

UNIVERSIDAD EAN

FACULTAD DE INGENIERÍA

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN DE ESPECIALIZACIÓN



INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

**INCIDENCIA DEL TIPO DE EJE DE LOS BUSES ARTICULADOS DE
TRANSMILENIO EN EL CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS**

AUTORES:

**YEMMI ESMERALDA BRICEÑO BARRANTES
EDWIN RICARDO MEDINA SOLANO
CRISTIAN RODOLFO NIÑO GONZÁLEZ**

TUTORA:

PAOLA ANDREA ACEVEDO PABON, Ph.D.

BOGOTÁ D.C.

07-11-2023

Tabla de contenido

1. TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.1. Resumen.....	5
1.2. Abstract	7
1.3. Problema de Investigación.....	9
2. OBJETIVOS	11
2.1. Objetivo general.....	11
2.2. Objetivos específicos	11
3. JUSTIFICACIÓN.....	12
4. MARCO TEÓRICO.....	15
4.1. Daño causado a los pavimentos	17
4.2. Modelo teórico de interacción neumático-pavimento	19
5. MARCO INSTITUCIONAL	20
5.1. Mapa de procesos	21
5.2. Estructura organizacional.....	22
6. METODOLOGÍA	23
6.1. Primer nivel.....	23
6.1.1. <i>Enfoque de la investigación</i>	23
6.1.2. <i>Alcance de la investigación</i>	24
6.1.3. <i>Diseño de la investigación</i>	25
Actividades planteadas para el cumplimiento de los objetivos:	25
6.1.3.1. <i>Análisis técnico</i>	27
6.1.3.2. <i>Análisis económico</i>	28
6.1.3.3. <i>Análisis de impacto ambiental</i>	29
6.1.4. <i>Definición de variables</i>	29
6.1.5. <i>Población y muestra</i>	30
6.2. Segundo nivel	31
6.2.1. <i>Selección de métodos o instrumentos para recolección de información</i>	31
6.2.2. <i>Técnicas de análisis de datos</i>	31
7. ANÁLISIS DE DATOS.....	31

7.1.	Implicación del tipo de eje en el NEE.....	32
7.1.1.	<i>Supuestos adoptados y construcción de escenarios.....</i>	32
7.1.2.	<i>Método de la AASHTO</i>	34
7.1.3.	<i>Método INVIAS</i>	36
7.1.4.	Implicación de la sobrecarga por tipo de eje.....	38
7.2.	Evaluación del impacto económico para Transmilenio por el tipo de eje empleado.	39
7.3.	Evaluación del impacto económico para el IDU por actividades de mantenimiento	40
7.4.	Evaluación del impacto ambiental por cambio del tipo de eje.....	42
7.5.	Evaluación del impacto social por cambio del tipo de eje.....	46
8.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	47
8.1.	Respecto a la incidencia del tipo de eje de carga.....	47
8.2.	Respecto al impacto ambiental por el cambio de llantas	49
8.3.	Respecto al impacto social por el cambio de llantas	49
9.	CONCLUSIONES.....	50
	REFERENCIAS	53

Lista de figuras

Figura 1.	Competitividad en el transporte internacional, vía carretera, aérea, fluvial y marítima.....	14
Figura 2.	Factores de equivalencia de carga por tipo de vehículo a nivel nacional, 1996	18
Figura 3.	Modelo teórico de huella rectangular equivalente.	20
Figura 4.	Mapa de procesos del Instituto de Desarrollo Urbano.....	21
Figura 5.	Organigrama del Instituto de Desarrollo Urbano.	22
Figura 6.	Configuración de ejes de carga del bus de Transmilenio.	27
Figura 7.	Eje estándar o de referencia: eje simple con llantas duales.....	31
Figura 8.	Configuración de ejes de carga en los escenarios de análisis.	34
Figura 9.	Exceso de ejes equivalentes por efecto de sobrecarga de los buses. ...	38
Figura 10.	Estructura de pavimento flexible – Troncal Calle 80.....	41
Figura 12.	Gráfico comparativo costos con emisiones del pavimento asfáltico.....	45
Figura 13.	Resumen de resultados de ESAL y comparación por escenarios.	48

Lista de tablas

Tabla 1. Definición conceptual de las variables	29
Tabla 2. Definición operacional de las variables.....	30
Tabla 3. Distribución de carga en un día típico – Troncal Transmilenio Calle 80...	33
Tabla 4. ESAL bajo metodología AASHTO, para cada escenario.....	36
Tabla 5. Fórmulas simplificadas para el cálculo de EALF - INVIAS.....	37
Tabla 6. ESAL bajo metodología INVIAS, para cada escenario.	37
Tabla 7. Cargas máximas permitidas por tipo de eje en Colombia.....	38
Tabla 8. Cotización de neumáticos para buses tipo Transmilenio.	39
Tabla 9. Variación de costos de llantas según tipo de eje.	40
Tabla 10. Impacto económico por mantenimiento de la capa superficial.....	42
Tabla 11. Comparación de los rendimientos de los neumáticos, en kilometrajes ..	43
Tabla 12. Cantidades porcentuales y relativas de emisiones contaminantes generadas por los neumáticos.	44
Tabla 13. Cantidades porcentuales y relativas de emisiones contaminantes contrarrestadas.	44
Tabla 14. Resumen de Emisiones por carril asfáltico por año	44
Tabla 15 . Resumen de resultados de cálculo de ESAL.....	47

1. TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN

Incidencia del tipo de eje de los buses articulados de Transmilenio en el ciclo de vida de los pavimentos.

Incidence of axle type of Transmilenio articulated buses on the pavement life cycle.

1.1. Resumen

El crecimiento económico de las regiones está decididamente condicionado por el desarrollo de la infraestructura vial que permita la operación de sistemas de transporte eficientes, multimodales y sostenibles. Sin duda, el modo de transporte terrestre carretero es el predominante en Colombia, por lo cual, vale la pena centrar la mirada hacia algunos de los aspectos que condicionan la durabilidad de la infraestructura vial. De tal modo, considerando que la mayor parte de las vías nacionales se encuentran construidas en pavimentos flexibles, y que, del total de las vías nacionales, alrededor del 50.24% de las vías pavimentadas se encuentran en regular, mal o muy mal estado a julio de 2023 (INVIAS, 2023); ningún esfuerzo encaminado hacia mejorar las técnicas de diseño y construcción de vías será en vano. Es así como, dentro de las variables de diseño de que consideran las diversas metodologías de diseño de pavimentos, se encuentra el tránsito, tal vez una de las más importantes pues constituye las sollicitaciones de carga a las que se expondrá la estructura de pavimento durante su vida útil (periodo de diseño) y, por lo tanto, la principal causante del deterioro de la estructura. Como bien lo indica Condarco, P. (2016), el daño también depende del tipo de eje vehicular que empleen los vehículos que hacen uso de la infraestructura. No es lo mismo el daño que una misma carga

produce al pavimento si se descarga por medio de un eje simple que por medio de un eje tándem o un trídem. Evidentemente abordar esta problemática desde un enfoque físico mecánico permite pensar en diversas estrategias que podrían adoptar sistemas de transporte masivo como Transmilenio, con el objetivo de mejorar el desempeño de los sistemas de gestión de infraestructura vial, traduciéndose en posibles ahorros de inyección de recursos, mitigación del impacto ambiental por explotación de materiales no renovables como el asfalto y los agregados pétreos y disminución de la interrupción del servicio de transporte de pasajeros para una ciudad tan congestionada como es Bogotá, en la cual, el sistema de buses rápidos (BRT, por sus siglas en inglés) ofrece la principal alternativa de movilidad para la mayor franja poblacional.

Durante la presente investigación se abordará el método AASHTO que consiste en especificar los factores de equivalencia para convertir los diferentes tipos de vehículos comerciales a ejes equivalentes de 8.2 toneladas Higuera, (2015); evaluando las condiciones particulares del sistema Transmilenio en cuanto al tipo de vehículos, tipos de ejes y las cargas impuestas en un tramo de la troncal Calle 80 (pavimento flexible).

Palabras clave: ejes equivalentes, cargas, tránsito, ciclo de vida, pavimentos, BRT, Transmilenio.

1.2. Abstract

The economic growth of the regions is decisively conditioned by the development of road infrastructure that allows the operation of efficient, multimodal and sustainable transportation systems. Without a doubt, the road transportation mode is the predominant one in Colombia, which is why it is worth focusing on some of the aspects that determine the durability of the road infrastructure. Thus, considering that most of the national roads are built on flexible pavements, and that of the total national roads, around 50.24% of the paved roads are in fair, bad or very bad condition as of July from 2023 (INVIAS, 2023); no effort aimed at improving road design and construction techniques will be in vain. This is how, among the design variables considered by the various pavement design methodologies, is traffic, perhaps one of the most important as it constitutes the load requests to which the pavement structure will be exposed during its operation or useful life (design period) and, therefore, the main cause of deterioration of the structure. As Condarco, P. (2016) indicates, the damage also depends on the type of vehicle axle used by the vehicles that use the infrastructure. The damage that the same load produces to the pavement if it is unloaded by means of a single axle is not the same as by means of a tandem or tridem axle. Obviously, addressing this problem from a physical-mechanical approach allows to think about various strategies that mass transit systems such as Transmilenio could adopt, with the aim of improving the performance of road infrastructure management systems, translating into possible savings in resource injection, mitigation of environmental impact due to the exploitation of non-renewable materials such as asphalt and stone aggregates and

reduction of the interruption of the passenger transport service for a city as congested as Bogotá, in which the bus rapid transit system (BRT) offers the main mobility alternative for the largest segment of the population.

During this research, the AASHTO method will be addressed, which consists of specifying the equivalence factors to convert the different types of commercial vehicles to equivalent axles of 8.2 tons (Higuera, 2015); evaluating the particular conditions of the Transmilenio system in terms of the vehicle types, axle types and the loads imposed on a section of the Calle 80 trunk (flexible pavement).

Keywords: equivalent axles, traffic loads, pavement lyfe-cycle, BRT, Transmilenio.

1.3. Problema de Investigación

El problema planteado corresponde a un estudio descriptivo, dado que se fundamentará en el análisis de información secundaria que permita evaluar a nivel macro el grado de incidencia del tipo de eje de los buses articulados de Transmilenio en el ciclo de vida del pavimento flexible de la troncal calle 80; teniendo de presente que el deterioro acelerado de los pavimentos conlleva sobrecostos y externalidades para el sistema de transporte, entre otros: costos adicionales de mantenimiento, reparación y/o rehabilitación, aumento en los tiempos de viaje por actividades de obra en las vías, contaminación por material particulado, ruido e impacto ambiental por mayor explotación de materiales (asfalto, emulsiones asfálticas, agregados pétreos, polímeros modificadores, geo sintéticos y geotextiles, agua, etc.).

El problema que se pretende abordar tiene relación con problemáticas de la ingeniería civil, en la especialidad de transporte y vías. Así mismo, se pretende aplicar técnicas adquiridas a través de los programas de Especialización en Gerencia de Proyectos y Especialización en Gerencia de Procesos de Calidad e Innovación, los cuales dotan al investigador de herramientas valiosas para el análisis de escenarios del proyecto y la evaluación comparativa mediante indicadores como la relación B/C, la TIR (Tasa de Interna de Retorno) o el VPN.

Adicionalmente, el problema descrito será abordado desde la óptica de la sostenibilidad, el impacto ambiental y la responsabilidad social; dimensiones imprescindibles en la actualidad para la evaluación de proyectos bajo los principios rectores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

De resultar favorable la exploración que se realizará, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) como entidad responsable de la construcción, mantenimiento y rehabilitación de la malla vial arterial de la ciudad tendrá importantes herramientas que le permitan realizar una gestión de la infraestructura vial más eficiente. Así mismo, como entidad pública del sector movilidad estará en la capacidad de negociar condiciones más favorables para la operación de la infraestructura de la ciudad por parte de terceros.

Transmilenio a su vez, como entidad encargada de la administración del sistema integrado de transporte público (SITP) de la ciudad, tendrá mayores argumentos que permitan ratificar las condiciones actuales de la flota de buses de las troncales o por el contrario, refutarlas y empezar un proceso de cambio hacia escenarios más favorables desde las dimensiones: económica, ambiental y social.

En cuanto a los operadores de las troncales de BRT, conviene interesante explorar la implicación que tendrían eventuales medidas de cambio en el diseño de los buses que conforman las flotas a su cargo; por ejemplo, como respuesta a la pregunta: ¿qué es más costoso?: ¿ejes sencillos que emplean menos neumáticos para su funcionamiento?, o, ¿será más costoso operar vehículos con ejes tándem o trídem?

2. OBJETIVOS

Los objetivos planteados para la presente investigación son los siguientes:

2.1. Objetivo general

Evaluar el grado de incidencia del tipo de eje de los buses articulados de Transmilenio en el ciclo de vida de los pavimentos de las troncales mediante análisis de sensibilidad y simulaciones de escenarios que permitan determinar la conveniencia de cambiar las configuraciones de trenes de carga actuales por otras alternativas, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

2.2. Objetivos específicos

1. Verificar a partir de modelos teóricos la implicación que tiene el tipo de eje de los vehículos en el aporte a las solicitaciones de carga que se impone a una estructura de pavimento flexible, en términos de ejes equivalentes.
2. Establecer el impacto económico que implicaría el cambio de los tipos de ejes de los buses de Transmilenio para varios escenarios sobre el corredor de la Avenida Calle 80 (pavimento flexible), desde el rol del operador del sistema (Transmilenio).
3. Estimar el impacto económico que conllevaría la reducción de actividades de mantenimiento y/o la eventual mejoría en el ciclo de vida sobre el corredor de la Avenida Calle 80 (pavimento flexible), desde el rol del administrador de la red vial (IDU).

4. Identificar los impactos ambientales y sobre los usuarios del sistema que implicarían los cambios analizados durante el desarrollo de la presente investigación, bajo la óptica de la sostenibilidad y el compromiso social.

3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación es conveniente por el impacto que tiene sobre la productividad de una ciudad por cuanto, a pesar de los avances tecnológicos del nuevo milenio, las nuevas y modernas modalidades de transporte aéreo, marítimo, para transportar tanto personas como materiales, por ejemplo, a enero de 2023 y en el 2022, el transporte público mundial experimentó un incremento de cerca de 93,5 millones de usuarios con respecto al año anterior (ORUS, 2022).

A pesar de ello, todavía se encuentra lejos de las cifras alcanzadas antes del inicio de la pandemia de COVID-19 (ORUS, 2022), el medio terrestre representa en muchos países el mayor porcentaje de uso en todo tiempo, y esto conduce a saber que la sostenibilidad de los pavimentos, y por ende el cuidado en la fabricación, puntualmente en el pesos de sus partes críticas como el motor, los ejes, la suspensión, y la carrocería en general, revisten la clave para evaluar a corto y mediano plazo la durabilidad del pavimento, y por ende las inversiones en mantenimientos, la productividad entendida como la capacidad de una ciudad para no detener sus actividades económicas, por impedimentos en su flujo de transporte, por las causas referidas.

Si se revisa la relevancia social el modo carretero aporta el 75% del valor total del PIB transporte mientras que el transporte por agua solamente participa con el 2%, el transporte aéreo con el 9% y el restante 14% se le atribuye a los servicios auxiliares y complementarios del transporte (MINISTERIO DE TRANSPORTE, 2005); dicha relevancia a trascendido miradas internacionales, por el impacto que reviste de tal manera que se han elaborado estudios de los factores distancia y costo en el transporte a nivel internacional, puesto que en análisis de esta temática contribuye a determinar la competitividad en el comercio mundial.

Se tiene para ello un ejemplo gráfico tomado del Journal of Economics, Finance y Administrativa sobre el transporte internacional como factor de competitividad (RENDÓN, 2013).

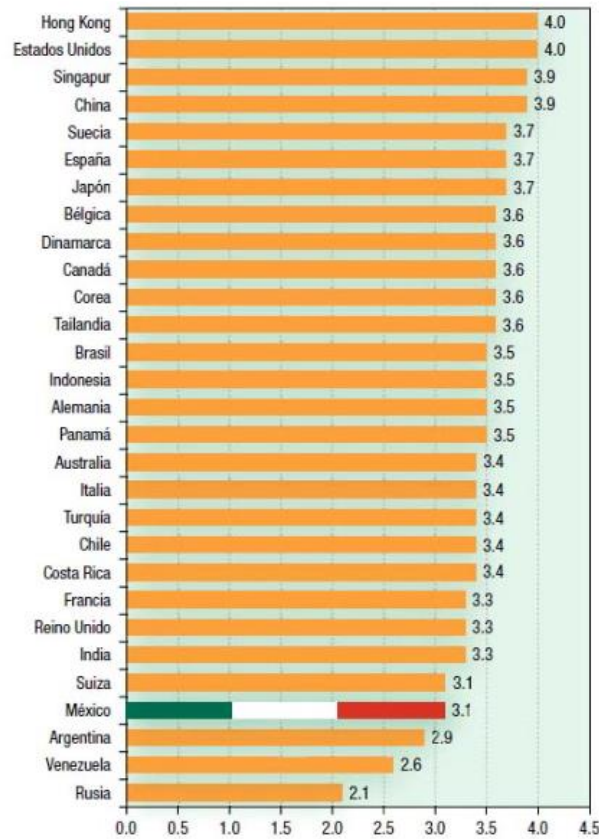


Figura 1. Competitividad en el transporte internacional, vía carretera, aérea, fluvial y marítima.

Fuente: Journal of Economics, Finance and Administrative.

Sus implicaciones prácticas están enfocadas en el aporte puntual que los resultados tendrán en la disminución de los potenciales mantenimientos al pavimento, usando materiales que afectan de manera negativa al medio ambiente; así también la evaluación de esta línea de investigativa permitirá fortalecer el sustento que el distrito de la capital debe acoger en los convenios que realice por concesión con los fabricantes para que apliquen los estudios realizados y planifiquen el reemplazo en la elaboración de los ejes de suspensión de los buses de transporte masivo actualmente utilizados.

En el aporte teórico y metodológico se utilizará el compendio de estudios de cálculos de carga y peso, versus los tipos de eje según el tipo de carga no solo en Colombia si no en otros Países, con lo que se revisará el comportamiento de dichas variables y la relación de estas para determinar que el análisis será consistente y clave fundamental desde el diseño, fabricación y adquisición del parque automotor en el distrito de Bogotá para buses articulados.

Todo lo anterior será calculado, investigado y aplicado teniendo en cuenta todo aprendido en la Especialización en Gerencia de Proyectos y Gerencia de Procesos de Calidad e Innovación de la universidad EAN, los cuales nos dan un punto de partida y un camino de ruta del cómo se podrá ir desarrollando cada una de las fases del proyecto y de la investigación.

4. MARCO TEÓRICO

El estudio de la carga en vehículos de transporte masivo y su incidencia en el pavimento, en su duración, mantenimiento y calidad, al parecer es un tema cuyo análisis causa efecto tiene explicación tácita, ha sido referente de varios estudios no solo por su contenido técnico y directa implicación en los costos presupuestales de transporte y vías en el Distrito, sino también por la cantidad de variables que pueden revisarse y de las cuales se derivan consecuencias en diferentes ámbitos, tales como el ambiental, el económico, el social, cultural y hasta político.

Es así como en el 2004 el IDU y la Universidad de los Andes en el convenio de cooperación 034 aúnan esfuerzos para adelantar estudios que permitan

determinar el peso por eje de los buses articulados (ANDES, 2004) y seguidamente en el 2005 el Ministerio de Transporte caracteriza el transporte colombiano con el fin de sustentar el diagnóstico y proyectos de transporte e infraestructura, basándose ambos en sus justificaciones en el impacto determinante del transporte y los costos asociados para la sustentabilidad y competitividad comercial y por ende económica en el distrito.

Ahora bien de manera indirecta los estudios de peso, carga, y ejes, en el transporte y su incidencia en las vías terrestres ha sido un tema no solo local si no de alcances internacionales, pues los estudios encontrados dan cuenta que aún después de la pandemia el uso del transporte terrestre continúa siendo la alternativa para la dinámica económica y social en los países, así nos lo muestra la estadística sobre que en el 2022 y para 2023 el transporte público mundial experimentó un incremento de 93, 5 millones de usuarios respecto del año anterior y se proyecta que para el 2027 el número de usuarios será de 4.500 millones (ORUS, 2023).

Así mismo su estudio e impacto llegará a tocar al ciudadano de a pie, a todos y cada uno de los barrios donde los alimentadores llegan, y cuenta de ello nos da las conclusiones de la Evaluación de Operación del transporte Automotor realizada por la Universidad la Gran Colombia en el 2017 que concluye que el aumento de usuarios desde la creación del Sistema de Transporte Transmilenio en 2000, se desbordó debido al crecimiento acelerado de la población (ALARCÓN, 2017) y de allí se han derivado acciones en el camino para mejorar las vías y el pavimento, en acciones no planeadas ni previstas, lo que confirma que el estudio y evaluación de

impactos con miras a la mejora será de gran incidencia para la calidad de vida de la ciudad.

El estudio de esta manera se abordará desde un sentido práctico donde se revisarán comparativamente los cálculos establecidos que sustenta el uso de 1 o 2 ejes en el bus integrado del Sistema Transmilenio, con estudios de cálculos donde se han usado ejes trídems que den soporte como se da en los vehículos C de carga pesada, con el fin de proteger el pavimento y con este, el medio ambiente y el tema económico de presupuesto distrital.

4.1. Daño causado a los pavimentos

Según lo que plantea Condarco, P. (2016) en su artículo es que “el daño al pavimento causado por los vehículos depende de la carga que cada eje descarga sobre ella. Los flujos de tránsito presentan una variedad de tipos de vehículos y configuraciones de ejes, tamaños y pesos de esta diversidad, son los vehículos pesados (Buses y camiones) los que ejercen mayor sollicitación al paquete estructural. Los vehículos livianos tienen poco impacto sobre la superficie de rodado que representa apenas cerca del 0.15% del total de sollicitaciones sobre la carretera. Condarco, P. (2016).

El daño también depende del tipo de eje vehicular. No es lo mismo el daño que una misma carga produce al pavimento si se descarga por medio de un eje simple que por medio de un eje tándem o un trídems. El efecto dañino de esa misma carga será mayor si se descarga al pavimento por medio de los ejes simples que por los ejes tándem y mucho mayor que por los ejes trídems. Condarco, P. (2016).

En cuanto a la temática técnica y práctica se profundizará en los diferentes métodos y diseños dentro de los cuales encontramos:

El método AASHTO el cual consiste en especificar los factores de equivalencia para convertir los diferentes tipos de vehículos comerciales a ejes equivalentes de 8.2 toneladas. A manera de recomendación, en el cálculo del tránsito del diseño, en Colombia se utilizan los factores de equivalencia calculados en la Investigación Nacional de Pavimentos, los cuales se ajustan a las condiciones del país en cuanto al tipo de vehículos y sus cargas que transitan por la red vial (Higuera, 2015).

TIPO DE VEHÍCULO		FACTOR DE EQUIVALENCIA PARA PAVIMENTO FLEXIBLE
BUSES	Bus	0.40
	Bus metropolitano	1.00
C2P	C2P	1.14
C2G	C2G	3.44
C3 – C4 (3.74 promedio)	C3	3.76
	C2-S1	3.37
	C4	6.73
	C3-S1	2.22
	C2-S2	3.42
C5	C3-S2	4.40
> C5	>C5	4.72

Figura 2. Factores de equivalencia de carga por tipo de vehículo a nivel nacional, 1996
Fuente: INVIAS, 1998.

De esta forma, según Higuera (2015), plantea que, con el método de diseño de la AASHTO, ejes con diferentes magnitudes y numero de repeticiones se convierten a un número de repeticiones equivalentes de carga de un eje estándar que causa el mismo daño en el pavimento. La carga seleccionada del eje estándar es de 18,000 libras (80 KN) aplicada por un eje simple con ruedas dobles en los

extremos, lo cual causa el mismo deterioro y daño en el pavimento que el causado por cada repetición del eje en estudio.

Teniendo en cuenta toda esta información se aplicará todas las herramientas que brinda cada materia de la Especialización en la Gerencia de Proyectos y en Gerencia de Procesos de Calidad e Innovación los cuales facilitan al investigador realizar una investigación de alta calidad y aplicar unas técnicas y herramientas que ayudan a dar solución al planteamiento del problema y sus diferentes objetivos.

Adicionalmente se pretende realizar la investigación con una óptica medio ambiental y de sostenibilidad llevando el proyecto hacia resultados que puedan ayudar a la toma de decisiones mucho más responsables a cualquier tipo de riesgo ambiental y mitigando el desperdicio de desechos industriales, generando a si una responsabilidad social de las partes responsables en el diseño, construcción, operación y mantenimiento de la malla vial del sistema Transmilenio.

4.2. Modelo teórico de interacción neumático-pavimento

Como bien resume Higuera (2015), las diferentes metodologías de diseño simplifican el problema de representar la interacción vehículo – pavimento, a través de las llantas. Por supuesto, cualquier método parte del principio básico de la presión ($P = F/A$), en donde el área de contacto entre el neumático y la superficie de pavimento resulta determinante para entender el mecanismo de disipación de esfuerzos (producidos por la carga vehicular) de la estructura de pavimento, y a su vez, resulta de suma importancia para entender la incidencia que tendrá la configuración de los ejes de los vehículos de carga (en este caso buses articulados

y biarticulados de Transmilenio) en el ciclo de vida de los pavimentos. La Figura 3 presenta los modelos teóricos más reconocidos en el medio respecto a los supuestos del área de contacto con el cual se aborda la problemática.

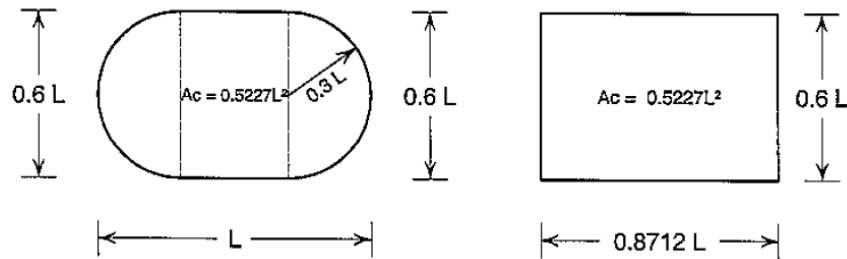


Figura 3. Modelo teórico de huella rectangular equivalente.

Fuente: Higuera, (2015).

5. MARCO INSTITUCIONAL

El Instituto de Desarrollo Urbano - IDU, es una institución destinada a ejercer obras viales y de espacio público para el desarrollo urbano de Bogotá su sede principal está ubicada en la Calle 22 No. 6 – 27 de Bogotá. La entidad fue creada mediante el Acuerdo 19 de 1972 del Concejo de Bogotá D.C. con el objeto de ejecutar obras viales y de espacio público para el Desarrollo Urbano de la Capital. (Instituto de Desarrollo Urbano, 2023)

El Instituto de Desarrollo Urbano es una institución pública, que realiza obras de infraestructura y mantenimiento vial para facilitar la movilidad de los habitantes en la ciudad. Dicha entidad es la encargada de estructurar y desarrollar proyectos de infraestructura vial y movilidad multimodal, de forma sostenible, incluyente, innovadora y eficiente, para contribuir al desarrollo urbano de Bogotá Región y mejorar la calidad de vida de su gente. (Instituto de Desarrollo Urbano, 2023)

El Instituto de Desarrollo Urbano, cuenta con un selecto equipo humano de funcionarios y contratistas, con funciones y objetivos claros para contribuir a mejorar la imagen de la ciudad, mediante el desarrollo de obras de infraestructura vial y de espacio público, para facilitar la movilidad y mejorar la calidad de vida de los capitalinos. La entidad es actualmente dirigida por el ingeniero civil Diego Sánchez Fonseca, egresado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Especialista en Gerencia Sistemas Gerenciales de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. (Instituto de Desarrollo Urbano, 2023).

5.1. Mapa de procesos

El Mapa de Procesos es la interpretación gráfica de la forma en la cual trabaja la entidad para el cumplimiento de su misión. En total son 22 procesos agrupados en 4 tipos: Misionales, Estratégicos, Apoyo, y de Evaluación y Mejora.

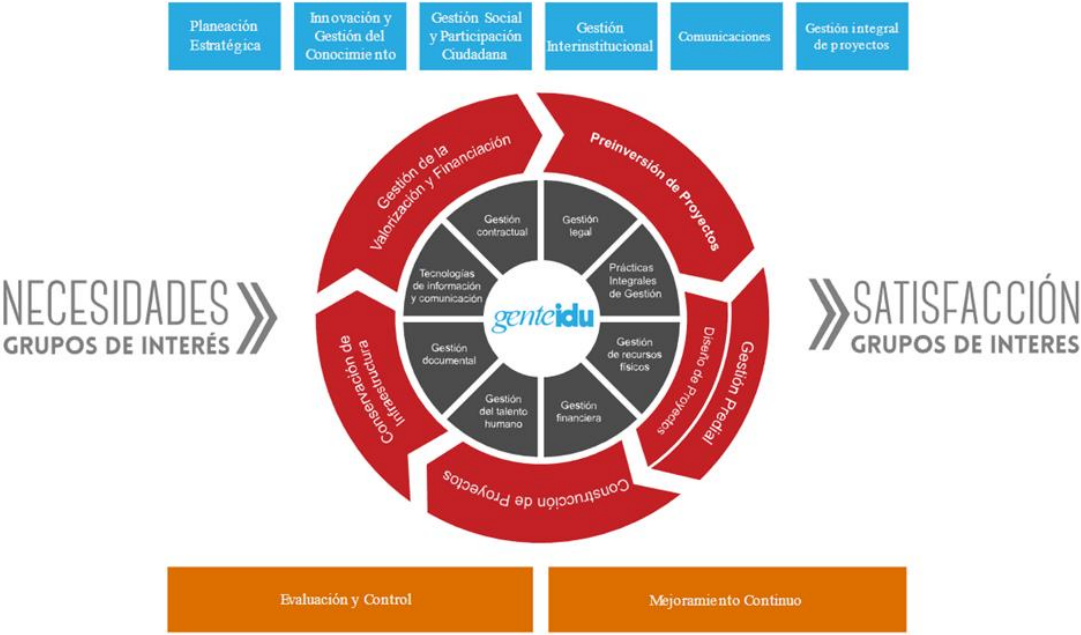


Figura 4. Mapa de procesos del Instituto de Desarrollo Urbano.

Fuente: IDU, 2023.

5.2. Estructura organizacional

El Instituto de Desarrollo Urbano, cuenta con un selecto equipo humano de funcionarios y contratistas, con funciones y objetivos claros para contribuir a mejorar la imagen de la ciudad, mediante el desarrollo de obras de infraestructura vial y de espacio público, para facilitar la movilidad y mejorar la calidad de vida de los capitalinos. La entidad es actualmente dirigida por el ingeniero civil Diego Sánchez Fonseca, egresado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Especialista en Gerencia Sistemas Gerenciales de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. (Instituto de Desarrollo Urbano, 2023).

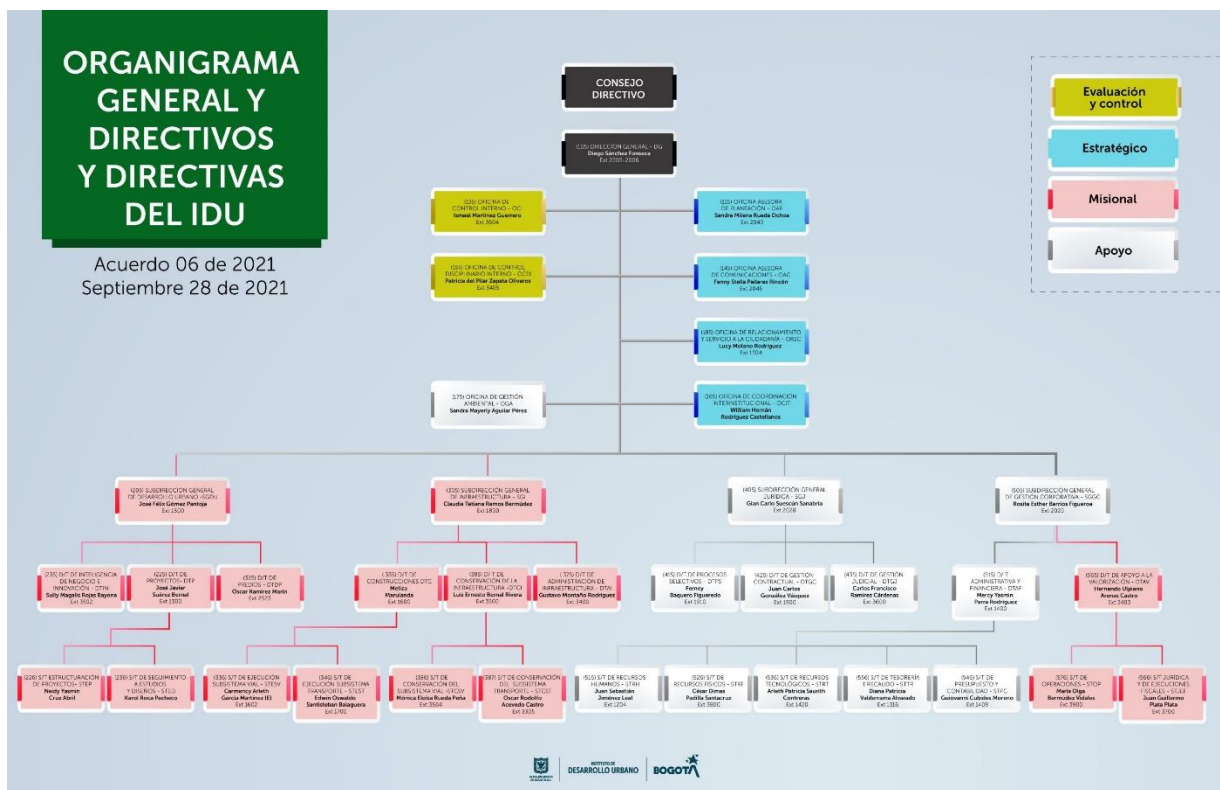


Figura 5. Organigrama del Instituto de Desarrollo Urbano.

Fuente: IDU, 2023.

6. METODOLOGÍA

La presente investigación incorpora un enfoque de **investigación cuantitativa correlacional**, para abordar el problema planteado desde sus 3 frentes: técnico, económico y ambiental; generando información de calidad, con valor agregado para que a partir de ella se gesten soluciones futuras con impacto para el IDU, Transmilenio, el medio ambiente y la ciudadanía en general.

Con la esencia de esta investigación se establecerán escenarios de incidencia sobre el ciclo de vida de la troncal Calle 80 de Transmilenio (pavimento flexible), revisando el efecto del tipo de eje de los buses, causado por el cambio en el factor de carga distribuida dependiendo del tipo de eje en función del área de contacto huella-pavimento.

Los escenarios planteados para análisis son los siguientes:

- Ejes simples con llantas duales (escenario base actual)
- Ejes tándem
- Ejes trídem

6.1. Primer nivel

6.1.1. *Enfoque de la investigación*

El enfoque como se ha mencionado es **cuantitativo**, teniendo como actividad clave el cálculo del número de ejes equivalentes bajo una metodología de diseño de pavimentos, que permita estandarizar el efecto de las cargas con relación al tipo de eje que las soporta y las transmite hacia el pavimento.

Para cumplir este objetivo, se empleará información secundaria basada en modelos teóricos de mecánica de pavimentos y fichas técnicas de los buses del sistema de transporte masivo Transmilenio.

Como mecanismo de control se comparará con cifras de estudios y análisis de sensibilidad previamente elaborados.

Adicionalmente, se pretende evaluar cuantitativamente el efecto que tendría implementar otras tipologías de ejes en los buses articulados de Transmilenio, respecto al impacto económico y ambiental, estimando cifras generales bajo escenarios supuestos del ciclo de vida de un tramo de pavimento.

6.1.2. Alcance de la investigación

Los datos serán correlacionados y se harán simulaciones mediante análisis de sensibilidad de variables previamente identificadas como críticas o que presuntamente influyen en uno u otro resultado.

Durante la presente investigación se abordará el método AASHTO para el diseño de pavimentos flexibles, que especifica factores de equivalencia para convertir los diferentes tipos de vehículos comerciales (en este caso los buses del sistema) a ejes equivalentes de 8.2 toneladas (Higuera, 2015); evaluando las condiciones particulares del sistema Transmilenio en cuanto al tipo de vehículos (articulados y biarticulados), tipos de ejes y las cargas impuestas en un tramo de referencia que será la troncal Calle 80 por tener pavimento flexible.

La presente investigación no comprende la toma de información primaria en campo, es decir, el pesaje de los ejes de los buses que hacen uso de la infraestructura; sino

que será basada en información secundaria y análisis de escenarios típicos y realistas.

Adicionalmente, es oportuno mencionar que la investigación no abarca el análisis de espectros de carga, siendo una metodología de evaluación del efecto de las cargas del tránsito diferente.

6.1.3. Diseño de la investigación

Actividades planteadas para el cumplimiento de los objetivos:

- **Objetivo 1.** Verificar a partir de modelos teóricos la implicación que tiene el tipo de eje de los vehículos en el aporte a las solicitaciones de carga que se impone a una estructura de pavimento flexible, en términos de ejes equivalentes.

Actividades:

- ✓ Establecer con las fichas técnicas los modelos de vehículos (buses de Transmilenio), tipos de ejes y capacidad de carga por eje.
- ✓ Realizar el cálculo de ESAL's (número de ejes equivalentes) para los escenarios planteados: ejes tándem y ejes trídem, en reemplazo de los ejes simples duales convencionales.
- **Objetivo 2.** Establecer el impacto económico que implicaría el cambio de los tipos de ejes de los buses de Transmilenio para varios escenarios sobre el corredor de la Avenida Calle 80 (pavimento flexible), desde el rol del operador del sistema (Transmilenio).

Actividades (posibles):

- ✓ Investigar los costos del modelo actual que emplea ejes simples duales, identificando el costo de los neumáticos, duración promedio, etc.
 - ✓ Proyectar el efecto de los escenarios alternos planteados: con ejes tándem y con ejes trídem; contrastando el impacto en un escenario comparable.
- **Objetivo 3.** Estimar el impacto económico que conllevaría la reducción de actividades de mantenimiento y/o la eventual mejoría en el ciclo de vida sobre el corredor de la Avenida Calle 80 (pavimento flexible), desde el rol del administrador de la red vial (IDU).

Actividades (posibles):

- ✓ Investigar el presupuesto anual dedicado a actividades de mantenimiento de la troncal calle 80, con el actual escenario (ejes simples duales).
 - ✓ Estimar el impacto en los costos que generaría la implementación de los escenarios alternos, por efecto del potencial cambio en el ciclo de vida del pavimento.
- **Objetivo 4.** Identificar los impactos ambientales y sobre los usuarios del sistema que implicarían los cambios analizados durante el desarrollo de la presente investigación, bajo la óptica de la sostenibilidad y el compromiso social.

Actividades (posibles):

- ✓ Investigar un mecanismo de estimación del impacto ambiental (por ejemplo: huella de carbono u otros) que generaría el cambio en el tipo de ejes y por lo tanto en la cantidad de neumáticos que emplearían los buses del sistema.
- ✓ Estimar el impacto de la implementación de las medidas en términos ambientales o sociales o externalidades del transporte.

6.1.3.1. Análisis técnico

- **Escenario 1:** Análisis de la situación actual

Empleando la información sobre la distribución de carga a lo largo de un día típico, se calculará a cuántos ejes de 8.2 ton equivale el paso de ese bus en su condición de carga máxima y mínima (sólo para estas dos condiciones – las más críticas). Se hace claridad que las condiciones de carga a analizar deberán corresponder con mediciones hechas sobre la Troncal de la Av. Calle 80, que posee pavimento flexible.

La **Figura 6** representa un bus articulado típico de Transmilenio.



Figura 6. Configuración de ejes de carga del bus de Transmilenio.

Fuente: IDU, 2013.

- **Escenario 2:** Análisis con ejes tándem

Se deberá repetir el ejercicio anterior, pero bajo el supuesto de que el eje trasero del bus se cambiará por un eje tándem (suponiendo la carga total sobre el eje trasero no cambia).

- **Escenario 3:** Análisis con ejes trídem

Finalmente se replicará el ensayo, pero bajo el supuesto de que el eje trasero del bus se cambiará por un eje trídem.

Para realizar los cálculos mencionados se empleará la ecuación clásica:

$$\left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^4$$

Así mismo, se usarán las conversiones del Instituto del Asfalto (i.e., AASHTO para SN= 5 y Pt = 2.5) para realizar los cálculos en los tres escenarios descritos anteriormente, para finalmente comparar los resultados obtenidos.

6.1.3.2. *Análisis económico*

Para desarrollo del análisis económico se compararán los resultados obtenidos por cada escenario, estimando los costos que acarrearía el generar un cambio en la composición de los trenes de carga de los buses de Transmilenio para un tramo de referencia.

Dado que el eventual cambio en el tipo de ejes de los buses generará un impacto en el pavimento, se pretende cuantificar en qué medida se dará tal efecto; bien sea en cuanto a la durabilidad de la estructura del pavimento y/o en cuanto al impacto en términos de los costos asociados a llantas y repuestos.

6.1.3.3. Análisis de impacto ambiental

Este análisis se deberá realizarse al final, basado en los análisis técnico y económico, pues su objetivo es comparar el potencial impacto en el medio ambiente desde los siguientes dos puntos de vista:

- El posible beneficio que implicaría el reducir el efecto de las cargas al ser transmitidas a la estructura de pavimento a través de una mayor área de contacto rueda – superficie. Teóricamente se espera un aumento en el ciclo de vida del pavimento.
- El probable impacto ambiental por efecto del mayor consumo de neumáticos con el empleo de ejes tándem o trídem a cambio de los actuales ejes simples duales.

6.1.4. Definición de variables

- **Definición conceptual**

La definición conceptual de las variables empleadas en la presente investigación se presenta en la **Tabla 1**.

No.	Variable	Definición conceptual
1	Carga total	Carga total por tipo de bus que se entregará a la estructura del pavimento
2	Distribución de cargas	Proporción de la carga total que asume cada eje del vehículo
3	ESAL (Equivalent Single-Axle Load)	Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas
4	Indicador de costo/Km/año	Costo estimado total de mantenimiento de 1 Km de pavimento flexible, por año.
5	Indicador de costo de neumáticos/año	Costo estimado total de neumáticos por año, para cada escenario.
6	Indicador de cambio de consumo de asfalto / año	Indicador que permitirá estimar el beneficio ambiental de la potencial reducción en el consumo de asfalto, por ser un producto resultado de la refinación del petróleo (recurso natural no renovable).

Tabla 1. Definición conceptual de las variables

Fuente: elaboración propia.

- **Definición operacional**

Si bien es cierto que el deterioro de los pavimentos en un tiempo determinado se puede dar por más de un factor, las solicitaciones por efecto del tránsito tienen un porcentaje importante en su vida útil.

La definición operacional de las variables consideradas para el desarrollo del estudio planteado se presenta en la **Tabla 2**.

No.	Variable	Definición operacional	Unidades
1	Carga total	Se empleará para realizar los cálculos de ESAL's de acuerdo con la distribución porcentual por eje	Toneladas
2	Distribución de cargas	Permite identificar el aporte de cada eje en la transmisión de cargas al pavimento	%
3	ESAL (Equivalent Single-Axle Load)	Es la unidad de medida estándar que permite comparar la carga de diferente tipo de vehículo y de eje, en una sola medida. Para su cálculo se empleará la ecuación clásica y el método AASHTO.	Número
4	Indicador de costo/Km/año	Indicador que permitirá estimar el impacto económico de la potencial disminución de necesidades de mantenimiento del pavimento	\$/Km/año
5	Indicador de costo de neumáticos/año	Indicador que permitirá estimar el impacto económico y ambiental por efecto de la variación en consumo de neumáticos con los cambios planteados en el tipo de eje.	\$/año
6	Indicador de cambio de consumo de asfalto / año	Indicador que permitirá estimar el beneficio ambiental de la potencial reducción en el consumo de asfalto.	m ³ /año

Tabla 2. Definición operacional de las variables.

Fuente: elaboración propia.

6.1.5. Población y muestra

Para los fines de este estudio la población objetiva y por ende la muestra, es de instancias, cifras y estudios más no de personas. Por ello responde a ámbitos técnicos, económicos y ambientales, aunque indudablemente tendrán un impacto social importante, a largo plazo, y en aspectos tributarios de las personas.

6.2. Segundo nivel

6.2.1. Selección de métodos o instrumentos para recolección de información

El origen de la información de la presente investigación será secundario, dado que el alcance del estudio no abarca la toma de información primaria en campo. Como fuente de comparación adicional, podrán ser cotejados los resultados con otros estudios similares de otros sistemas de transporte, otras ciudades u otros tipos de vehículos.

6.2.2. Técnicas de análisis de datos

Debido a la naturaleza de la investigación propuesta, y a que no involucra la recolección de información primaria, no aplica este numeral.

7. ANÁLISIS DE DATOS

Un mecanismo para determinar el mayor o menor daño que un tipo de vehículo genera en la estructura de pavimento es el factor de equivalencia de carga por tipo de vehículo comercial (buses y camiones).

Este factor representa el número de veces que pasa un eje normalizado (generalmente de 8.2 toneladas) por cada pasada del tipo de vehículo considerado (Higuera, 2015).

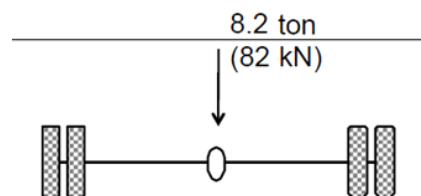


Figura 7. Eje estándar o de referencia: eje simple con llantas duales.

Fuente: elaboración propia.

De tal modo, a continuación, se presenta el desarrollo metodológico y resumen de los cálculos y resultados obtenidos.

7.1. Implicación del tipo de eje en el NEE

7.1.1. Supuestos adoptados y construcción de escenarios

Empleando la información sobre la distribución de carga a lo largo de un día típico que se presenta en la **Tabla 3**, se calculó a cuántos ejes de 8.2 toneladas equivale el paso de un (1) bus articulado en su condición de carga máxima y mínima (las condiciones más críticas). Se hace claridad que las mediciones de estos buses fueron hechas sobre la Troncal de la Av. Calle 80, que posee pavimento flexible.

Luego, aplicando la metodología AASHTO, se repitió el ejercicio anterior, pero bajo el supuesto de que el eje trasero del bus se cambiara por un eje tándem (suponiendo la carga total sobre el eje trasero no cambia). Finalmente se replicó el ensayo, pero bajo el supuesto de que el eje trasero del bus se cambiara por un eje trídem.

Posteriormente, se empleó la ecuación clásica: $(P/P_{ref})^4$, la cual hace parte de las metodologías de diseño de pavimentos adoptadas por el INVIAS y las conversiones del Instituto del Asfalto (i.e., AASHTO para SN= 5 y Pt = 2.5) para realizar los tres cálculos en los siguientes escenarios, se compararon los resultados obtenidos:

- Escenario 1 – Base: actual (eje simple con llantas gemelas).
- Escenario 2: reemplazo del eje trasero del bus por un eje tándem.
- Escenario 3: reemplazo del eje trasero del bus por un eje trídem.

Hora inicio	Hora final	Peso total (Ton)	Peso por ejes (Ton)		
			Eje 1	Eje 2	Eje 3
5:00	6:00	32.5	12.50	12.50	7.51
6:00	7:00	32.5	12.50	12.50	7.51
7:00	8:00	32.5	12.50	12.50	7.51
8:00	9:00	30.87	11.87	11.87	7.13
9:00	10:00	30.76	11.83	11.83	7.11
10:00	11:00	28.58	10.99	10.99	6.60
11:00	12:00	27.28	10.49	10.49	6.30
12:00	13:00	26.41	10.15	10.15	6.10
13:00	14:00	26.62	10.24	10.24	6.15
14:00	15:00	27.93	10.74	10.74	6.45
15:00	16:00	29.56	11.37	11.37	6.83
16:00	17:00	28.91	11.12	11.12	6.68
17:00	18:00	28.04	10.78	10.78	6.48
18:00	19:00	26.08	10.03	10.03	6.02
19:00	20:00	24.67	9.49	9.49	5.70
20:00	21:00	24.34	9.36	9.36	5.62
21:00	22:00	23.8	9.15	9.15	5.50
22:00	23:00	24.56	9.44	9.44	5.67
23:00	0:00	25.97	9.99	9.99	6.00

Tabla 3. Distribución de carga en un día típico – Troncal Transmilenio Calle 80.

Fuente: Datos de Transmilenio S.A.

Se hace la claridad que para efectos prácticos de aplicación de la metodología AASHTO para la generación de factores de equivalencia entre ejes, se considera el eje delantero del bus como simple con llantas duales.

De la Tabla 3, se extrae la condición de carga máxima y de carga mínima en un día típico:

- Carga máxima = 32.5 toneladas,
- Carga mínima = 23.8 toneladas.

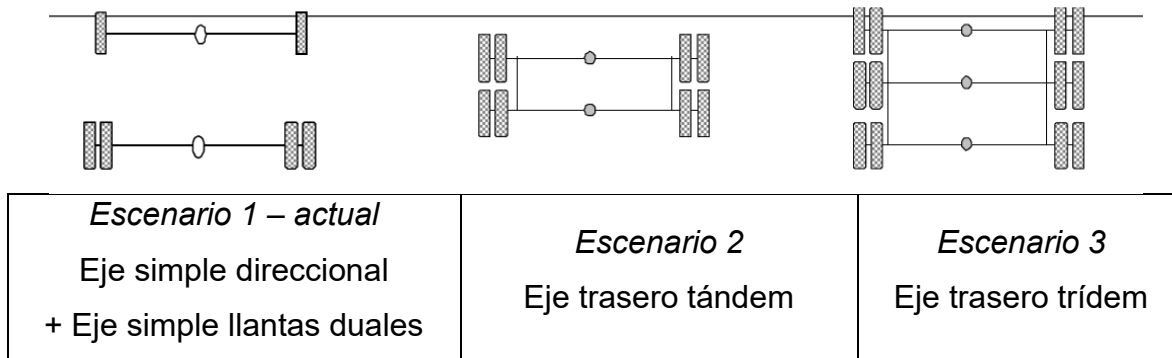


Figura 8. Configuración de ejes de carga en los escenarios de análisis.

Fuente: elaboración propia.

7.1.2. Método de la AASHTO

De acuerdo con este método estadounidense de amplia aceptación a nivel mundial, incluyendo las buenas prácticas en Colombia, diversos tipos de ejes con magnitudes de carga y número de repeticiones se convierten a un número de ejes equivalentes de carga (NEE) de un eje estándar de referencia de 18.000 libras (80 kN u 8.2 ton) aplicadas en un eje simple de ruedas dobles o gemelas.

Los factores de carga de eje equivalente (EALF, Equivalent Axle Load Factors) son un mecanismo que permite relacionar el daño causado por diferentes magnitudes de carga y configuraciones de ejes con la carga del eje estándar, mediante la expresión:

$$\frac{W_x}{W_{18}}$$

Donde:

W_x: Aplicaciones de carga del eje de 18.000 libras en un periodo t.

W₁₈: Aplicaciones de carga del eje de 18.000 libras en un periodo t.

De tal modo, para pavimentos flexibles como es el caso de la troncal de Transmilenio Calle 80, es posible aplicar las siguientes expresiones matemáticas que permiten determinar los factores de equivalencia entre los diversos tipos de eje que se considerarán en el presente estudio.

$$\frac{W_x}{W_{18}} = \left[\frac{L_{18} + L_{2s}}{L_x + L_{2x}} \right]^{4.79} \cdot \left[\frac{10^{\frac{G}{\beta_x}}}{10^{\frac{G}{\beta_{18}}}} \right] \cdot [L_{2x}]^{4.33}$$

$$G = \log \left(\frac{4.2 - P_t}{4.2 - 1.5} \right)$$

$$\beta = 0.4 + \left[\frac{0.081 (L_x + L_{2x})^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} \cdot L_{2x}^{3.23}} \right]$$

Donde:

Wx: inverso de los factores EALF

W18: Número de ejes simples de 18.000 lb (80 kN u 8.2 ton)

Lx: Carga del eje evaluado

L18: 18 (carga del eje estándar / 1000, en libras)

L2: Código para la configuración del eje

1 = eje simple

2 = eje tándem

3 = eje trídem

x = factor de equivalencia de carga del eje evaluado

s = código para el eje estándar, igual a 1 (eje simple)

G: Función de la proporción de pérdida de serviciabilidad en un tiempo t, para la pérdida potencial observada para $P_t = 1.5$

b: Función que determina la relación entre serviciabilidad y aplicaciones de eje de carga

Pt: Índice de serviciabilidad al final del periodo de diseño

SN: Número estructural del pavimento

En la **Tabla 4** se resumen los cálculos con la ecuación de la AASHTO para los distintos escenarios: para las condiciones de carga máxima y mínima en un día típico, y bajo el supuesto de que el eje trasero pueda ser un eje tándem y el mismo caso para un eje trídem.

Caso	Condición	Carga total (Ton)	Distribución cargas (%)	Tipo de eje	Wtx (Ton)	Wtx (lb)	Wx/W18	EALF AASHTO	ESAL (vehículo)
Ejes simples con llantas duales (Escenario 1-Base)	Carga máxima	32.5	23.10%	simple *	7.51	16536.34	1.4046	0.71	10.82
			38.45%	simple dual	12.50	27524.78	0.1978	5.06	
			38.45%	simple dual	12.50	27524.78	0.1978	5.06	
	Carga mínima	23.8	23.10%	simple *	5.50	12109.69	5.0897	0.20	3.31
			38.45%	simple dual	9.15	20156.61	0.6414	1.56	
			38.45%	simple dual	9.15	20156.61	0.6414	1.56	
Eje trasero tándem (Escenario 2)	Carga máxima	32.5	23.10%	simple *	7.51	16536.34	1.4046	0.71	6.06
			38.45%	simple dual	12.50	27524.78	0.1978	5.06	
			38.45%	tándem	12.50	27524.78	3.3724	0.30	
	Carga mínima	23.8	23.10%	simple *	5.50	12109.69	5.0897	0.20	1.84
			38.45%	simple dual	9.15	20156.61	0.6414	1.56	
			38.45%	tándem	9.15	20156.61	12.4792	0.08	
Eje trasero trídem (Escenario 3)	Carga máxima	32.5	23.10%	simple *	7.51	16536.34	1.4046	0.71	5.82
			38.45%	simple dual	12.50	27524.78	0.1978	5.06	
			38.45%	trídem	12.50	27524.78	19.9118	0.05	
	Carga mínima	23.8	23.10%	simple *	5.50	12109.69	5.0897	0.20	1.77
			38.45%	simple dual	9.15	20156.61	0.6414	1.56	
			38.45%	trídem	9.15	20156.61	73.1785	0.01	

Tabla 4. ESAL bajo metodología AASHTO, para cada escenario.

Fuente: elaboración propia.

7.1.3. Método INVIAS

De la misma manera, en la Tabla 5 se presentan las expresiones para el cálculo simplificado del factor de carga por eje equivalente empleadas por el INVIAS en Colombia.

Tipo de eje	Fórmula para el cálculo de EALF
Eje simple de llanta simple	$\left(\frac{\text{Carga del eje, ton}}{6.6}\right)^4$
Eje simple de llantas gemelas	$\left(\frac{\text{Carga del eje, ton}}{8.2}\right)^4$

Tipo de eje	Fórmula para el cálculo de EALF
Eje tándem	$\left(\frac{\text{Carga del eje, ton}}{15}\right)^4$
Eje trídem	$\left(\frac{\text{Carga del eje, ton}}{23}\right)^4$

Tabla 5. Fórmulas simplificadas para el cálculo de EALF - INVIAS.

Fuente: Higuera, 2015.

En la Tabla 6 el resumen para los cálculos con la ecuación clásica de conversión $(P/P_{ref})^4$.

Caso	Condición	Carga total (Ton)	Distribución cargas (%)	Tipo de eje	Wtx (Ton)	EALF INVIAS	ESAL (vehículo)
Ejes simples con llantas duales (Escenario 1 - Base)	Carga máxima	32.5	23.10%	simple *	7.51	1.67	12.46
			38.45%	simple dual	12.50	5.39	
			38.45%	simple dual	12.50	5.39	
	Carga mínima	23.8	23.10%	simple *	5.50	0.48	3.58
			38.45%	simple dual	9.15	1.55	
			38.45%	simple dual	9.15	1.55	
Eje trasero tándem (Escenario 2)	Carga máxima	32.5	23.10%	simple *	7.51	1.67	7.55
			38.45%	simple dual	12.50	5.39	
			38.45%	tándem	12.50	0.48	
	Carga mínima	23.8	23.10%	simple *	5.50	0.48	2.17
			38.45%	simple dual	9.15	1.55	
			38.45%	tándem	9.15	0.14	
Eje trasero trídem (Escenario 3)	Carga máxima	32.5	23.10%	simple *	7.51	1.67	7.15
			38.45%	simple dual	12.50	5.39	
			38.45%	trídem	12.50	0.09	
	Carga mínima	23.8	23.10%	simple *	5.50	0.48	2.06
			38.45%	simple dual	9.15	1.55	
			38.45%	trídem	9.15	0.03	

Tabla 6. ESAL bajo metodología INVIAS, para cada escenario.

Fuente: elaboración propia.

7.1.4. Implicación de la sobrecarga por tipo de eje


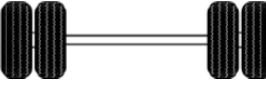
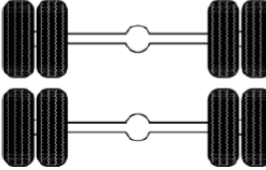
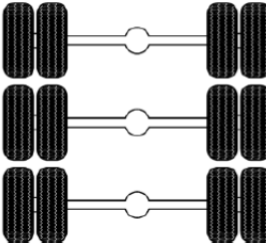
Tipo de eje	Esquema	Carga máxima permitida en Colombia (Toneladas)
Eje simple direccional		6.0
Eje simple de llanta doble		11.0
Eje tándem (llanta doble)		22.0
Eje trídem (llanta doble)		24.0

Tabla 7. Cargas máximas permitidas por tipo de eje en Colombia.

Fuente: Higuera, 2015.

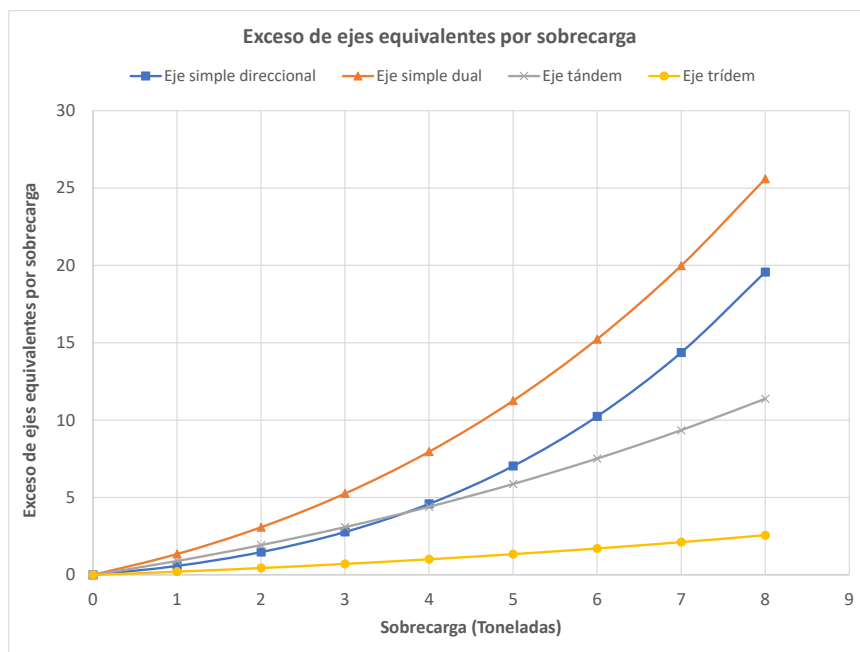


Figura 9. Exceso de ejes equivalentes por efecto de sobrecarga de los buses.

Fuente: elaboración propia.

7.2. Evaluación del impacto económico para Transmilenio por el tipo de eje empleado.

Según la investigación realizada y el análisis de los datos obtenidos se pudo evidenciar un resultado donde el uso de los neumáticos que actualmente maneja Transmilenio con referencia 295/80 R22.5 de la marca Goodyear tienen un valor por unidad en el mercado promedio de \$ 2.466.199 según las cotizaciones realizadas en diferentes fuentes como mercado libre, Goodyear, Walmart, Buscallantas.com etc., los cuales se observan a continuación en la **Tabla 8**.

COTIZACION LLANTAS GOODYEAR	
TIPO DE LLANTA	VALOR
Goodyear S800+ 295/80 R22.5	\$ 2.506.654
Goodyear 295/80 R22.5 Armor Max Ms	\$ 2.750.900
Goodyear KMAX SEVERE – 295/80 R22.5	\$ 2.370.240
Goodyear KMAX D 295/80 R22.5	\$ 2.237.000
PROMEDIO PRECIO	\$ 2.466.199

Tabla 8. Cotización de neumáticos para buses tipo Transmilenio.

Fuente: elaboración propia.

Por lo consiguiente se puede evidenciar que el cambio de ejes simples a ejes tándem o trídem podría tener un impacto en los costos al incrementar por cada neumático adicional dicho valor mencionado anteriormente de \$2.466.199. Según lo anterior se calculó la diferencia de precios al momento de utilizar algún tipo de eje ya sea simple, tándem o trídem de acuerdo con el valor por el número de neumáticos que se utilizan por cada bus articulado de Transmilenio como se evidencia en la **Tabla 9**.

TABLA DE VARIACION DE PRECIO SEGÚN EL EJE							
Escenario 1							
Tipo de Eje	Eje simple direccional	Eje simple de llantas duales	Eje simple de llantas duales	Total de llantas	Valor Unitario	Valor total	Diferencia
Eje Simple	2	4	4	10	\$ 2.466.199	\$ 24.661.985	\$ 0
Escenario 2							
Tipo de Eje	Eje simple direccional	Eje simple de llantas duales	Eje Tandem de llantas duales	Total de llantas	Valor Unitario	Valor total	Diferencia
Eje Tandem	2	4	8	14	\$ 2.466.199	\$ 34.526.779	\$ 9.864.794
Escenario 3							
Tipo de Eje	Eje simple direccional	Eje simple de llantas duales	Eje Tridem de llantas duales	Total de llantas	Valor Unitario	Valor total	Diferencia
Eje Tridem	2	4	12	18	\$ 2.466.199	\$ 44.391.573	\$ 19.729.588

Tabla 9. Variación de costos de llantas según tipo de eje.

Fuente: Elaboración propia.

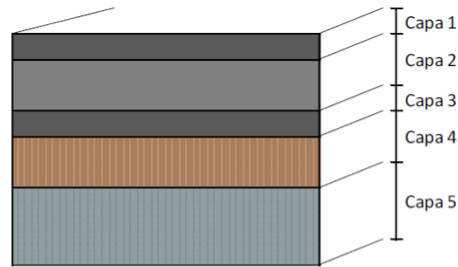
Según todo lo anterior y teniendo en cuenta solo el número de neumáticos que actualmente se utilizan en los buses de Transmilenio con un **promedio de vida útil de 65.000 km a 69.000 km** el aumento en el valor de los neumáticos se incrementaría sustancialmente de la siguiente forma:

- Eje Tándem incremento 40%
- Eje Trídem incremento 80%

7.3. Evaluación del impacto económico para el IDU por actividades de mantenimiento

Con el ánimo de evaluar el impacto económico debido a las actividades de mantenimiento típicas para la capa superficial del pavimento (carpeta de rodadura) para un periodo de diseño de 10 años (típico para pavimentos flexibles); se procede a calcular la cantidad global de material a partir de lo siguientes datos de entrada:

- Longitud total de la troncal calle 80, desde la Autopista Norte hasta el Portal Calle 80 = 7.5 Km.
- Ancho de calzada promedio adoptado = 7 m.
- Espesor de la capa superficial de rodadura = 9 cm, según la **Figura 10**.



Capa No.	Tipo de capa	Material	Espesor, cm
1	Rodadura	MD-12 Asfalto modificado tipo III	9.0*
2	Intermedia	MAM-20 Asfalto modificado tipo V	12.0*
3	Intermedia	MD-20 convencional	7.0*
4	Base	Material granular estabilizado con asfalto (MGEA)	25.0
5	Material remanente	Granular remanente	55.0

Figura 10. Estructura de pavimento flexible – Troncal Calle 80.

Fuente: Medina, 2013.

Adicionalmente, se procede a realizar los cálculos bajo una serie de supuestos:

- Bajo el escenario actual se adopta un porcentaje de deterioro del 25% del área total de la superficie de rodadura.
- Se asume una relación lineal y directamente proporcional entre el número de ejes equivalentes (NEE) encontrados para cada escenario y el grado de deterioro, considerando que todas las demás variables permanecen constantes.
- Se asume que solamente será necesario realizar actividades de mantenimiento sobre la capa superficial del pavimento, durante los primeros 10 años de la vida útil o periodo de diseño del pavimento.
- Se asume un valor global por concepto de mano de obra y administración del 35% del valor total de los materiales, en este caso mezcla asfáltica MD-12 modificada.
- Se asume que el porcentaje de afectación (grado de deterioro) para los escenarios con eje tándem y eje trídem será proporcionalmente lineal al número de ejes equivalentes (NEE); es decir, reduciendo tal deterioro en un 56% y 54% para los escenarios 2 y 3, respectivamente.

Ítem	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
MD-12 Asfalto modificado tipo III (m ³)	4725	4725	4725
Porcentaje de afectación	25%	14%	14%
Precio de referencia IDU 2023 (m ³) *	\$ 910,142	\$ 910,142	\$ 910,142
Costos de administración y mano de obra global	35%	35%	35%
Costo total mantenimiento - Periodo 10 años =	\$ 1,451,392,071	\$ 812,779,560	\$ 783,751,718

Tabla 10. Impacto económico por mantenimiento de la capa superficial.

Fuente: Elaboración propia.

** Visor de Precios Unitarios de Referencia IDU, 2023.*

7.4. Evaluación del impacto ambiental por cambio del tipo de eje

La óptica de evaluación en la sostenibilidad y el compromiso social, y esta entendida dentro del contexto que arroja la presente investigación, donde el uso de ejes tándem y trídem implicarán un aumento al doble en el uso de neumáticos, lo que a primera vista tendría un impacto ambiental en el uso de cantidad de insumos como el petróleo, lo que tendrá un impacto directo en la huella de carbono por las toneladas de emisiones por kilómetros de recorrido.

Al respecto y para sustentar esta evaluación, se ha determinado según la Tabla No. 7 que si bien es cierto que el uso de número de neumáticos aumentaría causando un impacto ambiental por el tonelaje de emisiones este podría representar en conjunto con la reducción de materiales para la fabricación y mantenimiento de piso asfáltico, un menor impacto puesto que según el estudio de la Universidad Yale de Estados Unidos se determinó que los productos relacionados con el asfalto emiten mezclas sustanciales y diversas de compuestos orgánicos al aire, con una fuerte dependencia de la temperatura y otras condiciones ambientales.

También se sumó a la investigación un estudio de la Universidad Católica sobre el impacto ambiental de las emisiones de CO₂ en el ciclo de vida de los pavimentos flexibles y rígidos en Bogotá. Donde se comparó la contaminación por emisiones de neumáticos y la del pavimento tenemos lo siguiente:

- Porcentaje de emisiones esperado por neumáticos nuevos es del 69,20 % y las toneladas de emisiones esperadas es de 41,05%.
- Emisiones anuales en toneladas en el 2022 de CO₂ son de 983.54, ver **Tabla 11**, sobre emisiones de CO₂.

Representando esto para las emisiones por neumáticos solo un 0,0417 % frente a la contaminación del pavimento que estaría un 99,958 % por encima.

De manera que, aunque como hay un impacto económico por la compra de neumáticos, que ya reforzaremos en las recomendaciones, puede disminuirse como en el caso de Ecuador, mediante el uso de reencauchados, de calidades comprobadas, por lo cual nunca será comparable con la contaminación y el impacto por huella de carbono, que genera el pavimento y sus permanentes mantenimientos, por la carga y el desgaste natural sobre el mismo.

Tipo de neumático	Tipo de carretera	Porcentaje de población que representa	Kilometraje medio que recorren los neumáticos	Kilometraje esperado según datos del estudio
Llantas nuevas	Pavimentado Larga Distancia	22,30%	68000	70000
	Regional	23,10%	53000	83000
	Mixto	12,40%	38000	84000
	Urbano	42,20%	38000	59000
Reencauche	Pavimentado Larga Distancia	22,30%	53000	56000
	Regional	23,10%	53000	55000
	Mixto	12,40%	40000	40000
	Urbano	42,20%	38000	55000

Tabla 11. Comparación de los rendimientos de los neumáticos, en kilometrajes

Fuente: Universidad Metropolitana del Ecuador, 2019.

Tipo de neumático	Tipo de carretera	Porcentaje de contaminación por tipo de llanta	Toneladas de emisiones que representa	Toneladas de emisiones esperadas según estudio
Llantas nuevas	Pavimentado Larga Distancia	15,20%	13,23	12,85
	Regional	15,75%	13,70	8,75
	Mixto	8,45%	7,36	3,33
	Urbano	28,77%	25,03	16,12
Reencauche	Pavimentado Larga Distancia	7,10%	6,17	5,84
	Regional	7,35%	6,39	6,16
	Mixto	3,95%	3,43	3,43
	Urbano	13,43%	11,68	8,07

Tabla 12. Cantidades porcentuales y relativas de emisiones contaminantes generadas por los neumáticos.

Fuente: Universidad Metropolitana del Ecuador, 2019.

Elemento	Toneladas de emisiones esperadas	Porcentaje de emisiones esperado	Reducción en Toneladas de emisiones	Reducción en porcentaje de emisiones
Llantas nuevas	41,05	69,20%	18,27	30,80%
Reencauchadas	23,51	84,92%	4,17	15,08%
Toneladas emisiones CO2	64,56	74,20%	22,44	25,80%

Tabla 13. Cantidades porcentuales y relativas de emisiones contaminantes contrarrestadas.

Fuente: Universidad Metropolitana del Ecuador, 2019.

Tramo: Carril_Derecho Alternativa: Alternativa base Sensibilidad: Base Sensitivity Scenario							
ID tramo: 001		Ancho: 10,00m		Tipo de carretera: Secondary or Main		Curvatura: 3,00grados/km	
Longitud: 2,52m		Ascensos y descensos: 1,00m/km					
Año	Cantidad de emisiones anuales en toneladas						
	Hidrocarburos HC	Monóxido de carbono CO	Oxido nitroso NOx	Dióxido de azufre SO2	Dióxido de carbono CO2	Partículas Par	Piomo Pb
2021	5,91	12,18	15,52	0,52	901,31	1,52	0,07
2022	6,65	13,67	17,07	0,58	983,54	1,70	0,07
2023	7,46	15,29	18,75	0,64	1.072,65	1,90	0,07
2024	8,32	16,97	20,54	0,71	1.166,55	2,12	0,08
2025	9,21	18,65	22,43	0,79	1.265,06	2,35	0,08
2026	10,12	20,32	24,45	0,87	1.369,47	2,60	0,09
2027	11,09	22,01	26,65	0,96	1.483,38	2,88	0,09
2028	12,17	23,88	29,13	1,06	1.612,36	3,19	0,10
2029	13,40	26,00	31,96	1,18	1.760,77	3,56	0,10
2030	14,84	28,50	35,26	1,32	1.934,81	3,98	0,11

Tabla 14. Resumen de Emisiones por carril asfáltico por año

Fuente: Universidad Metropolitana del Ecuador, 2019.

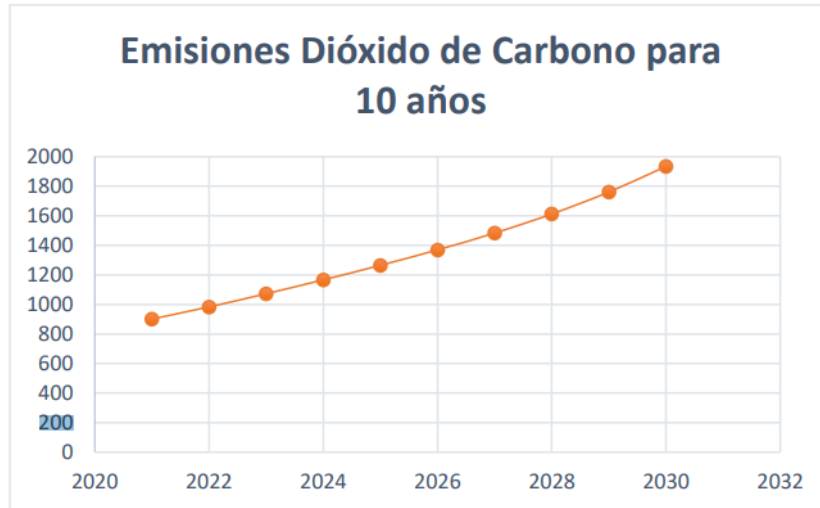


Figura 11. Aumento de emisiones de CO₂ en Avenida las Américas Bogotá D.C.

Fuente: GONZÁLEZ, 2021.

Ahora bien, el impacto ambiental por emisión de CO₂ en el pavimento tiene un costo de crecimiento exponencial que supera claramente los costos vistos en el numeral anterior, por el aumento en la compra de mayor número de neumáticos por el uso de ejes trídrem y tándem.

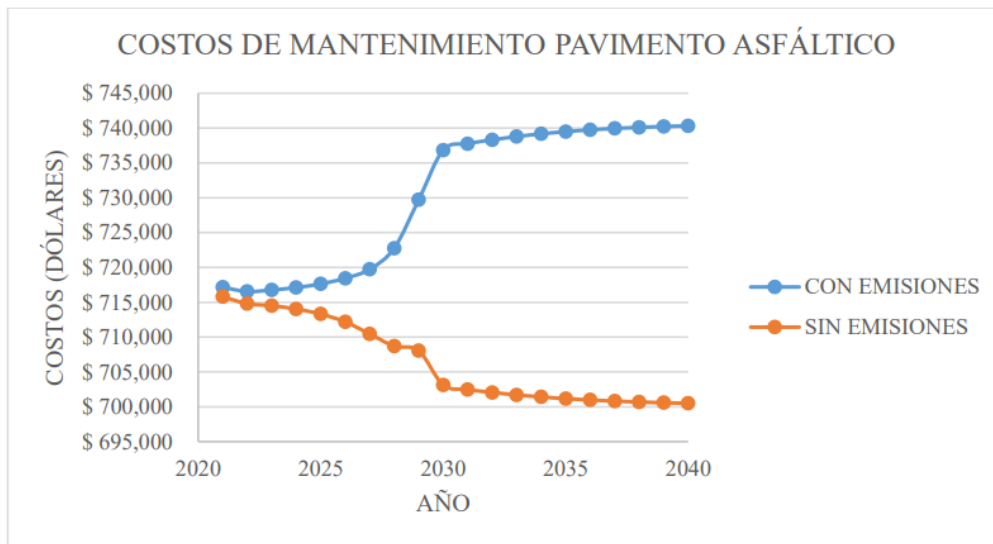


Figura 11. Gráfico comparativo costos con emisiones del pavimento asfáltico.

Fuente: GONZÁLEZ, 2021.

Es importante también tener en cuenta en esta evaluación, que la contaminación por emisión de huella de carbono establecida está dada en los estudios revisados, bajo unas condiciones normales de ejecución de mantenimientos programados, de uso correcto del paso vehicular por las mallas viales, de una garantía de fabricación de neumáticos y de pavimento razonable en calidad, de condiciones climáticas contempladas en las condiciones de fabricación, y para el impacto económico el aumento del índice de precios del consumidor y los precios de importación de materiales.

7.5. Evaluación del impacto social por cambio del tipo de eje

El impacto económico ha arrojado que el aumento en el presupuesto de la inversión en neumáticos de un 40% con eje tándem y 80% con eje trídem contrasta con el valor ganado respecto a el aumento del ciclo de vida del pavimento el cual tendrá un impacto económico importante frente a los costos del servicio.

Sin embargo, para la población de usuarios en Bogotá, el aumento tanto en la tarifa del pasaje causado por un reajuste presupuestal de la empresa Transmilenio, o ya sea vía tributos por rodamiento, a corto plazo tiene una representatividad, dadas las condiciones actuales de desaceleración económica.

A pesar de ello se manifiesta en esta evaluación que a mediano y largo plazo los países desarrollados habrán podido implementar las medidas nacientes de incentivos para países que contribuyan en la reducción de emisiones de carbono, con sus políticas públicas y con ejecuciones presupuestales concretas como las que esta investigación indirectamente puede llegar a sugerir.

Concretamente se hace referencia a pronunciamientos como el del Secretario de Medio Ambiente del Reino Unido, David Miliband donde se establece que se podrían generar US \$ 100 millones anuales para los países en desarrollo por la venta de créditos de emisiones de carbono (2017, Banco Mundial), por su alta rentabilidad pues son soportados por acciones de petróleo, minerales, carbón etc.

Este tipo de recursos generaría fondos en países de desarrollo para inversión en proyectos sociales, educación, salud, entre otros. Con los cual evaluamos que los esfuerzos en reducción de emisiones de carbono en unidades de tonelada / kilómetro, si representara a futuro un peso importante en las estadísticas a mostrar para aplicar a recursos que incentiven el ahorro o eliminación de dichas emisiones.

8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

8.1. Respecto a la incidencia del tipo de eje de carga

La **Tabla 15** presenta el resumen de resultados del cálculo de ESAL (*Equivalent Single Axle Load*) o NEE (número de ejes equivalentes) para las dos metodologías consideradas y los tres escenarios de análisis.

Escenario	Caso	ESAL (NEE)	
		AASHTO	EC. CLÁSICA
1 - Simple llantas duales (Base)	Simples máx	10.82	12.46
	Simples mín	3.31	3.58
2 - Eje trasero tándem	Tándem máx	6.06	7.55
	Tándem mín	1.84	2.17
3 - Eje trasero trídem	Trídem máx	5.82	7.15
	Trídem mín	1.77	2.06

Tabla 15 . Resumen de resultados de cálculo de ESAL.

Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 12** resume los resultados obtenidos en la **Tabla 15**, y permite comparar los resultados para las dos metodologías consideradas bajo los distintos escenarios de análisis:

- Los valores obtenidos por la ecuación clásica son ligeramente mayores en cada escenario y bajo ambas condiciones de carga (máxima y mínima), frente a los valores obtenidos por la metodología AASHTO.
- El número de ejes equivalentes obtenido bajo los escenarios en los que se cambia el eje trasero por uno tándem y luego por uno trídem, es considerablemente menor que para el caso real (ejes simples); del orden del 56% y 53% respectivamente.
- Comparativamente, entre la condición de máxima y mínima carga, en un día típico de operación del sistema, la diferencia en los ESAL es considerable. En términos globales, al pasar de la hora valle a la hora pico del sistema, los factores de carga aumentan alrededor del 230%.

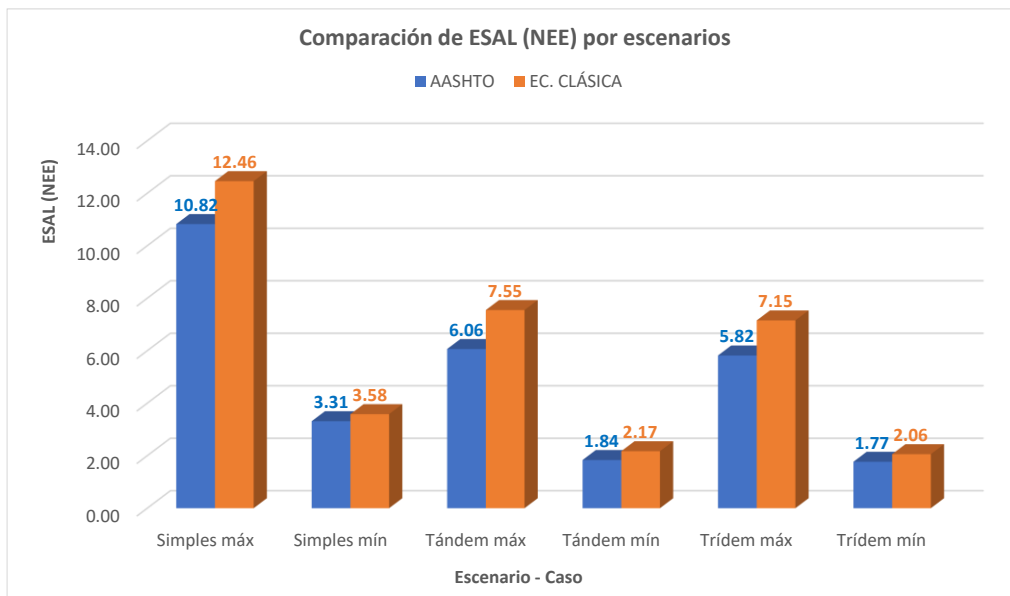


Figura 12. Resumen de resultados de ESAL y comparación por escenarios.
Fuente: elaboración propia.

8.2. Respecto al impacto ambiental por el cambio de llantas

El análisis encontrado en el cambio de neumáticos que confirma el aumento en cantidad necesaria por el cambio en el tipo de eje de simple a tándem y trídem, nos ha permitido establecer según la investigación efectuada que tiene un impacto 16 veces menor en términos ambientales, que las actividades de mantenimiento al pavimento flexible, en términos de emisiones de CO₂, así que a largo plazo como se presentó en la **Figura 11**, para el 2030 se tendría un impacto mayor por el control en el uso y ciclo de vida del pavimento que si dedicáramos los esfuerzos solamente en el ciclo de vida de los neumáticos o llantas.

Paralelo a esto se ha reforzado el alcance del estudio, estableciendo las cifras que pueden disminuirse en emisión de CO₂ optimizando con el uso de neumáticos de reencauche **Tabla 12**, pues tiene un impacto de 15,08% en reducción de porcentaje de emisiones contaminantes contrarrestadas.

8.3. Respecto al impacto social por el cambio de llantas

De manera directa el impacto más allá de enfocarlo en términos de inversión tributaria por el aumento en la tarifa final del usuario (entre el 2% y 3% según la canasta de costos de Transmilenio S.A., 2021), si aumenta el consumo de materiales como neumáticos por cada bus articulado en Bogotá, el impacto investigado es en términos de vidas, donde tenemos que por cada 4434 toneladas métricas de CO₂ que añadimos por encima del nivel de 2020, provocamos el fallecimiento de una persona (Portal Ambiental Estados Unidos, 2023). De manera tal que los ahorros en emisiones, los ajustes y cambios controlados que puedan

ejercer las entidades del estado, las instituciones, las comunidades y los usuarios en general.

9. CONCLUSIONES

- Como se demostró, es clara la ventaja y la incidencia positiva que traería a la malla vial del sistema (desde el punto de vista del desempeño mecánico de la estructura de pavimento flexible), el uso de ejes tándem o trídem en los buses de Transmilenio a cambio de los actuales ejes simples de llantas duales o gemelas; debido a que esta configuración de trenes de carga ofrecen mayor área para distribuir la carga hacia la superficie, lo cual implica menor esfuerzo hacia la subrasante o terreno natural. Sin embargo, se evidenció que, si bien el eje tándem traería un aporte sustancial, el escenario implementando ejes trídem no generaría un aporte significativo.
- De la conclusión anterior, en cuanto al aumento de los costos de operación desde el punto de vista de impacto ambiental y social, tenemos lo siguiente, a corto plazo puede generarse un incremento para el usuario en el costo de la tarifa de los buses articulados, pero la contribución en términos ambientales por disminución de emisión de CO₂, es 16 veces mayor que el ahorro en la emisión por el uso de neumáticos o llantas, y estas emisiones tiene un impacto en toneladas directa sobre la vida humana, según estadísticas expuestas. De manera tal que es concluyente que a pesar de que a corto plazo haya un incremento en el costo para el usuario se tiene un impacto directo más amplio por el ahorro en emisiones de toneladas de CO₂ por el cuidado en el ciclo de

vida del pavimento flexible por el uso de ejes tándem y trídem, dadas unas condiciones básicas de regularidad en el uso del suelo, garantías de fábrica para los neumáticos, condiciones normales climáticas contempladas en la ficha de fabricación, cumplimiento en las programaciones de mantenimientos y control de la carga vehicular otros materiales de fabricación, pasajeros por vehículos y uso del carril solo por buses y eliminación de otros usos vehiculares.

- Según la investigación realizada se puede concluir que en cuanto al costo de los neumáticos para cada uno de los buses articulados de Transmilenio tendrá un incremento del 40% utilizando eje tándem y del 80 % utilizando eje trídem, claro está que dicho aumento sería en el valor más no en la durabilidad de las llantas ya que estas por soportar una carga mejor repartida ya sea por el eje tándem o trídem podrían tener una duración mayor que su promedio actual de 65 mil a 69 mil kilómetros por cada neumático. Esta afirmación debería comprobarse en una etapa posterior de la investigación.
- Considerando el cambio de los ejes simples a Tándem o Trídem, los cuales disminuyen el impacto en la estructura del pavimento, y en procura de llegar a un acuerdo de intereses bilaterales entre el IDU y Transmilenio, el eje trídem sería el que generaría el mayor beneficio en el comportamiento mecánico de las estructuras de pavimento, sin embargo la diferencia con el eje tándem no es sustancial; mientras que los costos de una mayor cantidad de llantas por un eje trídem puede repercutir en los costos de la operación y al final en la tarifa.

- Se recomienda realizar un análisis económico más detallado a fin de identificar la conveniencia del uso o no de otro tipo de eje trasero en los buses articulados de Transmilenio.
- El presente estudio está enfocado en la estructura de pavimento flexible de la troncal calle 80, por lo cual, no puede ser comparado con otras troncales del sistema que tengan pavimento rígido; para lo cual deberá conducirse un análisis similar contemplando las variables propias de ese tipo de pavimentos y las variables propias del sistema en cada caso particular.
- El alcance de la presente investigación está basado en los supuestos y escenarios construidos, que para emplearse como punto de partida de decisiones de las entidades deberán ser validados cuidadosamente.

REFERENCIAS

1. ALARCÓN ARIAS, Jorge Arturo y SISA BOCANEGRA Brayan Andrés (2017). Evaluación de la operación del transporte automotor informal en la av. ciudad de Cali localidad de Kennedy, caso de estudio: UPZ 82 patio bonito. Universidad La Gran Colombia. Pág. (13 – 14).
2. Alcaldía Mayor de Bogotá, Instituto de Desarrollo Urbano y Universidad de los Andes (2004). informe preliminar determinación del peso por eje de los buses articulados y buses alimentadores del sistema de Transmilenio. Pág. (3 -4).
3. Alcaldía Mayor de Bogotá, Transmilenio (2019). Informe de Gestión 2016 – 2019. Pág. (74 – 79).
4. ARIAS BRACHO, Gerardo Enrique (2016). Evaluación de factores de equivalencia y sus efectos en la reducción de la vida útil en las estructuras de los pavimentos de la vía Barranquilla Ciénaga, Corporación Universidad de la Costa, 2016, pág. 53 – 54.
5. AASHTO, (1993). Guide for design of pavement structures. Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials. Capitol Street, N.W., suite 249. Recuperado de: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>.
6. Banco Mundial, 2017. Financiamiento de la Energía Limpia: marco para que las asociaciones público privadas aborden el cambio climático, Londres. <https://www.bancomundial.org/es/news/speech/2007/03/13/financing-clean->

[energy-a-framework-for-public-private-partnerships-to-address-climate-change-london](#)

7. CONDARCO, P. (2016). “Análisis y Procedimiento para un Estudio de Cargas por Eje”. Facultad de Ingeniería UMSA, Instituto de Vías y Transporte.
8. CONSTAMANGA, N. (2018). BITREN 75 Tn. Universidad Tecnológica Nacional, facultad regional de Villa María, Proyecto final. Recuperado de: file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Bitren%2075Tn_Costamagna.pdf .
9. GONZÁLEZ OSORIO, Jorge 2021. Universidad Católica de Colombia. Evaluación del impacto ambiental de las emisiones de CO2 en el costo del ciclo de vida de los pavimentos flexibles y rígidos: caso de estudio avenida comuneros entre carrera 30 y avenida las américas en la ciudad de Bogotá D.C. Pág 26 – 30.
10. HIGUERA, C. (2015). “Nociones sobre métodos de diseño de estructura de pavimentos para carretera”. Volumen 1: Principios fundamentales, el tránsito, factores climáticos y geotecnia vial. Numeral 1.3. Variables que afectan el diseño, la construcción y el comportamiento de los pavimentos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
11. HIGUERA, C. (2015). “Nociones sobre métodos de diseño de estructura de pavimentos para carretera”. Volumen 2: Teoría, métodos de diseño y ejemplos de aplicación. Cap. 2. Método de diseño de pavimentos flexibles AASHTO 1993. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
12. HURTADO, C. (2009). Coeficiente Integral de Daño a Pavimentos Causado por Vehículos Pesados. Querétaro, México.

13. Instituto de Desarrollo Urbano, (2023). Alcaldía Mayor De Bogotá, Gov.co Colombia. Recuperado de: <https://www.idu.gov.co/page/quienes-somos-2>
14. Instituto de Desarrollo Urbano, (2023). Precios Unitarios de Referencia 2023. Recuperado de: <https://www.idu.gov.co/page/siipviales/economico/portafolio>
15. INVIAS, (1998). Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. Bogotá, 1998.
16. INVIAS, (2023). Estado de la red vial. Recuperado el 11 de septiembre de 2023 de: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>
17. MEDINA, Edwin (2013). Estudio del Comportamiento Mecánico de una Estructura de Pavimento Flexible Instrumentada: Caso Transmilenio Bogotá D.C. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes.
18. Ministerio de Transporte, (2005). Caracterización del Transporte en Colombia. Oficina de Planeación. Diagnóstico y Proyectos de Infraestructura. Febrero de 2005, pág. 108.
19. ORUS, Abigail (2023). STATISTA. Usuarios de Transporte Público en el mundo 2017 – 2027, <https://es.statista.com/estadisticas/1012270/usuarios-de-transporte-publico-en-el-mundo/>. 26 de enero de 2023.
20. Portal Ambiental Mexicano, 2023. Consultoría de Periferios y Sistemas S.A. El impacto social del carbono podría ser más elevado de lo estimado. <https://www.portalam biental.com.mx/sabias-que/20220420/el-impacto-social-del-carbono-podria-ser-mas-elevado-de-lo-estimado>.

21. Revista ECOS, 2019. Reducción de Emisiones Contaminantes mediante una gestión de control de neumáticos en buses de transporte. Ruiz, Jonathan. Universidad Metropolitana del Ecuador.
22. SALAMA, H., Chatti, K., & Lyles, R. W. (s.f.). Effect of Heavy Multiple Axle Trucks on Flexible Pavement.
23. THOM, N. (2013). "Principios de ingeniería de pavimentos", segunda edición. Ice publishing, conocimientos esenciales de ingeniería de la biblioteca virtual de ICE, recuperado de: <https://www.icebookshop.com/product/principles-of-pavement-engineering-2nd-edition>.
24. TRANSMILENIO S.A., 2021. Informe de costos de inversión y operación 2021. Sugerencia Económica.
25. TRONCOSO, J. R. (2011). Evaluación del Espectro de Carga y Coeficientes de Daño en el Corredor de la Avenida Boyacá, Bogotá D.C. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.
26. Universidad EAN, (2023). Guía 1: Planteamiento del problema y marco teórico e institucional. Recuperado el 02 de septiembre de 2023 de: https://virtual.universidadean.edu.co/courses/18404/pages/guia-1-actividad-2-primer-informe-de-avance-de-la-investigacion-pag-5?module_item_id=585361
27. VÁSQUES MONTEROS, Carlos Javier (2016). Factores de Equivalencia de daño en pavimentos flexibles: análisis para condiciones típicas de Argentina, Facultad de Ingeniería, *Universidad Nacional de la Plata*. Pág. iv.
28. ZAMORA TORRES, América Ivonne y PEDRAZA RENDON, Oscar H. (2013). El transporte internacional como factor de competitividad en el comercio exterior. *Journal of Economics, Finance and Administrative Science*

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-18862013000200007. Vol.18, n.35, pp.108-118. ISSN 2077-1886.