabhumi con el centro de la ciudad.⁶

Según la ANI indica en dicho estudio, el corredor ferroviario existente puede ser utilizado y es la opción hasta ahora prevista para la conexión del nuevo aeropuerto con el existente. Una de las desventajas de esta opción en su parte técnica es que no prestaría un servicio expreso entre aeropuertos, por lo que podría no ser viable ya que en cualquier caso ese sistema propuesto por la ANI estaría en uso para los servicios regulares de transporte masivo y haría obligatorio que el servicio se

⁵ AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Op. Cit., p. 15.

⁶ BANGKOK, Airport Rail Link. [En línea]. <http://www.bangkok.com/airport-rail-link.htm#promo>. [citado el 24 de marzo de 2016].

detuviese frecuentemente, causando retrasos en la oportuna llegada al destino; contrario a lo buscado con la propuesta de esta investigación.

También, como punto adicional de análisis, se debe tener en cuenta que al ser un servicio ferroviario a nivel, en varias de las secciones se verá afectado por el tráfico que existe entre las ciudades de Bogotá, Funza, Mosquera, Madrid y Facatativá, ocasionando aún más retrasos, sobre todo en las horas pico. Para los pasajeros entre aeropuertos no resultaría cómodo ni seguro el transporte por este medio.

Por lo tanto, es necesario considerar una vía con características de servicio rápido y de uso exclusivo de los aeropuertos y al centro de la Ciudad.

3.1. ASPECTOS DEMOGRÁFICOS

Igual que la población hacia el occidente de Bogotá, esta región contigua del Departamento de Cundinamarca ha venido creciendo en habitantes a una tasa por encima del 2% durante la última década, lo cual es explicado por la alta migración, en particular hacia los cuatro municipios más cercanos a Bogotá. Las fuentes de información más confiables son las dadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE).

El crecimiento poblacional para estos cuatro municipios indicados en la Tabla 2, tiene un componente muy particular y es que no solo se debe al efecto migratorio de las familias como su lugar de residencia desde Bogotá, sino que además debe tenerse en cuenta la re-localización de empresas e industrias que están trasladándose hacia estos municipios. En este orden de ideas las cifras poblacionales son las observadas en la Tabla 2:

Tabla 2 – Crecimiento poblacional.

Lugar	1995	2000	2005	2012	2020
Facatativá	78.109	87.242	96.090	112.269	120.465
Funza	45.390	51.832	58.249	66.596	76.782
Mosquera	46.216	52.711	59.178	63.459	77.800
Madrid	25.750	31.317	37.307	43.229	57.055

Fuente: <https://goo.gl/sWTvzP>

De la proyección poblacional indicada para dichos municipios, igualmente así determinados por la Mesa de Planificación Regional Bogotá -Cundinamarca hasta el año 2020, los municipios donde tiene influencia EDII, es del orden de 332 mil habitantes, lo que equivale a 3,6% de la población de Bogotá para dicho año.

Estos datos explican el gran dinamismo del área de estudio como fuente generadora de empleo, consumo y producción, y por ello la importancia estratégica de estos municipios en el afianzamiento del proyecto EDII en esta región de la Sabana.

3.2. ASPECTOS ECONÓMICOS

Cundinamarca es el quinto departamento en importancia participativa del PIB sobre el agregado nacional después de Bogotá, Antioquia, Valle del Cauca y Santander, con una participación del 5.75%. Bogotá se destaca como una economía del sector terciario (servicios y comercio), mientras que Cundinamarca

registra tendencia hacia la especialización de las actividades agropecuarias e industriales.⁷

Bogotá y el Departamento de Cundinamarca generan una contribución del 28% del PIB, siendo Bogotá el aportante del 23% del total. El departamento de Cundinamarca viene presentando una tasa sostenida de crecimiento del PIB del 5.2% en los últimos 20 años.⁸

El Aeropuerto EDI tiene una gran representatividad económica en términos de transporte de carga y pasajeros en Latinoamérica. A través de los años este ha venido aumentando en cifras el transporte de estos y por tanto su representatividad y competitividad.⁹

A esto se suma el aumento de la utilización de la aviación como sistema de transporte que se ha evidenciado de manera drástica en las últimas décadas. La oferta de aerolíneas que favorecen la economía de los usuarios hace que este medio de transporte vaya en constante crecimiento y así mismo demande servicios adicionales, y para garantizar que los aeropuertos respondan a estas demandas esto representa un reto para la planificación de las ciudades y las regiones.

EDI representa un elemento principal en el desarrollo regional de Bogotá y de Cundinamarca. Representa un polo de desarrollo importante donde se encuentra una aglomeración significativa de actividades económicas y sociales. Bogotá se encuentra en el centro de la región, donde se concentra la mayor cantidad de población y actividad y donde los municipios también adquieren un papel

⁷ AERONÁUTICA CIVIL. Análisis técnico de la viabilidad operacional y elaboración del plan maestro aeroportuario para el proyecto de infraestructura El Dorado II. Capítulo 1 – Introducción general. Bogotá. 2016, p. 4.

⁸ Ibid., p. 4.

⁹ PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. El aeropuerto el Dorado como elemento de planeamiento multiescalar y articulador urbano regional: instrumentos y actores de la planeación. Bogotá, 2016. p. 23.

importante al convertirse en polos de desarrollo, contribuir al crecimiento económico y alojar población que labora en la ciudad.

3.3. INFRAESTRUCTURA

La provisión eficiente de los servicios de infraestructura es uno de los aspectos más importantes de las políticas de crecimiento económico. La ausencia de este tipo de infraestructura constituye un verdadero obstáculo para alcanzar las tasas de crecimiento. EDII es una infraestructura que permite lograr una conectividad para generar ventajas competitivas no solo a nivel de pasajeros, sino en el transporte de carga, ya que con este se logra penetrar más mercados a nivel internacional aprovechando los diferentes acuerdos regionales ya firmados.

Para facilitar la construcción de un transporte que agilice la conexión de las dos terminales aeroportuarias y el centro de Bogotá, hay que evaluar la infraestructura vial existente y el tiempo de ejecución de las obras. El sistema que nos genera ventajas sobre la opción estudiada por la ANI es el monorriel, que posee las mismas ventajas del tren de cercanías (línea privada de operación) sin coincidir con la misma vulnerabilidad que este medio de transporte presenta, ya que el monorriel no interactúa con el tráfico existente.

Algunas de las ventajas que observamos para implementar la interconexión de los aeropuertos y el centro internacional de Bogotá, por medio de monorriel son las siguientes:

- Mantenimiento rápido y a bajo costo.
- Seguridad y confiabilidad.
- Poca afectación de la infraestructura vial existente.

- Por el uso de electricidad para su locomoción es una propuesta amigable con el medio ambiente.
- No necesita un sistema de drenaje especial y es compatible con zonas húmedas.
- Frecuencias de viajes son más precisa.
- Opción de operación automática.

3.4. PRONÓSTICOS DE DEMANDA

El pronóstico de la demanda de aviación del Plan Maestro de 2012 para el Aeropuerto Internacional El Dorado representa la previsión más reciente del tráfico del aeropuerto internacional de la ciudad de Bogotá.

El Plan Maestro del Aeropuerto Internacional El Dorado de 2012 indica que EDI estaría saturado para el año 2016 para cuando se proyectaban aproximadamente 400.000 operaciones anuales y aun tomando en cuenta la optimización del aeródromo y de las aproximaciones. El Plan Maestro también menciona que la capacidad de El Dorado se puede mejorar reubicando el tráfico de aviación general. La viabilidad de un segundo aeropuerto podría proporcionar el necesario aumento a la capacidad operativa pronosticada para Bogotá, y facilitar el crecimiento de pasajeros y carga en el Aeropuerto Internacional El Dorado a mejores niveles de servicio.¹⁰

La actividad de pasajeros es mayor en los segmentos de pasajeros nacionales e internacionales debido a la solidez de la economía colombiana, los nuevos mercados y las frecuencias ampliadas. El aumento en la demanda de pasajeros

¹⁰ AERONÁUTICA CIVIL. Capítulo 3. Op. Cit., p. 2.

ha afectado el tamaño medio de las aeronaves utilizadas por las compañías aéreas que operan en El Dorado, lo cual ayuda a reducir la tasa de crecimiento de las operaciones comerciales de pasajeros.

El tonelaje de carga nacional ha aumentado por encima de lo que estaba previsto en el pronóstico del Plan Maestro de 2012, lo cual puede estar vinculado a la incorporación de nuevos mercados nacionales y la capacidad de transportar la carga dentro de Colombia de manera más eficiente por el aire que por carretera, debido a las limitaciones de infraestructura.

Las proyecciones de operaciones se elaboraron utilizando dos métodos. Las operaciones de pasajeros comerciales se calcularon utilizando las proyecciones de pasajeros y los supuestos sobre niveles futuros de pasajeros promedio por operación. Las proyecciones para otros segmentos de operaciones (carga, militar/gubernamental, taxi aéreo, chárter y aviación general) se desarrollaron con análisis de tendencias históricas lineales.

La Tabla 3 presenta un resumen del pronóstico del Plan Maestro de 2012 para los segmentos de operaciones comentados:

Tabla 3 – Pronóstico de operaciones del Plan Maestro de 2012.

Operaciones									
Año	Pasajeros Domesticos	Pasajeros Internacionales	Pasajeros Totales	Carga	Militar	Taxi Aéreo	Charters	Aviación General	Vuelos Totales
2011	182,918	48,709	231,627	18,594	24,813	22,794	771	11,109	309,708
Forecast									
2012	189,350	51,770	241,120	19,110	25,435	23,500	780	11,400	321,345
2013	204,770	54,360	259,130	19,630	26,060	24,220	790	11,700	341,530
2014	223,210	57,040	280,250	20,150	26,670	24,960	800	12,010	364,840
2015	239,750	60,450	300,200	20,670	27,270	25,720	810	12,320	386,990
2016	258,140	64,000	322,140	21,190	27,860	26,510	820	12,640	411,160
2017	270,998	67,378	338,376	21,703	28,430	27,319	830	12,930	429,587
2018	284,496	70,934	355,430	22,230	29,012	28,153	840	13,233	448,897
2019	298,666	74,679	373,345	22,771	29,606	29,012	850	13,548	469,131
2020	313,543	78,620	392,163	23,328	30,212	29,897	860	13,877	490,336
2021	329,160	82,770	411,930	23,900	30,830	30,810	870	14,220	512,560
2022	338,266	87,032	425,298	24,478	31,497	31,737	880	14,505	528,394
2023	347,624	91,513	439,137	25,072	32,179	32,691	890	14,799	544,768
2024	357,241	96,225	453,466	25,683	32,876	33,674	900	15,104	561,702
2025	367,124	101,180	468,304	26,310	33,588	34,687	910	15,419	579,217
2026	377,280	106,390	483,670	26,955	34,315	35,730	920	15,745	597,335
2027	386,448	110,743	497,190	27,537	34,985	36,664	930	16,033	613,339
2028	395,838	115,274	511,112	28,133	35,668	37,622	940	16,329	629,804
2029	405,456	119,990	525,447	28,744	36,365	38,605	950	16,634	646,745
2030	415,308	124,900	540,208	29,369	37,076	39,615	960	16,947	664,175
2031	425,400	130,010	555,410	30,010	37,800	40,650	970	17,270	682,110
2032	433,236	134,285	567,521	30,663	38,577	41,579	985	17,511	696,836
2033	441,215	138,702	579,917	31,332	39,369	42,529	1,000	17,757	711,905
2034	449,342	143,263	592,605	32,018	40,178	43,502	1,015	18,009	727,327
2035	457,619	147,974	605,593	32,719	41,004	44,496	1,031	18,267	743,111
2036	466,048	152,840	618,888	33,438	41,847	45,513	1,047	18,532	759,265
2037	474,632	157,867	632,499	34,174	42,707	46,554	1,063	18,802	775,799
2038	483,375	163,058	646,433	34,928	43,585	47,618	1,079	19,079	792,723
2039	492,278	168,421	660,699	35,700	44,482	48,707	1,096	19,363	810,045
2040	501,346	173,959	675,305	36,490	45,396	49,821	1,113	19,653	827,778
2041	510,580	179,680	690,260	37,300	46,330	50,960	1,130	19,950	845,930
CAGR									
2011-2041	3.5%	4.4%	3.7%	2.3%	2.1%	2.7%	1.3%	2.0%	3.4%
2014-2041	3.1%	4.3%	3.4%	2.3%	2.1%	2.7%	1.3%	1.9%	3.2%

Fuente: <https://goo.gl/FVOVUu>

En cuanto a las operaciones días tomadas en cuenta para el diseño del EDII, se proyecta que las operaciones en la hora pico aumenten de 37 operaciones en 2021 a 57 en 2041, y las operaciones de pasajeros en la hora pico aumenten de 21 en 2021 a 32 en 2041, información que se observa en la Tabla 4.

Tabla 4 – Pronóstico de operaciones día del Plan Maestro de 2012.

Total operations	2021	2026	2031	2036	2041
Annual peak	110.200	126.700	141.500	155.900	171.900
Month	10.028	11.530	12.877	14.187	15.643
Busy day	351	404	451	497	548
Peak hour	37	42	47	52	57
Arriving	26	30	34	37	41
Departing	23	27	30	33	37

Passenger Operations	2021	2026	2031	2036	2041
Annual peak	53.500	62.300	69.600	76.400	83.900
Month	5.063	5.896	6.587	7.230	7.940
Busy day	185	215	240	264	289
Peak hour	21	24	27	29	32
Arriving	15	17	19	21	23
Departing	12	14	15	17	18

Fuente: Plan Maestro Aeronáutica civil.

En cuanto a la proyección de pasajeros en la hora pico en el EDII, aumentará de 1.292 en 2021 a casi 2.200 en 2041. En EDI los pasajeros en hora pico aumentarán a 13.700 en 2041, información registrada en la Tabla 5.

Tabla 5 – Pronóstico de pasajeros día del Plan Maestro de 2012.

EDII - TOTAL PASSENGERS	2021	2026	2031	2036	2041
Annual peak	4.576.000	5.409.000	6.143.000	6.865.000	7.664.000
Month	410.172	484.839	550.631	615.348	686.967
Busy day	13.231	15.640	17.762	19.850	22.160
Peak hour	1.292	1.527	1.734	1.938	2.164
Arriving	771	912	1.035	1.157	1.292
Departing	853	1.008	1.145	1.280	1.429

EDI – TOTAL PASSENGERS	2016	2021	2026	2031	2036	2041
Annual peak	31.197.000	35.004.000	41.882.000	48.148.000	54.442.000	61.568.000
Month	2.826.390	3.174.771	3.798.588	4.366.625	4.937.747	5.584.056
Busy day	91.174	102.412	122.535	140.859	159.282	180.131
Peak hour	6.655	7.763	9.288	10.677	12.074	13.654
Arriving	3.611	4.326	5.175	5.949	6.728	7.608
Departing	3.499	4.238	5.071	5.829	6.592	7.455

Fuente: Plan Maestro Aeronáutica civil.

4. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

4.1. SISTEMAS DE TRANSPORTE

Los antecedentes históricos con los que cuenta el sistema de transporte en el mundo son extensos. Los esfuerzos por crear medios de transporte no convencionales comenzaron con el intento de lograr un transporte con mayor eficiencia, mayor velocidad o menor costo en producción y funcionamiento. El transporte moderno proviene principalmente de la implementación de ferrocarriles no convencionales a finales del siglo XIX.

Los primeros servicios ferroviarios de pasajeros en el mundo se iniciaron en 1807 en Gales, usando carruajes especialmente diseñados en una línea de tranvía tirado por caballos y construido para el uso del transporte de mercancías, como el observado en la Imagen 1. Para 1832, esta tecnología se introduce en Nueva York, y en 1858 se inauguran las primeras líneas en México, La Habana y Santiago, además de Río de Janeiro, Buenos Aires, Callao y Lima, donde se inauguraron entre 1859 y 1864.¹¹ Después de la tracción animal se intentó la tracción por vapor, mediante una pequeña máquina de vapor, pero las molestias causadas por los humos y el vapor no hicieron popular este sistema, solamente en tranvías que circulaban prácticamente por el campo.

¹¹ 20 MINUTOS. ¿Cuál es el origen de los tranvías?. [En línea]. <http://blogs.20minutos.es/yaestaellistoquetodolosabe/cual-es-el-origen-de-los-tranvias/>. [citado el 14 de mayo de 2016].

Imagen 1 – Primeros tranvías con tracción animal en el Reino Unido.



Fuente: <https://goo.gl/71juZK>

El primer tranvía eléctrico fue puesto en servicio por Werner Von Siemens en Berlín en 1879, observado en la Imagen 2, seguido de Budapest en 1887, y por último, Frank J. Sprague con la electrificación de la red de Tranvías de Richmond (Virginia) con la que demostró, desde 1887, que la tracción eléctrica era la forma mejor de propulsar los tranvías. ¹²

Imagen 2 – Primer tranvía eléctrico por Werner Von Siemen.



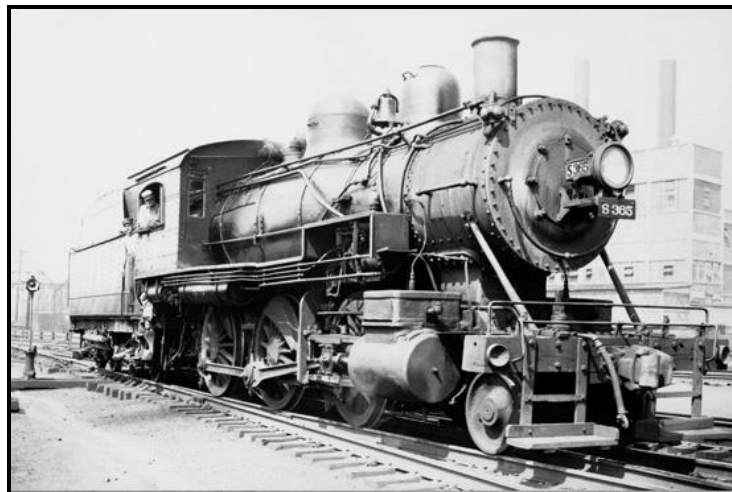
Fuente: <https://goo.gl/7Er3E9>

¹² *Ibíd. Historia.*

El ferrocarril es un sistema de transporte sobre un camino de carriles o rieles constituido por vehículos que se desplazan independientemente o formando una sucesión de vagones que son arrastrados por medio de tracción.¹³

En la imagen 3 se observa el primer ferrocarril que estaba formado por un cuerpo de madera recubierto por una chapa, y fue fabricado en 1768. Esto permitió la elaboración de aparatos de vía más complejos. A partir de 1790 se utilizaron los primeros carriles de acero completo en Reino Unido. En 1803, William Jessop, al sur de Londres, inauguró el primer ferrocarril público tirado por caballos. El primer carril de acero en el mundo fue hecho en Inglaterra a mediados de la década de 1850, y una instalación de prueba en un ferrocarril se hizo en 1862. Después de dos años, las autoridades encontraron que resistía 18 veces más que sus pares de hierro forjado.¹⁴

Imagen 3 – Ferrocarril en México.



Fuente: <http://goo.gl/dKjyav>

¹³ UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTANO. La evaluación del monorriel, un proyecto de inversión. [En línea]. <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/1777/1/RI001315.pdf>. [citado el 14 de mayo de 2016].

¹⁴ EXPLORE PA HISTORY. First steel rails historical marker. [En línea]. <http://explorepahistory.com/hmarker.php?markerId=1-A-1CA>. [citado el 20 de mayo de 2016].

Los esfuerzos por crear ferrocarriles no convencionales comenzaron a finales del siglo XIX, con el objetivo de lograr mayor eficiencia, mayor velocidad o menor costo. Se llevaron a cabo varios intentos para crear un sistema en el que una rueda de acero de doble brida operase sobre un único riel parecido al convencional. El Wuppertaler Schwebebahn es el único monorraíl de este tipo conservado.

En la imagen 4, El Wuppertaler Schwebebahn, un tren monorraíl suspendido en Wuppertal, Alemania. Su nombre completo es "tren monorraíl de suspensión sistema Eugen Langen". Fue diseñado por Eugen Langen y construido en Barmen, Elberfeld y Vohwinkel (ciudades alemanas) entre 1897 y 1903.

Imagen 4 – Wuppertaler Schwebebahn



Fuente: <https://goo.gl/Ctzcsk>

Contrario a lo que se cree, en 1825 el Cheshunt Railway observado en la Imagen 5, fue el primer monorraíl transportando pasajeros, en el Reino Unido y el mundo. Este tuvo su inauguración en Junio 25 de 1825, con un caballo de potencia literalmente. Basado en la patente de Henry Robinson Palmer, el ferrocarril de

Cheshunt fue creado para transportar ladrillos pero hizo historia en los monorrieles al transportar pasajeros en su inauguración.¹⁵

Imagen 5 – Cheshunt Railway.



Fuente: <http://www.monorails.org/tMspages/History.html>

La constante demanda en el mundo por sistemas de transporte eficientes lleva a la creación de sistemas tecnológicos mejores. Se puede identificar la creación del sistema de transporte eléctrico.

Existen países con ejemplares sistemas de transporte, como Inglaterra que tiene el metro de Londres. Muchos otros países no tienen el poder adquisitivo para poseer un sistema de transporte público.

En Bogotá, en el 2001, se implementó sistema de ciclo rutas y de autobuses Transmilenio como un transporte tipo BRT, similar al metro en cuanto a su capacidad de movilización.

4.2. EL AEROPUERTO EL DORADO EN LATINOAMÉRICA

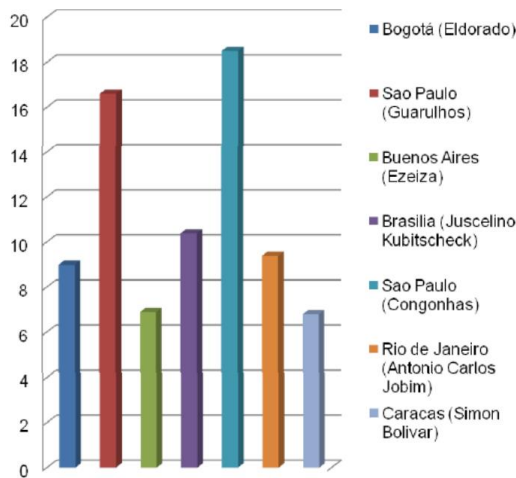
Los aeropuertos desempeñan un papel indispensable en términos de conectividad en una región y en un país, son el punto de intercambio para el movimiento de la

¹⁵ THE MONORAIL SOCIETY. Monorails in history part I. [En línea].
<http://www.monorails.org/tMspages/History.html>. [citado el 20 de mayo de 2016].

economía y población en un mundo cada vez más globalizado en donde permiten trascender el ámbito local hacia un escenario de intercambio con el mundo.

En términos de pasajeros ocupó el quinto lugar en las ciudades con más de 9 millones de pasajeros al año. Sin embargo, sigue superando a los aeropuertos de ciudades como Caracas, Santiago y Buenos Aires. En la imagen 6, el comportamiento de pasajeros en los principales aeropuertos de Suramérica.

Imagen 6 – Tráfico de pasajeros (millones), principales aeropuertos Suramérica.



Fuente: <https://goo.gl/cd5CrD>

Según el Plan Maestro del Aeropuerto, para el 2032, la modernización de este aeropuerto puede significar el incremento del 85% en transporte de carga y del 128% en movilización de pasajeros.

Es importante resaltar la posición estratégica de Bogotá, pues está a menos de seis horas por avión de cualquier capital del Continente y a menos de nueve horas de las principales ciudades del mundo. Bogotá está cuatro veces más cerca en distancia económica vía aérea de Estados Unidos, principal mercado del mundo, que los países del Asia o tres veces más cerca que los países de Europa. Adicionalmente, EDI está ubicado a 20 minutos del Centro Internacional de Bogotá

y a menos de 40 minutos de las zonas empresariales, comerciales y turísticas más importantes de la Región. Así mismo, en los municipios vecinos, ubicados a menos de dos horas vía terrestre, se cultivan productos agrícolas propios de pisos térmicos fríos y templados de interés para los mercados internacionales.¹⁶

4.3. GEOLOGÍA EDI

Bogotá se localiza en promedio a 2.650 metros de altitud sobre el eje de la Cordillera Oriental de Colombia. Geomorfológicamente se diferencian dos zonas: la plana, ubicada hacia la parte central en donde se concentra la mayor parte de la población, y la zona de relieve montañoso con una parte habitada, otra dedicada a la minería a tajo abierto (canteras, gravilleras, etc.), y otra aun no intervenida por el hombre, localizada en los sectores oriental y suroccidental de la ciudad.¹⁷

Geológicamente la ciudad se localiza sobre un extenso relleno sedimentario que conforma la Sabana de Bogotá, y está rodeada por cerros constituidos por rocas de tipo arenisca, arcillolitas y conglomerados.

4.3.1. Litoestatigrafía

En Bogotá afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, con edades entre el Cretáceo y Terciario, y depósitos sedimentarios poco consolidados. A continuación se describen las unidades presentes según el mapa geológico de Bogotá, observado en la Imagen 7.

Imagen 7 – Mapa geológico de Bogotá.

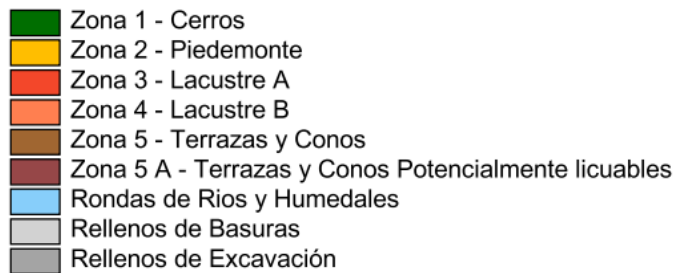
¹⁶ Ibid., p. 25.

¹⁷ RED SISMOLÓGICA NACIONAL DE COLOMBIA. Microzonificación sísmica de Bogotá. Capítulo 2 – Características del subsuelo de la ciudad. Bogotá. 2016, p. 53.

- **Qta:** Depósitos Fluvio-Lacustres. (Terraza alta). Depósitos de arcillas con intercalaciones importantes de bancos de arena y grava. Ocasionalmente delgadas capas de ceniza volcánica y turbas.

4.3.2. Microzonificación sísmica

La Ciudad de Bogotá está dividida en cinco zonas sísmicas principales, en donde la Av. El Dorado se encuentra entre la Zona 4 hacia el occidente de la ciudad y la Zona 3 hacia el oriente de Bogotá. En la imagen 8 el mapa de microzonificación sísmica de Bogotá.

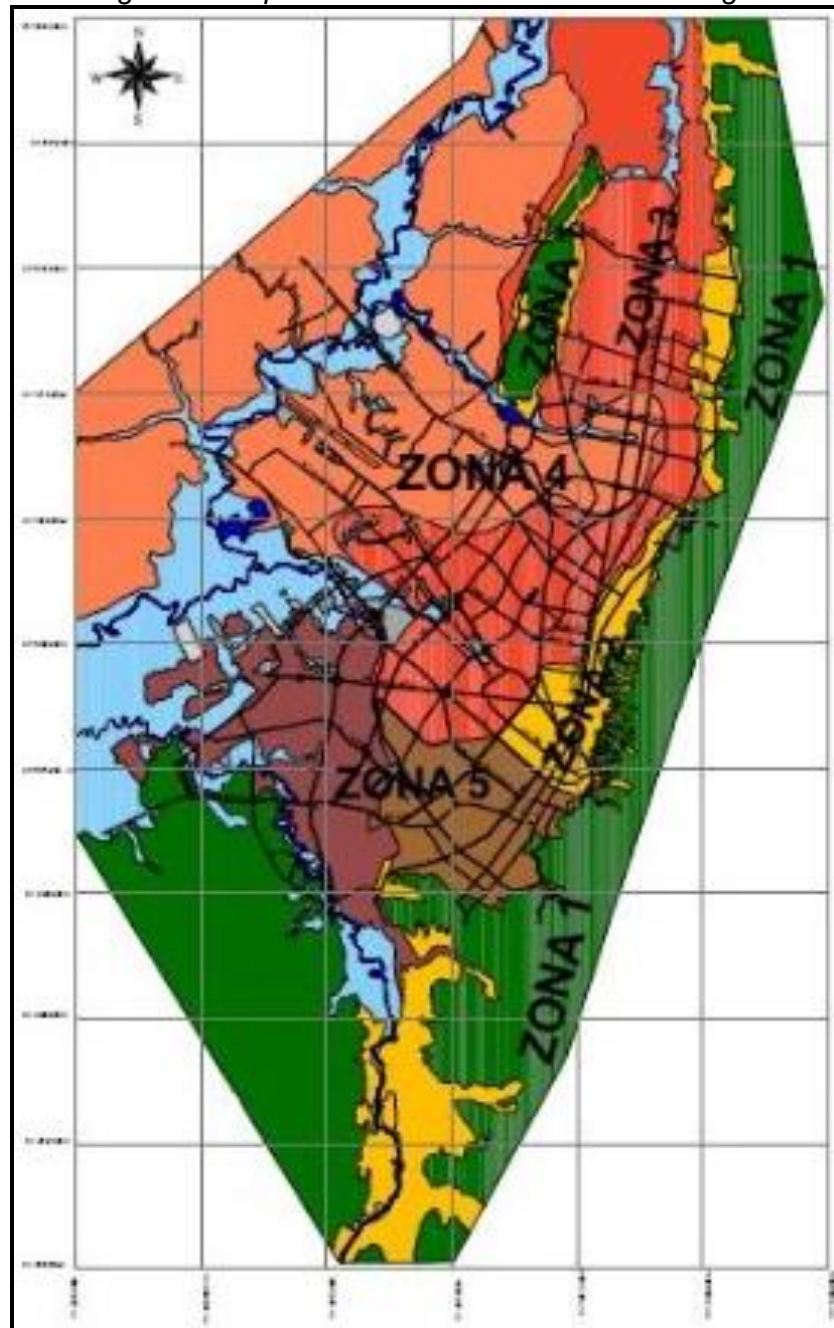


- Zona 3 – Lacustre A: Está conformada principalmente por depósitos de arcillas blandas con profundidades mayores de 50 metros. Pueden aparecer depósitos ocasionales de turbas o arenas de espesor intermedio a bajo. Presentan una capa superficial preconsolidada de espesor variable y no mayor a 10 metros. ¹⁸
- Zona 4 - Lacustre B: Tiene las mismas características de la zona 3 pero los depósitos superficiales (los primeros 30 a 50 metros) son consistentemente más blandos que los anteriores. Además, corresponde a la zona en que la

¹⁸ Ibid., p. 105.

profundidad hasta la roca base es mucho mayor (del orden de 200 metros hasta 400 metros o más).¹⁹

Imagen 8 – Mapa microzonificación sísmica de Bogotá.



Fuente: http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/Mapa_Microzonifica_Sismica.pdf

¹⁹ Ibid., p. 105.

Las zonas geotécnicas de la Av. El Dorado presentan las características resumidas en la Tabla 6:

Tabla 6 – Descripción de las zonas geotécnicas.

Nombre	Geotecnia	Geología	Geomorfología	Composición principal	Comportamiento geotécnico
Lacustre A	Suelo lacustre muy blando	Terraza alta - lacustre	Planicie	Arcillas limosas muy blandas	Suelos de muy baja a media capacidad portante y muy compresibles
Lacustre B	Suelo lacustre blando			Arcillas limosas blandas	

Fuente: <https://goo.gl/akjKuY>

Los terrenos arcillosos son en principio, los más peligrosos para cimentar. En ellos se pueden producir grandes asentamientos en un largo plazo. Experimentalmente se determinó que el tiempo de asentamiento de los estratos arcillosos es proporcional al cuadrado de su espesor es decir, que si por ejemplo la fundación de un edificio descansa sobre un estrato de 2 metros de espesor y el asiento se produce en cuatro años. En este tipo de terrenos las pruebas de carga son inútiles para conocer su comportamiento.

Lo que más influye en la duración del asentamiento es el contenido de agua del estrato y su permeabilidad, así como la del terreno adyacente, pues si una arcilla con un elevado contenido de agua es sometida a una carga, su asentamiento instantáneo es casi nulo ya que el agua (que es incomprensible) es quien soporta la carga. La presión hace que el agua trate de fluir desocupando los huecos que ocupa la arcilla, pero este fluir es lento y dificultado cuanto más impermeable es el estrato, por lo que se comprende que en terrenos de arcilla muy pura y gran espesor el equilibrio demore muchos años en ser alcanzado.

De lo dicho deducimos que puede cimentarse en terrenos arcillosos, pero cuidando que las cargas estén uniformemente repartidas en la planta del edificio, dando a las bases las dimensiones necesarias para que la carga por unidad de superficie sea la misma.

4.3.2.1. Recomendaciones geotécnicas.

La construcción de una buena cimentación para puentes es fundamental a la hora de que la estructura ofrezca un buen comportamiento durante su vida, proporcionando seguridad a los usuarios de la misma. Existen dos tipos de cimentaciones: las superficiales y las profundas. Para el tipo de terreno encontrado en la ubicación de la Av. El Dorado es preferible usar cimentaciones profundas.

Las cimentaciones profundas se llevan a cabo mediante pilotes. Estos pueden ser de dos tipos: hincados o perforados/excavados in situ. Los pilotes hincados se pueden colocar mediante hincadora con percusión con una maza o mediante vibración. Estos pueden ser prefabricados y de diferentes materiales (hormigón, madera o acero).

Los micropilotes también podrían ser otra solución en el caso de cimentaciones profundas, con orificios en el suelo, en los que se va a colocar un elemento metálico y que posteriormente se inyectará con el fin de que estos elementos de metal queden en contacto con el terreno.

Durante la construcción se recomienda auscultar la pila-cimiento, con el fin de detectar posibles giros o asentamientos sufridos.

4.4. GEOTECNIA EDII

Como parte del estudio geológico y geomorfológico de la zona del proyecto EDII se realizó la recopilación bibliográfica con el fin de establecer una descripción regional de los materiales existentes en la zona.

4.4.1. Recopilación información existente.

El Proyecto se localiza entre los municipios de Madrid y Facatativá sobre la margen derecha de la vía que conecta los dos municipios. La Aeronáutica Civil definió el polígono en el que se ubican las dos nuevas pistas de aterrizaje las cuales buscan mejorar la capacidad de operación del aeropuerto El Dorado. Este polígono tiene un área aproximada de 1984 hectáreas y alberga las pistas en el costado sur y occidental del polígono, las cuales tienen una longitud aproximada de 3800 m cada una.²⁰

Como parte de los estudios a nivel de prefactibilidad se consultaron documentos elaborados por entidades como la Corporación Autónoma Regional CAR, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, Ingeominas e investigaciones desarrollada por instituciones académicas en los cuales describen aspectos tales como el marco geológico, la problemática de subsidencia originada por el aprovechamiento intensivo de los acuíferos existentes en la Sabana de Bogotá e información de los puntos de extracción de agua del subsuelo en la zona del proyecto.

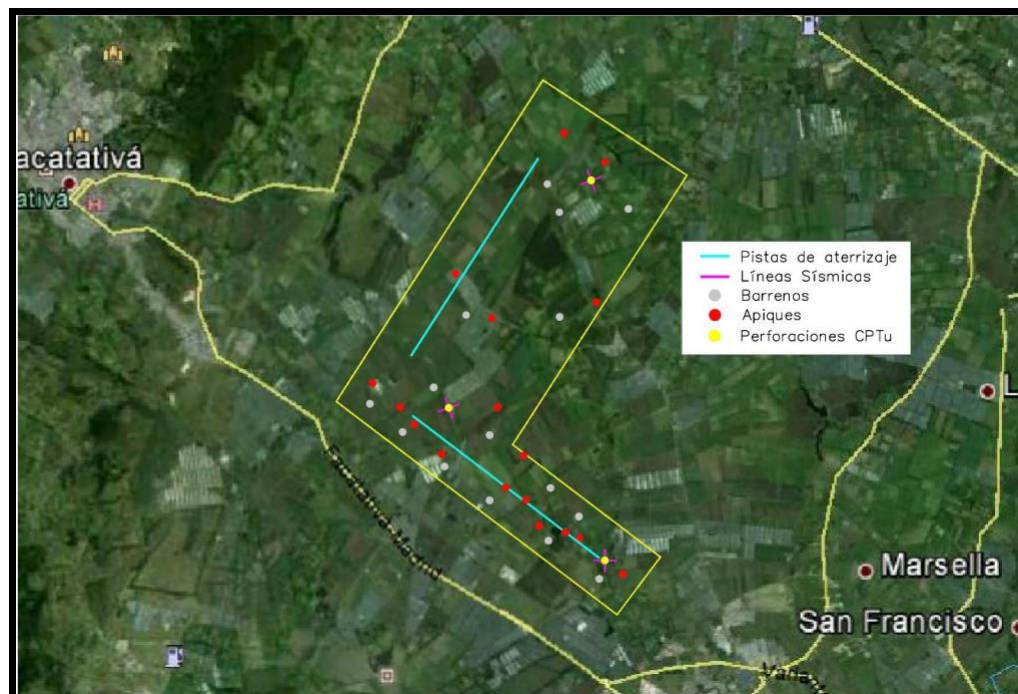
²⁰ AERONÁUTICA CIVIL. Análisis técnico de la viabilidad operacional y elaboración del plan maestro aeroportuario para el proyecto de infraestructura El Dorado II. Capítulo 2 – Evaluación de condiciones existentes. Bogotá. 2016, p. 7.

4.4.2. Exploraciones de campo y ensayos.

La investigación geotécnica realizada sobre el polígono definida en común acuerdo con personal de la AEROCIVIL y en concordancia con lo establecido en los términos de referencia del proyecto se encaminó a la identificación de los materiales presentes en la zona del proyecto y la obtención de muestras para la ejecución de ensayos de laboratorio con el objetivo de establecer principalmente propiedades geomecánicas de los materiales que conformarán la subrasante de las pistas proyectadas. Este estudio está incluido en el Plan Maestro ED II.

El programa de exploración para los estudios geotécnicos comprendió la ejecución de 17 apiques, 15 barrenos manuales, 1200 m de líneas sísmicas y tres exploraciones profundas ($L > 20$ m) mediante pruebas de CPT, observados en la imagen 9.

Imagen 9 – Localización exploraciones geotécnicas.



Fuente: <https://goo.gl/3dyBBG>

Durante la ejecución de los trabajos de exploración en dicho estudio se ejecutaron pruebas de campo para establecer las propiedades in-situ de los materiales encontrados y adicionalmente, se tomaron muestras de suelo para la ejecución de pruebas de laboratorio.

La distribución de los apiques y barrenos se definió teniendo en cuenta que el 70% de las exploraciones estarían ubicadas en la pista sur y el 30% restante en el resto del polígono. Lo anterior en razón a que de acuerdo con la Aeronáutica Civil la prioridad de construcción es la pista sur. El espaciamiento de las exploraciones fue de aproximadamente 600 m en la pista sur y en la pista occidental 1500 metros.

Se ejecutaron 17 apiques de dimensiones de 1mx1mx2m de profundidad. En la pista sur se ubicaron 11 apiques y en la pista occidental se ubicaron 6 apiques. Se tomaron muestras en bolsa para realizar ensayos de humedad natural, límites de Atterberg y granulometría. Adicionalmente, se tomaron CBR inalterados, se efectuaron ensayos de cono dinámico y se muestrearon suelos en tubos Shelby para realizar ensayos de laboratorio de compresión inconfiada, consolidación y corte directo.

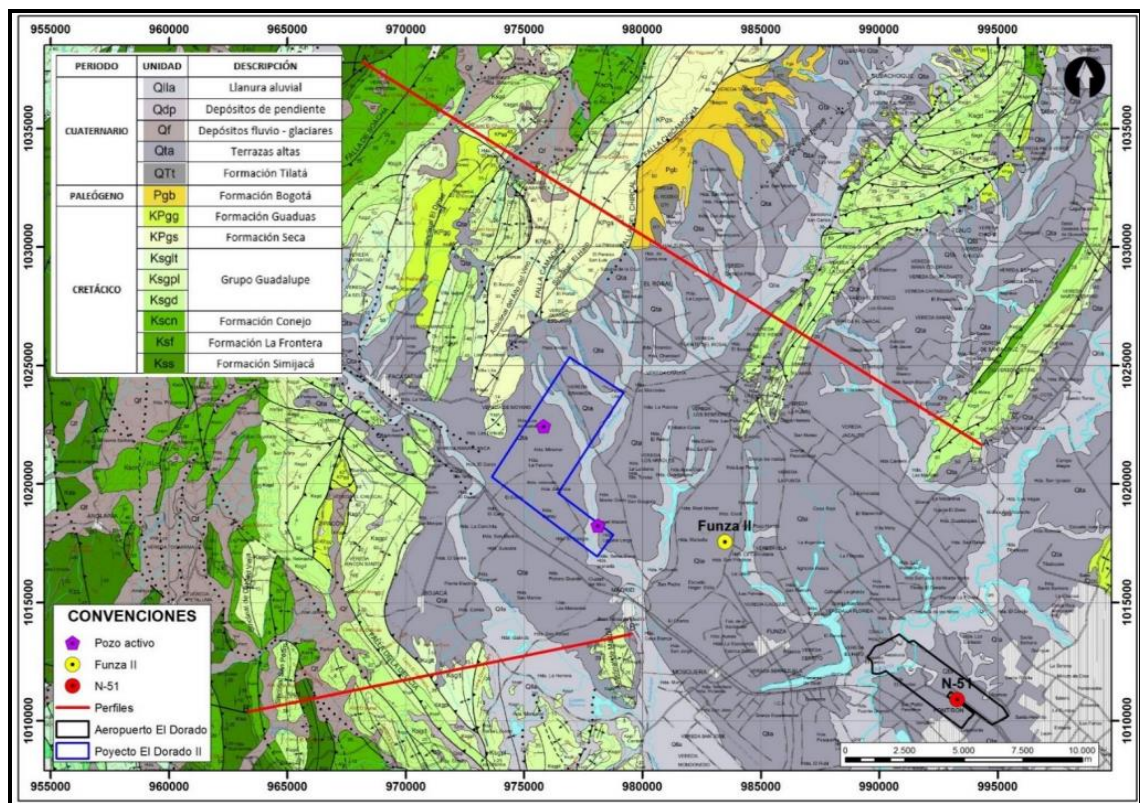
4.4.3. Marco geológico.

El proyecto Nuevo Aeropuerto EDII se localiza en el extremo occidental de la Sabana de Bogotá a 2,5 km del tren estructural N–E que forman unidades de rocas de edad Cretácica y Neógeno que dan origen al relieve montañoso del sector. El proyecto se emplaza en sedimentos del Pleistoceno- Holoceno de origen lacustre – aluvial, transportados por drenajes como los ríos Subachoque y Bogotá, y numerosos tributarios. Estos sedimentos han formado geometrías de terrazas

altas y bajas llanuras de inundación aluvial, que forman los valles de los ríos que disecan la Sabana de Bogotá.²¹

El Proyecto está localizado en el flanco occidental del sinclinal de Subachoque, que hace parte del sistema plegado de la Cordillera Oriental y se caracteriza por sinclinales simétricos y abiertos, anticlinales apretados y fallados. Se evidencian depósitos continuos de sedimentos arcillosos principalmente con intercalaciones de lentes de arenas, turbas y lignitos de hasta 600 metros aproximadamente, lo cual permite considerar una estratigrafía similar en el sector del Proyecto. En la imagen 10 se observa la geología del área del proyecto.

Imagen 10 – Geología del área del proyecto EDII.



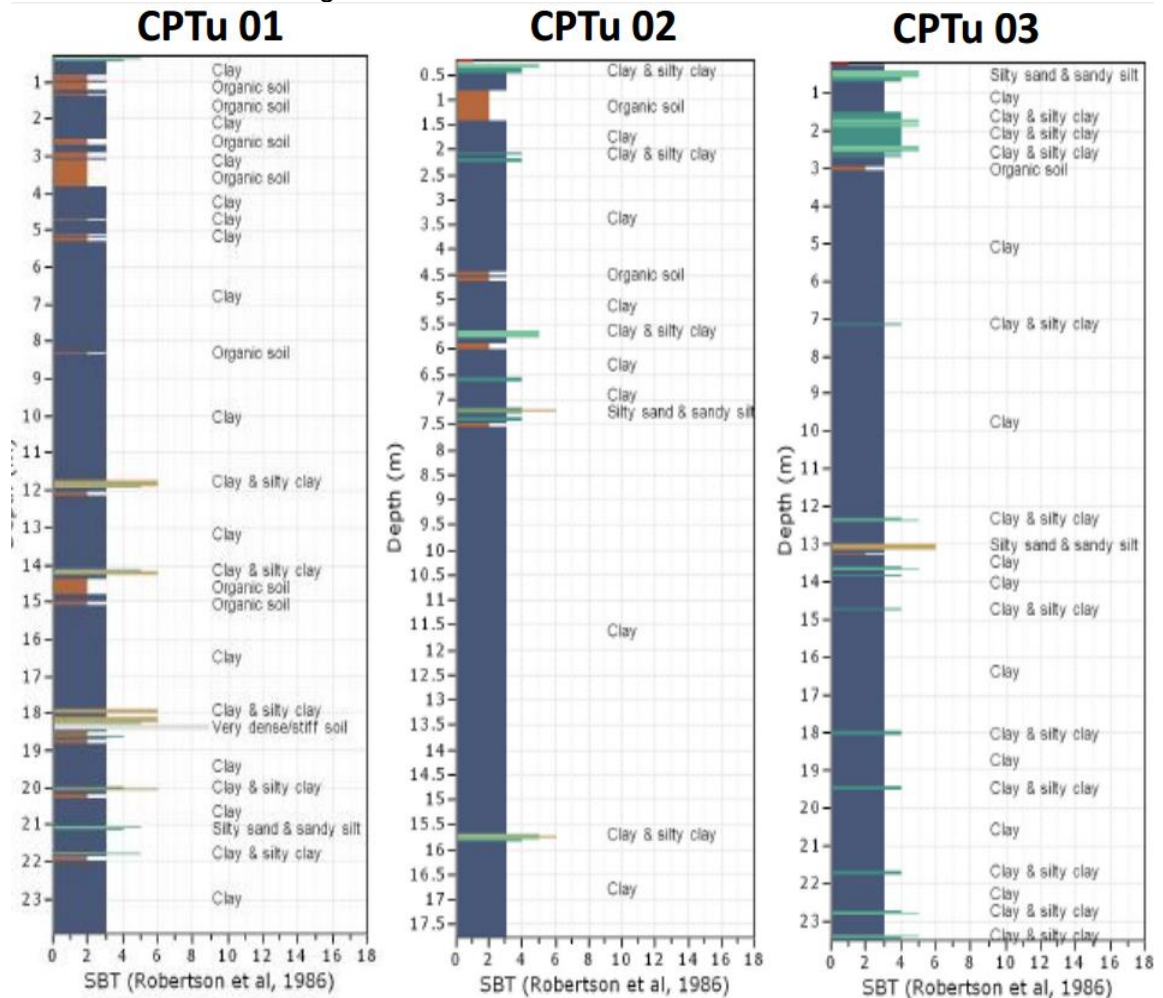
Fuente: <https://goo.gl/3dyBBG>

²¹ Ibid., p. 11.

4.4.3.1. Caracterización de suelos.

Para determinar preliminarmente el tipo de materiales presentes en la zona del proyecto, según se indica en el Plan Maestro del ED II, se efectuó un programa de exploraciones geotécnicas, el cual consistió en la ejecución de apiques manuales, barrenos manuales, perforaciones con CPTu y líneas sísmicas. Dado que los CPTu permitieron una profundidad mayor de exploración, se utilizó la información así obtenida para identificar los materiales presentes en la zona, información que se observa en la imagen 11.

Imagen 11 – Materiales identificados con CPTu.



Fuente: <https://goo.gl/3dyBBG>

CONVENCIONES	
	Arcilla
	Suelo orgánico
	Arcilla y arcilla limosa
	Arena limosa y limo arenoso

La Sabana de Bogotá se caracteriza por la ser una “Zona de Suelos Blandos”, de la Formación Sabana, que tiene presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad, donde en los primeros 60 m de profundidad es posible encontrar valores de límite líquido en un amplio intervalo que varía de 30% a más de 200% y disminuye en profundidad a un valor del orden de 30%.

Dadas las condiciones de formación de los materiales allí presentes, las resistencias de los mismos son bajas y presentan una alta deformabilidad. Por esta razón, el diseño de cualquier estructura proyectada en este sector, como sería el caso para el EDII, requerirá el desarrollo de un programa de exploración geotécnica detallado, en el cual se estimen las propiedades de resistencia y deformación de los materiales de cimentación y la definición del sistema de cimentación acorde con las tolerancias particulares de cada estructura y a las deformaciones esperadas durante su vida útil.

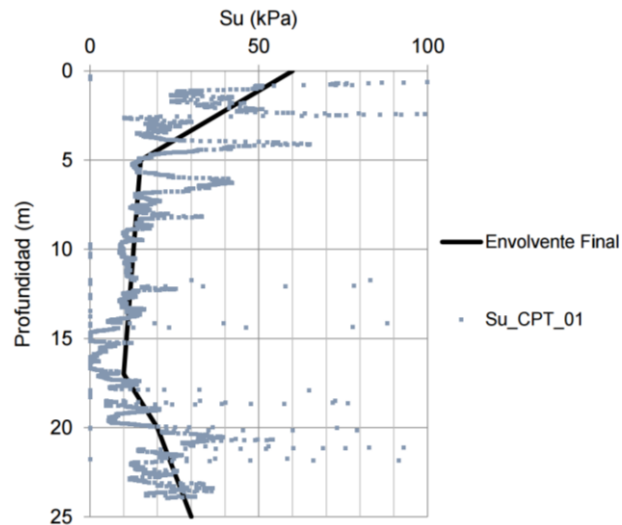
4.4.3.2. Parámetros de resistencia

- Resistencia no drenada:

Se presenta un resumen del comportamiento de la resistencia no drenada (S_u) a partir de la interpretación de las pruebas de CPTu, graficados en función de la profundidad y observados en las imágenes 12 y 13, según lo presenta el Plan

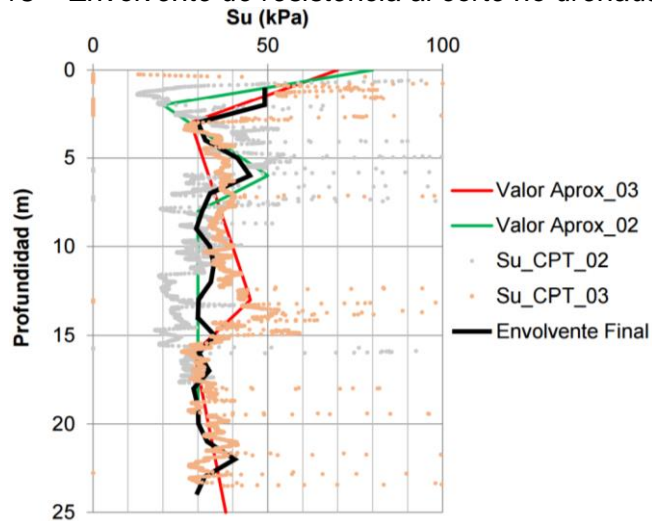
Maestro del ED II. En las mismas gráficas se muestra una envolvente final con la variación de su promedio en profundidad, la cual representa los valores de resistencias adoptados empleado por en las recomendaciones preliminares de cimentación, para la zona 1 (sector norte) y para la zona 2 (sector sur) del proyecto ED II.

Imagen 12 – Envolvente de resistencia al corte no drenada Zona 1.



Fuente: <https://goo.gl/3dyBBG>

Imagen 13 – Envolvente de resistencia al corte no drenada Zona 2.



Fuente: <https://goo.gl/3dyBBG>

- Resistencia drenada:

A partir de los resultados de los ensayos de corte directo ejecutados sobre las muestras inalteradas recuperadas durante la campaña de exploración geotécnica, se estimaron los parámetros de resistencia en condición drenada (c' y ϕ'), que arrojaron los resultados observados en la Tabla 7.

En los resultados obtenidos se observan bajos valores de cohesión indicando que los materiales podrían estar fisurados, lo que es consistente teniendo en cuenta que la profundidad a la cual se extrajeron las muestras es menor a la profundidad a la que se identificó el nivel freático en las pruebas de CPT.

En etapas posteriores del proyecto para el ED II, se deberán adelantar muestreos a mayores profundidades con el propósito de establecer un perfil de resistencia drenada que permita adelantar los diseños de la cimentación de las estructuras que se requieran como parte de dicho proyecto, además, de utilidad para el aquí propuesto sistema monorriel.

Tabla 7 – Resultados determinación parámetros de resistencia al corte drenada.

PROFUNDIDAD (m)	c'	ϕ'
2.8	1	29
3.3	0	27

Fuente: <https://goo.gl/3dyBBG>

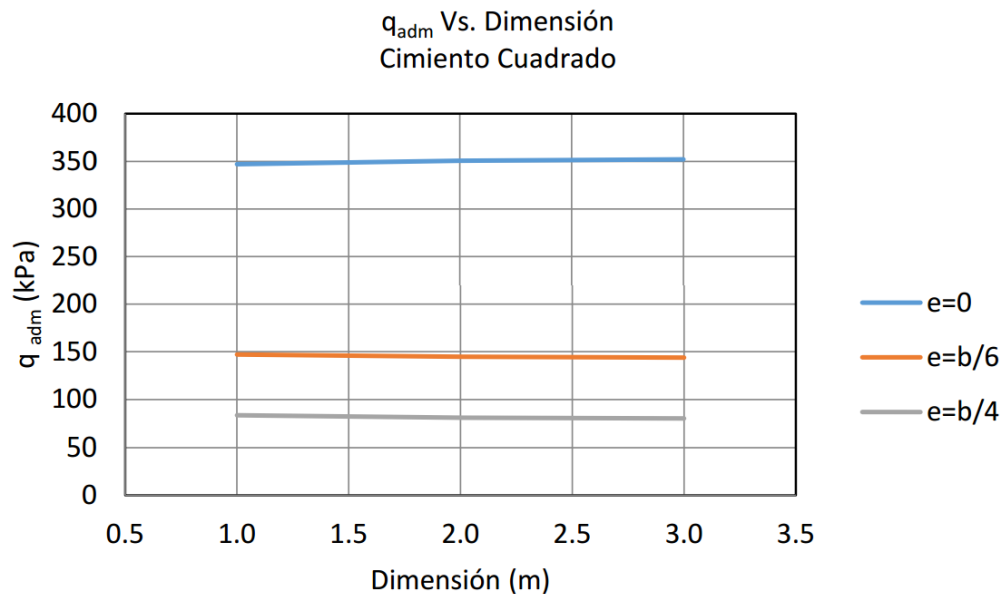
4.4.3.3. Recomendaciones geotécnicas.

- Cimentaciones superficiales:

A continuación se presentan los ábacos de capacidad portante contenidos en el Plan Maestro del EDII, para diferentes grados de excentricidad, en condición drenada y no drenada. Estas recomendaciones se establecen con el propósito de contar con un referente para la definición preliminar de las dimensiones de los cimientos de estructuras livianas.

En la imagen 14 se presentan las recomendaciones preliminares de capacidad portante para una profundidad de desplante de 2 m, considerando parámetros de resistencia de largo plazo, los cuales se establecieron a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de corte directo drenado.

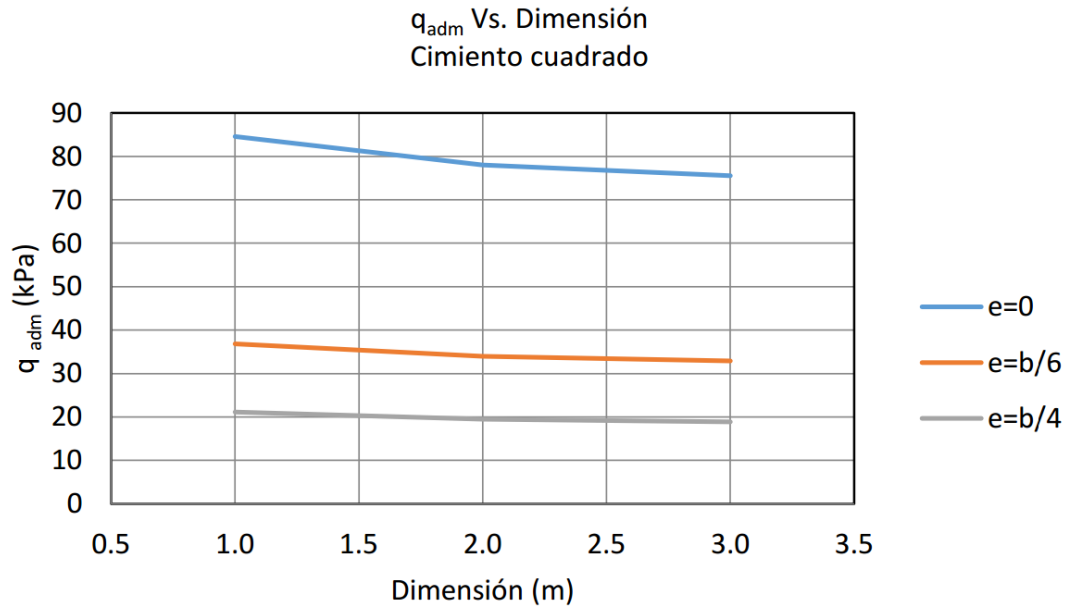
Imagen 14 – Capacidad portante admisible con condición drenada.



Fuente: <https://goo.gl/3dyBBG>

En la Imagen 15 se presentan los resultados para resistencia no drenada. La profundidad de desplante seleccionada corresponde con el máximo espesor de suelos orgánicos encontrados en la zona del proyecto.

Imagen 15 – Capacidad portante admisible con condición no drenada.



Fuente: <https://goo.gl/3dyBBG>

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y en forma consistente con la respuesta observada de los materiales presentes en la Sabana, la capacidad portante para condición no drenada resulta más crítica y por tanto, deberá emplearse en el predimensionamiento de la cimentación de las estructuras previstas en el proyecto.

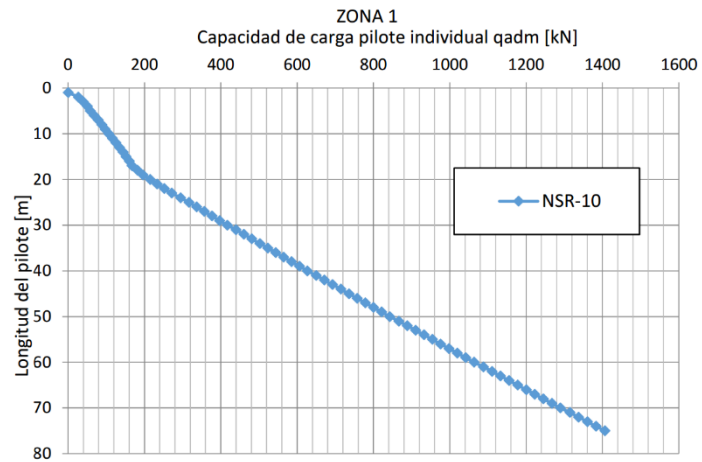
- Cimentaciones profundas:

En la Sabana de Bogotá es común emplear cimientos con pilotes para transferir las cargas de estructuras al suelo de fundación en edificaciones de importancia.

El diseño geotécnico de pilotes contempla el cálculo de capacidad portante, asentamiento y módulos de reacción horizontales y verticales. Existen diversas metodologías de cálculo según el material de cimentación (suelo o roca), el

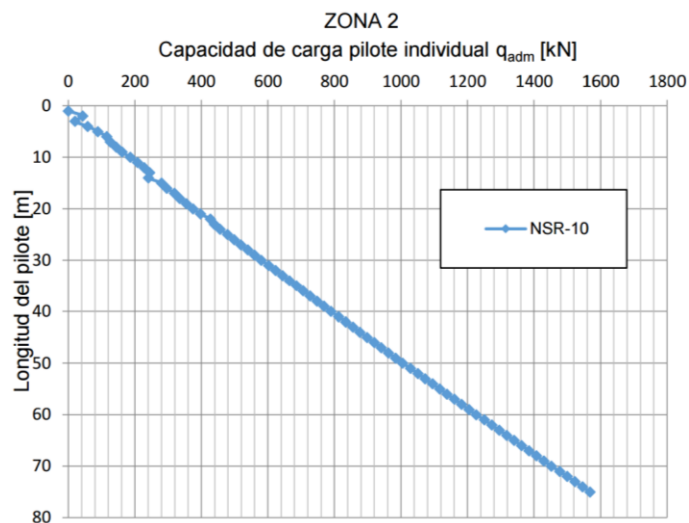
método constructivo (pre-excavado o hincado) y la condición de análisis (a corto plazo o largo plazo). Adicionalmente, las metodologías de cálculo varían en función del tipo de comportamiento del suelo (granular o cohesivo) en el que se encuentra embebido el pilote. En las Imágenes 16 y 17 algunos ábacos para el diseño de pilotes en la zona de estudio.

Imagen 16 – Ábaco de diseño para pilotes Zona 1.



Fuente: <https://goo.gl/3dyBBG>

Imagen 17 – Ábaco de diseño para pilotes Zona 2.



Fuente: <https://goo.gl/3dyBBG>

5. MARCO TEÓRICO

5.1. ¿QUÉ ES UN MONORRIEL?

El término monorraíl o monorriel se usa para describir los sistemas de transporte en los que las sillas o vagones están suspendidos o se desplazan sobre una estructura de un solo riel para transportar mercancías o personas.²²

5.1.1. Tipos.

Están divididos en dos clases generales: monorrieles sobre viga y suspendidos. El tipo más común de monorriel usado actualmente es el monorriel sobre viga, en el que el tren funciona sobre una viga de hormigón armado del orden de 0,5 a 1 m de ancho. Un vagón con neumáticos de caucho se apoya sobre la viga y sus laterales para lograr tracción y estabilidad. Hay también un tipo de monorriel suspendido en el que los vagones del tren están suspendidos bajo el sistema de ruedas. En este diseño las ruedas se mueven dentro de la viga.²³

5.1.2. Aspectos técnicos.²⁴

²² FERROPEDIA. Monorraíl. [En línea]. <http://ferropedia.es/wiki/Monorra%C3%AD>. [citado el 14 de mayo de 2016].

²³ THE MONORAIL SOCIETY. Monorails in history part II. [En línea]. <http://www.monorails.org/tMspages/History2.html> [citado el 20 de mayo de 2016].

²⁴ *Ibíd.* Aspectos técnicos.

- Propulsión: Están propulsados por motores eléctricos alimentados por terceros rieles duales, cables de contacto o canales electrificados sujetos o encerrados en sus vigas de guía.
- Levitación magnética: Los trenes de levitación magnética fueron construidos como monorrieles sobre viga, debido a que este diseño proporciona una alta estabilidad y permite una desaceleración rápida desde velocidades elevadas. Cuando funcionan a toda velocidad, los trenes de levitación magnética flotan sobre el riel, sin entrar en contacto físico con él, siendo los monorrieles más rápidos, superando los 500 km/h.
- Cambio de agujas: Utilizadas para el cambio de dirección o de riel, están construidas en vigas cortas conectadas que adquieren cierta curvatura, pero más limitadas que las de los sistemas férreos.

5.1.3. Ventajas.

En la tabla 8 se observan algunas de las ventajas del monorriel.

Tabla 8 – Ventajas del monorriel.

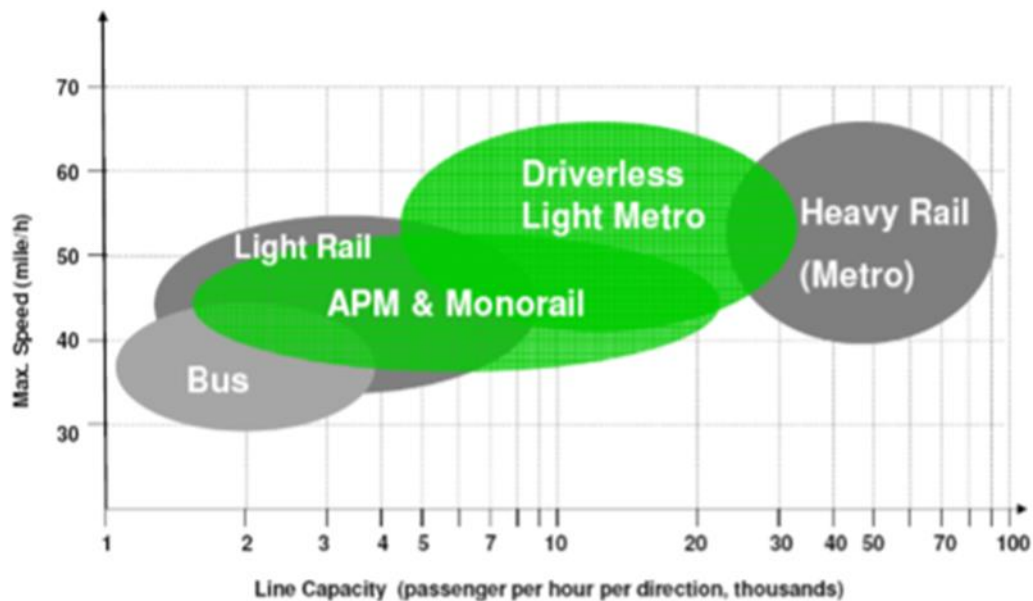
CONCEPTO	VENTAJA
Adquisición de tierras	Menor costo y menor tiempo.
Vista panorámica	Mejor vista que el metro y otro transporte elevado. Visiblemente más atractivos.
Accidentes	No se presentan accidentes con tráfico vehicular o peatonal por ser aéreo, lo que reduce costos.
Tiempo de construcción	Posee la ventaja de emplear prefabricados. No irrumpe con la accesibilidad vehicular.
Costos de operación	Menores a cualquier sistema.
Espacio vehicular	No se reduce el espacio de tránsito vehicular.
Plusvalía	Aporte plusvalía al sector turístico de la ciudad.
Espacio	Requieren un espacio mínimo, tanto horizontal como vertical.

CONCEPTO	VENTAJA
	Demandan de una pequeña superficie para apoyar los pilares.
Excavación	No requiere excavar el terreno, excepto para pilotaje, lo cual disminuye costos.
Ruido	Son más silenciosos los modelos modernos que usan ruedas de caucho sobre una pista de hormigón.
Comportamiento en pendientes	Son capaces de subir y descender mayores pendientes que los sistemas sobre rieles convencionales pesados o ligeros.
Seguridad	Los monorrieles sobre vigas rodean su riel y por tanto son físicamente incapaces de descarrilar, salvo si la propia viga sufre un grave daño, lo que hace que los monorrieles tengan unos buenos registros de seguridad.

Fuente: <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/1777/1/RI001315.pdf>

En la imagen 18 se aprecia que el monorriel es la opción que abarca mayor capacidad de pasajeros con una velocidad superior a los 80 km/h, solo superado por el costoso metro pesado, y por el LRT, superando este último por su capacidad de pasajeros y mejorando en capacidad y velocidad al bus.

Imagen 18 – Comparativo de capacidad sistemas monorriel.



Fuente: *Automated People Movers and Automated Transit Systems 2016.*

5.1.4. Desventajas.

En la tabla 9 se observan algunas de las desventajas del monorriel.

Tabla 9 – Desventajas del monorriel.

CONCEPTO	DESVENTAJA
Mantenimiento de vías	Mayor costo y dificultad por ser aéreo.
Aceptación	Rechazo en tempranas etapas de planeación.
Costo capital	Mayor al metro y tren ligero
Eficiencia	Menor capacidad y velocidad de usuarios, pero mayor eficiencia de funcionamiento.
Integración	Los monorrailes de levitación magnética requieren una vía altamente dedicada y no pueden ser integrados fácilmente con ningún otro sistema de transporte.
Tamaño	Los monorrailes suelen ser más pequeños que los metros pesados, lo que incrementa el número de unidades necesarias para igualar la capacidad de los sistemas de metro.
Diseño	Por diseño, un cambio de agujas monorriel dejará una viga colgando en mitad del aire en algunos momentos. Un cambio incorrectamente posicionado o atascado podía así provocar que el monorriel descarrilase y cayera, si bien este riesgo puede mitigarse mediante un diseño cuidadoso y no hay casos documentados de tales accidentes.
Emergencias	En caso de emergencia, los pasajeros no pueden evacuar inmediatamente el vehículo debido a que éste suele estar elevado y no todas las instalaciones cuentan con pasarelas de emergencia.

Fuente: <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/1777/1/RI001315.pdf>

5.1.5. Características.

5.1.5.1. Velocidad.

Las velocidades con las que opera este tipo de sistema son de alguna manera inciertas. En la Tabla 10 se muestra una comparación de las velocidades promedio de operación de los sistemas de transporte más comunes.

Tabla 10 – Velocidades promedio de operación comparativa.

TIPO DE VEHÍCULO	VELOCIDAD km/hora
Monorriel	40
Tren ligero	24
Trolebús	15
Autobús local	17
Automóvil	30

Fuente: <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/1777/1/RI001315.pdf>

En promedio, los sistemas monorriel utilizados hasta ahora transportan del orden de 3000 personas por hora, pudiendo incrementar al doble su capacidad haciendo los periodos de interfase entre estaciones, pasando de 4 minutos a solo 2. Sin embargo, sistemas más modernos están atendiendo capacidades mucho mayores.

5.1.5.2. Costos.

Por ser una obra con tantas variables, no se puede definir un costo por kilómetro lineal general, sino hasta contar con un estudio detallado. En la tabla 11, algunos de los factores que influyen en el costo definitivo del sistema son los siguientes:

Tabla 11 – Factores que influyen en el costo del monorriel.

FACTOR	VARIABLE
Longitud del sistema	En cuanto más grande el sistema, menor el costo.
Topografía	Según su topografía (plano o montañoso), depende el costo de la obra civil.
Ubicación	Impedimentos para el equipo de construcción.
Servicios	Reubicación de cañerías, redes eléctricas, redes telefónicas, etc.

FACTOR	VARIABLE
Tierra	Cantidad de tierra a comprar, arrendar o expropiar.
Pasajeros	Tamaño y número de vehículos
Velocidad	Necesidad de velocidad en el sistema y distancias a recorrer.
Estaciones	Cada estación necesaria añade un costo al sistema.
Estructura especial	Reconstrucción a la estructura urbana existente.
Condiciones geotécnicas	Condiciones del suelo.
Impacto ambiental	Las necesidades de paredes de sonido, utilización de áreas protegidas, etc.

Fuente: <http://www.monorails.org/>

En la tabla 12 se presenta un resumen del costo de algunos de los monorrieles del mundo:

Tabla 12 – Costo monorrieles en el mundo.

TIPO DE SISTEMA	COSTO / AÑO	UBICACIÓN
Hitachi	US\$ 15 millones/km 1964	Tokio - Haneda, Japón
Hitachi	US\$ 62 millones/km 1985	Kitakyushu, Japón
VSL	US\$ 25 millones/milla 1995	Bally's, Las Vegas
Hitachi	US\$ 27 millones/km \$44 millones/milla 2003	Okinawa, Japón
Kuala Lumpur	US\$ 36 millones/km 2003	Kuala Lumpur, Malasia
Bombardier MVI	US\$ 88 millones/milla 2004	Monorriel Las Vegas
Hitachi	US\$ 73.4 millones/km 2006	Palm Jumeirah, Palm Island
Scomi	US\$ 27.25 millones/km 2008	Mumbai, India

Fuente: <http://www.monorails.org/tMspages/HowMuch.html>

5.1.5.3. Experiencia.

- De los Monorrieles que existen en Japón, ocho son sistemas de tránsito urbano a escala completa.
- El Sistema Monorriel de Disney World es el que tiene el uso acumulado más intenso de todos los monorrieles de transporte vigentes. Más de 100.000 viajes de pasajeros se registran cada día en los 14 kilómetros de vías y seis estaciones. Más pasajeros que la mayoría de los otros sistemas de ferrocarril de EE.UU. y no solo para divertirse.
- El Tokio-Haneda Monorraíl ha estado operando desde 1964. Este sistema de doble haz de ocho millas es de propiedad privada y ha dado beneficios por años.
- El Seattle Center Monorail, construido en 1962 para la exposición del siglo XIX, está dirigido por una empresa privada. A cambio de la concesión para operar el sistema de 1.2 millas, la empresa paga a la ciudad US\$ 75.000/año.

5.1.6. Algunos monorrieles en el mundo.

5.1.6.1. Monorriel en Chiba, Japón.

Se encuentra en Japón y es el monorriel suspendido más largo de todo el mundo con una longitud de 15,2 kilómetros, siendo cada vez mayor, ya que desde su inauguración, en el año 1988, no ha dejado de crecer. A lo largo de esta longitud el tren efectúa 18 paradas. Se puede observar en la imagen 19. ²⁵

²⁵ STRUCTURALIA. Monorrieles en el mundo. [En línea].
<http://www.structuralia.com/es/novedades/item/10001675-monorrieles-en-el-mundo>. [citado el 15 de mayo de 2016].

Imagen 19 – Monorriel Chiba, Japón.



Fuente: <http://goo.gl/MxBWLw>

5.1.6.2. Monorriel en Shonan, Japón.

Conecta las ciudades de Kamakura y Fujisawa, al sur de Tokio, en Japón, con una línea de una longitud de 6,6 kilómetros, en los que se distribuyen un total de 8 estaciones. El monorriel Shonan observado en la imagen 20, entró en funcionamiento en el año 1970.²⁶

Imagen 20 – Monorriel Shonan, Japón.



Fuente: <http://goo.gl/MxBWLw>

²⁶ Ibid., Monorriel Shonan.

5.1.6.3. **Monorriel en Sydney, Australia.**

Esta línea, que se utilizaba en Sydney, en Australia, tenía 3,6 kilómetros en los que realizaba 8 paradas. Entró en funcionamiento en el año 1988, pero se encuentra en desuso desde junio del 2013. Se puede observar en la imagen 21. ²⁷

Imagen 21 – Monorriel Sydney Australia.



Fuente: <http://goo.gl/MxBWLw>

5.1.6.4. **Monorriel en Medellín, Colombia.**

El futuro monorriel propuesto en Medellín, observado en la imagen 22, tendrá una longitud de 7,4 kilómetros en los que habrá un total de 9 estaciones y contribuirá a mejorar la conexión de ciertas zonas marginadas de Medellín, aumentando la movilidad de más de 140.000 habitantes de la ciudad. Unirá la estación de Santo Domingo con la de Villa Sierra, integrándose a la actual línea de metro. El costo del proyecto será de unos 300 millones de dólares.²⁸

²⁷ Ibid., Monorriel Sydney.

²⁸ Ibid., Monorriel Medellín.

Imagen 22 – Monorriel Medellín, Colombia.



Fuente: <http://goo.gl/MxBWLw>

5.1.6.5. Monorriel en Sao Pablo, Brasil.

Su primer tramo con una extensión de 26 Km fue inaugurado en 2014, este monorriel es uno de los pioneros en transporte masivo de este tipo en Latinoamérica, está proyectado para una construcción de 100 Km, tres líneas y 49 estaciones, la primera línea Extensao da Linha 15-Prata (Línea 15-Silver), tiene 54 trenes con 7 carros con una capacidad de 1000 pasajeros.

En la tabla 13 se presenta un resumen con algunos monorrieles en operación:

Tabla 13 – Algunos monorrieles en operación en el mundo.

UBICACIÓN	AÑO INAUGURACIÓN	KM / ESTACIONES	PASAJEROS AL DÍA
Chiba, Japón	1988	15.5 / 18	40.000
Chongqing, China	2005	20 / 18	380.000
Daegu, Corea del sur	2014	24 / 30	70.000
Kuala Lumpur, Malasia	2003	85 / 11	45.000
Mumbai, India	2011	20 / 18	125.000
Orlando, Florida	1971	22 / 6	150.000
Osaka, Japón	1990	28 / 18	77.900

UBICACIÓN	AÑO INAUGURACIÓN	KM / ESTACIONES	PASAJEROS AL DÍA
Port Harcourt, Nigeria	2012	19 / 14	16.000
Sao Paulo, Brasil	2014	24 / 17	500.000
Tama, Japón	1998	16 / 19	92.700
Tokio-Haneda, Japón	1964	18 / 11	137.900
Wuppertal, Alemania	1910	133 / 20	82.000

Fuente: <http://lat.wsj.com/articles/SB130610874561017915?tesla=y>

6. MARCO LEGAL Y NORMATIVO

A continuación alguna normativa que se tendrá en cuenta:

6.1. RESOLUCIÓN 2176 DE 2015 ²⁹

RESOLUCIÓN 2176 DE 02 DE SEPTIEMBRE DE 2015.

UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE AERONÁUTICA CIVIL.

CONTENIDO: modifica las Resoluciones 130 y 224 de 2015, en lo relacionado con el cuadro informativo de coordenadas georreferenciadas del área seleccionada para la propuesta del nuevo aeropuerto internacional el dorado.

TEMAS ESPECÍFICOS: aeronáutica civil, malla vial, aeropuerto, expropiación administrativa.

DIARIO OFICIAL N°:49624 DE SEPTIEMBRE 3 DE 2015.

Resuelve:

ART. 1º - Modificar el artículo primero de la Resolución 130 de enero 21 de 2015 modificada por la Resolución 224 del 3 de febrero del mismo año, definiendo las nuevas coordenadas oficiales establecidas en el plano referenciado y descritas en la tabla 15:

²⁹ COLOMBIA. PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN. Resolución 2176 (2, septiembre, 2015). Por la cual se modifican las coordenadas de localización de El Dorado II. Bogotá, 2015.

Tabla 14 – Coordenadas modificadas nuevo aeropuerto EDII.

Coordenadas polígono híbrido		
Alternativas de pista 04/22 & 13/31		
Configuración híbrida - Coordenadas polígono		
Identificación punto de esquina	Latitud	Longitud
1	4°49'31.221"N	74°17'8.564"W
2	4°48'42.956"N	74°15'54.459"W
3	4°46'24.725"N	74°17'23.935"W
4	4°45'27.276"N	74°16'7.999"W
5	4°44'57.477"N	74°16'30.443"W
6	4°46'46.915"N	74°18'54.926"W

Fuente: <http://goo.gl/Mby0SL>

Según anotación de los artículos 1 a 5 como complemento a esta resolución.

6.2. PLAN MAESTRO DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL EL DORADO

La Agencia de Comercio y Desarrollo de los Estados Unidos (USTDA por sus siglas en inglés) aprobó, el 25 de Abril del 2011, un préstamo de fondos no reembolsables a la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil) para financiar la preparación de un plan de actualización para el Aeropuerto Internacional El Dorado en Bogotá, Colombia. El propósito de la subvención es actualizar el plan maestro anterior que fue finalizado en el 2001. La actualización del Plan Maestro es de gran importancia dando que desde el 2001 el aeropuerto ha crecido a un paso mucho mayor del estimado llegando a tener más de 20 millones de pasajeros en el 2011. Esto ha dado como resultado que el plan

maestro para el aeropuerto se convierta en prioridad para Aerocivil y el Gobierno de Colombia.³⁰

6.3. DECRETO 1008 DE 2015

MINISTERIO DE TRANSPORTE

DECRETO N° 1008 DEL 15 DE MAYO DE 2015

"Por el cual se reglamenta el Servicio de Transporte Público Masivo de Pasajeros por metro ligero, tren ligero, tranvía y tren-tram"

El presente Decreto tiene como objeto reglamentar la prestación del servicio de transporte masivo de pasajeros por metro ligero, tren ligero, tranvía y tren-tram, y establecer los requisitos que deben cumplir las empresas interesadas en la habilitación en esta modalidad, quienes deberán operar de manera eficiente, segura, oportuna y económica, cumpliendo los principios rectores del transporte, como el de la libre competencia y el de la iniciativa privada, a las cuales solamente se aplicarán las restricciones establecidas por la ley y los convenios internacionales.³¹

³⁰ AERONÁUTICA CIVIL. Actualización del plan maestro del aeropuerto internacional el dorado. [En línea]. <http://www.aerocivil.gov.co/Aerodromos/PMaestros/Documents/El%20Dorado%20Executive%20Summary%20Jan%202014.pdf>. [citado el 15 de mayo de 2016].

³¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 1008 (15, mayo, 2015). Por el cual se reglamenta el Servicio de Transporte Público Masivo de Pasajeros por metro ligero, tren ligero, tranvía y tren-tram. Bogotá: el ministerio. 2015.

6.4. DECRETO 765 DE 1999³²

Alcaldía de Bogotá D.C.

De noviembre 9.

“Por el cual se reglamenta el Acuerdo 6 de 1990, mediante la expedición para la zona de influencia del Aeropuerto El Dorado, correspondientes a los polígonos de reglamentación asignados por los Decretos 735, 736 y 737 de 1993”.

“Ubicar usos comerciales e industriales en el entorno del Aeropuerto (Servicios aeroportuarios, empresariales, financieros, logísticos)”. Para facilitar la reconversión de los usos, el plan establece el tratamiento de renovación urbana (instrumento de planeación que permite actualizar la estructura urbana a las necesidades).

6.5. DECRETO 301 DE 1990³³

Alcaldía de Bogotá D.C.

De mayo 31.

³² ALCALDÍA DE BOGOTÁ. Decreto 765 de 1999. [En línea].
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1646>. [citado el 25 de octubre de 2016].

³³ ALCALDÍA DE BOGOTÁ. Decreto 301 de 1990. [En línea].
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=2122>. [citado el 25 de octubre de 2016].

“Por el cual se dictan disposiciones sobre usos en los terrenos ubicados en inmediaciones del Aeropuerto Eldorado, localizados en zona de influencia de ruido y se dictan otras disposiciones”.

6.6. RESOLUCIÓN 06815 DE 2013³⁴

Ministerio de transporte.

De 6 de diciembre.

“Por la cual se aprueba la actualización del Plan Maestro del Aeropuerto Internacional El Dorado de la ciudad de Bogotá D.C.”

6.7. DECRETO 523 DE 2010³⁵

Sociedad Colombiana de Geotecnia.

De diciembre 16.

“Por el cual se adopta la microzonificación sísmica de Bogotá D.C.”

³⁴ MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 06815 de 2013. [En línea]. <http://www.aerocivil.gov.co/Aerodromos/PMaestros/Documents/Resoluci%C3%B3n%20actualizaci%C3%B3n%20plan%20maestro.pdf>. [citado el 1 de noviembre de 2016].

³⁵ SOCIEDAD COLOMBIANA DE GEOTECNIA. Decreto 523 de 2010. [En línea]. <http://www.scg.org.co/wp-content/uploads/DECRETO-523-DE-2010-MICROZONIFICACION-BOGOTA.pdf>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

7. MARCO GEOGRÁFICO

Este proyecto está enmarcado en la ciudad de Bogotá y las municipalidades de Funza, Mosquera, Madrid y Facatativá en el departamento de Cundinamarca. Tendrá un diámetro máximo de 60 km del ED I, con un tiempo de viaje aproximado de 40 minutos desde su periferia. En la imagen 23 se puede observar esta ubicación y en la Imagen 24 se provee la ubicación de lo que en el plan maestro ED II, se ha llamado Aerotrópolis.

Imagen 23 – Localización proyecto.

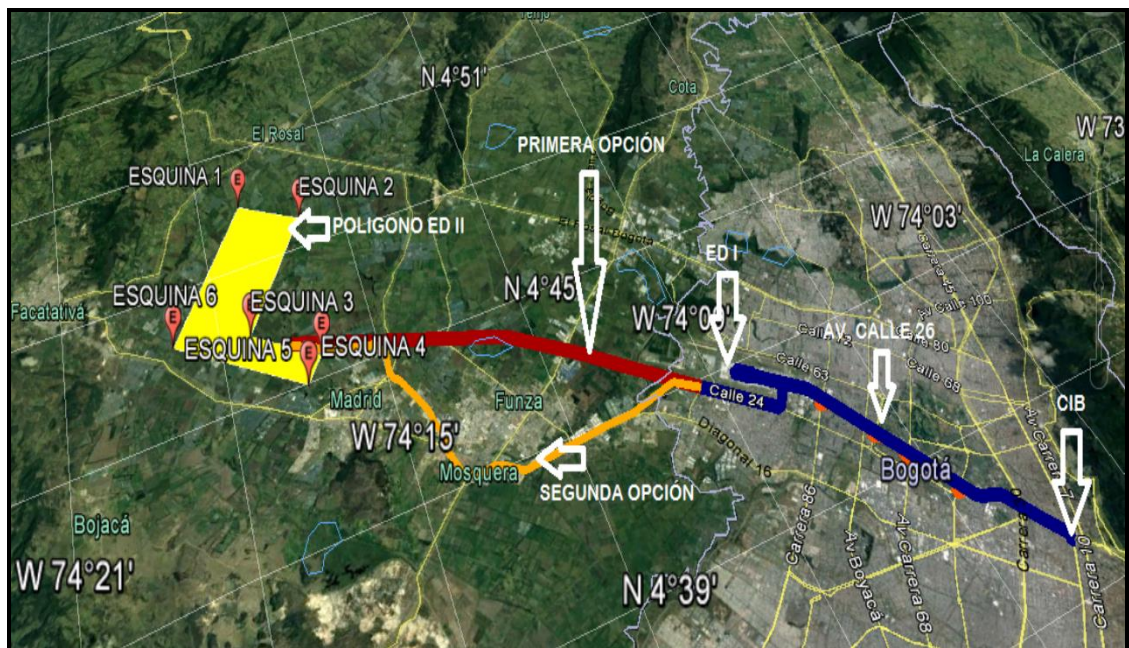
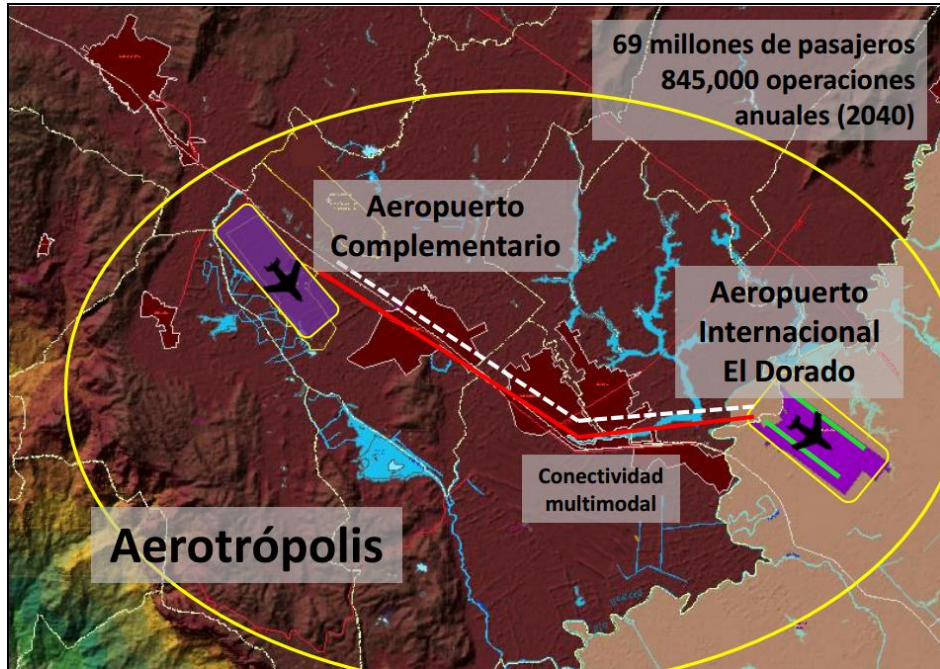


Imagen 24 – Localización proyecto.



Fuente:

file:///C:/Users/usuario/Downloads/Plan%20Maestro%20Aeropuerto%20El%20Dorado.pdf

8. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

8.1. ENFOQUE

El enfoque de esa monografía es cuantitativo, porque se procesara los datos con los que se cuentan para la elaboración de rutas preliminares y por la información obtenida del plan maestro de los aeropuertos EDI y EDII, se puede dar aproximación de la cantidad de viajes necesarios para cubrir la demanda del monorriel como interconexión entre las dos terminales y el centro internacional de Bogotá.

Se dará un modelo del monorriel que se propone con las rutas estimadas como las más optimas en cuanto a condiciones del terreno, menor distancia y comodidad para los viajeros tanto nacionales como internacionales, al unir las terminales aéreas con el centro internacional de la ciudad de Bogotá se pretende ubicar esta obra de infraestructura en una de las pioneras en Latinoamérica además de colocar a la ciudad de Bogotá al nivel de las grandes ciudades del mundo

8.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación será de carácter progresivo.

Este proyecto dependerá básicamente de los factores técnicos que lo encierran, para este tipo de proyectos lo mejor a considerar puede ser una unión publico privada (APP), al ser un proyecto netamente de carácter ingenieril se deben considerar todos los datos necesarios tanto para su construcción como son el estudio de suelos, los cálculos matemáticos para la estructura bien sea por medio

de software con métodos manuales de comprobación, para la inversión en este tipo de proyectos se deben tener en cuenta los aspectos considerados como son la extensión de las rutas, las estaciones, los patios de mantenimiento y los costos de mantenimiento, en su parte contraria se considerará la rentabilidad o no del sistema de interconexión.

8.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Las técnicas de recolección de datos para este anteproyecto serán por el momento observacionales y de las tablas de datos encontradas en los planes maestros de los aeropuertos I y II, las cuales brindan la información en cuanto a la proyección de pasajeros nacionales e internacionales, como también los volúmenes de carga, además de la información encontrada en las diferentes fuentes al alcance para esta investigación, de las que se pueden mencionar se tiene la red social del monorriel (The Monorail Society Website). Se profundizará con otras técnicas de recolección de datos como lo son entrevistas las estadísticas.

8.4. VARIABLES

En la tabla 15 se presentan las variables en las que se basó la presente investigación.

Tabla 15 – Variables.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
Número de pasajeros	Esta es la base de cualquier proyecto de este tipo ya que dé el número de pasajeros a movilizar dependen las

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
	frecuencias a programar y el tipo de vagones (trenes) a usar.
Demanda de transporte	La demanda es otra de las variables muy importantes a considerar, aunque la proyección de esta investigación está dirigida directamente a la demanda en la necesidad de un medio de transporte como interconexión entre aeropuertos y el centro internacional de Bogotá, esto hace que la demanda esté garantizada.
Geología	Del tipo de terreno y sus características físicas (capacidad portante), depende la cimentación y estructura a utilizar para el monorriel.
Distancia	Se toma en cuenta porque fija las frecuencias de los trenes, y la cantidad de pasajeros que se van a movilizar. Brinda el mejor trazado según tiempos de operación para las rutas a estudiar en esta investigación.
Predios	Para el sistema monorriel se verifica la cantidad de predios ubicados en el trazado de la ruta, para su posible compra o expropiación.
Vías y tráfico vecino	Se toma en cuenta por la no interferencia en el trazado de la ruta del monorriel con las vías conexas al proyecto.

Fuente: propia.

8.5. FASES DE INVESTIGACIÓN

En la tabla 16 se presentan las fases en las que se basó la presente investigación.

Tabla 16 – Fases.

FASES	DESCRIPCIÓN
FASE A: Determinar, mediante la identificación de características técnicas y económicas de sistemas monorriel internacionales, las condiciones favorables y no favorables como medio de conexión expresa y efectiva entre los Aeropuertos EDI y II y con el centro Internacional de Bogotá, según necesidades actuales de un servicio de calidad para el transporte por vía aérea en Bogotá.	En esta fase se deben tener en cuenta las experiencias de otros países y fundamentar la favorabilidad de este proyecto, porque es un sistema cómodo totalmente amigable con el medio ambiente y con calidad como medio de transporte.
FASE B: Establecer, por medio del estudio de las características físicas de los sistemas monorriel	Aquí entran en juego los estudios de suelos, los cálculos estructurales básicos para la construcción de este sistema de transporte, que

FASES	DESCRIPCIÓN
y su infraestructura vial, las condiciones estructurales básicas y constructivas elementales requeridas para implementar un sistema monorriel adecuado a la situación en consideración.	en su parte fundamental solo implica conservar los estándares internacionales para la implementación e implantación de este sistema.
FASE C: Realizar propuesta de trazado para la implementación del sistema de transporte tipo monorriel, basándose en análisis somero y en prospectiva de información secundaria sobre condiciones relevantes (suelo, predios, vías aledañas y sus condiciones de tráfico vehicular), junto con las necesidades de traslado ágil a los aeropuertos EDI y II.	Aquí se deben proyectar las rutas de manera conveniente para hacer de este sistema un medio de interconexión confiable, con puntualidad y comodidad, para lograr estos objetivos se deben proyectar por lo menos dos alternativas de trazado por sección (Centro internacional-EDI; EDI-EDIII)

Fuente: propia.

9. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tal como se señaló en el Planteamiento del Problema, Capítulo 1, la demanda actual y proyectada de pasajeros que moviliza y movilizará en el próximo futuro EDI, ha indicado su insuficiencia para atender adecuadamente dicho volumen, adicionalmente a las operaciones necesarias también crecientes para movilizar carga. Por lo anterior, en el Plan Maestro del EDII se determina que es necesario un aeropuerto alterno, ya que para el 2041 el número de pasajeros anuales en total será 70 millones.

Es así como se hace necesario considerar un sistema de interconexión entre los dos aeropuertos EDI y EDII, que cumpla con los estándares internacionales sobre aeropuertos y sistemas conexos, incluyendo las facilidades de acceso rápido y efectivo con el centro de la Ciudad; a la vez que le dé a la ciudad y su entorno una visión de modernidad, confort y seguridad para los pasajeros entre aeropuertos y su conexión con el corazón de Bogotá.

Para poder llegar a un análisis más profundo en este tema, se deben considerar los aspectos relacionados con la propuesta de este proyecto de un sistema de transporte que permita adecuarse a las exigencias modernas de movilidad, en este caso un modo tipo monorriel, que se ajustaría en sus múltiples características a dichas exigencias, principalmente de rapidez y comodidad con seguridad. Con este fin, se adentra en detalle a las siguientes consideraciones resultantes del estudio realizado.

9.1. PARTICULARIDADES TÉCNICAS Y ENTORNOS DE UN SISTEMA MONORRIEL PARA LA INTERCONEXIÓN CON ED I Y ED II

La imagen 25 da una idea de lo que es un sistema monorriel, destacándose los principales componentes, a la vez que se incluyen algunas de las ventajas más reconocidas para este modo de transporte.

Imagen 25 – Sistema monorriel típico.



Fuente: <https://goo.gl/s1rRvk>

Varios aspectos de lo mostrado en la figura, ya indican varias características importantes:

- Al ser elevado, las posibles interferencias con desplazamientos vehiculares y peatonales en vías paralelas o en los cruces, son mínimas, incluso con instalaciones e infraestructura a nivel de superficie; esto, de por sí da ventaja para sistemas expresos, como se propone en este proyecto.
- La estructura esbelta y de relativo poco material requerido (un riel de soporte básico) señala relativa facilidad constructiva y de bajo impacto ambiental, incluyendo el visual y sonoro.
- El tipo de estructura basada en pilares acondiciona mejor este sistema para diferentes tipos de suelos, incluyendo suelos blandos y muy húmedos, comunes en Bogotá y zonas aledañas.
- Al ser un sistema eléctrico cien por ciento, es amigable al medio ambiente, por su mínima contaminación, más aprovechando la electricidad en Colombia que es mayoritariamente de origen renovable.
- La operación del monorriel puede ser totalmente automatizada, lo cual da ventajas de precisión en la frecuencia, así como en seguridad por el control y seguimiento continuos.

Se destacan de estos sistemas monorriel-sus bondades ambientales, punto clave para los actuales compromisos del País sobre reducción de emisiones, pues es casi nula su contaminación en el sitio de uso, sin emisiones de CO₂, excepto por la generación térmica de electricidad, que en Colombia es de menos del 40%, predominando la hidroelectricidad. Además, los monorrieles tienen gran flexibilidad para los trazados, ya que aceptan curvas de radios mínimos de 40 metros en sus modalidades más pequeñas, lo cual los hace aptos para líneas incluso bordeando edificaciones, de ser necesario.

La importancia de los sistemas monorraíl da cuenta del desarrollo que estas modalidades están teniendo a nivel mundial, donde su implementación en la solución al transporte está teniendo características que van pasando del escepticismo a un amplio desarrollo, con su uso que data desde el siglo XIX. Con el auge e implementación de servicios ferroviarios desde esa época, el monorraíl surge como una alternativa y variación de dichos sistemas que, si bien no es férreo, si se desplaza sobre un riel (usualmente de concreto).

Aunque los primeros monorraíles fueron usados como medio de transporte de carga, su uso se extendió al servicio de pasajeros, con características técnicas que han evolucionado con las necesidades urbanísticas; desde 1825, con el Cheshunt Railway³⁶ de Reino Unido, el primer monorraíl transportando pasajeros en el mundo de tecnología colgante, hasta la puesta en marcha de los nuevos monorraíles de Sao Paulo en Brasil (2014) con 24 km y Daegu en Corea (2015) de igual extensión, los cuales se deslizan sobre una viga elevada en concreto.

Se evidenció también que con el tiempo el monorraíl ha venido cambiando en cuanto a concepto de uso, porque ha pasado de un uso temático y recreativo a un uso comercial y de servicio de transporte masivo, como en Tokio, Dubái, Brasil, solo por nombrar algunos de los investigados.

En la Tabla 17 se presenta la lista de monorraíles construidos con sus fechas de inicio, compañías que suplieron estos sistemas y demás aspectos técnicos.

Se resalta la cantidad numerosa de sistemas monorraíl que se están poniendo a circular en el mundo, siendo la mayoría de ellos indicados para transporte masivo.

³⁶ THE MONORAIL SOCIETY. Monorails in history part I. [En línea].
<http://www.monorails.org/tMspages/History.html>. [citado el 20 de mayo de 2016].

Tabla 17 – Monorrieles más importantes y recientes en el mundo.

Project Name	Country	Year of Revenue Service	Technology Supplier	System Length (km)	# of Stations	Max. Speed (km/h)
Seattle Monorail	U.S.	1962	Alweg	1.5	2	
Tokyo Monorail	Japan	1964	Hitachi	17.8	10	80
Kitakyusyu Monorail	Japan	1985, 1998	Hitachi	8.8	13	80
Sydney Monorail (decommissioned)	Australia	1988	Bombardier	3.6	8	40
Osaka Monorail	Japan	1990, 1994, 1997	Hitachi	28	18	70
Newark Monorail	U.S.	1996, 2001	Bombardier	4.7	8	40
Jacksonville Monorail	U.S.	1998	Bombardier	4.8	8	56
Tokyo Tama Monorail	Japan	1998, 2000	Hitachi	16	19	60
Okinawa Monorail	Japan	2003	Hitachi	12.9	15	65
Kual Lumpur Monorail	Malaysia	2003	Scomi	8.6	11	80
Las Vegas Monorail	U.S.	2004	Bombardier	6.4	7	80
Chongqing Monorail Line 2	China	2005, 2014	CRC	30.9	24	80
Moscow Monorail	Russia	2008	Intamin	5	6	60
Dubai Palm Monorail	UAE	2009	Hitachi	5.4	4	80
Chongqing Monorail Line 3	China	2011, 2013	CRC	55.5	37	80
Sao Paulo Tiradentes, first section	Brazil	2014	Bombardier	24	17	90
Mumbai Monorail	India	2014, phase 1	Scomi	19.5	17	80
Daegu Monorail	Korea	2015	Hitachi	23.7	30	80

Fuente: APM and Monorails for urban applications Tim Zhang, 2016.

De estos sistemas monorriel también se han indicado limitaciones técnicas y de costos, pero en la investigación realizada se encontró que los mismos tienen características que los hacen viables tanto para usos temáticos como para su uso efectivo en transporte de pasajeros. Sus medios de propulsión también han venido evolucionando y hoy en día se cuenta incluso con medios de levitación magnética (Maglev), como medio de propulsión, con capacidad de velocidades de hasta 500 km/h, por ejemplo, en Changsha, China, Emsland, Alemania e Incheon, Sur Corea.

Dado que los sistemas Maglev son de un costo muy superior por sus propias exigencias técnicas que los monorrieles convencionales, en esta monografía se consideró un sistema como el último indicado, en un mercado cada vez más abierto, donde se dan compañías reconocidas como la Bombardier en Canada, Hitachi y Mitsubishi en Japón, por nombrar solamente algunas, de una larga lista de fabricantes chinos, Ingleses y de los Estados Unidos-

Para este trabajo de investigación, la interconexión entre EDI, EDII y el Centro Internacional de la ciudad de Bogotá, se encontró que no existe un sistema planteado como el que aquí se propone para la comunicación entre los dos terminales, ni sobre la Avenida Calle 26. En ésta Avenida existen medios de transporte, incluido el TM, pero que no llega directamente al terminal del EDI, exceptuando una línea reciente, usualmente requiriendo transbordos engorrosos para la persona que viaja y se desplaza hacia estas terminales aéreas, dejando como alternativas el uso del carro particular o servicio de taxi. Estos prestan un servicio útil pero insuficiente, afectado por las congestiones vehiculares frecuentes.

El monorriel es una opción moderna y que se puede adaptar a entornos ya construidos y proyectos en desarrollo de aeropuertos. En el caso de Bogotá, como alternativa a considerar como posible solución al transporte masivo, dada las deficiencias sobre su malla vial.

La creciente incorporación de autos particulares al flujo vehicular hace caótico y limitante el desplazamiento desde y hacia el Aeropuerto El Dorado. Entre más vías se construyen más automóviles particulares se pondrán a rodar sobre ellas.

Considerando la necesidad de mejoramiento del transporte hacia EDI y su futura interconexión a EDII, el monorriel se muestra con características y modo de operación que facilitaría dicha conexión aeroportuaria, además de indicar reducida

interferencia con el sistema vial existente. El sistema TM existente sobre la Avenida 26 no se vería afectado si se considera como sistema de transporte masivo de utilidad para desplazamientos a lo largo de dicha Avenida, incluyendo, por lo que se consideró como complementario al posible sistema monorriel.

El transporte monorriel sirve no solo a los usuarios regulares de este corredor vial, si no que le dará una mejor y más económica manera de llegar hasta la principal terminal aérea de Bogotá, esto comparado con lo que puede costar movilizarse desde cualquier punto de la ciudad en taxi, con los inconvenientes del tráfico y posibles accidentes que deben enfrentar los viajeros y empleados que se movilizan todos los días.

Aunque esta investigación no incluyó aspectos económicos, se consideró hacer un comparativo de costos entre el monorriel de Haneda, Japón, uno de los más exitosos del mundo, y el transporte en taxi, como el medio actualmente más utilizado para llegar y salir de EDI. Para viajar en el monorriel desde el aeropuerto de Haneda, el costo del tiquete es de 490 Yen, y si se quiere hacer la transferencia al monorriel de Hamamatsucho, se deben pagar 500 Yen, con la que saliendo del aeropuerto, se puede llegar a cualquier punto del centro de Tokio,³⁷ esto traducido a COP es \$14.311,91 a \$14.550,89; mientras que en Bogotá el salir del aeropuerto puede costar \$45.000 en Uber, o en taxi puede costar entre \$25.000 a \$35.000, (a la actual tasa-de cambio de moneda)³⁸.

Este comparativo indica parte de lo que significaría para el transporte de pasajeros el llegar al EDI, de una manera seguramente más económica y a la vez, cómoda, segura y sin los inconvenientes del tráfico diario de la ciudad de Bogotá y el cada vez más caótico transitar sobre la Avenida Calle 26.

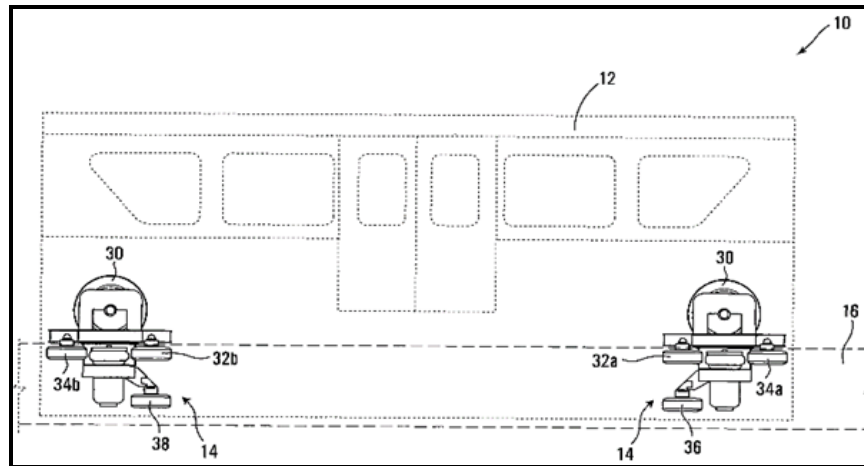
³⁷ TOKYO MONORAIL. Monorail guide. [En línea]. <http://www.tokyo-monorail.co.jp/english/>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

³⁸ BOGOTÁ PASS. Taxis en Bogotá. [En línea]. <http://bogotapass.com/blog-bogotapass/taxis-en-bogota/>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

9.1.1. Sistema de tracción

En las imágenes 26, 27, 28, 29 y 30 se da una idea conceptual de lo que son estos sistemas de propulsión y su emplazamiento en los vagones: Llantas infladas con nitrógeno, impulsado por un motor eléctrico de entre 750 a 1500 Vdc, lo cual lo hace un medio de transporte suave y con niveles de contaminación auditiva casi nulos³⁹. La electricidad es tomada por medio de rieles que varían en materiales de acuerdo al constructor, a cada lado de la viga principal con su polaridad y la energía es tomada por los motores a lo largo de su recorrido.

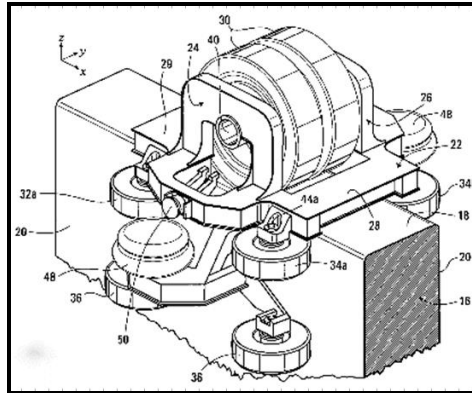
Imagen 26 – Vista lateral del vagón típico.



Fuente: <https://goo.gl/eN10Fh>

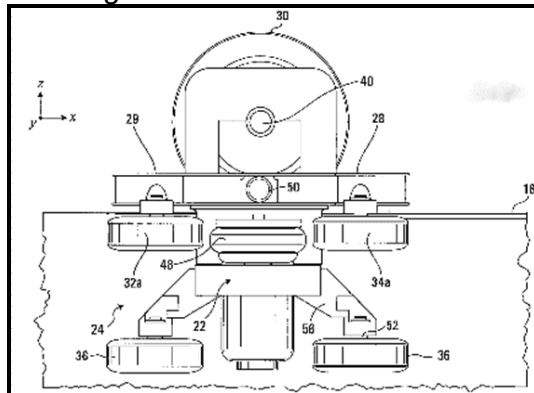
³⁹ EAST JAPAN RAILWAY CULTURE FOUNDATION. New types of guided transport. [En línea]. http://www.ejrpf.or.jp/jrtr/jrtr26/pdf/t58_neh.pdf. [citado el 6 de noviembre de 2016].

Imagen 27 – Isométrico del motor.



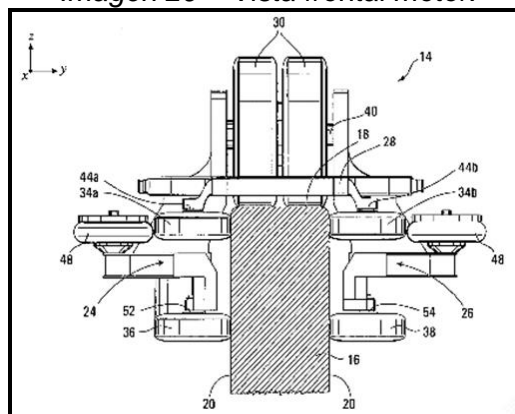
Fuente: <https://goo.gl/eN10Fh>

Imagen 28 – Vista derecha motor.



Fuente: <https://goo.gl/eN10Fh>

Imagen 29 – Vista frontal motor.



Fuente: <https://goo.gl/eN10Fh>

Imagen 30 – Motor Bombardier.



Fuente: <https://goo.gl/2n3Ymq>

Dentro de las ventajas de este rodamiento está la capacidad de tracción en inclinaciones de hasta el 6%, aunque su efectividad se ve un poco reducida en condiciones severas de humedad, sobre todo en zonas geográficas donde en épocas invernales se llega a temperaturas de congelación, aclarando que no es el caso para Bogotá.

9.2. DIFERENCIAS ENTRE LOS MODOS DE TRANSPORTE SOBRE RIELES.

La consulta realizada sobre sistemas monorraíl internacionales indicó una serie de características importantes que permiten establecer comparaciones con otros sistemas sobre rieles, como se detalla a continuación; más cuando en algunos medios se ha mencionado como opciones sistemas ferrocarrileros para comunicar a los aeropuertos EDI y EDII sistemas ferrocarrileros, como el tren ligero.

En este caso, haciendo referencia al tren de cercanías de occidente, anunciado para conectar Bogotá con los Municipios vecinos de Madrid, Mosquera y Facatativá, y que serviría para transportar pasajeros aeroportuarios, aunque no tan eficazmente por tener otro propósito de transporte masivo, como ya se mencionó.

9.2.1. Estética

La estética juega un papel importante en el pasajero y en la parte urbanística. Los metros pesados normalmente son subterráneos e introducen al pasajero a una sensación de encerramiento y oscuridad. Cuando son elevados causan una gran sombra. Los trenes ligeros tienen que ser alimentados de energía por vía aérea lo que hace que se teja una gran telaraña de cables y postes para el soporte de estas líneas de poder. Cuando se hacen elevados causan la misma sensación visual que los metros pesados. El monorriel debe ser considerado como una mejora y no como detrimento de la parte ambiental, su viga principal en la mayoría de los sistemas es de solamente 60 cm de ancho causando un efecto de sombra muy reducido, además del disfrute del paisaje en su trazado, dando una visión elegante y futurista.

9.2.2. Construcción

En los metros pesados se presentan inconvenientes de logística, y su proyección constructiva depende de sus características. Su proceso constructivo puede llegar a la finalización en años causando problemas para todos los comerciantes de la zona, problemas de movilización y los servicios públicos deben ser reubicados.

El sistema constructivo de monorraíles se simplifica debido a que su gran conjunto de pilares y vigas pueden ser construidos aparte y ser llevadas hasta el sitio donde se implementarán. Un ejemplo claro de esto es el monorraíl de las Vegas cuya construcción duro siete meses desde su inicio hasta su puesta en funcionamiento.⁴⁰ En la actualidad ningún otro sistema presenta disminución de tiempos constructivos y está libre de interrupciones tanto viales como en los entornos más cercanos a la construcción.

9.2.3. Costo

Aunque en este proyecto no se incluyó análisis económico, es oportuno mencionar algunos aspectos que serán de importancia para la posible implementación del monorraíl, en comparación con otros sistemas sobre rieles.

Se encontró que los sistemas pesados son los más apetecidos por los constructores y los consultores, debido a que estos aseguran grandes sumas de dinero por varios años, el cual es pagado por los contribuyentes, debido a que el mantenimiento operacional de estos sistemas es costoso.

Por estar a nivel, los sistemas de trenes ligeros que normalmente necesitan de un operador, causan un sobre costo, y son causa de muchos accidentes y pérdida de vidas humanas. En Estados Unidos los costos por demandas de accidentes trágicos de estos sistemas de transporte tienen valores extraordinarios.

En el sistema monorraíl los costos de construcción puede ser muy similares a los de trenes ligeros y en ocasiones un poco más elevados. Estos sistemas han

⁴⁰ THE MONORAIL SOCIETY. Monorail vs. other. [En línea].
<http://www.monorails.org/tMspages/MonoVs.html>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

demostrado que inclusive mediante la financiación privada producen buenos créditos.

9.2.4. Eficiencia y eficacia

Los metros pesados usan rodamientos en acero sobre rieles del mismo material, por lo que el mantenimiento de estos sistemas debe ser constante, con algunos inconvenientes mecánicos que necesitan corrección. Si bien los sistemas férreos consumen mucho menos energía en su rodamiento, aumentando su eficiencia, lo anterior reduce la eficacia del sistema-

En cuanto a los trenes ligeros, una vez que están mezclados a nivel con el tráfico vehicular en zonas densas de la ciudad, están expuestos a los inconvenientes propios de ese tráfico, haciéndolos sistemas de una eficiencia limitada. De todos modos, son sistemas usualmente para transporte masivo, con múltiples paradas y cruces con otras vías.

Para los sistemas monorraíl, se ha comprobado que su confiabilidad es de 99.9%, como ningún otro sistema. Tan solo por nombrar una de sus mejores funcionalidades, está la de sus llantas que pueden durar hasta 161000 kilómetros, haciendo sus costos de operación y mantenimiento (O&M) menores, a la vez que su implementación como sistema totalmente automático mejora su eficiencia operacional.⁴¹

⁴¹ Ibid, Safety.

9.2.5. Seguridad

La figura geométrica de las ruedas metálicas de los metros pesados ocasiona descarrilamiento, como se conoce de los reportes de estos sistemas de transporte. Durante esta investigación se logró constatar que este es el más grande de los problemas de estos sistemas y aunque se ha venido trabajando para mejorar, siempre serán susceptibles de descarrilamiento.

En los trenes ligeros el problema no es menor, lo cual puede complicarse al estar mezclados con la operación de movilidad terrestre, pudiendo ocasionar accidentes no solo con vehículos, sino también con peatones que son los más vulnerables.

En el sistema monorraíl, por la concepción propia de su construcción, se encontró en esta investigación que al tener un riel de uso exclusivo y no mezclarse con el tráfico, la seguridad es mayor que en otros sistemas; no se encontró información de accidentes de connotaciones mayores para el sistema monorraíl, y el descarrilamiento es virtualmente imposible, es por esto que los monorraíles conservan un record de seguridad excelente.

Sin embargo, se han presentado objeciones a la seguridad de los pasajeros en caso de una evacuación en la vía elevada, pero esto es atendido con tener previsto unidades de rescate especializadas que utilizarían la vía paralela (del sentido opuesto), con coches equipados con rampas especiales para el traslado de uno a otro coche lateralmente dispuesto; también, existirán rampas entre los rieles paralelos de ambos sentidos cada cierta distancia para facilitar la evacuación.

9.3. CONDICIONES ESTRUCTURALES Y CONSTRUCTIVAS BÁSICAS DEL MONORRIEL

A lo largo de esta investigación se encontró que los sistemas monorriel tienen características que los hacen únicos dentro de los medios de transporte que se consideran sobre rieles; a la vez, también se notó que para la propuesta expuesta aquí, se tienen varias alternativas que se pueden adaptar a las necesidades dadas por la demanda y para enfrentar los inconvenientes propios de las áreas por donde circulará el monorriel sobre zonas ya urbanizadas. Su construcción elevada facilita lo anterior, incluyendo la casi completa eliminación de interferencias con otro tránsito vehicular y peatonal.

9.3.1. Condiciones estructurales

Es amplia la información encontrada en cuanto a las condiciones estructurales que se necesitan para la implementación de un sistema monorriel. Aunque existen muchas maneras constructivas, se puede afirmar que las estructuras tan solo varían de acuerdo a los suelos encontrados a lo largo del trazado.

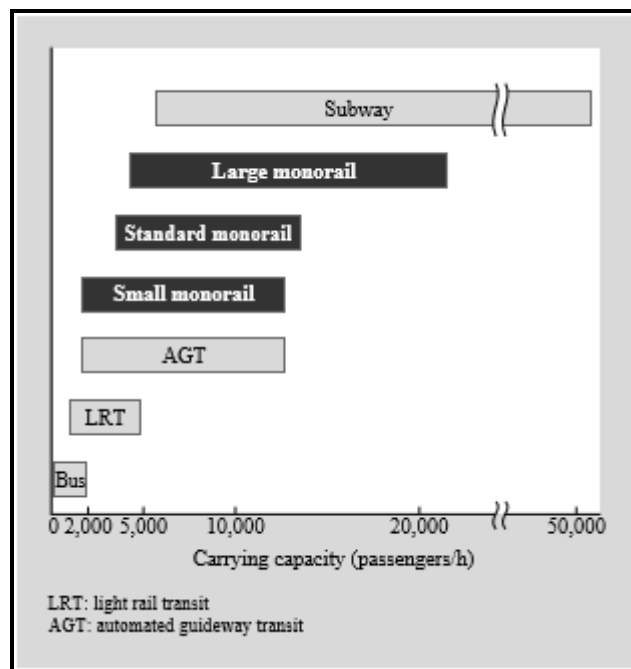
Dada la necesidad para esta investigación de basarse en información técnica existente sobre los sistemas monorriel en operación y los que actualmente se implementan, de las diferentes compañías productoras de estos sistemas, esta investigación se centralizó en dos de las compañías más reconocidas y que han producido la mayoría de estos sistemas, como lo son la Bombardier, posicionada en Canadá (con muchas sucursales a nivel internacional) y la Hitachi en el Japón.

Se encontró que los monorraíles de acuerdo a su capacidad de transporte están clasificados en tres categorías principales, indicadas en la imagen 36, donde se indica su capacidad de pasajeros por hora:⁴²

- Monorraíles pequeños.
- Monorraíles grandes.
- Monorraíles compactos o estándar.

En la imagen 31 se observa la capacidad (pasajeros/h) de los diferentes sistemas de transporte más utilizados para transporte masivo, pudiéndose apreciar cómo el monorraíl presenta un amplio rango de capacidades que compiten con los otros medios.

Imagen 31 – Capacidad de carga de los diferentes sistemas de transporte.

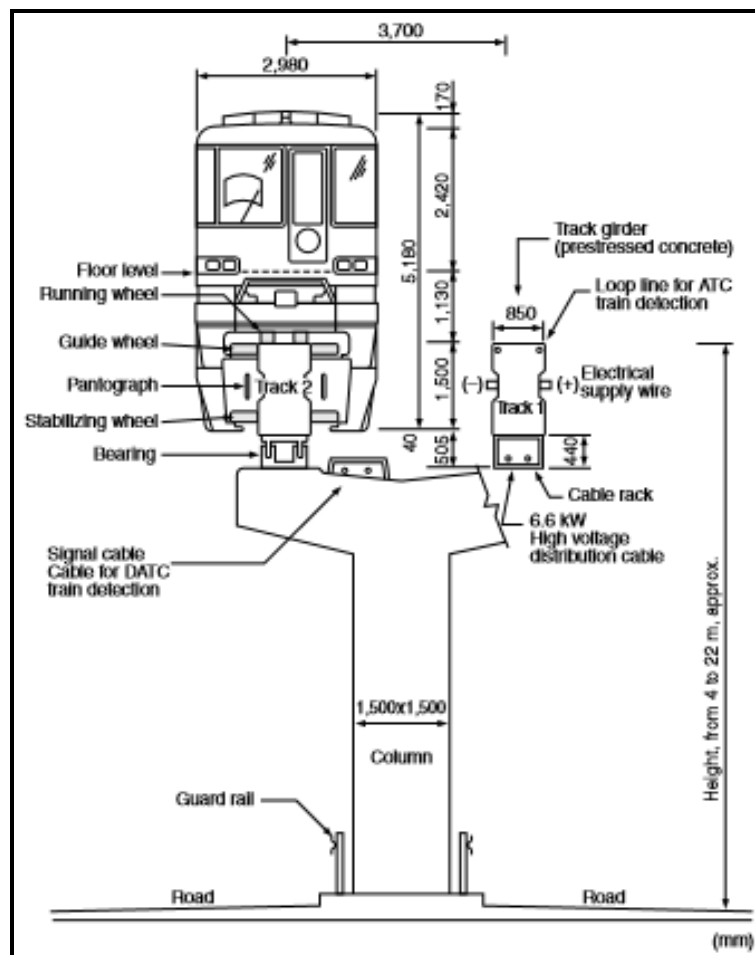


Fuente: <http://www.monorails.org/pdfs/Hitachi2004.pdf>

⁴² PIRGIDIS, Christos. Railway transportation systems. [En línea]. <https://goo.gl/GpqRbR>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

En la imagen 32 se observan las características básicas tanto estructurales como físicas del monorriel el cual, siendo fabricado de manera estándar, las mayores variaciones se encuentran en la construcción de las vías, de acuerdo a las necesidades de las columnas y sus alturas correspondientes, dando especial atención a las dimensiones de los vagones que pueden variar de acuerdo a la clasificación mencionada anteriormente, debido en gran parte a las diferentes cargas a soportar.

Imagen 32 – Esquema de modelo Hitachi de monorriel.



Fuente: http://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr26/pdf/t58_neh.pdf

Es preciso acotar que las dimensiones de la viga, dependientes del peso de los vagones y de los esfuerzos que aplican sobre la estructura, varían según su diseño específico y de la compañía que suplirá los vagones. En el caso de Hitachi, como se puede ver en la imagen 33, las vigas sobre las cuales rueda el monorriel son de 1,50 m de alto por 0,70 m de ancho, para la versión de los monorrieles pequeños y de 0,85 m para los grandes y compactos. Los vagones de tamaño pequeño pueden transportar 79 pasajeros por vagón, el 100 pasajeros y los grandes 173, dando como resultado una capacidad de 2000 pasajeros por hora en los pequeños y hasta 25000 en los estándar y grandes. La vida útil de estos vagones es de 30 años como mínimo.⁴³

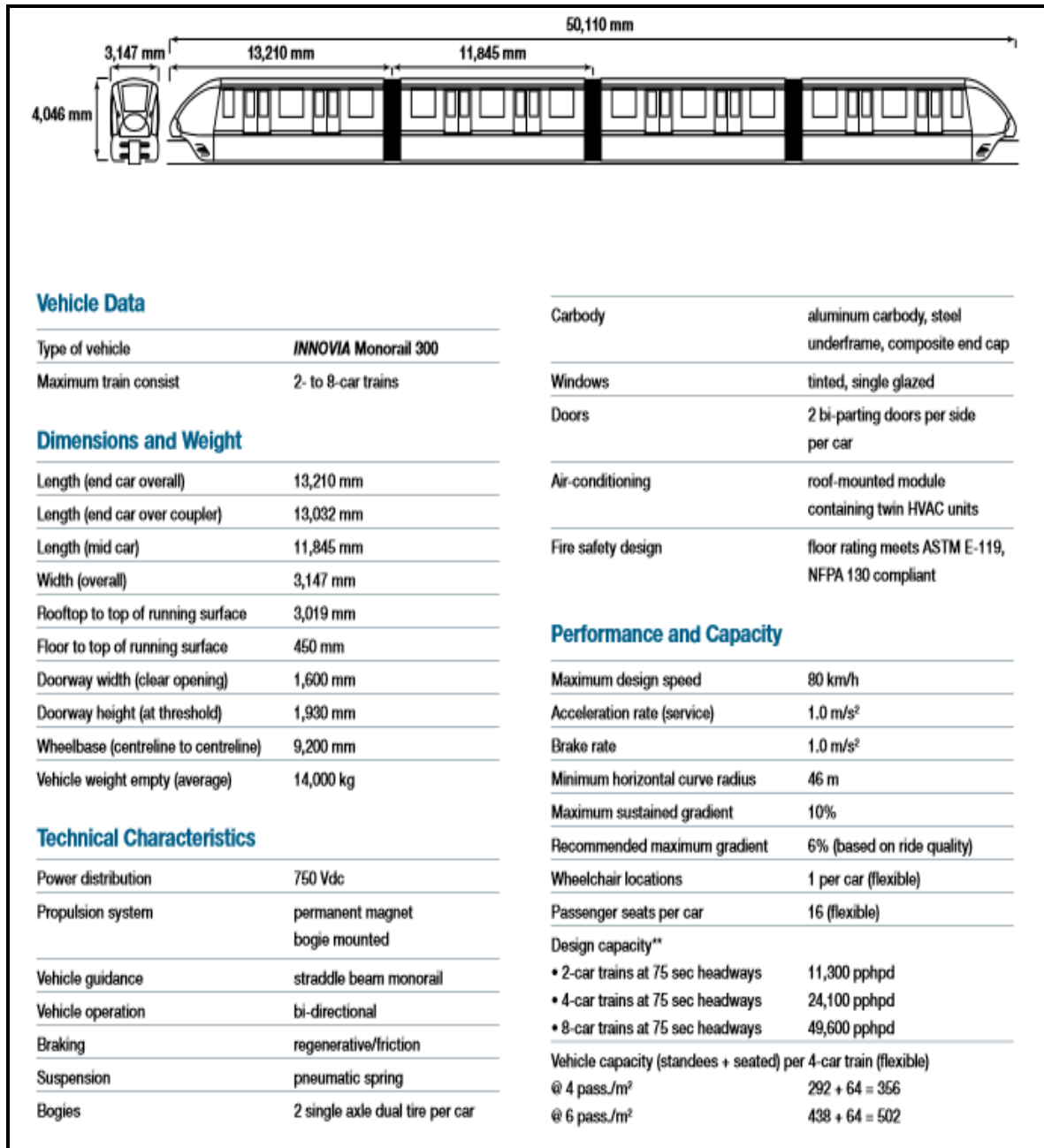
Para el sistema Bombardier se encontraron en esta investigación las versiones INNOVIA 100, 200 y 300 en su versión Monorriel.

En la imagen 33 se presenta la ficha técnica del monorriel Innovia 300, siendo el modelo que se encuentra en servicio en Sao pablo, Brasil.

Para dar una idea de los contrastes que se pueden encontrar entre las diferentes compañías proveedoras de los vagones y motores para estos sistemas, en cuanto a su parte estructural, como se puede apreciar en la tabla 18, las diferencias radican principalmente en las vigas que soportaran las cargas de los vagones y sus pasajeros; además, los pilares están influenciados por la arquitectura urbanística que se acondicione mejor al entorno de la construcción, con geometría que puede ser redonda, ovalada o cuadrada. El pilotaje para los cimientos dependerá de las condiciones de soporte del suelo a intervenir; por lo que se requiere del estudio geológico correspondiente.

⁴³ THE MONORAIL SOCIETY. Straddle-type monorail systems with driverless train operation system. [En línea]. <http://www.monorails.org/pdfs/Hitachi2004.pdf>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

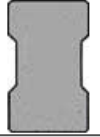



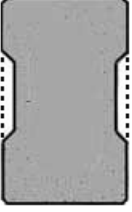
Imagen 33 – Monorriel Innovia 300.

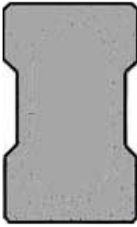
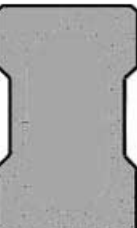


Fuente: <http://www.bombardier.com/en/search-results.html?q=monorail+300>

En la tabla 18 se aprecia la diferencia en medidas de las vigas estructurales del monorriel.

Tabla 18 – Comparación estructural vigas monorriel.

Endview (to scale)	Type	Width	Height	Height at Endpoint	Locations
	Disneyland-ALWEG	.51M 20"	.88M 34.5"	1.02M 40" (1961 extension beams)	Anaheim, CA (1959)
	Disney- Bombardier M-VI **	.66M 26"	1.22M 48"	2.03M 80"	Walt Disney World, FL (1971) Las Vegas, NV (1995)
	Bombardier- Innovia Monorail 300 **	.69M 27.2"	1.5M 59"	2.03M 80" (verification needed)	Riyadh, Saudi Arabia (*) São Paulo-Line 15, Brazil (2015)
	Hitachi Small **	.7M 27.6"	1.3M 51.2"	1.8M 70.9"	Sentosa, Singapore (2006)
	ALWEG Hitachi Medium ** Scomi **	.8M 31.5"	1.4-1.6M 55.1-63"	2.2M 86.6"	Fühligen, Germany (1957) Turin, Italy (1961) Inuyama, Japan (1962) Tokyo-Haneda (1964) Tokyo Disney, Japan (2001) Naha, Okinawa, Japan (2003) Kuala Lumpur (2003) Dubai-Palm Jumeirah (2009) Mumbai, India (2013) São Paulo-Line 17, Brazil (*)

	Hitachi Large **	.85M 33.5"	1.5M 59"	2.0M 78.7"	Kitakyushu, Japan (1985) Osaka, Japan (1990) Tama, Japan (1997) Chongqing, China (2005) Daegu, S. Korea (2015)
	ALWEG Large FCF **	.9M 35.4"	1.5M 59"	1.5M 59"	Seattle, WA (1962) Qom, Iran (*)

Fuente: <http://www.monorails.org/tMspages/TPBeams.html>

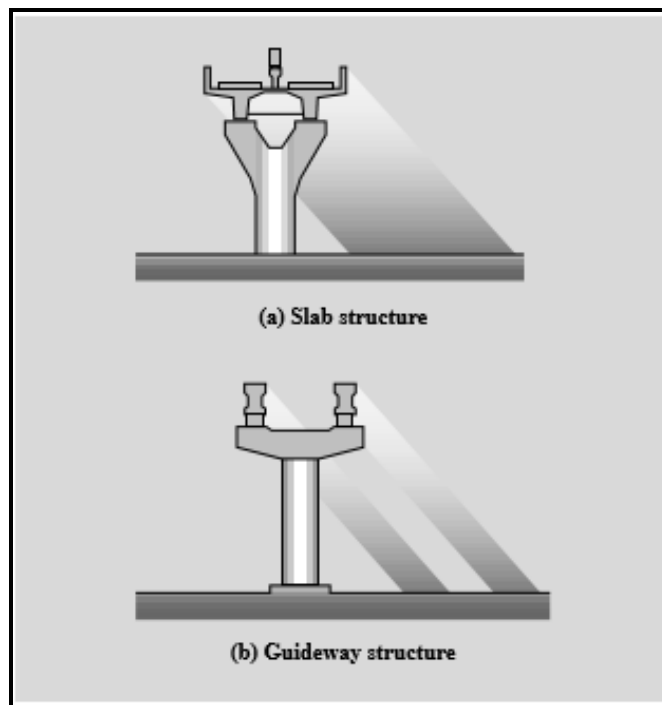
Se debe observar con detenimiento que las diferencias entre las dimensiones de las vigas, en cuanto a su ancho, son de 0,19 m (7.5") y con únicamente 0,095 m (3-3/4") diferencia por lado; de esta manera los proveedores pueden modificar sus trenes para satisfacer las diferencias, lo cual hace que los sistemas puedan también ser renovados de acuerdo a las exigencias y necesidades. Esto cambia la errada idea de que cuando se propone este sistema, sus diseñadores se apeguen a una sola compañía para su implementación y posteriores renovaciones.

Entre los dos tipos principales de monorrieles, los colgantes y los de viga straddle, esta investigación estará centrada en la viga straddle, ya presentada en los párrafos anteriores, por ser el más utilizado actualmente y consistir de un sistema mecánico más sencillo y de proceso constructivo más simple. Las pilas que sostienen la estructura superior son normalmente de 1,50 m de grosor (ver imagen 33) en columnas que pueden elevarse hasta 22 m, de ser necesario. Como se explicó, las dimensiones de las vigas varían de acuerdo a la compañía que supe los trenes, pero estos trenes se pueden adaptar a vigas ya existentes. La separación entre columnas puede variar desde 12 m hasta 25 m, dependiendo

del tipo de estructura elevada que se diseñe, las cargas a manejar y las normas locales, incluidas las sísmicas.

Otro asunto importante de tener en cuenta en la parte estructural, se ilustra en la imagen 34, en relación con parte ambiental en medios urbanos. La imagen proporciona una vista de la diferencia entre lo que puede ser el impacto de sombra entre la construcción de un monorriel y otros sistemas como el LRT o el Metro, por ejemplo; esto indica cómo las construcciones de placa dejan pasar menor cantidad de luz solar, que la construcción de vigas para monorraíles; lo cual puede ser definitivo para su aceptación o no por parte de los residentes por donde pase la línea.

Imagen 34 – Sección transversal vía guía monorriel.

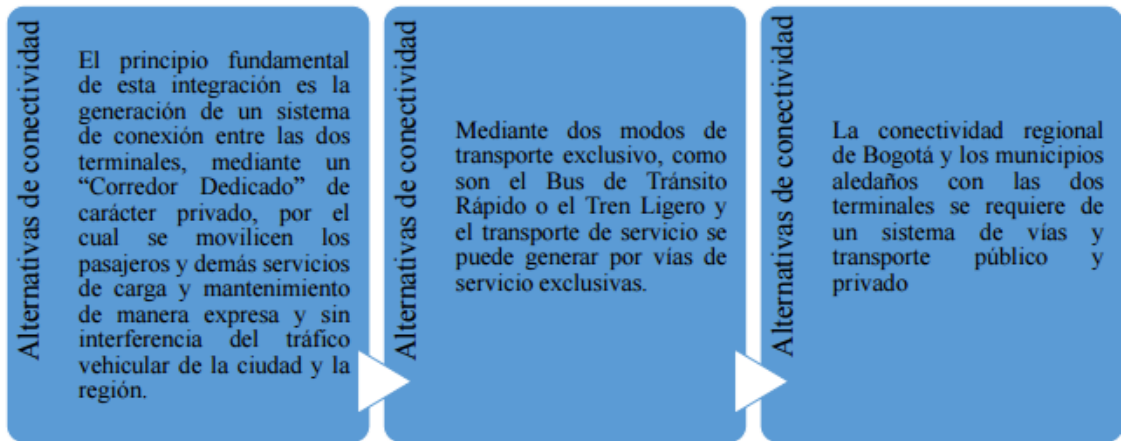


Fuente: <http://www.monorails.org/pdfs/Hitachi2004.pdf>

9.4. ALTERNATIVAS DE TRAZADO

Se proponen dos alternativas de trazado como rutas posibles para la conexión de los aeropuertos ED I y ED II y desde el Centro Internacional, con especial atención en el trazado de la Avenida Calle 26 (Jorge Eliecer Gaitán), por ser una arteria vial de gran importancia, el gran servicio que presta a múltiples urbanizaciones, con línea de TransMilenio (TM) y ciclorrutas implementadas y su posterior interacción con la línea del metro y otras rutas del SITP y de servicio colectivo de transporte público; además, de ser prácticamente la única vía de aproximación al EDI. Lo descrito en la imagen 35 se tuvo en cuenta para la escogencia de las dos alternativas de trazado.

Imagen 35 – Alternativas de conectividad.



Fuente: Fuente: <https://goo.gl/eN10Fz>

Para el trazado de las rutas del monorriel, los siguientes criterios básicos son requeridos, incluso para definir y comparar las dos alternativas propuestas:

- Necesidad de conexión rápida y de acceso fácil, ágil y cómodo para el Aeropuerto ED I y futuro ED II.

- Conveniencia de localización de terminales de partida y llegada y necesidad de puntos intermedios para estaciones consideradas de servicio importante para viajeros aéreos
- Condiciones del suelo para un diseño estructural correspondiente y acorde con las cargas en consideración
- Espacios disponibles para la estructura, con el mínimo de interferencia con predios y bienes inmuebles y sistema vial existente
- Vías existentes aledañas y condiciones físicas y de tránsito vehicular relacionados con el Aeropuerto y con servicios a zonas vecinas;
- Estado y uso actuales de la vía hacia el occidente Bogotá-Madrid-Mosquera-Facatativá, incluyendo la posible implementación de línea futura del tren de cercanías.

En este estudio, el alcance definido de acuerdo a los recursos con que se contó, no permitió consideración detallada de todos los múltiples aspectos necesarios a considerar para una definición técnica del mejor trazado, habiéndose logrado una serie de consideraciones aquí presentadas a continuación, suficientes como base para continuación de los estudios que fuesen requeridos para una toma de decisiones totalmente acertada, con recursos mayores que se estimen fuesen necesarios.

Para la Avenida 26 se proyectan desviaciones para salvar el paso elevado por encima de los puentes mencionados en el párrafo anterior. En esta investigación se encuentra que el sistema monorriel proporciona el beneficio de elevar la estructura hasta 22m. Las desviaciones serían una opción a elegir de acuerdo al criterio del diseñador que finalmente realice esta propuesta.

Para la interconexión entre los aeropuertos EDI y EDII se plantean también dos trazados, uno que corre totalmente paralelo a la vía actual que une las municipalidades de Funza, Mosquera, Madrid y Facatativá desde la ciudad de

Bogotá. El otro sería una línea expresa y que no conectaría ninguno de los centros de las municipalidades mencionadas. De acuerdo a la información recopilada se prefiere tomar la línea que lleva directamente hacia el EDII por ser más corta y dar la preferencia de expreso en el recorrido, con un tiempo aproximado de 25 minutos.

Imagen 36 – Alternativas de conectividad.



Fuente: propia.

En la imagen 36 se proporcionan las dos alternativas de partida del sistema monorriel desde la futura Gran Estación o Estación Central que está dentro de los 10 grandes proyectos de Bogotá.

La Estación Central estaría ubicada de la Avenida Caracas a la transversal 17; y entre las calles 24 y 26. Tiene como idea conectar los corredores viales de la

Caracas, La 10ª y la Calle 26 de forma subterránea. En el proyecto se estipula movilizar a 6.500 personas por hora en el centro de Bogotá. Además, en la superficie se construirían viviendas, oficinas y locales comerciales.⁴⁴

Esta estación central acomodará la primera estación del sistema propuesto, dándole al proyecto una magnitud moderna, sin cambios excesivos en la parte estructural o arquitectónica del mismo. En la imagen 37 se provee una vista del futuro proyecto.

Imagen 37 – Alternativas de conectividad.



Fuente: <https://goo.gl/tGdSK>

Partiendo de la Estación Central el recorrido hasta EDI sería de 13,3 km.

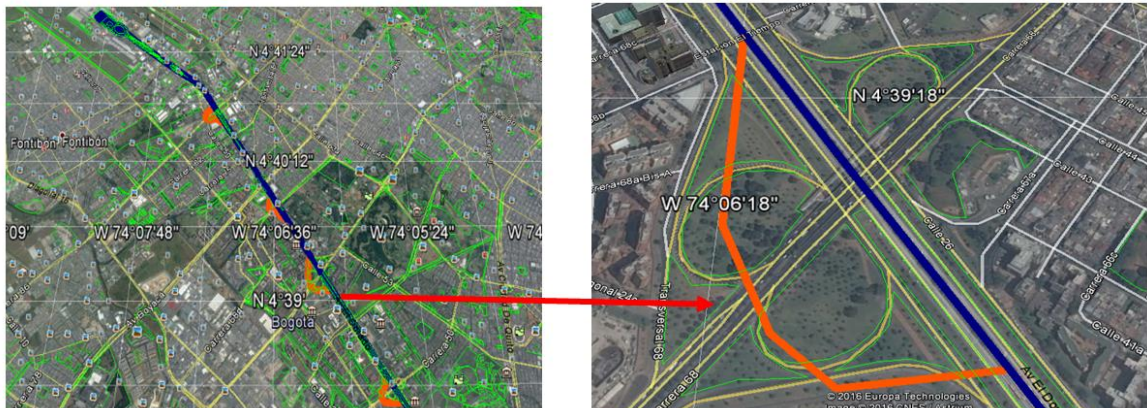
⁴⁴ CIVICO. 10 proyectos que le cambiarán la cara al centro de Bogotá. [En línea]. <https://www.civico.com/bogota/noticias/los-10-proyectos-que-le-cambiaran-la-cara-al-centro-de-bogota>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

La segunda opción planteada es partiendo desde el CIB, que tendría una extensión de 12,1 km, con la construcción de una estación inicio de ruta. Se debe tener en cuenta que el área en la que se proyectan los portales de inicio para este proyecto se considera “hub” del inglés, por ser centro de actividades y parte de las tendencias modernas en el desarrollo de las grandes ciudades

En la Avenida 26 se proyectan desviaciones para salvar el paso elevado por encima de los puentes mencionados en el párrafo anterior. En esta investigación se encontró que el sistema monorriel proporciona el beneficio de elevar la estructura hasta 22m, así de esta manera las desviaciones serían una opción a elegir o no de acuerdo al criterio del diseñador que finalmente realice esta propuesta.

Se suministra un acercamiento en detalle de una de estas desviaciones planteadas. En la imagen 38, la propuesta para la intersección de la Carrera 68, con longitud de desviación de 0,79 km.

Imagen 38 – Propuesta intersección Carrera 68.



Fuente: propia.

En la imagen 39 se pauta la propuesta de llegada al EDI, la cual será de un solo riel. Este recorrido se realizará con llegada por el brazo derecho hasta la estación

de 1999 indica que para construcciones cercanas a la cabecera del aeropuerto se permiten alturas máximas de construcción de 30 metros. Esta opción necesitaría un estudio más profundo en cuanto a su viabilidad.

Imagen 40 – Conexión Carrera 103.

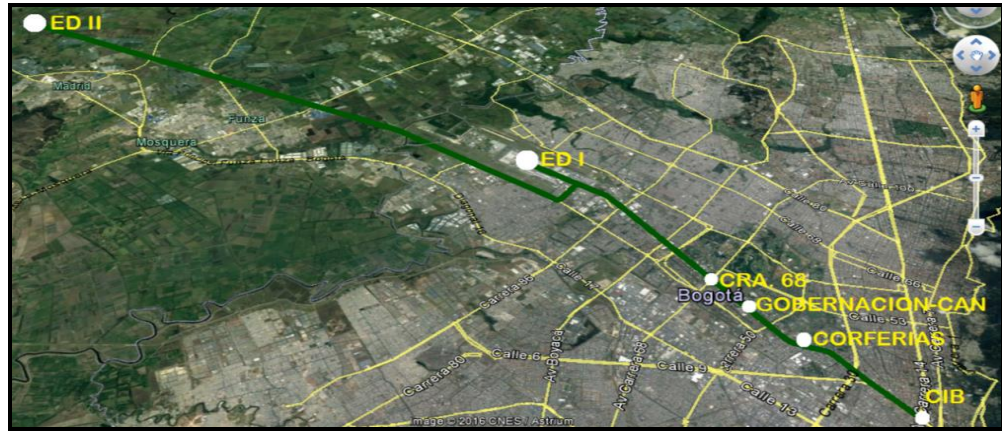


Fuente: propia.

Se pautó la primera ruta con una longitud de 16 km, sin interferir con el medio ambiente de manera invasiva, propiedad básica del sistema propuesto. Los terrenos a intervenir son menores en porcentaje, las expropiaciones de ser necesarias se reducirían de forma significativa, los cuerpos de agua y humedales con este sistema se ven poco afectados y con efectos totalmente redimibles.

Esta primera opción es la elegida para el propósito de esta investigación, por ser una ruta más corta, sin estaciones, que le da el carácter de expreso al recorrido entre las dos terminales aéreas.

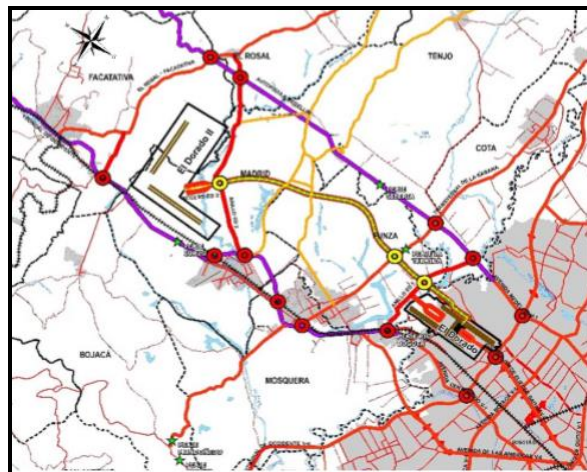
Imagen 42 – Estaciones propuestas.



Fuente: propia.

El Plan Maestro del EDII propone como alternativa de conexión entre los dos aeropuertos el corredor por la Calle 63. Consiste en generar un corredor vial como continuidad de la Calle 63 hacia el occidente de Bogotá, que contenga sobre su eje central un “Corredor Dedicado” que sirva para la integración exclusiva de las dos terminales. Este corredor conectaría la Calle 63 sobre el costado norte de EDI con el polígono de EDII, como se observa en la imagen 43.

Imagen 43 – Alternativa Plan Maestro EDII.



Fuente: Plan Maestro EDII.

Esta conectividad propuesta por la Aerocivil, el Ministerio de Transporte y la Vicepresidencia de la República, y estudiada por los autores, pero no incluida como alternativa para el monorriel, se muestra como una propuesta válida, ya que complementa lo propuesto en esta investigación para el transporte rápido de los pasajeros aéreos, pues los aeropuertos necesitarán contar con un corredor adicional y suficiente para el transporte de personal administrativo y de operación, además de la carga que se moviliza vía aérea y para los desplazamiento relacionados con los múltiples servicios aeroportuarios (insumos comerciales, alimentarios, combustibles, equipos, etc.) y que requieren traslados entre las dos terminales.

9.5. MOVIMIENTO DE PASAJEROS AEROPUERTOS

Movimiento de pasajeros entre los aeropuertos EDI y EDII y sus tiempos de desplazamiento.

9.5.1. Movimiento de pasajeros y proyección para aeropuertos EDI y EDII⁴⁵

Basados en la información obtenida del Plan Maestro del Aeropuerto El Dorado II (ED II):

- Se proyecta que los pasajeros en la hora pico en ED II aumenten de 1,292 en el año 2021 a casi 2,200 en 2041.
- En ED I los pasajeros en hora pico aumentarán de 6,049 en 2014 a casi 13,700 en 2041.

⁴⁵ AERONÁUTICA CIVIL. Capítulo 3. Op. Cit., p. 3.

Tabla 19 – Pronóstico de pasajeros del Plan Maestro de 2012.

ED II - Total Passengers		2021	2026	2031	2036	2041
Annual		4,576,000	5,409,000	6,143,000	6,865,000	7,664,000
Peak Month		410,172	484,839	550,631	615,348	686,967
Busy Day		13,231	15,640	17,762	19,850	22,160
Peak Hour		1,292	1,527	1,734	1,938	2,164
Arriving		771	912	1,035	1,157	1,292
Departing		853	1,008	1,145	1,280	1,429

ED I - Total Passengers		2014	2015	2016	2021	2026	2031	2036	2041
Annual		27,189,000	29,304,000	31,197,000	35,004,000	41,882,000	48,145,000	54,442,000	61,568,000
Peak Month		2,463,273	2,654,888	2,826,390	3,174,771	3,798,588	4,366,625	4,937,747	5,584,056
Busy Day		82,877	85,642	91,174	102,412	122,535	140,859	159,282	180,131
Peak Hour		6,049	6,251	6,655	7,763	9,288	10,677	12,074	13,654
Arriving		3,282	3,391	3,611	4,326	5,175	5,949	6,728	7,608
Departing		3,181	3,287	3,499	4,238	5,071	5,829	6,592	7,455

Fuente: Plan Maestro Aeronáutica civil.

9.5.2. EDI/EDII: Conectividad de terminales independientes:⁴⁶

- Conectividad basada en la demanda de pasajeros en conexión.
- ED II: pasajeros en líneas de bajo costo conectando a líneas en ED I.
- Rango de conexiones (estimado): de 1% de los pasajeros totales a 20% de los pasajeros de ED II.
- Frecuencias de servicio de un viaje cada 5 minutos y un viaje cada 15 minutos.

Tabla 20 – Pronóstico de pasajeros del Plan Maestro de 2012.

	2021	2026	2031	2036	2041
Hora Pico Una Dirección Pasajeros (Total del Sistema)	4.581	5.473	6.283	7.095	8.013
1% de pasajeros conectando entre aeropuertos	46	55	63	71	80
Avg Pax/viaje con servicio cada 15 minutos	11	14	16	18	20
5% de pasajeros conectando entre aeropuertos	229	274	314	355	401
Avg Pax/ viaje con servicio cada 5 minutos	19	23	26	30	33

⁴⁶ AERONÁUTICA CIVIL. Capítulo 3. Op. Cit., p. 3.

Hora Pico Una Dirección Pasajeros ED II Únicamente	853	1.008	1.145	1.280	1.429
10% Conectando entre aeropuertos	85	101	115	128	143
Avg Pax/viaje con servicio cada 15 minutos	21	25	29	32	36
20% Conectando entre aeropuertos	171	202	229	256	286
Avg Pax/Viaje con servicio cada 5 minutos	14	17	19	21	24

Fuente: Plan Maestro Aeronáutica civil.

9.5.3. EDI/EDII: Conectividad con EDII como terminal remota del EDI:⁴⁷

- Conectividad basada en la demanda total de pasajeros en ED II.
- Todos los pasajeros en ED II deben ser procesados en ED I.
- Frecuencias de servicio de un viaje cada 5 minutos y un viaje cada 15 minutos.
- Se indica que todos los pasajeros en ED II deben tomar en cuenta el tiempo de transferencia entre ED I y ED II (20+ minutos), tiempo basado en un transporte terrestre proyectado por el Plan Maestro de ED II.

Tabla 21 – Pronóstico de pasajeros del Plan Maestro de 2012.

	2021	2026	2031	2036	2041
Hora Pico Pasajeros una dirección ED II únicamente	853	1.008	1.145	1.280	1.429
100% de pasajeros de ED II requiriendo conexiones	853	1.008	1.145	1.280	1.429
Avg Pax/viaje con servicio cada 5 minutos	71	84	95	107	119
100% de pasajeros de ED II Requiriendo Conexiones	853	1.008	1.145	1.280	1.429
Avg Pax/viaje con servicio cada 15 minutos	213	252	286	320	357

Fuente: Plan Maestro Aeronáutica civil.

⁴⁷ AERONÁUTICA CIVIL. Capítulo 3. Op. Cit., p. 3.

9.5.4. Tiempos de desplazamiento desde el CIB y entre EDI y EDII⁴⁸

Con las proyecciones del Plan Maestro del Aeropuerto ED II, el tiempo de transportación es de 20 minutos entre terminales aeroportuarias, con frecuencias dependiendo de la cantidad de pasajeros con períodos de entre 5 y 15 minutos.

Ahora bien, al proponer en este proyecto un sistema de transporte como el monorriel, con velocidad de diseño de hasta 80 km/h, se podría obtener un tiempo de 13.7 minutos, con velocidad promedio de 70 km/h, en la interconexión entre ED I y ED II, como se muestra en la Tabla 22. Esto significaría un adelanto importante y clave para el transporte de pasajeros aeroportuarios al servicio de Bogotá y Municipios vecinos.

En relación con los valores sobre tiempos de desplazamiento para la interconexión de ambos aeropuertos desde el Centro Internacional de Bogotá (CIB), al implementarse el sistema monorriel, se tendría:

- Hasta el EDI se encuentra que la distancia a recorrer es de 17,16 km, se considera una velocidad promedio de 55 km/h por las paradas en cada estación; así el tiempo para recorrer esta distancia sería de 18,6 minutos lo cual nos refleja un tiempo promedio de 32,3 minutos, para el recorrido total hasta el D II, si se considera una ruta semi-expresa haciendo menos paradas o una línea expresa entre el CIB y el D I. Considerando una velocidad media de 65 km/h podemos obtener un tiempo de 15,7 minutos, el total de tiempo de esta manera para el recorrido estaría en el rango de 29,4 minutos como máximo. Se aclara que para lograr valores más exactos se debe hacer un estudio más técnico y profundizado, con aforos que permitan determinar con mayor exactitud estos valores

⁴⁸ Ibid., p. 4.

	DISTANCIA KM	V. CON PARADAS. KM/H	V. EXPRESS KM/H	TIEMPO MINUTOS	
				CON PARADAS	EXPRESS
CIB-D I	17.16	55	65	18.6	15.7
CIB-D II	33.16	62.5	67,5	31.8	29.4
D I-D II	16.00	-	70		13.7

Fuente: Propia.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mejorar la infraestructura de transporte público en Bogotá es una prioridad actual ante la demanda creciente de traslados en la Ciudad, en este caso para buscar la conexión segura entre el centro de la ciudad y el EDI y este a su vez con EDII. Es aún más necesario considerar el incremento importante en los viajes aéreos desde y hacia la Capital del País.

Es preciso mencionar que el sistema monorriel está dentro de los sistemas que mejor capacidad de pasajeros tiene en comparación con los sistemas que se consideran dentro de su mismo rango como son el LRT y BRT, además de brindar velocidades superiores sin perjuicio en la movilidad.

Dentro de esta investigación se encontró que los sistemas Monorriel, son sistemas resistidos, aduciendo su uso solamente en parques temáticos. Los monorrieles han demostrado desde sus inicios que son parte de una evolución urbanística moderna, que mejora y ayuda a darle una mejor movilidad a las ciudades sin la afectación del medio ambiente, con reducidos costos en cuanto a la adquisición de terrenos, con sistemas constructivos que afectan de mínima manera el tránsito vehicular durante su construcción.

Los monorrieles al ser sistemas elevados no presentan los inconvenientes de los sistemas a nivel. En la historia de este sistema de transporte no existen reportes recientes de accidentes ni pérdidas de vidas, dejándolo como uno de los sistemas más seguros que existen en cuanto al transporte de pasajeros se refiere.

Los monorrieles tienen records de seguridad que sobrepasan a todos los sistemas de transporte conocidos.

Los monorrieles cumplen con los requisitos sísmicos a nivel mundial.

Existe un gran avance en el tema de los monorrieles en Asia. Países como Japón han venido construyendo y mejorando sus sistemas monorriel y los colocan como ejemplo de progreso urbanístico y de interconexión multimodal para pasajeros.

Ahora bien, para la ciudad de Bogotá con crecientes problemas de tránsito y movilidad, por medio de esta investigación se deja abierta la recomendación a las autoridades pertinentes del estudio e implantación del moderno sistema monorriel que puede ser extendido a niveles urbanos.

Por medio de la información obtenida, el monorriel como alternativa de transporte entre Bogotá y los aeropuertos ED I y ED II, es una necesidad. Para al pasajero nacional e internacional se debe brindar un medio de transporte seguro, rápido y con comodidad que lo lleve desde el CIB, directamente hasta la terminal aérea de la capital nacional, y para la interconexión entre EDI y EDII. Se hace necesario una ruta expresa, que de tiempos de transporte justos de acuerdo a las necesidades propias de la Aero-transportación.

El monorriel ha demostrado en varias ciudades del exterior su conveniencia para conectar varios hubs distribuidos dentro de la urbe y desde ésta hacia los aeropuertos, aprovechando sus ventajas con respecto a otros medios de transporte masivo. En la Bogotá del futuro podría considerarse la implementación de dicho sistema de hubs, en línea con tendencias modernas de desarrollo urbano.

En cuanto a la conveniencia, considerada en este proyecto, de utilizar el CIB y la futura Estación Central como puntos centrales o portales de conexión y partida del sistema monorriel que se propone, prima su conveniente localización, además de su atractivo, por las facilidades con que cuenta, para agentes empresariales que

llegan por vía aérea desde varias localidades nacionales y extranjeras, en este caso, a través del EDI, y en un futuro, utilizando también en el ED II.

Desde el CIB, además de encontrar alojamiento cómodo y sitios turísticos, de comida y comerciales, entre otros, puede desplazarse con relativa facilidad a otras zonas de la Capital de interés no muy alejadas. Aquí entrarían en consideración los desarrollos recientes y próximos sobre el transporte multimodal de Bogotá, actualmente en revisión importante por parte de la Alcaldía; lo cual introduce cierto grado de incertidumbre al actual estudio. Sin embargo, los autores han considerado que esta incertidumbre sería mayor al contar con otra zona diferente al CIB.

Dentro de las necesidades de conectividad mencionadas, dado el actual y acelerado crecimiento de viajes por vía aérea, tendencia que se experimenta en Bogotá, las ciudades competitivas exigen cada vez mayor rapidez en los traslados desde y hacia su(s) aeropuerto(s). De esta manera se busca reducir la considerable pérdida de tiempo de los viajeros, principalmente en las vías que tienen que transitar centros de alta densidad poblacional, como es el caso de esta capital.

Se puede concluir que el aeropuerto EDII es viable desde el punto de vista urbanístico, teniendo en cuenta que se ubica en un territorio prácticamente rural y a una relativa y manejable distancia de concentraciones urbanas importantes como son los cascos urbanos de los municipios de Facatativá y Madrid.

El desarrollo del proyecto del EDII se presenta como una oportunidad para generar un desarrollo urbano-regional integrado a partir del Aeropuerto como un importante nodo de actividad que conforme el crecimiento ordenado de Bogotá hacia su región inmediata.

La conectividad actual hacia el aeropuerto se encuentra seriamente afectada por las dificultades de integración vial entre Bogotá y la región occidente de la Sabana, lo cual implica pensar en mejorar y buscar soluciones alternativas de vías y medios de transporte que garanticen una adecuada relación con la ciudad.

En la sección anterior se da la información de las dimensiones de las vigas que se están fabricando en la actualidad (ver Tabla 18). Según esta tabla las compañías proveedoras de los sistemas monorriel, como lo son Bombardier o Hitachi, son las más relevantes en cuanto a su presencia internacional sin descontar los adelantos hechos por las diferentes compañías que se están desarrollando en China y Estados Unidos.

Esta investigación aclara que la proyección de un sistema monorriel no debe estar siempre atado a una sola compañía proveedora, ya que estas compañías pueden adaptar sus vehículos a las vigas existentes, teniendo en cuenta las diferencias entre dimensiones y los rangos permisibles para este propósito.

Las estaciones proyectadas por esta investigación son de carácter conceptual y tienen en cuenta que para el propósito de brindar un servicio exprés entre aeropuertos se deben minimizar su número. Es claro que se necesitara el servicio de parada en cada una de las estaciones para los pasajeros locales y sin la necesidad de llegar a las terminales aéreas.

La proyección en cuanto a demanda y capacidad, deberá ser un estudio de un grupo multidisciplinar.

Se encontró en esta investigación que la proyección del aeropuerto EDII es la solución al crecimiento de pasajeros y de carga de EDI, pero sin perjuicio del servicio del EDI. La distribución de funciones de los aeropuertos se muestra en la

imagen 44, para poder tener una mejor visión de cómo se proyecta por las entidades gubernamentales los porcentajes de servicio.

Imagen 44 – Conexión aeropuertos Plan Maestro EDII.



Fuente: Plan Maestro EDII.

De esta manera se crea un balance entre las dos terminales guiado a la mejor prestación del servicio proyectado al año 2041 y dando mejor soporte a la necesidad de un sistema de interconexión con sentido futurista y de acuerdo a la altura de los grandes aeropuertos de orden internacional.

BIBLIOGRAFÍA

20 MINUTOS. ¿Cuál es el origen de los tranvías?. [En línea]. <http://blogs.20minutos.es/yaestaellistoquetodolosabe/cual-es-el-origen-de-los-tranvias/>. [citado el 14 de mayo de 2016].

AERONÁUTICA CIVIL. Actualización del plan maestro del aeropuerto internacional el dorado. [En línea].

<http://www.aerocivil.gov.co/Aerodromos/PMaestros/Documents/EI%20Dorado%20Executive%20Summary%20Jan%202014.pdf>. [citado el 15 de mayo de 2016].

AERONÁUTICA CIVIL. Análisis técnico de la viabilidad operacional y elaboración del plan maestro aeroportuario para el proyecto de infraestructura El Dorado II. Capítulo 3 – estrategias de desarrollo y pronósticos de la demanda. Bogotá. 2016, p. 7.

AERONÁUTICA CIVIL. Análisis técnico de la viabilidad operacional y elaboración del plan maestro aeroportuario para el proyecto de infraestructura El Dorado II. Capítulo 1 – Introducción general. Bogotá. 2016, p. 4.

AERONÁUTICA CIVIL. Análisis técnico de la viabilidad operacional y elaboración del plan maestro aeroportuario para el proyecto de infraestructura El Dorado II. Capítulo 2 – Evaluación de condiciones existentes. Bogotá. 2016, p. 7.

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Contratación de un consultor de negocios de aviación que lleve a cabo estudios iniciales de prefactibilidad de carácter estratégico, financiero y jurídico, que sirvan como insumo para el desarrollo de la estructuración del proyecto de asociación público privada de iniciativa pública que integre el aeropuerto El Dorado existente, con el proyecto

aeropuerto El Dorado II, de conformidad con el alcance del objeto. Bogotá. 2015, p. 15.

ALCALDÍA DE BOGOTÁ. Decreto 301 de 1990. [En línea]. <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=2122>. [citado el 25 de octubre de 2016].

ALCALDÍA DE BOGOTÁ. Decreto 765 de 1999. [En línea]. <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1646>. [citado el 25 de octubre de 2016].

BANGKOK, Airport Rail Link. [En línea]. <http://www.bangkok.com/airport-rail-link.htm#promo>. [citado el 24 de marzo de 2016].

BOGOTÁ PASS. Taxis en Bogotá. [En línea]. <http://bogotapass.com/blog-bogotapass/taxis-en-bogota/>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

CIVICO. 10 proyectos que le cambiarán la cara al centro de Bogotá. [En línea]. <https://www.civico.com/bogota/noticias/los-10-proyectos-que-le-cambiaran-la-cara-al-centro-de-bogota>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 1008 (15, mayo, 2015). Por el cual se reglamenta el Servicio de Transporte Público Masivo de Pasajeros por metro ligero, tren ligero, tranvía y tren-tram. Bogotá: el ministerio. 2015.

COLOMBIA. PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN. Resolución 2176 (2, septiembre, 2015). Por la cual se modifican las coordenadas de localización de El Dorado II. Bogotá, 2015.

EAST JAPAN RAILWAY CULTURE FOUNDATION. New types of guided transport. [En línea]. http://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr26/pdf/t58_neh.pdf. [citado el 6 de noviembre de 2016].

FERROPEDIA. Monorraíl. [En línea]. <http://ferropedia.es/wiki/Monorra%C3%AD>. [citado el 14 de mayo de 2016].

MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 06815 de 2013. [En línea]. <http://www.aerocivil.gov.co/Aerodromos/PMaestros/Documents/Resoluci%C3%B3n%20actualizaci%C3%B3n%20plan%20maestro.pdf>. [citado el 1 de noviembre de 2016].

PIRGIDIS, Christos. Railway transportation systems. [En línea]. <https://goo.gl/GpqRbR>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. El aeropuerto el Dorado como elemento de planeamiento multiescalar y articulador urbano regional: instrumentos y actores de la planeación. Bogotá, 2016. p. 23.

SOCIEDAD COLOMBIANA DE GEOTECNIA. Decreto 523 de 2010. [En línea]. <http://www.scg.org.co/wp-content/uploads/DECRETO-523-DE-2010-MICROZONIFICACION-BOGOTA.pdf>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

STRUCTURALIA. Monorrieles en el mundo. [En línea]. <http://www.structuralia.com/es/novedades/item/10001675-monorrieles-en-el-mundo>. [citado el 15 de mayo de 2016].

THE MONORAIL SOCIETY. Monorail vs. other. [En línea]. <http://www.monorails.org/tMspages/MonoVs.html>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

THE MONORAIL SOCIETY. Monorails in history part I. [En línea]. <http://www.monorails.org/tMspages/History.html>. [citado el 20 de mayo de 2016].

THE MONORAIL SOCIETY. Straddle-type monorail systems with driverless train operation system. [En línea]. <http://www.monorails.org/pdfs/Hitachi2004.pdf>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

TOKYO MONORAIL. Monorail guide. [En línea]. <http://www.tokyo-monorail.co.jp/english/>. [citado el 6 de noviembre de 2016].

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTANO. La evaluación del monorriel, un proyecto de inversión. [En línea]. <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/1777/1/RI001315.pdf>. [citado el 14 de mayo de 2016].

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTANO. La evaluación del monorriel, un proyecto de inversión. [En línea]. <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/1777/1/RI001315.pdf>. [citado el 14 de mayo de 2016].

UNIVERSIDAD DE LA SALLE. Monorriel. [En línea]. http://evirtual.lasalle.edu.co/info_basica/nuevos/guia/GuiaClaseNo.3.pdf. [citado el 24 de marzo de 2016].