EVALUACIÓN DEL ESPECTRO DE CARGA Y COEFICIENTES DE DAÑO EN EL CORREDOR DE LA AVENIDA BOYACÁ, BOGOTÁ D.C.

JUAN RICARDO TRONCOSO RIVERA

PERFIL DE PROFUNDIZACIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA
BOGOTÁ
2011

EVALUACIÓN DEL ESPECTRO DE CARGA Y COEFICIENTES DE DAÑO EN EL CORREDOR DE LA AVENIDA BOYACÁ, BOGOTÁ D.C.

JUAN RICARDO TRONCOSO RIVERA

PERFIL DE PROFUNDIZACIÓN

Trabajo final de maestría para optar por el titulo de Magister en Ingeniería - Geotecnia

PhD. CAROL ANDREA MURILLO FEO
Director

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA
BOGOTÁ
2011

Nota de aceptación:

El trabajo final de Maestría titulado "**Evaluación del espectro de carga y coeficientes de daño en el corredor de la avenida Boyacá, Bogotá D.C.**", presentado por Juan Ricardo Troncoso Rivera en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de Magister en Ingeniería – Geotecnia, fue aprobado por el Director.

PhD. CAROL ANDREA MURILLO FEO
Director

MSc. GUILLERMO ÁNGEL REYES
Jurado

PhD. OCTAVIO CORONADO GARCIA
Jurado

Bogotá, Mayo de 2011

DEDICATORIA

Dedico la culminación de mis estudios de maestría a Dios y a mi familia por fortalecerme espiritualmente y ser un apoyo constantemente en mi desarrollo personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a la ingeniera Carol Andrea Murillo Feo, Director de Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia y directora del trabajo final de maestría.

Al Instituto de Desarrollo Urbano, gestor y promotor del Concepto Especial No 10 Espectros de Carga, enmarcado dentro del Contrato Interadministrativo No. 020 de 2008 entre el Instituto de Desarrollo Urbano y la Universidad Nacional de Colombia.

CONTENIDO

1. ANTECEDENTES 2
   1.1 MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO 2
   1.2 OBJETIVOS 3
2. MARCO CONCEPTUAL GENERAL 4
   2.1 MARCO LEGAL 4
      2.1.1 Normatividad Nacional 4
      2.1.2 Normatividad en la ciudad de Bogotá D.C. 6
   2.2 ESTUDIOS ANTERIORES DE ESPECTROS DE CARGA 6
      2.2.1 Espectros de carga vehicular para la zona urbana de Bogotá D.C. 6
      2.2.2 Guía de análisis de ejes de carga y conteos de trafico para determinar el efecto de las cargas sobre los pavimentos 6
   2.3 MARCO TÉCNICO 7
      2.3.1 Espectros de carga 7
      2.3.2 Coeficientes de daño – aproximaciones existentes 7
      2.3.2.1 Agresividad (a_0) 7
      2.3.2.2 Factor de equivalencia de carga 8
      2.3.3 Análisis de la vida útil en la estructura de pavimento 9
3. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO 13
   3.1 CARGAS POR EJE Y VEHÍCULO 13
   3.2 SITIO DE ESTUDIO 14
   3.3 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO 16
4. RESULTADOS 17
   4.1 ESPECTROS DE CARGA EN LA AVENIDA BOYACÁ 18
      4.1.1 Cargas excedidas 20
      4.1.2 Análisis de direccionalidad 23
   4.2 COEFICIENTE DE AGRESIVIDAD (A_0) 25
   4.3 FACTORES AASHTO DE LA AVENIDA BOYACÁ 27
   4.4 COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE FACTOR DE DAÑO 28
   4.5 REDUCCIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL PAVIMENTO 37
5. CONCLUSIONES 43
6. RECOMENDACIONES 45
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 46

ANEXOS i

Anexo 1 Espectros de carga ii

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Peso bruto vehicular por tipo de vehículo 5
Tabla 2 Pesos Máximos por eje autorizados 5

Tabla 3 Valores promedio de $\mathbf{k}$ y α para calcular el coeficiente de agresividad 8
Tabla 4 Relación de la carga y la presión de contacto para un eje de llanta simple 12
Tabla 5 Relación de la carga y la presión de contacto para un eje de llanta doble 12
Tabla 6 Designación de tipo de vehículos en Colombia 14
Tabla 7 Identificación de estaciones de pesaje 15
Tabla 8 Coeficiente estructural y espesores por corredor vial arterial 16
Tabla 9 Módulos y relación de Poisson de capas 16
Tabla 10 Vehículos medidos y porcentaje con respecto a la muestra en cada estación .. 17
Tabla 11 Porcentaje de ejes medidos que exceden su carga permitida 20
Tabla 12 Porcentaje de ejes con sobrecarga a partir de la ecuación 5 21
Tabla 13 Porcentaje de magnitud de carga máxima por eje/carga nominal por eje 22
Tabla 14 Carga nominal y máxima medida por eje y estación de medición en kN 23
Tabla 15 Coeficientes de agresividad ponderada para cada tipo de vehículo 25
Tabla 16 Coeficientes de agresividad ponderada y su variación con respecto a la direccionalidad 26
Tabla 17 Coeficientes de agresividad con cargas excedidas 26
Tabla 18 Factores AASTHO en cada estación de pesaje ($SN = 5$ y $Pt = 3{,}0$) 27
Tabla 19 Factor de equivalencia AASHTO y su variación con respecto a la direccionalidad 28
Tabla 20 Factores AASHTO con cargas excedidas 28
Tabla 21 Resumen de factores de daño para el vehículo tipo 2 29
Tabla 22 Valores normalizados a partir del coeficiente de daño nominal del tipo 2 29
Tabla 23 Resumen de factores de daño para el vehículo tipo 3 30
Tabla 24 Valores normalizados a partir del coeficiente de daño nominal del tipo 3 31
Tabla 25 Resumen de factores de daño para el vehículo tipo 2S2 32
Tabla 26 Valores normalizados a partir del coeficiente de daño nominal del tipo 2S2 32
Tabla 27 Resumen de factores de daño para el vehículo tipo 3S2 34
Tabla 28 Valores normalizados a partir del coeficiente de daño nominal del tipo 3S2 34
Tabla 29 Resumen de factores de daño para el vehículo tipo 3S3 35
Tabla 30 Valores normalizados a partir del coeficiente de daño nominal del tipo 3S2 36
Tabla 31 Carga LX con respecto al eje y al número de llantas (kN) 39
Tabla 32 Radio de carga a con respecto al eje y al número de llantas (m) 39
Tabla 33 Presión de contacto P con respecto al eje y al número de llantas (MPa) 40
Tabla 34 Deformación a tensión de las cargas evaluadas (Los valores están expresados en $1X10^{-6}$) 40
Tabla 35 Valores de ε_t 41
Tabla 36 Porcentaje de reducción por Estación 41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Relación entre la condición del pavimento y las intervenciones de rehabilitación. 9
Figura 2 Inversión en intervención con respecto a la pérdida de calidad del pavimento... 10
Figura 3 Relación de la carga sobre una rueda y presión de contacto adoptado 11
Figura 4 (a) Ubicación de la avenida Boyacá y estaciones de pesaje (b) Pesajes realizados. 15
Figura 5 Estructura de pavimento avenida Boyacá, según Base de Datos IDU 16
Figura 6 Espectro de carga del camión tipo 2, Calle 170 sentido Norte Sur..... 18
Figura 7 Espectro de carga del camión tipo 3, Calle 170 sentido Norte Sur..... 19
Figura 8 Espectro de carga del camión tipo 3S3, Calle 170 sentido Norte Sur 20
Figura 9 Espectro de carga del camión tipo 3S3, Calle 170 en ambos sentidos 24

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1 Porcentaje de magnitud de carga máxima por eje/carga nominal por eje 22
Gráfica 2 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 2 29
Gráfica 3 Valores normalizados en sentido sur norte del vehículo tipo 2 30
Gráfica 4 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 3 31
Gráfica 5 Valores normalizados en sentido sur norte del vehículo tipo 3 31
Gráfica 6 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 2S2 33
Gráfica 7 Valores normalizados en sentido sur norte del vehículo tipo 2S2 34
Gráfica 8 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 3S2 35
Gráfica 9 Valores normalizados en sentido sur norte del vehículo tipo 3S2 35
Gráfica 10 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 3S3 36
Gráfica 11 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 3S3 36

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Cálculo de Agresividad..... 7
Ecuación 2 Cálculo de factores de equivalencia AASHTO..... 8
Ecuación 3. Ley de fatiga..... 10
Ecuación 4 Calculo de presión de contacto 11
Ecuación 5 Porcentaje de incidencia por tipo de vehículo i y tipo de eje j en función a la excedencia de carga..... 21
Ecuación 6 Coeficiente de agresividad ponderada 25
Ecuación 7 Determinación de la deformación a tensión admisible..... 38

RESUMEN

Las cargas de vehículos y el volumen de tráfico son los factores más importantes que influyen en los costos de mantenimiento durante el ciclo de vida de las carreteras y puentes. El efecto de tráfico está relacionado con los tipos de vehículos y la capacidad de carga. En general, la mayoría de los países y las ciudades tienen un nivel límite legal de carga por eje. En Colombia, el Ministerio de Transporte es el responsable de establecer la carga máxima en las carreteras.

El desarrollo económico del país ha mejorado en los últimos años, en este sentido, la mayoría de los vehículos exceden el límite de carga legal. El efecto de la sobrecarga es la aceleración del daño en la estructura del pavimento reduciendo exponencialmente la vida de las carreteras. Con el fin de establecer las estrategias de mantenimiento en la red vial de la ciudad, el Instituto de Desarrollo Urbano esta interesado en determinar las cargas reales en Bogotá. Es necesario tener en cuenta que la red de carreteras de Bogotá representa el 35% del total de carreteras construidas en Colombia.

Este estudio tiene como objetivo evaluar la reducción de la vida útil del pavimento en la Avenida Boyacá, esta avenida es una red de carreteras arteriales de la ciudad que cruza de norte a sur en el lado oeste de la ciudad, y tiene una longitud de 35 km, construida totalmente en pavimento flexible.

Palabras clave: espectros de carga, factores de equivalencia, pavimento flexible.

ABSTRACT

Loads of vehicles and traffic are the most important factor affecting maintenance costs during the life cycle of roads and bridges. The effect of traffic is related to the types of vehicles and cargo capacity. In general, most countries and cities have a level legal limit of axle load. In Colombia, the Ministry of Transport is responsible for setting the maximum load on the roads.

The economic development of the country has been improved in recent years, in this sense, now days most of the vehicles exceede the legal load limit. The effect of the additional load is the acceleration of the damage in the pavement structure reducing the life of the roads exponentially. To establish maintenance strategies for the City road network, the Urban Development Institute is interested in determining the actual loads be in applied by load vehicles in Bogotá. Taking account Bogotá road network represents 35% of total roads built in Colombia.

This study aims to evaluate the reduction in pavement life in the Boyacá Avenue; this avenue is a main road of the city which crosses from north to south of the west side of the city, has a length of 35 km and is built entirely in flexible pavement.

Palabras clave: Load Spectra, load equivalent factor, flexible pavement.

INTRODUCCIÓN

En los países en vía de desarrollo se generan proyectos viales que permiten el mejoramiento de la comunicación y el transporte de carga terrestre. Debido a este fenómeno, las tipologías y configuraciones de los vehículos pesados han venido cambiando en razón a una variabilidad de cargas que se desean transportar, para ser competitivos comercialmente.

En Colombia, el Ministerio de Transporte por medio de la Resolución 4100 del 28 de diciembre de 2004 y la Resolución 1782 de mayo de 2009 reglamenta la tipología, configuración, dimensiones, máximos pesos brutos vehiculares y máximos pesos por eje de los vehículos automotores de carga en nuestro país. A nivel urbano en la ciudad de Bogotáá no se tiene una regulación en el tema de pesajes ni se conoce el daño que imponen las cargas en las estructuras de pavimento de la ciudad.

El Instituto de Desarrollo Urbano IDU interesado en conocer si los pesos brutos vehiculares y los máximos pesos por eje de los vehículos que transitan por los corredores de la ciudad cumplen las normas establecidas, y por medio de contrato interadministrativo N° 020 de 2008 con la Universidad Nacional de Colombia solicitó la elaboración un concepto técnico para determinar los Espectros de Carga de los vehículos de transporte terrestre de carga que transitan por la vías de la red arterial de Bogotá D.C.,

El trabajo final se delimita en realizar el análisis del corredor de la Avenida Boyacá. En este corredor se instalaron cuatro estaciones de pesaje con el fin de determinar el espectro y el factor de daño de cada vehículo de carga. La reducción de la vida útil del pavimento se determinó mediante un método racional propuesto en la guía de diseño de pavimento francés (LCPC, 1994) teniendo en cuenta las cargas excedidas medidas.

1. ANTECEDENTES

Las vías en general se deterioran progresivamente debido a las condiciones de tráfico y condiciones atmosféricas. Igualmente la falta de planes de mantenimiento y conservación, aceleran estos procesos de deterioro. Desde el punto de vista de tráfico, el aumento de las cargas máximas permitidas en los vehículos de carga produce mayor daño en las estructuras de pavimento reduciendo la vida útil. Lo anterior incrementa los niveles de intervención de mantenimiento rutinario, refuerzos y rehabilitación parcial o total de las estructuras de pavimento.

La Malla Vial de Bogotá (IDU, 2009) a diciembre de 2009 alcanza 15.657,3 Kilómetros carril de los cuales el 94.53% (14.801,1 km-carril) corresponden al Subsistema Vial y el 5,47% (856,2 km-carril) al Subsistema de Transporte (Troncales Transmilenio). El Subsistema Vial está compuesto por la malla vial arterial, intermedia y local. Este subsistema vial de acuerdo al último estudio de inventario de malla vial determina que el 40,3% está en una condición mala, el 22,9% en condición regular y tan solo el 36,8% está en un estado bueno.

Esta deficiencia en el estado de las vías de Bogotá conlleva a verificar las condiciones de carga a las cuales están sometidas las estructuras de pavimento y lo cual puede llegar a ser un factor importante en la degradación temprana de los materiales.

Este estudio podrá tener una aplicación de tipo local en el diseño de pavimentos y eventualmente aplicación regional debido a que la las características de los vehículos de carga son los regulados a nivel nacional por el Ministerio de Transporte.

1.1 MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

El aumento de las cargas permitidas en los vehículos produce mayor daño en las estructuras de pavimento reduciendo de manera exponencial la vida útil. Lo anterior incrementa los niveles de intervención de mantenimiento rutinario, mantenimiento periódico, y rehabilitación parcial o total de las estructuras de pavimento.

El cambio de tipologías y configuraciones de los vehículos de carga que transitan en la malla vial de Bogotá genera cambios en las condiciones de transito para las cuales fue diseñado las estructuras de pavimento, y por lo tanto la agresividad que ejerce cada vehículo en la estructura.

Este estudio podrá tener una aplicación de tipo local en el diseño de pavimentos y eventualmente aplicación regional debido a que la las características de los

vehículos de carga son los regulados a nivel nacional por el Ministerio de Transporte.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar los espectros de cargas y coeficiente de daño de los camiones rígidos y semirremolques de acuerdo a la resolución 4100 del 28 de diciembre de 2004 modificada por la Resolución 1782 de mayo de 2009 del Ministerio de Transporte, en el corredor de la avenida Boyacá, Bogotá D.C.

Objetivos específicos

- Determinar los espectros de carga por tipo de vehículo de carga.
- Determinar el coeficiente de daño por tipo de vehículo de carga.
- Determinar la reducción de la vida útil del la estructura de pavimento en función al exceso de carga.

2. MARCO CONCEPTUAL GENERAL

Se presenta el marco conceptual general que se tiene en cuenta para el desarrollo del estudio definido en el marco legal, en estudios anteriores relacionados con el tema y en el marco técnico o metodología de análisis con la cual se desarrollara el estudio.

2.1 MARCO LEGAL

Se presentan en orden cronológico, la normatividad y las leyes relacionadas con la reglamentación del transporte, el control de cargas y configuración de vehículos de carga en Colombia, así como las disposiciones del tránsito de carga en la ciudad de Bogotá.

2.1.1 Normatividad Nacional

- Ley 105 de 1993. Define las disposiciones básicas sobre el transporte, distribuye competencias y recursos entre la Nación y las entidades territoriales y reglamenta la planeación en el sector transporte, entre otras disposiciones. Es esta ley la que define la función de planeación, control, regulación y vigilancia del Estado frente al transporte y las actividades vinculadas con este.

- Ley 336 de octubre 20 de 1996. Establece el estatuto nacional de transporte, unifica los principios y los criterios para la regulación y reglamentación del transporte público aéreo, marítimo, fluvial, férreo, masivo y terrestre y su operación en el territorio nacional, de conformidad con la Ley 105 de 1993. Esta ley establece con respecto al transporte de carga, las sanciones y procedimientos para cualquier modo de transporte si llegasen a incumplir con la reglamentación vigente que sobre el transporte dispongan las autoridades competentes.

- Ley 769 de 2002 o Código Nacional de Tránsito Terrestre. Define que todos los vehículos deben someterse a la reglamentación que el Ministerio de Transporte reglamente sobre las dimensiones y pesos permitidos para los vehículos.

- Resolución 4100 de 2004. El Ministerio de Transporte de acuerdo con las Leyes 105 de 1993, y 769 de 2002 expide la Resolución 4100 de 2004, por la cual se adoptan los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte terrestre automotor de carga por carretera, para su operación normal en la red vial a nivel nacional. Esta resolución define las dimensiones y pesos para las diferentes tipologías de vehículos de transporte de carga, tanto en el peso bruto vehicular como el máximo peso permitido por eje para los vehículos que transitan por la red vial nacional. Es esta resolución la que explícitamente exige a todos los vehículos de transporte terrestre de carga que transitan por el

territorio nacional, a las empresas ensambladoras, fabricantes y/o importadores de vehículos de transporte de carga, acogerse a lo estipulado en ésta con respecto a los pesos y dimensiones para las diferentes tipologías de vehículo.

- La Resolución 1782 de 2009. Tiene como propósito la modificación del artículo 8 de la Resolución 4100 de 2004 sobre la posibilidad de aumentar la capacidad de carga de los camiones tipo 2. En esta Resolución se estableció el cambio del peso bruto vehicular para el camión tipo 2, de 16 a 17 toneladas.

La Resolución 4100 de 2004 define dos aspectos importantes para el control de cargas, el peso bruto vehicular (Tabla 1) y el máximo peso por ejes (Tabla 2) para los vehículos que transitan por la red vial nacional, para el caso del trabajo final se extraen de la Resolución los datos de camiones y tracto-camiones con semirremolque.

Tabla 1 Peso bruto vehicular por tipo de vehículo

Vehículo	Designación	Peso bruto por vehículo (kg)
Camiones	2	17.000
	3	28.000
	4	31.000 36.000 32.000
Tracto-camión con semirremolque	2-S1	27.000
	2-S2	32.000
	2-S3	40.500
	3-S1	29.000
	3-S2	48.000
	3-S3	52.000

Fuente: Res. 4100 de 2004 modificada Res.1782 de 2009-Ministerio de Transporte

Tabla 2 Pesos Máximos por eje autorizados

Tipo de eje	Numero de llantas	Peso máximo por eje (kg)
Eje sencillo	Dos llantas	6.000
	Cuatro llantas	11.000
Eje tándem	Cuatro llantas	11.000
	Seis llantas	17.000
	Ocho llantas	22.000
Eje trídem	Seis llantas	16.500
	Ocho llantas	19.000
	Diez llantas	21.500
	Doce llantas	24.000

Fuente: Res. 4100 de 2004 modificada Res.1782 de 2009-Ministerio de Transporte

2.1.2 Normatividad en la ciudad de Bogotá D.C.

La ciudad de Bogotá no cuenta con una normatividad específica para el control de pesos de similares características a la Resolución 4100 de 2004 con sus Resoluciones modificatorias.

En términos de movilidad se ha regulado el tránsito de los vehículos pesados en las horas pico de la ciudad como una medida de mitigación al problema de congestión. Esta regulación Distrital está contenida en el Decreto Distrital 034 de 2009, el cual define las condiciones para el tránsito de vehículos de carga en el área urbana del Distrito Capital.

2.2 ESTUDIOS ANTERIORES DE ESPECTROS DE CARGA

A continuación se presentan algunos trabajos e investigaciones realizadas del tema del trabajo.

2.2.1 Espectros de carga vehicular para la zona urbana de Bogotá D.C.[1]

Estudios previos realizados para la ciudad de Bogotá han sido realizados en el año 2000 y 2004. En este estudio se determinó el tipo de carga que se estaba transportando en Bogotá y que salía y entraba por la vía Bogotá – Melgar. Posteriormente, analizaron los vehículos de carga que salían de Bogotá por la vía a Briceño, y trazaron las curvas de espectros de carga para cada vehículo de carga. Calcularon el Coeficiente de Agresividad Media (CAM) para el año 2000 al 2004.Como conclusiones se encontró que el mayor porcentaje de camiones que circulan por Bogotá son los C2 pequeños, que conforman el 52.6% del volumen de vehículos de carga, seguidos por el C2 grande en un porcentaje de 27.9%. Así mismo se determinó que el mayor porcentaje de camiones que circulan por Bogotá son los C2 pequeños, que conforman el 52.6% del volumen de vehículos de carga, seguidos por el C2 grande en un porcentaje de 27.9%.

2.2.2 Guía de análisis de ejes de carga y conteos de trafico para determinar el efecto de las cargas sobre los pavimentos[2]

El deterioro en las vías se debe a la magnitud de la carga como el número de veces que estas cargas se aplican. Para fines de diseño del pavimento se debe tener en cuenta no sólo el número total de vehículos que utilizará la vía , sino también las cargas por vehículo o carga por eje. Por lo tanto, el conteo de tráfico e información de cargas por eje son esenciales para el diseño del pavimento.

Diferentes guías técnicas permiten realizar una planificación y ejecución de los conteos de tráfico y mediciones de cargas por eje, a su vez en este tipo de guías se establece la metodología para analizar los datos para obtener cargas de tráfico actuales y proporciona la orientación sobre la predicción de los futuros niveles de

[1] Castellanos, A. et al. Universidad de los Andes, 2004.

[2] TRL Limited Old WokinghamRoad - Department for International Development, 2004

tráfico, prediciendo el tráfico total de cargas que un pavimento tendrá durante su periodo de diseño.

Con base en las metodologías establecidas por la AASHTO y Highway Research Board, 1962 y los estudios realizados en pistas de prueba en las cuales se estudio se evaluó el desempeño del pavimento, con respecto a un eje de 8,16 toneladas, se determinó arbitrariamente que el eje estándar de referencia sería de 8.16 toneladas. Así mismo los factores de equivalencia (EFs) fueron derivados a continuación, para otras cargas por eje, de tal manera que los efectos dañinos de los ejes más pesados y ligeros pueden ser expresados en términos del número de pasadas del eje estándar que producen el mismo daño (Liddle, 1962).

2.3 MARCO TÉCNICO

2.3.1 Espectros de carga

Los espectros se definen como la relación entre el número de un tipo de eje con un rango de carga y el número total de ese tipo de eje, expresado en porcentaje, se calculan usualmente para cada tipo de eje: sencillo dual, tándem y trídem. Los espectros de carga son una representación realista de la distribución de cargas. Algunos estudios del tránsito han definido los espectros de carga como la manera más eficiente de caracterización en términos de tipos de ejes y su respectivo daño.

Para evaluar si un camión presenta carga excedida se verifica que no supere el peso máximo total y el peso máximo por eje permitido, si excede alguna de las dos condiciones mencionadas el camión estará con sobrecarga; otra condición que se puede evidenciar es la inadecuada distribución de carga en algunos camiones.

2.3.2 Coeficientes de daño – aproximaciones existentes

Los coeficientes de daño representan numéricamente el daño producido por el paso de las cargas con respecto un eje de referencia, a continuación se presentan dos aproximaciones de cálculo de coeficientes de daño.

2.3.2.1 Agresividad (a_0)

La Agresividad (A_0) corresponde al daño por fatiga producido en la estructura de pavimento por el paso de un eje con carga P, con respecto al daño producido por el paso del eje de referencia.

La Agresividad con base a la metodología Francesa propuesta en *"Conception et Dimensionnement des structures de Chaussée, Guide technique" (*1994) se expresa de manera analítica como se observa en la

Ecuación 1.

Ecuación 1 Cálculo de Agresividad

$$A_0 = k\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^{\alpha}$$

Donde:

k: es el coeficiente que define el tipo de eje que se está evaluando (simple, tándem o trídem), las distancias entre ejes se define que debe ser mayor a 2 m.

$k\ y\ \alpha$: dependen de la naturaleza del tipo de estructura de pavimento. Los valores de estos coeficientes se presentan en la Tabla 3.

P_i: Carga del eje medido

P_{ref}: Carga del eje de referencia

Tabla 3 Valores promedio de k y α para calcular el coeficiente de agresividad

Tipo de pavimento	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{k}$		
		eje simple	**eje tándem**	**eje tridem**
Pavimentos flexibles	5	1	0.75	1.1

Fuente: Conception et Dimensionnement des structures de Chaussée (1994)

La agresividad de un solo vehículo es la sumatoria de la agresividad de cada uno de sus ejes.

2.3.2.2 Factor de equivalencia de carga

El factor de de equivalencia es el daño que los vehículos de carga trasmiten a la estructura de pavimento representado en un número acumulado con respecto a un eje de referencia. Este factor tiene en cuenta el tipo estructura (rígida o flexible). En los estudios desarrollados por la American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO**.** El factor de equivalencia de carga AASHTO se obtiene por medio de ecuaciones de regresión obtenidas de los resultados de los ensayos de la prueba AASHTO. La Ecuación 2 define el cálculo del factor de equivalencia para una estructura de pavimento flexible.

Ecuación 2 Cálculo de factores de equivalencia AASHTO

$$log\left(\frac{W_{tx}}{W_{18}}\right) = 4.79\log(18+1) - 4.79\log(L_x + L_2) + 4.33\log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

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

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN+1)^{5.19} L_2^{3.23}}$$

Fuente: AASHTO (1986)

En estas ecuaciones, W_{tx} es el número de x aplicaciones de carga por eje al final del tiempo t; W_{18} es el número de aplicaciones de carga de un eje simple de 18

kips (80 kN) para el tiempo t; L_x es la carga en kip de un eje simple, un conjunto de ejes en tándem, o un conjunto de ejes trídem; L_2 es un código de eje (1 para eje simple, 2 para ejes tándem, y 3 para ejes trídem); SN es el número estructural, el cual es función de la rigidez y módulo de cada capa y de la condición de drenaje de la Base y la Subbase; P_t es el índice de servicio final, el cual indica la condición del pavimento al ser considerado que falla; G_t es función de P_t; y β_{18} es el valor de β_x cuando L_x es igual a 18 kips y L_2 es igual a 1.

Para cada uno de los corredores evaluados se obtienen los factores de equivalencia según las condiciones actuales.

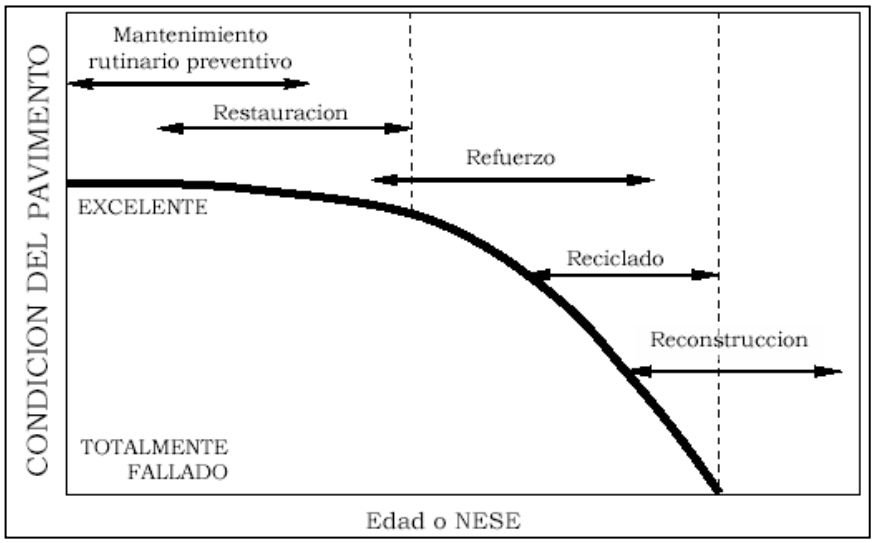
2.3.3 Análisis de la vida útil en la estructura de pavimento

El incremento del daño es la relación de la carga máxima permitida por eje en cada tipo de vehículo con la carga excedida por eje promedio de acuerdo con el espectro de carga obtenido por tipo de vehículo.

Para conocer conceptualmente el incremento de daño, se obtiene la curva de deterioro de una estructura de pavimento que define la disminución de la condición del pavimento a través de tiempo de servicio, siendo una herramienta de control para el mantenimiento de una vía. Se puede observar en la Figura 1 que a medida que la condición del pavimento disminuye, el tipo de intervención que se tiene que realizar es mayor en tiempo, cantidad de materiales y costos (Figura 2).

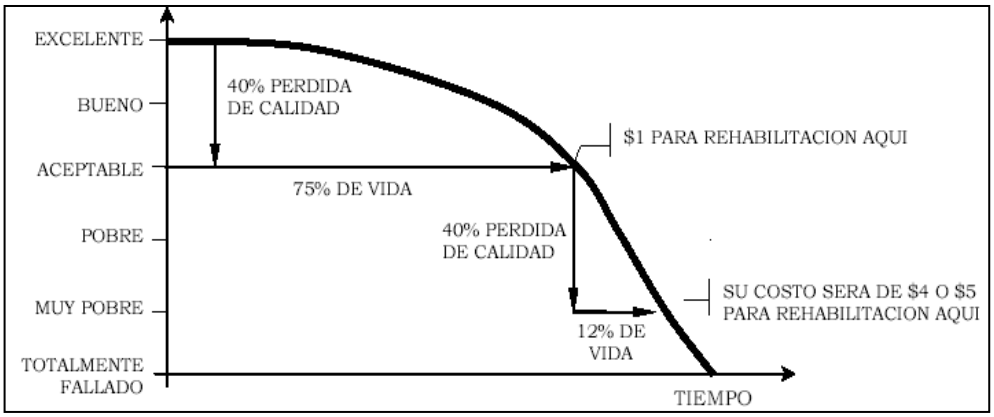
Estos costos aumentan de acuerdo a la literatura en cuatro o cinco veces a medida que la pendiente de la curva de deterioro aumenta negativamente, generándose obras de rehabilitación tipo reconstrucción parcial o total y perdida de movilidad en una zona o zonas de influencia.

Figura 1 Relación entre la condición del pavimento y las intervenciones de rehabilitación.



Fuente: INVIAS, 2008.

Figura 2 Inversión en intervención con respecto a la pérdida de calidad del pavimento



Fuente: INVIAS, 2008

Es importante para las entidades locales y nacionales conocer la influencia de las cargas excedidas en el aumento de pérdida de calidad de una estructura de pavimento, con el fin de definir mantenimientos periódicos que permitan conservar la calidad de las estructuras de pavimento, y evitar inversiones mayores debido a un avanzado deterioro producto de sobrecargas que no se puedan evitar.

Con el fin de estudiar la influencia del exceso de cargas en el comportamiento mecánico de las estructuras de pavimento se comparará el daño unitario para una estructura de pavimento dada en función a las cargas máximas permitidas y a las cargas excedidas de acuerdo con lo propuesto por Miner (1945) usando la metodología propuesta por Laboratoire Centrale de Ponts et Chaussées, LCPC, en su manual *"Conception et dimensionnement des structures de chaussée – Guide Technique*" (1994). Lo anterior se expresa en la Ecuación 3.

Ecuación 3. Ley de fatiga

$$\frac{1}{N} = \left(\frac{\varepsilon_6 k_t}{\varepsilon_t}\right)^{1/b} \quad (4)$$

En esta formulación ε_6 es la deformación de referencia correspondiente a 10^6 ciclos en la ley de fatiga, b es la pendiente de la ley de fatiga, ε_t es la deformación admisible de la capa asfáltica estimada para una carga aplicada, k_t es un coeficiente que depende de la temperatura y N es el número de ejes equivalentes del eje de referencia que resiste la estructura a ser distribuidos en el tiempo en función del trafico. La determinación del valor de ε_t se obtiene por medio de un análisis de esfuerzos y deformaciones en estructuras multicapa en el rango elástico. Los parámetros de entrada son la presión de contacto (P), el radio de

carga (a), el coeficiente de Poisson (ν) y el módulo de elasticidad de los materiales. La presión de contacto se calcula por medio de la Ecuación 4.

Ecuación 4 Calculo de presión de contacto

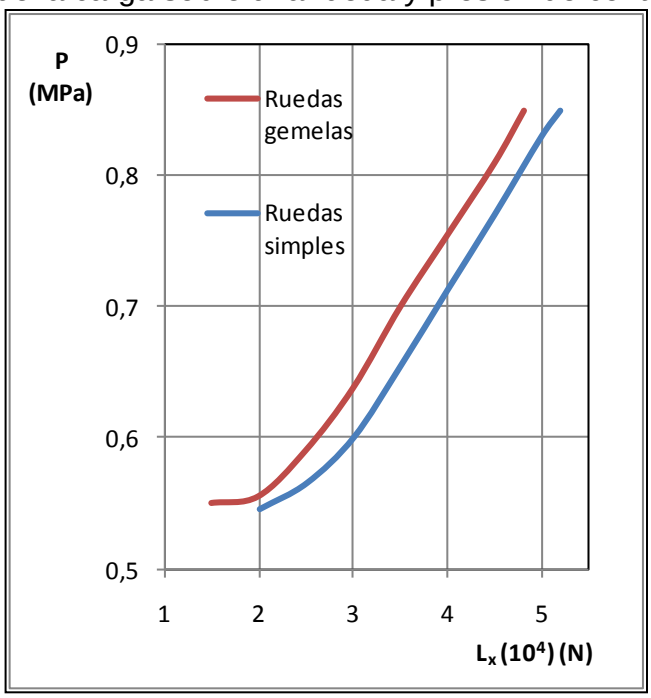
$$P = {}^{L_x}/_{\pi a^2} \quad (5)$$

Donde P es la presión de contacto para una carga L_x por llanta.

Esta formulación fue establecida en la metodología Francesa a partir del Modelo de Boussinesq, en la cual un eje gemelo de 130 kN es representado por dos cargas de presión uniformemente distribuida de 0,662 MPa en dos área circulares de 0,125 m de radio, con una distancia entre ejes de 0,375 m. para un eje sencillo es representado por una carga de presión uniformemente distribuida L_x en un área circular de radio a.

Para las diferentes cargas el modelo Francés adopta una relación proporcional de carga sobre una rueda y la presión de contacto, como se observa en la Figura 3.

Figura 3 Relación de la carga sobre una rueda y presión de contacto adoptado



Fuente: LCPC, 1994

A partir de esta formulación, para valores de L_x y a se obtienen los valores presión P para un eje sencillo de llanta simple (Tabla 4) y para un eje sencillo de llanta doble (Tabla 5).

Tabla 4 Relación de la carga y la presión de contacto para un eje de llanta simple

L_x (kN)	5	10	15	20	25	30	35	40
P (MPa)	0,538	0,540	0,540	0,547	0,567	0,600	0,658	0,715
a (m)	0,055	0,077	0,094	0,108	0,119	0,126	0,130	0,134

Tabla 5 Relación de la carga y la presión de contacto para un eje de llanta doble

L_x (kN)	5	10	15	20	25	30	35	40
P (MPa)	0,547	0,547	0,550	0,560	0,590	0,647	0,700	0,760
a (m)	0,054	0,076	0,093	0,107	0,116	0,122	0,126	0,129

Con estos valores encontrados se podrá encontrar la deformación a tensión en un modelo multicapa para las cargas nominales y excedidas.

3. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

A continuación se define las características específicas que se tienen en cuenta para el desarrollo del trabajo final.

3.1 CARGAS POR EJE Y VEHÍCULO

Para el desarrollo del estudio y a partir de los antecedentes en el marco legal, se definen los vehículos a evaluar en el estudio. Estos vehículos son clasificados como camiones y tracto camión con semirremolque, en total nueve configuraciones de vehículos como se observan en la Tabla 6. En esta tabla se observa el tipo de vehículo, su descripción general en términos de camión (rígido o semirremolque), número de ejes y número de llantas, un esquema representativo de cada tipo de vehículo y su peso máximo por eje y peso bruto total por vehículo.

Definidas estas cargas se tomaran como referencia para construir los espectros de carga por cada tipo de eje y vehículo de carga definido para el estudio. Estas cargas serán el límite para determinar si un vehículo esta con carga permitida o con sobrecarga en cada uno de sus ejes de los vehículos de carga.

Tabla 6 Designación de tipo de vehículos en Colombia

Tipo	Descripción general	Configuración esquemática del vehículo	Peso máximo (kN)			
			Total	Por eje		
2	Camión, dos ejes simples, seis llantas.		166,77	58,86	107,91	0,00
3	Camión, un eje simple, un eje tandem, diez llantas.		274,68	58,86	215,82	0,00
4	Camión, dos ejes simples, un eje tandem, doce llantas.		333,54	117,72	215,82	0,00
2S1	Tracto-camión con semirremolque, tres ejes simples, diez llantas.		264,87	49,05	107,91	107,91
2S2	Tracto-camión con semirremolque, dos ejes simples, un eje tándem, catorce llantas.		313,92	49,05	98,10	166,77
2S3	Tracto-camión con semirremolque, dos ejes simples, un eje tridem, dieciocho llantas.		397,31	58,86	107,91	230,54
3S1	Tracto-camión con semirremolque, dos ejes simples, un eje tandem, catorce llantas.		284,49	49,05	137,34	98,10
3S2	Tracto-camión con semirremolque, un eje simple, dos ejes tandem, dieciocho llantas.		470,88	49,05	210,92	210,92
3S3	Tracto-camión con semirremolque, un eje simple, un eje tandem, un eje tridem, veintidos llantas.		510,12	58,86	215,82	235,44

3.2 SITIO DE ESTUDIO

El estudio se desarrolló en la ciudad de Bogotá D.C., en la avenida Boyacá, entre la calle 170 y el cruce con la Avenida Villavicencio, sentido norte sur de la ciudad. Se ubicaron cuatro estaciones de pesaje a lo largo de la avenida.

El Instituto de Desarrollo Urbano a través de un análisis estadístico realizado por la Universidad Nacional (Contrato Interadministrativo No. 020 de 2008) definió la ubicación de las estaciones y el tamaño de la muestra, el tipo de vehículo, el volumen de tráfico, y algunos reportes históricos, fueron los factores principales en

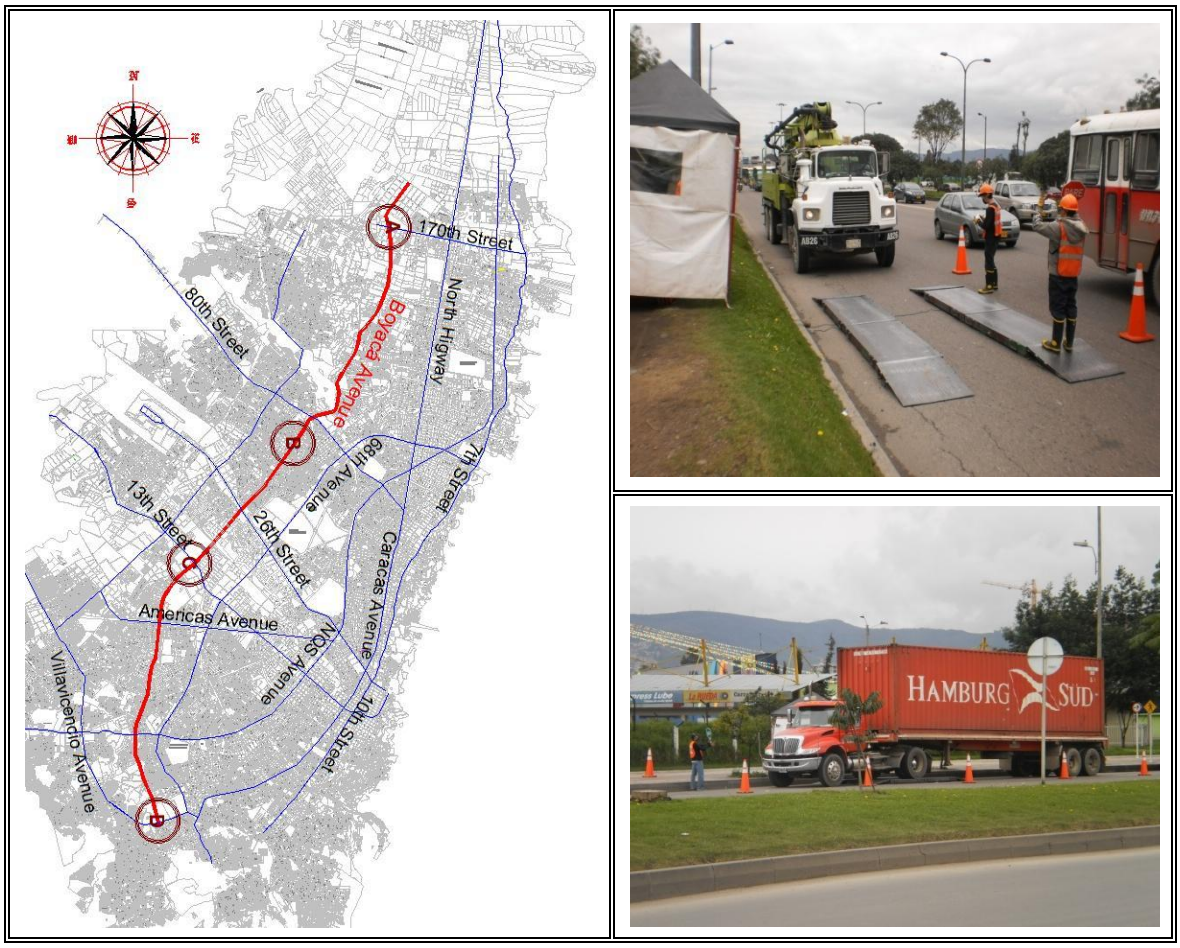
la selección de la ubicación de la estaciones para este estudio. El número de mediciones a realizar se determinó a partir del supuesto que el transito cumplía una distribución normal. La confiabilidad del estudio es el 85% y un error máximo permitido de 10%.

La identificación de cada estación y su descripción se presenta en la Tabla 7. La Figura 3(a) muestra la ubicación de las cuatro estaciones de pesaje. Los pesajes se llevaron a cabo con el fin de proporcionar información relacionada con el número, el tipo y el peso de los vehículos en cada estación.

Tabla 7 Identificación de estaciones de pesaje

ID	estación de pesaje
A	Avenida Boyacá con Calle 170
B	Avenida Boyacá con Calle 72
C	Avenida Boyacá con Calle 17
D	Avenida Boyacá con avenida Villavicencio

Figura 4 (a) Ubicación de la avenida Boyacá y estaciones de pesaje (b) Pesajes realizados.



(a) (b)

3.3 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

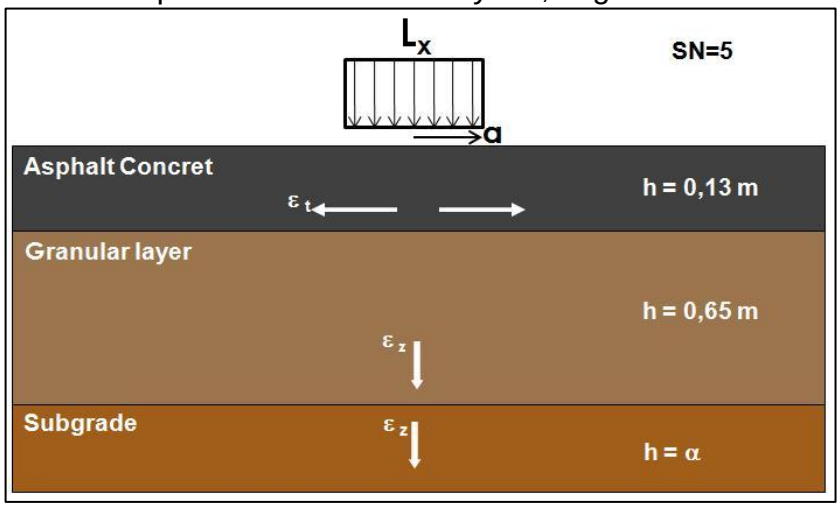
Se determinó las condiciones estructurales de la Avenida Boyacá con base a la información suministrada por Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), relacionada con los espesores de capas asfálticas (E_{CA}) y capas granulares (E_{CG}) y el valor del número estructural (SN) de la estructura de pavimento (Tabla 8), para el caso de la Avenida Boyacá se tienen registros cada 400 a 600 metros; la Figura 5 muestra el esquema general de la estructura de pavimento.

Tabla 8 Coeficiente estructural y espesores por corredor vial arterial

Corredor	SN	E_{CA}(m)	E_{CG}(m)
Avenida Boyacá	5,0	0,13	0,65

Fuente: Consulta Base de datos IDU

Figura 5 Estructura de pavimento avenida Boyacá, según Base de Datos IDU



La estructura definida se asumió como una condición ideal en la cual las características de los materiales no varían entre estaciones. Se definió los valores de módulos y relación de Poisson (medio elástico) para los materiales de la Avenida Boyacá con base al manual de diseño del IDU. Los datos definidos se observan en la Tabla 9

Tabla 9 Módulos y relación de Poisson de capas

Capa	Módulo (kg/cm^2)	Relación de Poisson (ν)
Concreto asfaltico	40.000	0,30
Base granular	5.600	0,35
Subbase granular	2.000	0,35
Subrasante	800	0,40

4. RESULTADOS

Un total de 3.193 mediciones de pesaje fueron registradas en la Avenida Boyacá en el estudio realizado por el Instituto de Desarrollo Urbano a través de la Universidad Nacional de Colombia. Para este estudio, el 53% de las mediciones fueron tomadas en dirección norte a sur. Los datos obtenidos a partir de las cuatro estaciones sugieren que los vehículos de 2, 3 y 3S3 son los vehículos más comunes que circulan sobre la Avenida Boyacá. Por otro lado, no hay muestras representativas de los vehículos de 4, 2S1, 2S3 y 3S1 de acuerdo a los reportes de las estaciones de pesaje, debido a la baja circulación en el medio urbano de estas tipologías.

La limitación de dos básculas por jornada de trabajo limitó que los pesajes medidos sean aleatorios en el tiempo debido a que para un punto de medición se realizó el total de la muestra en tres o cuatro días, y solo algunos de los vehículos que pasaban se midieron. La cantidad de vehículos medidos por estación y por sentido se observan en la Tabla 10, igualmente con respecto al total de vehículos medidos por estación se determina su porcentaje de representatividad.

Tabla 10 Vehículos medidos y porcentaje con respecto a la muestra en cada estación

Vehículo tipo	A		B		C		D	
	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N
2	138	161	92	97	232	191	81	130
	18,21%	21,24%	13,96%	14,72%	22,12%	18,21%	11,14%	17,88%
3	80	40	80	73	137	115	68	58
	10,55%	5,28%	12,14%	11,08%	13,06%	10,96%	9,35%	7,98%
2S2	16	21	20	30	29	16	4	8
	2,11%	2,77%	3,03%	4,55%	2,76%	1,53%	0,55%	1,10%
3S2	77	56	52	71	74	70	105	94
	10,16%	7,39%	7,89%	10,77%	7,05%	6,67%	14,44%	12,93%
3S3	112	57	73	71	107	78	101	78
	14,78%	7,52%	11,08%	10,77%	10,20%	7,44%	13,89%	10,73%
Vehículos totales por estación	758		659		1049		727	

Esta tabla desagregada por estaciones se tendrá en cuenta en el análisis de vida útil el cual se plantea por estaciones debido a que son universos de mediciones completamente diferentes.

4.1 ESPECTROS DE CARGA EN LA AVENIDA BOYACÁ

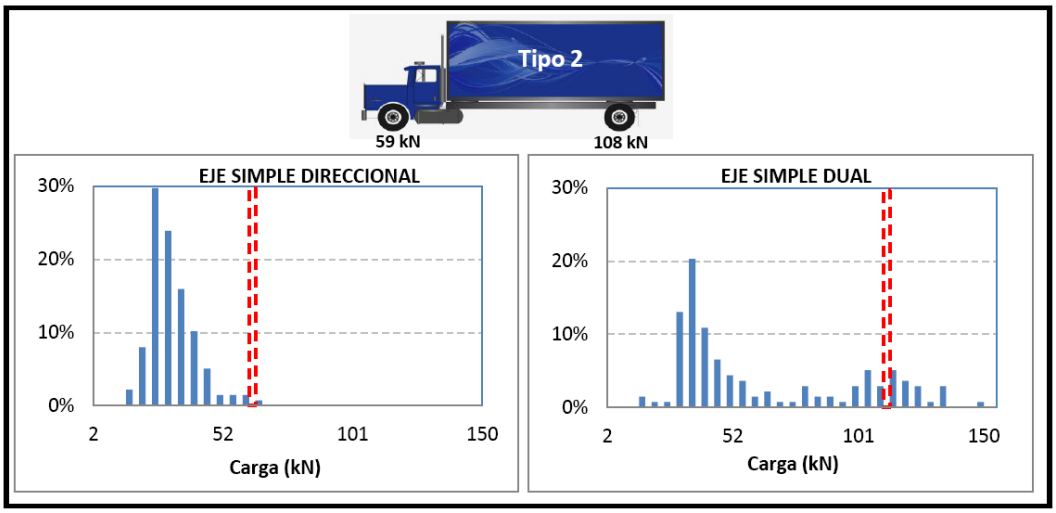
A partir de los datos obtenidos se realiza el análisis de espectros de carga teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Peso máximo permitido por eje de acuerdo a la configuración del vehículo.
- Espectro de carga por eje.
- Intervalo de pesaje.
- Marca más frecuente, en kilo Newton.
- Frecuencia de la marca más frecuente.
- Tamaño de la muestra.
- Pesajes en número superiores al permitido.
- Porcentaje de vehículos con sobrecarga con respecto al tamaño de la muestra.
- El intervalo de clase de peso por eje varía cada 5 kN para una mejor distribución de los datos encontrados. Los resultados de frecuencia se presentan en forma porcentual y la presentación gráfica de los espectros de carga de un mismo vehículo conservan la misma escala en marca de clase y porcentaje.

Se obtuvo los espectros de carga para los vehículos tipo 2, 3, 2S2, 3S2 y 3S3 en las cuatro estaciones de pesaje en ambos sentidos, los espectros obtenidos se presentan en el Anexo 1. En la Figura 6, Figura 7 y Figura 8 se observan los espectros de carga de los vehículos tipo 2, 3 y 3S3 medidos en la avenida Boyacá con Calle 170 sentido norte sur respectivamente. Estos vehículos de carga son los más representativos en las cuatro estaciones en ambos sentidos.

Se observa la línea roja punteada como el límite de carga en cada eje, los intervalos de carga a la izquierda de esta línea son las cargas permitidas y los intervalos de carga que están a la derecha de esta línea son cargas excedidas.

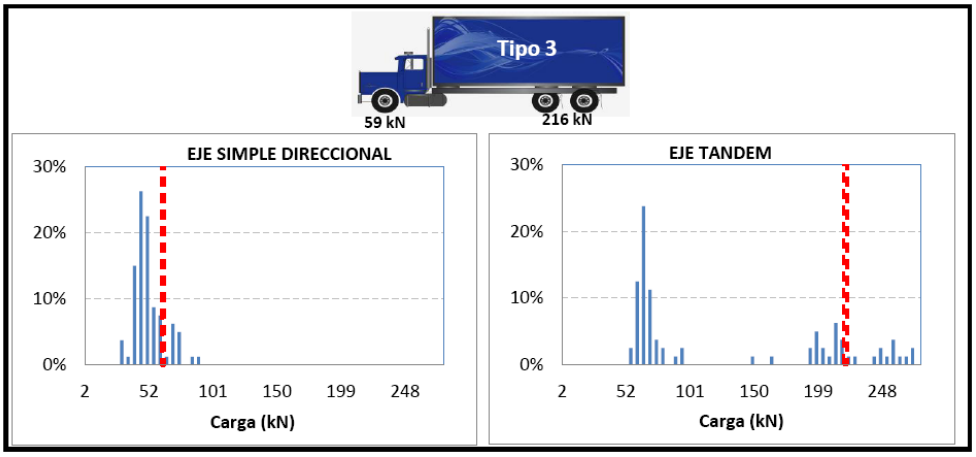
Figura 6 Espectro de carga del camión tipo 2, Calle 170 sentido Norte Sur



En el vehículo tipo 2 (Figura 6) se reportan mediciones excedidas del límite de carga del orden de 2% y19% en su eje simple direccional y eje simple dual respectivamente. En su eje trasero se observa que los datos tienen mayor frecuencia en 36,8 kN, la mayoría de estos vehículos pasan con un nivel de cargas bajo (grandes volúmenes de mercancía pero bajo peso).

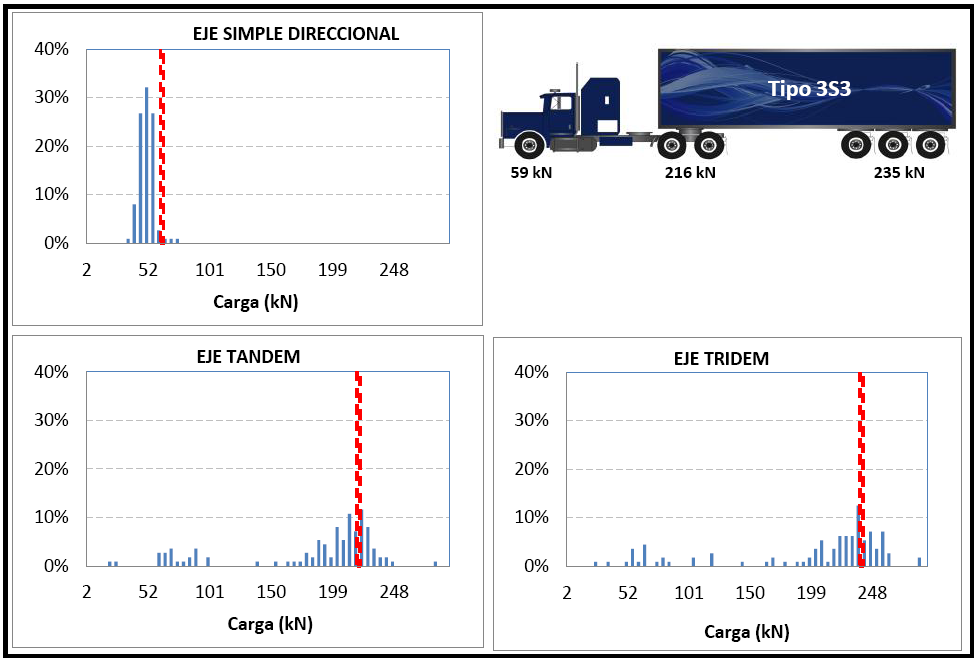
El vehículo tipo 3 reporta mediciones excedidas del límite de carga del orden de 23% y 20% en su eje simple y eje tándem respectivamente. La máxima carga reportada para el eje tándem es 273 kN.

Figura 7 Espectro de carga del camión tipo 3, Calle 170 sentido Norte Sur



Las mediciones realizadas para el camión tipo 3S3 muestran una mayor distribución de cargas cerca a su carga máxima por eje, se presenta un 5%, 36% y 40% por eje simple, tándem y trídem respectivamente de sobrecarga con respecto a los vehículos medidos. Con respecto a la magnitud, la sobrecarga promedio es 9,8 kN, 12,8 kN y 13,7 kN en los ejes simple, tándem y trídem respectivamente.

Figura 8 Espectro de carga del camión tipo 3S3, Calle 170 sentido Norte Sur



4.1.1 Cargas excedidas

De los espectros obtenidos, se compila la información de los ejes excedidos con respecto a la muestra por vehículo en cada estación de pesaje (Tabla 11).

Tabla 11 Porcentaje de ejes medidos que exceden su carga permitida

Vehículo tipo	Estación / Eje Medido	A		B		C		D	
		N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N
2	Simple direccional	2%	0%	0%	7%	1%	2%	0%	1%
	Simple dual	19%	11%	16%	28%	10%	14%	17%	26%
3	Simple direccional	23%	25%	53%	25%	29%	24%	18%	29%
	Tándem	20%	15%	18%	12%	18%	20%	4%	26%
2S2	Simple direccional	6%	0%	0%	10%	3%	0%	25%	0%
	Simple dual	13%	14%	0%	17%	7%	13%	50%	0%
	Tándem	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3S2	Simple direccional	36%	13%	29%	30%	26%	40%	15%	53%
	Tándem	3%	0%	8%	0%	0%	1%	0%	6%
	Tándem	9%	0%	15%	3%	3%	16%	0%	19%
3S3	Simple direccional	5%	4%	0%	3%	2%	1%	0%	13%
	Tándem	36%	5%	4%	3%	12%	10%	1%	27%
	Tridem	40%	2%	15%	3%	8%	22%	0%	24%

Con respecto al número de vehículos medidos y su porcentaje que representan en las 3.193 mediciones (Tabla 10), se divide cada porcentaje en el número de ejes por tipo de vehículo y a encontrar el valor de ejes excedidos en la muestra total con respecto a los porcentajes reportados de ejes excedidos en cada espectro de carga por eje (Tabla 11). Este procedimiento se expresa en la Ecuación 5.

Ecuación 5 Porcentaje de incidencia por tipo de vehículo i y tipo de eje j en función a la excedencia de carga

$$\%\ incidencia_{i,j} = \frac{\%\ representatividad\ Veh_i}{No\ ejes\ del\ Veh_i} * \%\ ejes\ excededidos\ en\ el\ eje_{\ j}$$

Donde,
i, corresponde al tipo de vehículo (2, 3, 2S2, 3S2, 3S3).
j, corresponde al tipo de eje en un vehículo i (1 simple, 2 tándem, 3 tridem).
$\%\ representatividad\ Veh_i$, corresponde a los valores de la Tabla 10
$\%\ excedidos\ en\ el\ eje\ j$, corresponde a los valores de la Tabla 11.

Como ejemplo se calcula el porcentaje de incidencia del eje simple direccional para el vehículo tipo 2 en sentido norte sur.

Ejemplo 1.

$$\%ejes\ excedidos_{2,1} = \frac{18{,}21\%}{2} * 2\% = 0{,}18\%$$

Este valor es el reportado en la Tabla 12 correspondiente al porcentaje de incidencia del eje simple direccional del vehículo tipo 2 en la estación A sentido norte sur.

Tabla 12 Porcentaje de ejes con sobrecarga a partir de la ecuación 5

Vehículo tipo	**Estación / Eje medido**	**A**		**B**		**C**		**D**	
		N-S	**S-N**	**N-S**	**S-N**	**N-S**	**S-N**	**N-S**	**S-N**
2	Simple direccional	0,18%	0,00%	0,00%	0,52%	0,11%	0,18%	0,00%	0,09%
	Simple dual	1,73%	1,17%	1,12%	2,06%	1,11%	1,27%	0,95%	2,32%
3	Simple direccional	1,21%	0,66%	3,22%	1,38%	1,89%	1,32%	0,84%	1,16%
	Tándem	1,06%	0,40%	1,09%	0,66%	1,18%	1,10%	0,19%	1,04%
2S2	Simple direccional	0,04%	0,00%	0,00%	0,15%	0,03%	0,00%	0,05%	0,00%
	Simple dual	0,09%	0,13%	0,00%	0,26%	0,06%	0,07%	0,09%	0,00%
	Tándem	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
3S2	Simple direccional	1,22%	0,32%	0,76%	1,08%	0,61%	0,89%	0,72%	2,28%
	Tándem	0,10%	0,00%	0,21%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,26%
	Tándem	0,30%	0,00%	0,39%	0,11%	0,07%	0,36%	0,00%	0,82%
3S3	Simple direccional	0,25%	0,10%	0,00%	0,11%	0,07%	0,02%	0,00%	0,46%
	Tándem	1,77%	0,13%	0,15%	0,11%	0,41%	0,25%	0,05%	0,97%
	Tridem	1,97%	0,05%	0,55%	0,11%	0,27%	0,55%	0,00%	0,86%
% de ejes excedidos por estación		**12,88%**		**14,04%**		**11,83%**		**13,14%**	

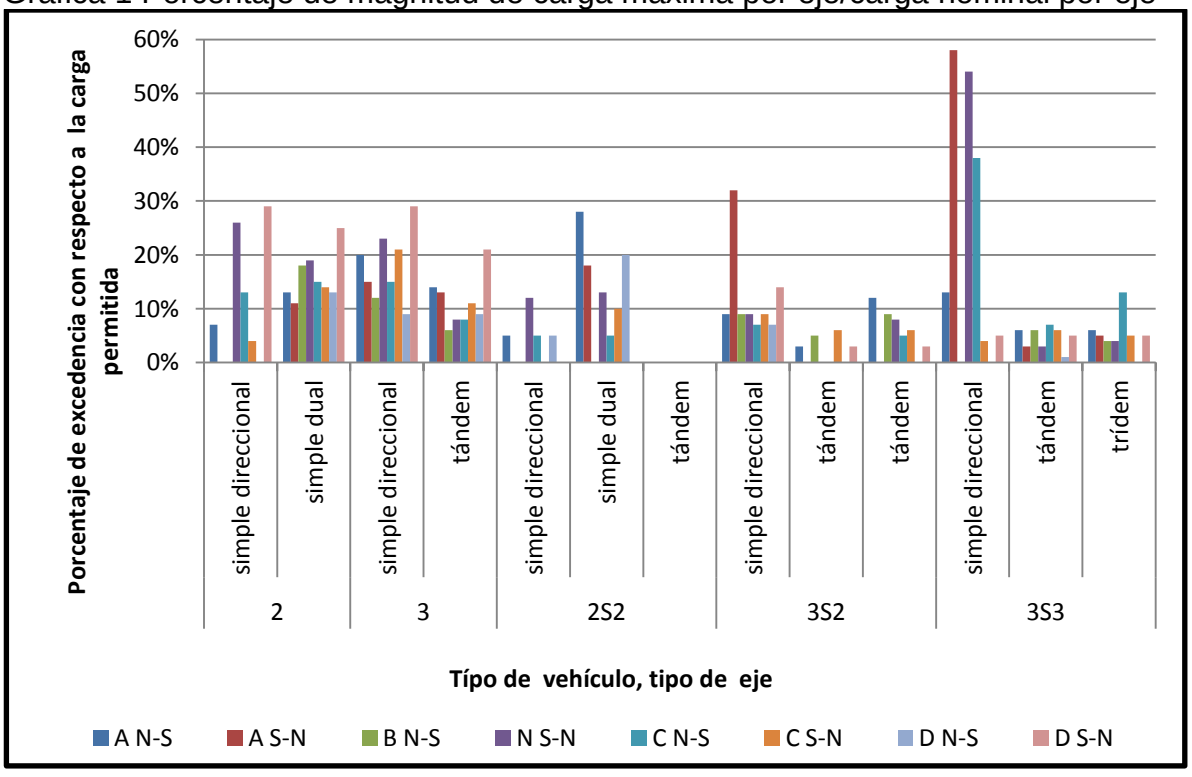
El promedio del porcentaje de ejes excedidos es de 12,97% y sus desviación estándar es de 0,91%.

Con respecto a la magnitud de carga, en la Tabla 13 y en la Gráfica 1 se observan los porcentajes de excedencia de carga por eje y tipo de vehículo en función a la magnitud nominal de carga definida para cada vehículo en el estudio.

Tabla 13 Porcentaje de magnitud de carga máxima por eje/carga nominal por eje

Vehículo tipo	Estación / Eje Medido	A		B		C		D	
		N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N
2	Simple direccional	7%	0%	0%	26%	13%	4%	0%	29%
	Simple dual	13%	11%	18%	19%	15%	14%	13%	25%
3	Simple direccional	20%	15%	12%	23%	15%	21%	9%	29%
	Tándem	14%	13%	6%	8%	8%	11%	9%	21%
2S2	Simple direccional	5%	0%	0%	12%	5%	0%	5%	0%
	Simple dual	28%	18%	0%	13%	5%	10%	20%	0%
	Tándem	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3S2	Simple direccional	9%	32%	9%	9%	7%	9%	7%	14%
	Tándem	3%	0%	5%	0%	0%	6%	0%	3%
	Tándem	12%	0%	9%	8%	5%	6%	0%	3%
3S3	Simple direccional	13%	58%	0%	54%	38%	4%	0%	5%
	Tándem	6%	3%	6%	3%	7%	6%	1%	5%
	Tridem	6%	5%	4%	4%	13%	5%	0%	5%

Gráfica 1 Porcentaje de magnitud de carga máxima por eje/carga nominal por eje



Se observa de manera general, que es muy variable la excedencia de carga en cada uno de los ejes y tipo de vehículos. los ejes simple direccionales de los vehículos tipo 3S3 muestran una excedencia alrededor de 35% y 60% para la estación A sentido norte sur y sur norte y la estación B sentido sur norte.

En función a la variabilidad de los porcentajes de excedencia de carga se determinan las cargas excedidas en magnitud. La Tabla 14 muestra la magnitud de la carga en cada eje y estación de medición.

Tabla 14 Carga nominal y máxima medida por eje y estación de medición en kN

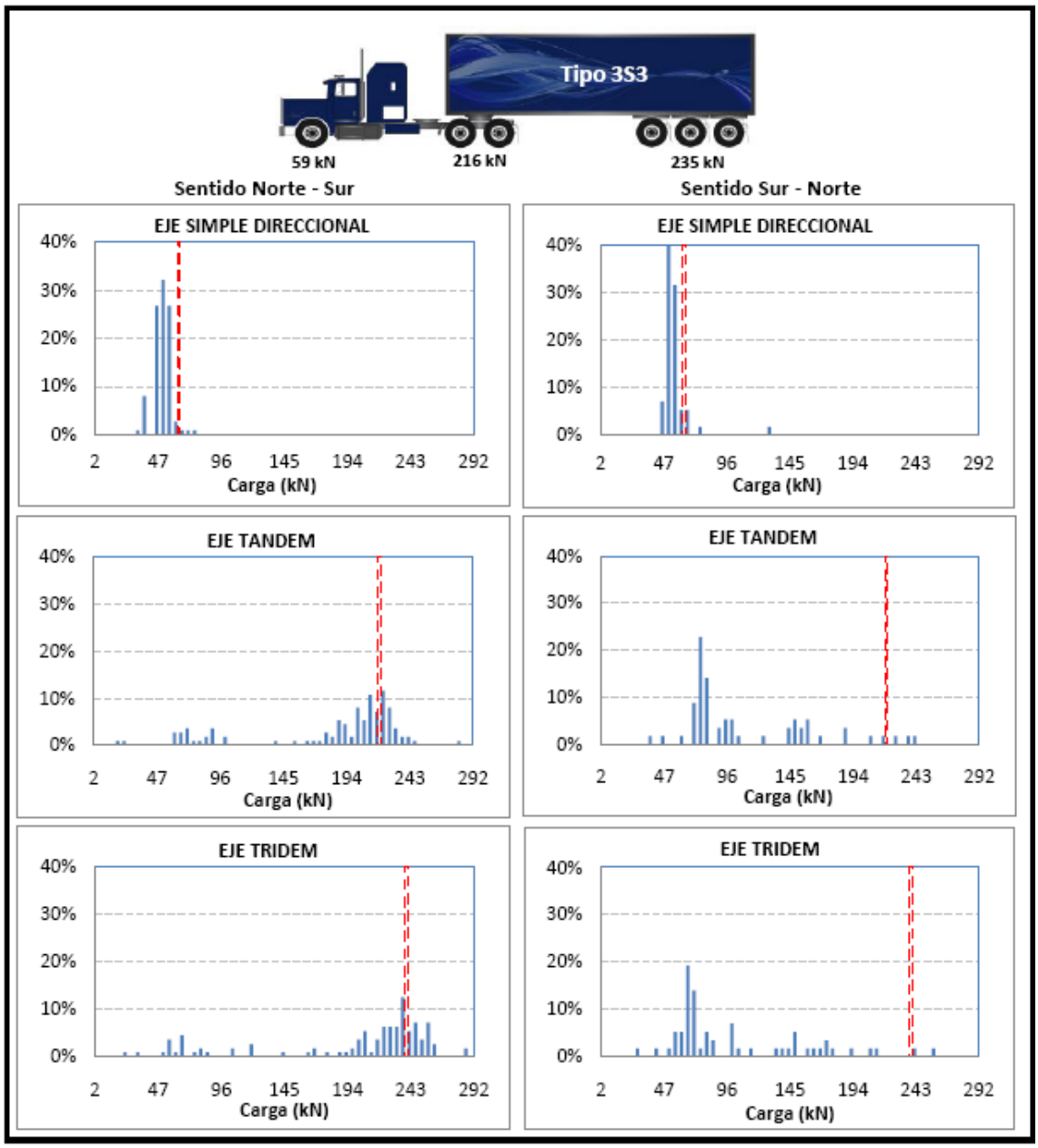
Vehículo tipo	Eje medido	Carga nominal	Estación, sentido							
			A		B		C		D	
			N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N
2	Simple direccional	58,86	62,98	58,86	58,86	74,16	66,51	61,21	58,86	75,93
	Simple dual	107,91	121,94	119,78	127,33	128,41	124,10	123,02	121,94	134,89
3	Simple direccional	58,86	70,63	67,69	65,92	72,40	67,69	71,22	64,16	75,93
	Tándem	215,82	246,03	243,88	228,77	233,09	233,09	239,56	235,24	261,14
2S2	Simple direccional	49,05	51,50	49,05	49,05	54,94	51,50	49,05	51,50	49,05
	Simple dual	98,10	125,57	115,76	98,10	110,85	103,01	107,91	117,72	98,10
	Tándem	166,77	166,77	166,77	166,77	166,77	166,77	166,77	166,77	166,77
3S2	Simple direccional	49,05	53,46	64,75	53,46	53,46	52,48	53,46	52,48	55,92
	Tándem	210,92	217,24	210,92	221,46	210,92	210,92	223,57	210,92	217,24
	Tándem	210,92	236,22	210,92	229,90	227,79	221,46	223,57	210,92	217,24
3S3	Simple direccional	58,86	66,51	93,00	58,86	90,64	81,23	61,21	58,86	61,80
	Tándem	215,82	228,77	222,29	228,77	222,29	230,93	228,77	217,98	226,61
	Tridem	235,44	249,57	247,21	244,86	244,86	266,05	247,21	235,44	247,21

Teniendo en cuenta que la carga transferida al pavimento es dependiente del número y distribución de llantas, el esfuerzo sobre la estructura del eje simple es mayor que el impuesto por el eje tándem o trídem. En este contexto, los vehículos tipo 2 y 3 son los más perjudiciales en el comportamiento mecánico de la estructura de pavimento.

4.1.2 Análisis de direccionalidad

Se realizó un análisis con el objeto de estimar la influencia de los resultados obtenidos de pesaje en ambas direcciones (norte a sur y sur a norte). En la figura 8 se observa un ejemplo del espectro de carga para el vehículo tipo 3S3 en la estación A. Se observa una diferencia significativa con respecto a los espectros obtenidos en cada eje del vehículo observado. Las cargas más altas fueron reportadas en el sentido norte a sur. Este fenómeno puede ser explicado por el hecho de que los vehículos transportan productos a la ciudad en este sentido específicamente en esta estación. En el otro sentido (sur a norte) los vehículos salen de la ciudad sin carga. Esta influencia de direccionalidad de la carga se debe tener en cuenta en el mantenimiento y desarrollo de proyectos viales.

Figura 9 Espectro de carga del camión tipo 3S3, Calle 170 en ambos sentidos



4.2 COEFICIENTE DE AGRESIVIDAD (A_0)

El coeficiente de agresividad (
Ecuación 1) se CALCULA para los vehículos de carga del estudio, este coeficiente se calcula sobre una carga de referencia de 130 kN. Este coeficiente combina el daño de los ejes de un tipo de vehículo y representa el daño calculado a partir de la distribución de carga obtenida en los espectros de carga, siendo un promedio entre los vehículos de un mismo tipo que transitan vacios, cargados con límites permitidos y cargados con sobrecarga. La agresividad ponderada es la sumatoria de las agresividades por cada carga medida en una estación por tipo de camión.

Para verificar los resultados obtenidos con las cargas reales se calcula el coeficiente de agresividad nominal A_N para cada tipo de vehículo de acuerdo con las cargas máximas permitidas. La Tabla 15 presenta el valor de coeficiente de agresividad nominal y ponderada para cada tipo de vehículo, con base a la Ecuación 6.

Ecuación 6 Coeficiente de agresividad ponderada

$$A_{P\,i} = \frac{1}{VP_i}\left[\sum_{j=1}^{3} k_j\, n_{jP}\left(\frac{P_{ij}}{P_{ref}}\right)^{\alpha}\right]$$

Donde

A_{P_i}, es la agresividad ponderada para un vehículo i (2, 3, 2S2, 3S2, 3S3)

VP_i, es la cantidad de vehículos del tipo i que se pesaron.

k_j, es el coeficiente correspondiente al tipo de eje

n_{jP}, es el número de ejes de tipo j y carga P

P_{ij}, es la carga en cada eje j de los vehículos tipo i

Tabla 15 Coeficientes de agresividad ponderada para cada tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Coeficiente de agresividad nominal (A_N)	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
		Sentido		Sentido		Sentido		Sentido	
		N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
2	0,41	0,19	0,12	0,21	0,38	0,18	0,14	0,20	0,41
3	0,61	0,35	0,24	0,34	0,19	0,31	0,26	0,17	0,47
2S2	0,42	0,15	0,12	0,13	0,16	0,05	0,09	0,39	0,02
3S2	1,06	0,41	0,05	0,42	0,08	0,24	0,39	0,17	0,57
3S3	0,89	0,69	0,12	0,34	0,12	0,42	0,34	0,32	0,52

Se observa que el coeficiente de agresividad calculado para los diferentes tipos de vehículos en las diferentes estaciones es inferior al coeficiente de agresividad nominal **(A_N).** Es importante anotar que el coeficiente de agresividad nominal es evaluado para un solo vehículo con las cargas máximas permitidas.

Igualmente se observa una concentración de coeficientes de agresividad en los vehículos tipo 2, tipo 3 en la estación D, sentido sur norte mayores a los de la estación A, puntos por donde confluye la mayoría de la carga a la ciudad. Este comportamiento se observa de forma contraria en el vehículo tipo 3S3.

Por otra parte, analizando los valores obtenidos con las cargas reales se observa que para los vehículos tipo 2S2, 3S2 y 3S3 los coeficientes de agresividad ponderada son mayores en sentido norte sur, de la avenida Boyacá. Así mismo, en función la direccionalidad se observan los valores medios y la desviación estándar de los coeficientes de agresividad ponderados.

Tabla 16 Coeficientes de agresividad ponderada y su variación con respecto a la direccionalidad

Tipo de Vehículo	Sentido Norte Sur				Media	Desviación estándar	Sentido Sur Norte				Media	Desviación estándar
	Estación						Estación					
	A	B	C	D			A	B	C	D		
2	0,19	0,21	0,18	0,20	0,20	0,01	0,12	0,38	0,14	0,41	0,26	0,15
3	0,35	0,34	0,31	0,17	0,29	0,08	0,24	0,19	0,26	0,47	0,29	0,12
2S2	0,15	0,13	0,05	0,39	0,18	0,15	0,12	0,16	0,09	0,02	0,10	0,06
3S2	0,41	0,42	0,24	0,17	0,31	0,12	0,05	0,08	0,39	0,57	0,27	0,25
3S3	0,69	0,34	0,42	0,32	0,44	0,17	0,12	0,12	0,34	0,52	0,28	0,19

La variación en el coeficiente de agresividad ponderada para el vehículo tipo 2 en sentido norte sur es nula, para las otras configuraciones y en los dos sentidos la variabilidad es alta en desviaciones estándar por encima de 0,10.

Por otra parte, para verificar el aumento del coeficiente de agresividad ponderado de cada tipo de vehículo en función de las cargas excedidas, se calcula el coeficiente de agresividad excedido con la magnitud de las cargas reportadas para cada vehículo en la Tabla 14, estos nuevos valores se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17 Coeficientes de agresividad con cargas excedidas

Tipo de camión	Coeficiente de agresividad nominal (A_N)	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
		Sentido		Sentido		Sentido		Sentido	
		N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
2	0,41	0,75	0,68	0,92	1,00	0,83	0,78	0,75	1,27
3	0,61	1,19	1,13	0,84	0,92	0,91	1,05	0,94	1,60
2S2	0,42	1,01	0,73	4,58	0,63	0,48	0,56	0,78	0,42
3S2	1,06	1,55	1,08	1,50	1,31	1,21	1,42	1,06	1,24
3S3	0,89	1,22	1,40	1,15	1,34	1,51	1,18	0,92	1,14

El coeficiente de agresividad para las cargas excesivas calculado reporta valores superiores a los del coeficiente de agresividad nominal **(A_N),** este comportamiento se ve acentuado para los vehículos tipo 2 y tipo 3 en particular.

Como condición especial, no se calculó los coeficientes de agresividad para los vehículos tipo 4, 2S1, 2S3 y 3S1 debido a su bajo transito en la ciudad y que no se tuvo muestra en las estaciones.

4.3 FACTORES AASHTO DE LA AVENIDA BOYACÁ

Los factores de equivalencia de carga AASHTO son calculados a partir de un eje de referencia de 80 kN, para este cálculo se utiliza la Ecuación 2 y se toma un índice de servicio final $P_t = 3.0$, debido a que las condiciones actuales son buenas y no requiere nivel de intervención de tipo rehabilitación o reconstrucción parcial. Para el cálculo de los factores de equivalencia se tiene en cuenta un número estructural $SN = 5$. Los valores calculados son reportados en la Tabla 18.

Tabla 18 Factores AASTHO en cada estación de pesaje ($SN = 5$ y $P_t = 3{,}0$)

Tipo de camión	Factor AASHTO nominal (FC_N)	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
		Sentido		Sentido		Sentido		Sentido	
		N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
2	3,00	1,14	0,85	1,22	1,90	0,88	0,86	1,27	1,88
3	4,00	2,00	1,51	2,44	1,32	2,08	1,65	1,36	2,27
2S2	3,72	1,06	0,96	0,49	1,23	0,49	0,88	2,76	0,35
3S2	7,02	3,16	0,50	3,08	0,66	1,96	2,84	1,83	4,05
3S3	5,54	4,25	0,97	2,27	1,02	2,58	2,30	2,58	3,33

Acorde con los valores de excedencia de carga obtenidos de los espectros de carga, los valores de factor de equivalencia de carga más altos son de los asociados con los vehículos que atraviesan la ciudad de norte a sur. En la estación D los valores de los factores de equivalencia en dirección sur norte presentan mayores valores debido al flujo vehicular con carga que entra a la ciudad.

En cada uno de los casos evaluados, los factores obtenidos no superan o igualan el valor de factor de equivalencia nominal como si se observa al calcular la agresividad por la aproximación Francesa.

Realizando un análisis de variación por direccionalidad se observan los valores de la media y desviación estándar de los datos por tipo de vehículo (Tabla 19).

Tabla 19 Factor de equivalencia AASHTO y su variación con respecto a la direccionalidad

Tipo de Vehículo	Sentido Norte Sur				Media	Desviación estándar	Sentido Sur Norte				Media	Desviación estándar
	Estación						Estación					
	A	B	C	D			A	B	C	D		
2	1,1	1,2	0,9	1,3	1,13	0,17	0,9	1,9	0,9	1,9	1,37	0,60
3	2	2,4	2,1	1,4	1,97	0,45	1,5	1,3	1,7	2,3	1,69	0,41
2S2	1,1	0,5	0,5	2,8	1,20	1,07	1	1,2	0,9	0,4	0,86	0,37
3S2	3,2	3,1	2	1,8	2,51	0,71	0,5	0,7	2,8	4,1	2,01	1,73
3S3	4,3	2,3	2,6	2,6	2,92	0,90	1	1	2,3	3,3	1,91	1,13

En este análisis por direccionalidad se observa una variabilidad más baja que la reportada el los coeficientes de agresividad ponderada debido a la magnitud del factor de equivalencia. En ese orden de ideas se obtiene una mayor variabilidad con la aproximación del coeficiente de agresividad ponderada, siendo más conservadora debido a que a una mayor variación la probabilidad de falla es más alta.

Adicionalmente se determinan los factores de equivalencia AASHTO para las cargas excedidas por tipo de vehículo referenciadas en la Tabla 14.

Tabla 20 Factores AASHTO con cargas excedidas

Tipo de camión	Factor AASHTO nominal (FC_N)	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
		Sentido		Sentido		Sentido		Sentido	
		N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
2	3,00	4,31	4,01	4,77	5,33	4,62	4,37	4,22	6,14
3	4,00	6,15	5,91	4,90	5,37	5,22	5,74	5,25	7,44
2S2	3,72	6,04	5,06	14,25	4,74	4,09	4,42	5,27	3,72
3S2	7,02	8,85	7,32	8,69	8,01	7,63	8,44	7,07	7,79
3S3	5,54	6,81	7,54	6,50	7,35	7,95	6,61	5,66	6,50

Como se observa los factores de equivalencia de carga varían en un mismo tipo de vehículo dependiendo directamente de las condiciones de sitio de almacenamiento de carga y centros de distribución en la ciudad.

4.4 COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE FACTOR DE DAÑO

Con el fin de verificar la compatibilidad de las aproximaciones existentes para la determinación del daño, y teniendo en cuenta que las metodologías de Agresividad (LCPC, 1994) y de factor de equivalencia AASHTO (1986) en sus formulaciones presentan diferencias conceptuales y metodológicas se procedió a analizar la desviación que existe entre los valores de daño calculados y los valores de daño nominales en términos normalizados.

Para este ejercicio se evalúan los cinco tipos de vehículos del estudio del corredor de la avenida Boyacá.

- **Vehículo tipo 2**

La Tabla 21 presenta los valores de coeficientes de daño para el vehículo tipo 2 obtenidos por las dos metodologías.

Tabla 21 Resumen de factores de daño para el vehículo tipo 2

Tipo de Vehículo	Factor de daño	Coeficiente de daño nominal	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
			Sentido							
			N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
2	A_0	0,41	0,19	0,12	0,21	0,38	0,18	0,14	0,2	0,41
	FC_{AASHTO}	3,00	1,14	0,85	1,22	1,9	0,88	0,86	1,27	1,88

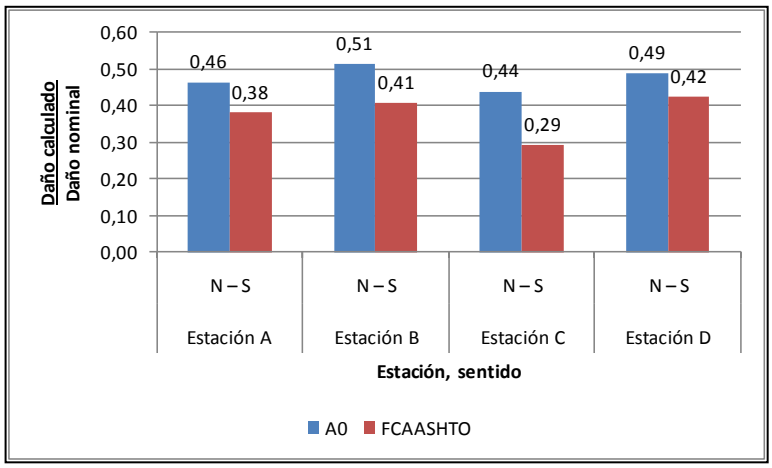
Con base a los coeficientes de daño nominales calculados por cada metodología, se normalizan los resultados obtenidos en cada una de las estaciones. El resultado de esta normalización se observa en la Tabla 22.

Tabla 22 Valores normalizados a partir del coeficiente de daño nominal del tipo 2

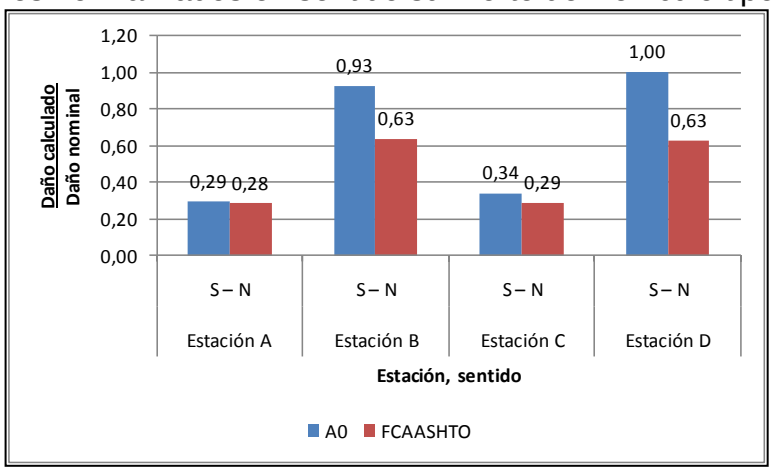
Tipo de Vehículo	Factor de daño	Coeficiente de daño nominal	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
			Sentido							
			N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
2	A_0	0,41	0,46	0,29	0,51	0,93	0,44	0,34	0,49	1,00
	FC_{AASHTO}	3,00	0,38	0,28	0,41	0,63	0,29	0,29	0,42	0,63
Diferencia normalizada			0,08	0,01	0,11	0,29	0,15	0,05	0,06	0,37

Se observa que las diferencias en los valores normalizados son muy bajas en condiciones de cargas con sobrecarga moderada. En la estación D en sentido sur norte donde los coeficientes de daño por las dos metodologías fueron los mayores existe una diferencia normalizada de 0,37, esto es por la alta excedencia de carga que presentan los vehículos de esta tipología en este sector. La Gráfica 2 y Gráfica 3 presentan los valores normalizados en sentido de avance, norte sur y sur norte respectivamente.

Gráfica 2 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 2



Gráfica 3 Valores normalizados en sentido sur norte del vehículo tipo 2



Los datos normalizados en sentido norte sur tienen un valor promedio de 0,10 y una desviación estándar de 0,035 teniendo una buen correlación. Los datos normalizados en sentido sur norte tienen un valor promedio de 0,18 y una desviación estándar de 0,178 que a pesar se der altos estos parámetros estadísticos en términos de la diferencia entre los factores de daño calculados por las dos aproximaciones es buena.

- **Vehículo tipo 3**

La tabla 23 presenta los valores de factor de daño para un vehículo tipo 3.

Tabla 23 Resumen de factores de daño para el vehículo tipo 3

Tipo de Vehículo	Factor de daño	Coeficiente de daño nominal	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
			Sentido							
			N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
3	A_0	0,61	0,35	0,24	0,34	0,19	0,31	0,26	0,17	0,47
	FC_{AASHTO}	4,00	2,00	1,51	2,44	1,32	2,08	1,65	1,36	2,27

Se realiza la normalización de los resultados con respecto al coeficiente de daño nominal.

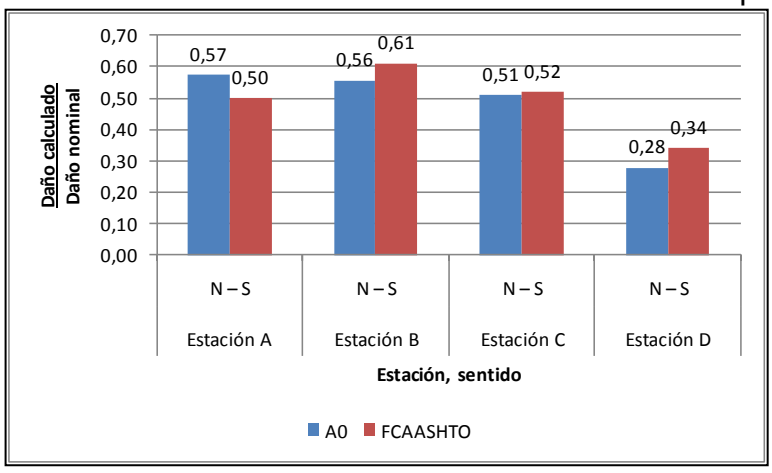
Tabla 24 Valores normalizados a partir del coeficiente de daño nominal del tipo 3

Tipo de Vehículo	Factor de daño	Coeficiente de daño nominal	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
			Sentido							
			N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
3	A_0	0,61	0,57	0,39	0,56	0,31	0,51	0,43	0,28	0,77
	FC_{AASHTO}	4,00	0,50	0,38	0,61	0,33	0,52	0,41	0,34	0,57
Diferencia normalizada			0,07	0,02	-0,05	-0,02	-0,01	0,01	-0,06	0,20

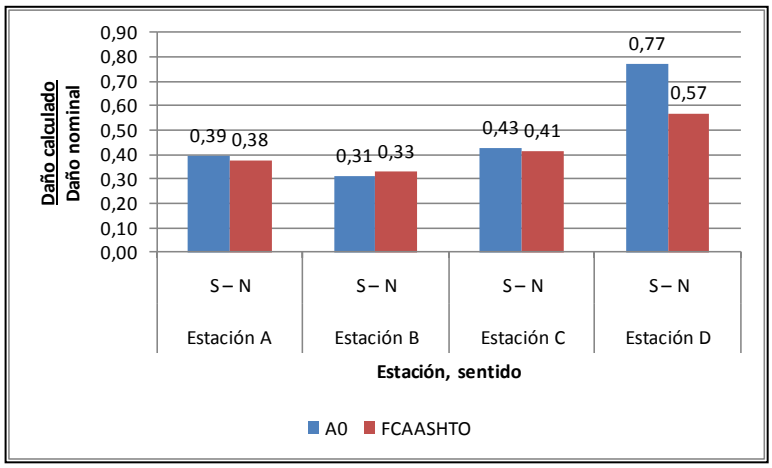
La diferencia normalizada sigue siendo baja para cada estación y sentido, exceptuado la estación D en sentido sur norte. Los valores negativos corresponden a que la diferencia radica en que se asume que el factor de daño de la Agresividad ponderada es más conservador, es decir seria el valor normalizado más alto.

Los datos normalizados se presentan en la Gráfica 4 y Gráfica 5 en sentido de avance, norte sur y sur norte respectivamente.

Gráfica 4 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 3



Gráfica 5 Valores normalizados en sentido sur norte del vehículo tipo 3



En sentido de avance existe una correspondencia entre los valores normalizados, se observa una variación alta en la estación D en sentido sur nortes, posiblemente por la magnitud de las cargas evaluadas en este sitio.

- **Vehículo 2S2**

La tabla 25 presenta los valores de factor de daño para un vehículo tipo 2S2.

Tabla 25 Resumen de factores de daño para el vehículo tipo 2S2

Tipo de Vehículo	Factor de daño	Coeficiente de daño nominal	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
			Sentido							
			N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
2S2	A_0	0,42	0,15	0,12	0,13	0,16	0,05	0,09	0,39	0,02
	FC_{AASHTO}	3,72	1,06	0,96	0,50	1,23	0,49	0,88	2,76	0,35

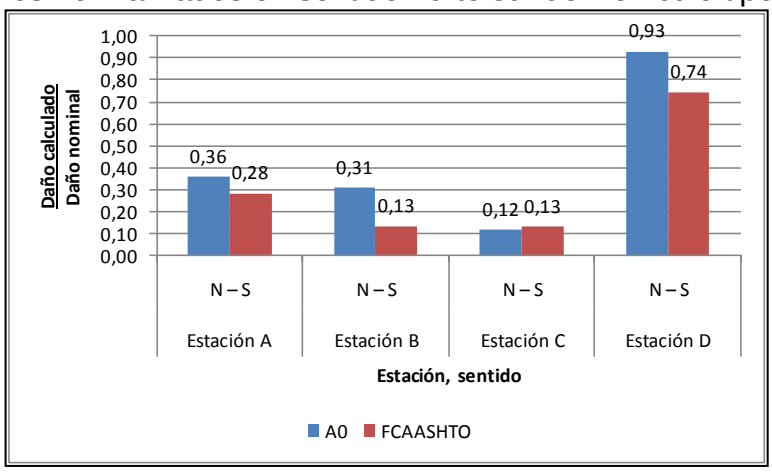
Se normalizan los datos por medio del coeficiente de daño nominal

Tabla 26 Valores normalizados a partir del coeficiente de daño nominal del tipo 2S2

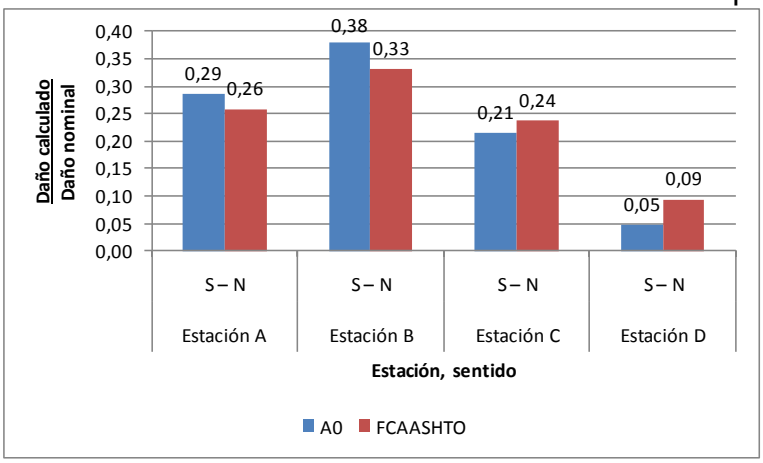
Tipo de Vehículo	Factor de daño	Coeficiente de daño nominal	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
			Sentido							
			N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
2S2	A_0	0,42	0,36	0,29	0,31	0,38	0,12	0,21	0,93	0,05
	FC_{AASHTO}	3,72	0,28	0,26	0,13	0,33	0,13	0,24	0,74	0,09
Diferencia normalizada			0,07	0,03	0,18	0,05	-0,01	-0,02	0,19	-0,05

Los valores normalizados de la estación B sentido norte sur y estación D sentido norte sur presentan una diferencia de 0,18 y 0,19 respectivamente, las demás están en un rango bajo de diferencia. Los valores de diferencia normalizada se grafican en sentido de avance.

Gráfica 6 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 2S2



Gráfica 7 Valores normalizados en sentido sur norte del vehículo tipo 2S2



Se observa una clara correspondencia de los valores normalizados en cada sentido de avance.

- **Vehículo 3S2**

La tabla 27 presenta los valores de factor de daño para un vehículo tipo 3S2.

Tabla 27 Resumen de factores de daño para el vehículo tipo 3S2

Tipo de Vehículo	Factor de daño	Coeficiente de daño nominal	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
			Sentido							
			N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
3S2	A_0	1,06	0,41	0,05	0,42	0,08	0,24	0,39	0,17	0,57
	FC_{AASHTO}	7,02	3,16	0,50	3,08	0,66	1,96	2,84	1,83	4,05

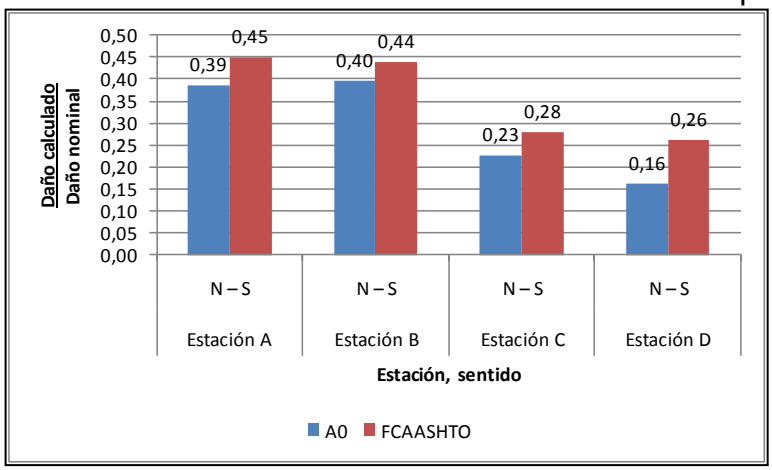
Estos datos se normalizan con cada factor de daño nominal de vehículo tipo 3S2.

Tabla 28 Valores normalizados a partir del coeficiente de daño nominal del tipo 3S2

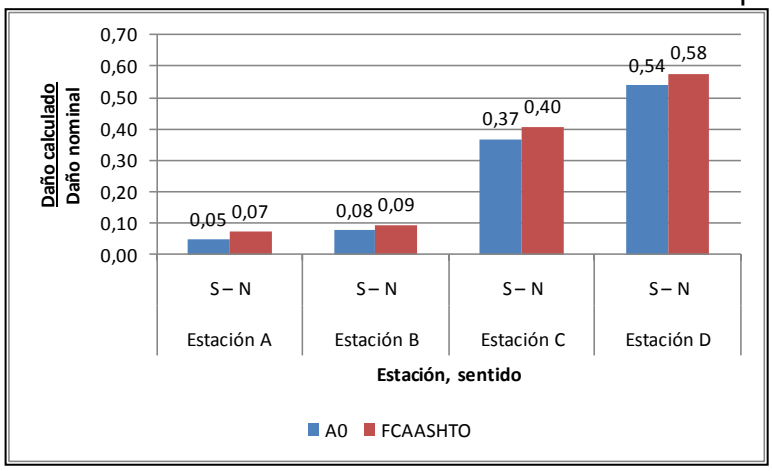
Tipo de Vehículo	Factor de daño	Coeficiente de daño nominal	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
			Sentido							
			N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
3S2	A_0	1,06	0,39	0,05	0,40	0,08	0,23	0,37	0,16	0,54
	FC_{AASHTO}	7,02	0,45	0,07	0,44	0,09	0,28	0,40	0,26	0,58
Diferencia normalizada			-0,06	-0,02	-0,04	-0,02	-0,05	-0,04	-0,10	-0,04

Para esta configuración los valores de la diferencia normalizada están dentro de unos rangos bajos, en este caso el coeficiente de daño más conservador es el de factor de equivalencia AASHTO. Los valores normalizados se grafican en sentido de avance.

Gráfica 8 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 3S2



Gráfica 9 Valores normalizados en sentido sur norte del vehículo tipo 3S2



Se mantiene la correspondencia en el sentido de avance, aunque los valores entre estaciones varían considerablemente.

- **Vehículo 3S3**

La tabla 29 presenta los valores de factor de daño para un vehículo tipo 3S3

Tabla 29 Resumen de factores de daño para el vehículo tipo 3S3

Tipo de Vehículo	Factor de daño	Coeficiente de daño nominal	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
			Sentido							
			N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
3S3	A_0	0,89	0,69	0,12	0,34	0,12	0,42	0,34	0,32	0,52
	FC_{AASHTO}	5,54	4,25	0,97	2,27	1,02	2,58	2,30	2,58	3,33

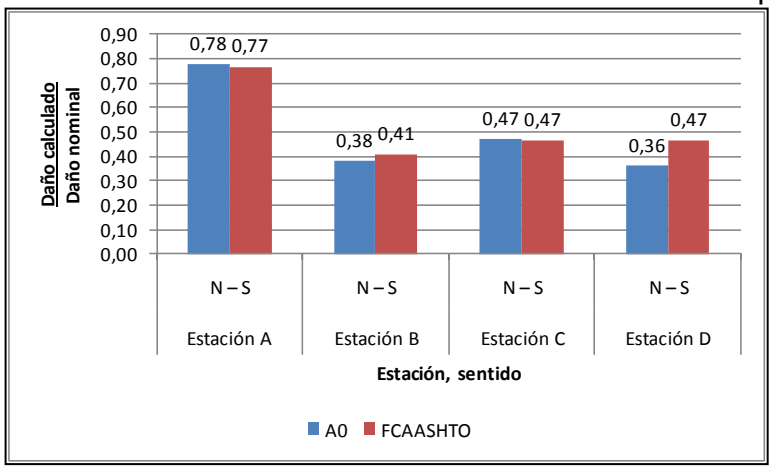
Los datos se normalizan con cada factor de daño nominal de vehículo tipo 3S3.

Tabla 30 Valores normalizados a partir del coeficiente de daño nominal del tipo 3S2

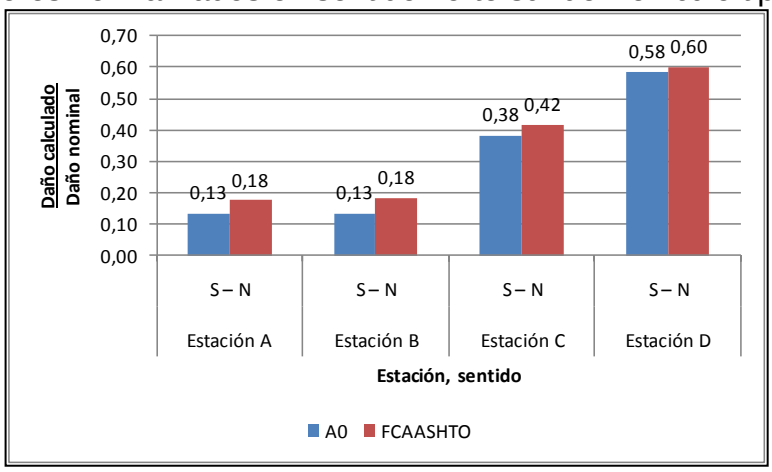
Tipo de Vehículo	Factor de daño	Coeficiente de daño nominal	Estación A		Estación B		Estación C		Estación D	
			Sentido							
			N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N	N – S	S – N
3S3	A_0	0,89	0,78	0,13	0,38	0,13	0,47	0,38	0,36	0,58
	FC_{AASHTO}	5,54	0,77	0,18	0,41	0,18	0,47	0,42	0,47	0,60
Diferencia normalizada			0,01	-0,04	-0,03	-0,05	0,01	-0,03	-0,11	-0,02

Las diferencias normalizadas presentan una variación baja, siendo en la mayoría de los casos más conservador el factor de daño de la AASHTO. Los valores normalizados se grafican en sentido de avance.

Gráfica 10 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 3S3



Gráfica 11 Valores normalizados en sentido norte sur del vehículo tipo 3S3



La correspondencia en el sentido de avance se mantiene de manera constante entre las dos aproximaciones de cálculo del factor de daño

4.5 REDUCCIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL PAVIMENTO

Para determinar el daño producido de los vehículos sobre una estructura de pavimento, se estima la vida útil del pavimento. Teniendo en cuenta que el daño depende de la carga y el área de contacto, se realizó el análisis por eje, numero de llantas y configuraciones.

Para iniciar con este análisis se calcula el valor de deformación a tensión en la fibra inferior de la mezcla asfáltica ε_t . A continuación se relacionan los parámetros de cálculo, teniendo en cuenta valores promedio de mezcla asfáltica para Bogotá.

- Características mecánicas de la mezcla asfáltica

ε_6 = 150 x 10 $^{-6}$
b =-0,25

El cálculo de la deformación a tensión admisible se realizó por medio del procedimiento propuesto en el Manual de diseño de Pavimentos para Bogota D.C. del Instituto de desarrollo Urbano.

- Características mecánica subrasante

CBR = 6 % (condición estabilizada mejorada)
MR = 60 MPa

Coeficiente de reducción por heterogeneidad del suelo $K_S = {}^{1}/_{1,1}$

K_S= 0,91.

- Condiciones de tráfico y probabilidad de falla

Se considera un tráfico T3

T3
$N = 2 \times 10^6$ ejes
$P_f = 25\%$
$u = -0{,}67$

La probabilidad de falla está asociada directamente con tipo de tráfico.

Se calcula la desviación estándar, la cual está dada por la dispersión de los ensayos de fatiga y de los espesores en capas in situ.

$$\delta = \sqrt{\sigma_N{}^2 + \left(\frac{C^2}{b^2}\right)\sigma_H{}^2}$$

σ_N , desviación estándar de la ley de fatiga, 0,25

σ_H , desviación estándar de los espesores de capas, 1 cm (concreto asfáltico)

C , coeficiente que depende del material, 0,02 para valores de σ_H en cm.

b, pendiente de la ley de fatiga, -0,25

$$\delta = \sqrt{0{,}25^2 + \left(\frac{0{,}02^2}{-0{,}25^2}\right)1^2} = 0{,}36$$

Luego se calcula el coeficiente K_r que ajusta el esfuerzo admisible a la probabilidad de falla adoptada.

$$K_r = 10^{-ub\delta}$$

$$K_r = 10^{-(-0{,}67*-0{,}25*0{,}36)} = 0{,}87$$

Finalmente se determina el coeficiente de calibración entre las medidas de laboratorio y los resultados in situ

$K_C = 1{,}1$

- Condición de temperatura

El coeficiente que relaciona el comportamiento de mecánico de la mezcla asfáltica en función de la temperatura es K_t Para el caso de Bogota y teniendo que en cuenta que este coeficiente relaciona el valor del modulo a cualquier temperatura respecto a el valor del modulo a 15C, se considero que la variación es mínima teniendo en cuenta la temperatura de Bogota promedio es de 18 C y por lo tanto se asume que el valor Kt es 1

$$K_t = 1.$$

- Cálculos

Se calcula la deformación a tensión en la fibra inferior de la mezcla asfáltica ε_t.

Ecuación 7 Determinación de la deformación a tensión admisible

$$\varepsilon t_{adm} = \varepsilon_6 \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b K_S K_r K_t K_c$$

$$\varepsilon t_{adm} = 150*10^{-6}\left(\frac{2*10^6}{10^6}\right)^{-0{,}25} 0{,}91*0{,}87*1*1{,}1 = 110*10^{-6}$$

A partir de la deformación a tensión admisible se procede a determinar para cada carga reportada en la Tabla 14 la presión de inflado y el radio de contacto con base a la Tabla 4 y Tabla 5. Estos valores se observan de la Tabla 23 a la Tabla 25.

Tabla 31 Carga L_X con respecto al eje y al número de llantas (kN)

Vehículo tipo	Eje medido	Carga nominal	Estación, sentido							
			A		B		C		D	
			N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N
2	Simple direccional	29,43	31,49	29,43	29,43	37,08	33,26	30,61	29,43	37,96
	Simple dual	26,98	30,48	29,95	31,83	32,10	31,02	30,75	30,48	33,72
3	Simple direccional	29,43	35,32	33,84	32,96	36,20	33,84	35,61	32,08	37,96
	Tándem	26,98	30,75	30,48	28,60	29,14	29,14	29,95	29,41	32,64
2S2	Simple direccional	24,53	25,75	24,53	24,53	27,47	25,75	24,53	25,75	24,53
	Simple dual	24,53	31,39	28,94	24,53	27,71	25,75	26,98	29,43	24,53
	Tándem	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85	20,85
3S2	Simple direccional	24,53	26,73	32,37	26,73	26,73	26,24	26,73	26,24	27,96
	Tándem	26,36	27,16	26,36	27,68	26,36	26,36	27,95	26,36	27,16
	Tándem	26,36	29,53	26,36	28,74	28,47	27,68	27,95	26,36	27,16
3S3	Simple direccional	29,43	33,26	46,50	29,43	45,32	40,61	30,61	29,43	30,90
	Tándem	26,98	28,60	27,79	28,60	27,79	28,87	28,60	27,25	28,33
	Tridem	19,62	20,80	20,60	20,40	20,40	22,17	20,60	19,62	20,60

Tabla 32 Radio de carga a con respecto al eje y al número de llantas (m)

Vehículo tipo	Eje medido	Carga nominal	Estación, sentido							
			A		B		C		D	
			N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N
2	Simple direccional	0,125	0,128	0,125	0,125	0,132	0,129	0,127	0,125	0,133
	Simple dual	0,119	0,123	0,122	0,124	0,124	0,123	0,123	0,123	0,126
3	Simple direccional	0,125	0,131	0,130	0,129	0,132	0,130	0,131	0,128	0,133
	Tándem	0,119	0,123	0,123	0,121	0,121	0,121	0,122	0,122	0,125
2S2	Simple direccional	0,118	0,120	0,118	0,118	0,123	0,120	0,118	0,120	0,118
	Simple dual	0,115	0,124	0,121	0,115	0,120	0,117	0,119	0,122	0,115
	Tándem	0,109	0,109	0,109	0,109	0,109	0,109	0,109	0,109	0,109
3S2	Simple direccional	0,118	0,122	0,129	0,122	0,122	0,121	0,122	0,121	0,124
	Tándem	0,118	0,119	0,118	0,120	0,118	0,118	0,120	0,118	0,119
	Tándem	0,118	0,122	0,118	0,121	0,121	0,120	0,120	0,118	0,119
3S3	Simple direccional	0,125	0,129	0,137	0,125	0,137	0,134	0,127	0,125	0,127
	Tándem	0,119	0,121	0,120	0,121	0,120	0,121	0,121	0,119	0,121
	Tridem	0,106	0,109	0,108	0,108	0,108	0,111	0,108	0,106	0,108

Tabla 33 Presión de contacto P con respecto al eje y al número de llantas (MPa)

Vehículo tipo	Eje medido	Carga nominal	Estación, sentido							
			A		B		C		D	
			N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N
2	Simple direccional	0,596	0,615	0,596	0,596	0,674	0,632	0,606	0,596	0,684
	Simple dual	0,608	0,643	0,638	0,659	0,662	0,649	0,646	0,643	0,681
3	Simple direccional	0,596	0,654	0,638	0,629	0,664	0,638	0,658	0,620	0,684
	Tándem	0,608	0,646	0,643	0,623	0,629	0,629	0,638	0,632	0,668
2S2	Simple direccional	0,561	0,568	0,561	0,561	0,580	0,568	0,561	0,568	0,561
	Simple dual	0,586	0,654	0,627	0,586	0,615	0,597	0,608	0,632	0,586
	Tándem	0,562	0,562	0,562	0,562	0,562	0,562	0,562	0,562	0,562
3S2	Simple direccional	0,561	0,575	0,623	0,575	0,575	0,571	0,575	0,571	0,584
	Tándem	0,602	0,609	0,602	0,614	0,602	0,602	0,617	0,602	0,609
	Tándem	0,602	0,633	0,602	0,625	0,622	0,614	0,617	0,602	0,609
3S3	Simple direccional	0,596	0,632	0,785	0,596	0,771	0,716	0,606	0,596	0,609
	Tándem	0,608	0,623	0,615	0,623	0,615	0,626	0,623	0,610	0,621
	Tridem	0,557	0,562	0,561	0,560	0,560	0,570	0,561	0,557	0,561

Se realizó un análisis asumiendo que las cargas de los vehículos están en las condiciones de sobrecarga expuestas. Con el radio de carga y la presión de contacto se realizan las corridas en el software de esfuerzos y deformaciones, obteniendo la deformación a tensión para cada carga.

Tabla 34 Deformación a tensión de las cargas evaluadas (Los valores están expresados en $1X10^{-6}$)

Vehículo tipo	Eje medido	ε_t nominal	Estación, sentido							
			A		B		C		D	
			N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N
2	Simple direccional	113	118	113	113	134	123	116	113	136
	Simple dual	130	143	141	149	150	145	144	123	157
3	Simple direccional	113	129	124	122	131	124	129	120	136
	Tándem	130	144	143	135	138	138	141	138	152
2S2	Simple direccional	100	103	100	100	108	103	100	103	100
	Simple dual	121	147	137	121	132	126	130	139	121
	Tándem	108	108	108	108	108	108	108	108	108
3S2	Simple direccional	100	106	120	106	106	105	106	105	109
	Tándem	128	130	128	132	128	128	133	128	130
	Tándem	128	139	128	136	135	132	133	128	130
3S3	Simple direccional	113	123	160	113	157	144	116	113	117
	Tándem	130	135	133	135	133	137	135	131	135
	Tridem	104	108	108	107	107	113	108	104	103

Con estos valores de deformación a tensión y teniendo en cuenta el porcentaje de representatividad de cada eje para cada tipo de vehículo en cada estación de pesaje (Tabla 12), se calcula la deformación total ε_t con la sumatoria del producto

de la deformación a tensión y la representatividad de cada eje por estación. Los resultados de la deformación a tensión para cada estación se observan en la Tabla 35.

Ecuación 8 deformación a tensión por estación

$$\varepsilon_{t\ estación} = \sum [\varepsilon_{t\ ij} * \%\ incidencia_{i,j}]$$

Tabla 35 Valores de ε_t por estación

Estación	ε_t Cargas Excedidas
A	16,6E-6
B	18,2E-6
C	15,3E-6
D	17,0E-6

Asumiendo que la deformación a tensión admisible es la deformación acumulada para el tráfico de diseño sin sobrecargas, se determina el porcentaje de reducción de la vida útil por estación.

Tabla 36 Porcentaje de reducción por Estación

Estación	**% reducción**
A	15%
B	17%
C	14%
D	15%

Es importante anotar que el valor reportado de reducción de vida útil está condicionado a los siguientes supuestos:

- No se tiene una medición continua en el tiempo para evaluar condiciones de temperatura en función a la rigidez del material
- Los cálculos de la deformación a tensión en la capa asfáltica se obtiene por medio de un software que considera un sistema multicapa y el macizo semi infinito son un medio elástico lineal, homogéneo, isótropo y continúo.
- Se asume que la deformación a tensión admisible es para un tráfico que no presente excedencia de carga.

Por estas razones y teniendo en cuenta las condiciones locales y que el comportamiento de la estructura de pavimento no se debe mirar capa a capa sino como una estructura que interactúa en diferentes entornos geológicos,

geotécnicos y ambientales, se hace necesario instrumentar las estructuras de pavimento en su cuerpo y en su entorno para medir la respuesta frente a las cargas impuestas, así mismo medir simultáneamente estas cargas para obtener la función de evaluación de daño en función de la tipología del vehículo asociado a las condiciones ambientales.

5. CONCLUSIONES

El estudio fue desarrollado para determinar los efectos de la carga real que circula en el corredor principal de la ciudad de Bogotá, la Avenida Boyacá, corredor en el donde se concentra el mayor movimiento de las cargas que entran y salen de la ciudad de Bogotá.

Se determinó el peso real para cada configuración de vehículo registrando el peso total del vehículo así como los pesos para cada uno de los ejes que componen los vehículos analizados. En total se realizaron 3.193 mediciones de pesaje en la Avenida Boyacá para los vehículos tipo 2, 3, 2S2, 3S2 y 3S3, el 53% de estas mediciones fueron tomadas en dirección norte a sur. Los vehículos tipo 4, 2S1, 2S3 y 3S1 que no se tuvieron en cuenta debido a que la muestra no era representativa para efectuar los análisis.

Con base en las mediciones de pesaje de obtuvieron los espectros de carga para los vehículos tipo 2, 3, 2S2, 3S2 y 3S3 en cada una de las cuatro estaciones en ambos sentidos para un total de ocho puntos de control en la ciudad. En total se registraron 104 espectros de carga que corresponde a cada tipo de eje para cada vehículo pesado en los puntos de control mencionados.

Con los datos reportados en las estaciones de pesaje se calculó de Coeficiente de Agresividad por medio de la metodología de *Conception et Dimensionnement des structures de Chaussées",* (1994), estos coeficientes son menores a los coeficientes nominales de cada vehículo, y estos coeficientes aumentan de manera significativa por las sobrecargas que se presenten.

Se determinaron los factores de equivalencia AASHTO de carga para los 5 tipos de vehículos pesados más representativos que circulan en los ocho puntos de control. Estos valores son menores a los factores de equivalencia nominales para cada vehículos, igualmente son menores a los reportados en algunos estudios del Instituto Nacional de Vías, debido a que la capacidad de las vías y el nivel de tráfico son diferentes.

Las dos metodologías de aproximación para determinar el factor de daño son compatibles en su concepción, por lo tanto se pueden hacer correlaciones en términos normalizados, teniendo en cuenta que las diferencias que se puedan presentar están directamente relacionadas con la excedencia de carga.

Se observó una clara dependencia de los resultados en función de la direccionalidad en el corredor de la avenida Boyacá. Este es un parámetro que se debe tener en cuenta para el diseño de pavimentos y para determinar los coeficientes de daño.

En el desarrollo del Contrato Interadministrativo No. 020 de 2008 entre el Instituto de Desarrollo Urbano y la Universidad Nacional de Colombia se asumió que el comportamiento del tránsito seguía una distribución normal ya que no se conocían bases de datos a nivel de Bogotá que definieran ese comportamiento, con base a análisis estadísticos posteriores se determinó que el tránsito sigue una distribución Log normal, concepto que puede dar explicación a la variabilidad de los resultados pero que en principio es un inicio a la evaluación de los espectros de carga y de coeficientes de daño que eran desconocidos en la ciudad.

Con base en las propiedades mecánicas de los materiales asumidas y teniendo en cuenta las condiciones de carga y distribución de la misma en la estructura de pavimento (área de contacto y numero de llantas) se determinó la vida remanente de la estructura de pavimento para cada carga ponderada excedida en cada estación de pesaje. La reducción de vida útil es hasta del 46% asumiendo los vehículos están en las condiciones de sobrecarga registrados en el estudio.

Se evidencia que el alto daño impuesto por los ejes simples de cualquier tipología es mucho mayor que en un eje tamden o un eje tridem, debido al número de llantas en las cuales se esta disipando el esfuerzo.

Teniendo en cuenta que el incremento en las cargas de los vehículos acelera el proceso de daños en las vías, es importante tener un control adecuado que permita monitorear las cargas en los pavimentos con fin de optimizar los recursos destinados a las actividades de gestión vial y reducir los porcentajes de exceso de carga que se presentan actualmente.

6. RECOMENDACIONES

Es importante continuar el estudio y completar la información obtenida para otros corredores y tipologías de vehículos que no fueron considerados en este estudio (buses Transmilenio, alimentadores, transporte público).

Como estrategia de mantenimiento y control, se debe generar un sistema de control de pesaje interno en la ciudad, para reducir los porcentajes de exceso de carga que se presentan actualmente y que afectan de manera directa en la conservación de la infraestructura vial de la ciudad y en el aprovechamiento del recurso económico dispuesto para tal fin.

Instrumentar las estructuras de pavimento de nuevos proyectos en la ciudad y medir simultáneamente las cargas impuestas en la misma con el objeto de encontrar el modelo de evaluación de factores de daño en la ciudad de Bogotá acorde a las condiciones geológicas y geotécnicas las cuales varían en la misma ciudad.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures, 1993

Garnica, A. P. Espectros de carga y daño para diseño de pavimentos, México, 2009

Haider, S and Harichandran R. Relating Axle Load Spectra to Truck Gross Vehicle Weights and Volumes Journal of Transportation. Engineering . 133, 696. 2007

Huang, Yang H. Pavement analysis and design.2ed, Pearson Education, Inc, 2004

Instituto de Desarrollo Urbano, Dirección Técnica Estratégica. Espectros de Carga, 2010

Instituto de Desarrollo Urbano. Reglamento Técnico para la Ejecución de Obras en el Sector Vial de Bogotá, D.C. 2002

Laboratoire Centrale de Ponts et Chaussées. Conception et dimensionnement des structures des chaussées – Guide Technique, Francia, 1994.

Miner, M. A. Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, 12, A159-A164. 1945

Ministerio de Obras Públicas y Universidad del Cauca, República de Colombia. Depav – Esfuerzos y deformaciones en Pavimentos, Subrutina del programa INPACO, 1993.

Ministerio de Transporte, República de Colombia. Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. 2008.

Ministerio de Transporte, República de Colombia. Resolución 4100 de 2004. Resolución 1782 de 2009.

Timm, D.H., Peters, K.D. and R.E. Turochy, “Effects of Axle Load Spectra Shifts on Highway Infrastructure Damage and Cost,” Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, Paris, France, 2008. Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, Paris, France, 2008

Transportation Research Board. Case Study for New Jersey State Impact of Buses on Highway Infrastructure. 1841 Paper No. 03-4223.1999.

Transportation Research Board. Regulation of Weights, Lengths, and Widths of Commercial Motor Vehicles Special Report 267. 2002

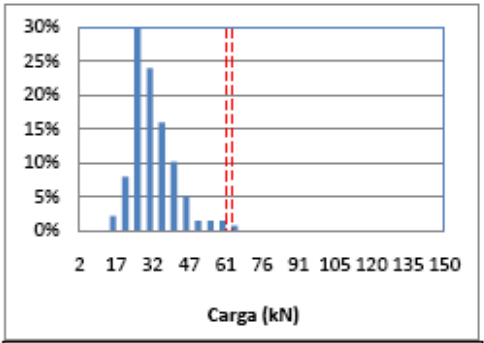
Yoder, E.J., Witczak, M.W. Principles of pavement design. 2ed, John Wiley & Sons, Inc, 1975

ANEXOS

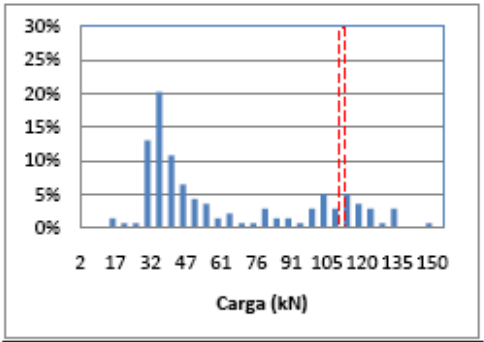
Anexo 1 Espectros de carga

PESO MÁXIMO PERMITIDO POR EJE (kN)					
EJE SIMPLE DIRECCIONAL	58,86	EJE SIMPLE	107,91	-	-

EJE SIMPLE DIRECCIONAL



EJE SIMPLE



INTERVALO DE PESAJE (kN)	14,7 - 68,7
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	26,98
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	41
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	138
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	3
% EXCESO DE CARGA	2%

INTERVALO DE PESAJE (kN)	14,7 - 152,1
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	36,8
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	28
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	138
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	26
% EXCESO DE CARGA	19%

ESPECTRO DE CARGA
AVENIDA BOYACA CON CALLE 170
SENTIDO NORTE SUR

ESPECTROS DE CARGA

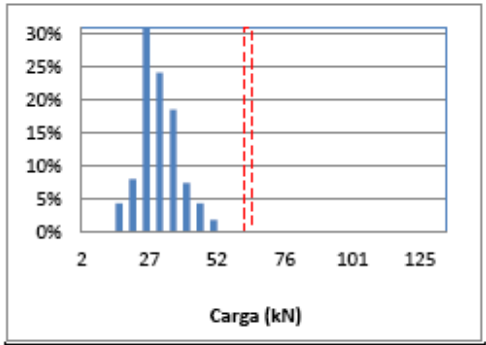
CAMION TIPO 2

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

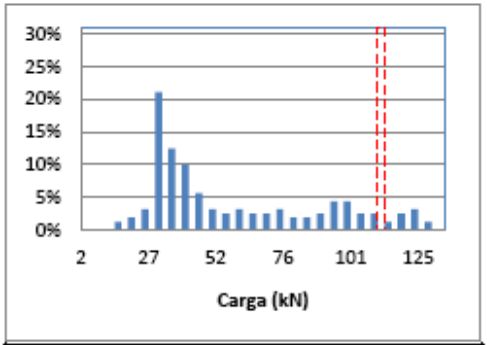
TRABAJO FINAL DE MAESTRIA

PESO MÁXIMO PERMITIDO POR EJE (kN)					
EJE SIMPLE DIRECCIONAL	58,86	EJE SIMPLE	107,91	-	-

EJE SIMPLE DIRECCIONAL



EJE SIMPLE



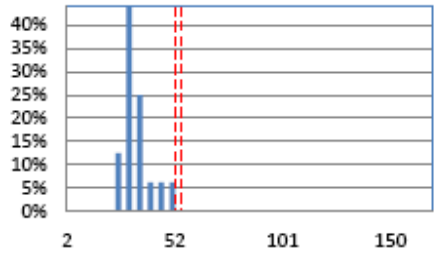
INTERVALO DE PESAJE (kN)	14,7 - 54
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	27,0
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	50
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	161
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	0
% EXCESO DE CARGA	0%

INTERVALO DE PESAJE (kN)	14,7 - 31,9
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	31,8825
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	34
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	161
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	17
% EXCESO DE CARGA	11%

ESPECTRO DE CARGA AVENIDA BOYACA CON CALLE 170 SENTIDO SUR NORTE	ESPECTROS DE CARGA CAMION TIPO 2	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA TRABAJO FINAL DE MAESTRIA

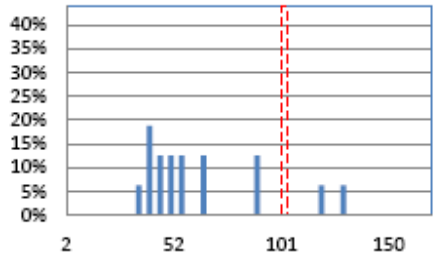
PESO MÁXIMO PERMITIDO POR EJE (kN)					
EJE SIMPLE DIRECCIONAL	49,05	EJE SIMPLE	98,10	EJE TANDEM	166,77

EJE SIMPLE DIRECCIONAL



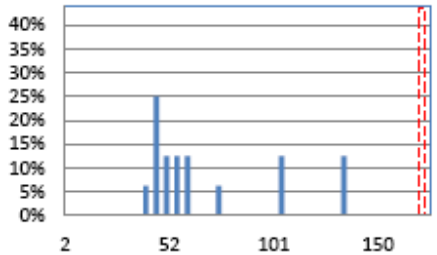
INTERVALO DE PESAJE (kN)	24,5 - 54,0
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	31,8825
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	7
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	16
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	1
% EXCESO DE CARGA	6%

EJE SIMPLE



INTERVALO DE PESAJE (kN)	34,3 - 132,4
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	41,6925
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	3
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	16
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	2
% EXCESO DE CARGA	13%

EJE TANDEM

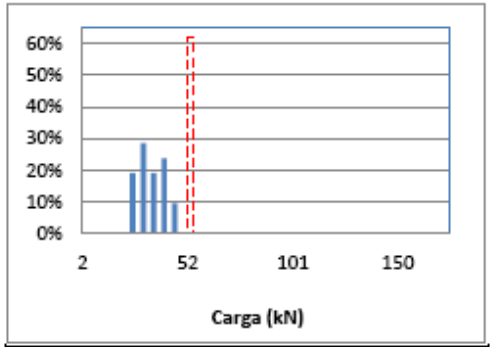


INTERVALO DE PESAJE (kN)	441,5 - 137,3
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	4,75
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	4
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	16
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	0
% EXCESO DE CARGA	0%

ESPECTRO DE CARGA AVENIDA BOYACA CON CALLE 170 SENTIDO NORTE SUR	ESPECTROS DE CARGA CAMION TIPO 2S2	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA TRABAJO FINAL DE MAESTRIA

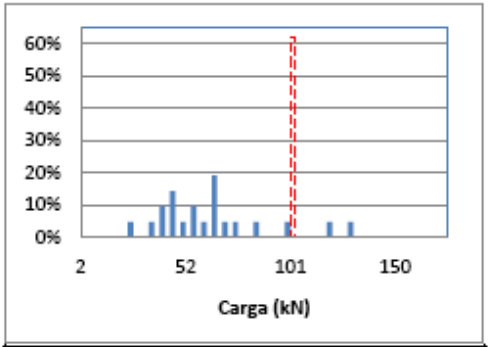
PESO MÁXIMO PERMITIDO POR EJE (kN)					
EJE SIMPLE DIRECCIONAL	49,05	EJE SIMPLE	98,10	EJE TANDEM	166,77

EJE SIMPLE DIRECCIONAL



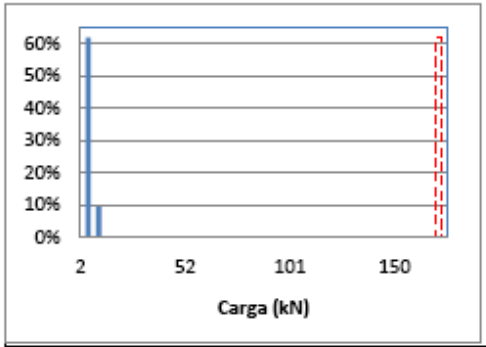
INTERVALO DE PESAJE (kN)	24,5 - 31,9
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	31,9
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	6
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	21
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	0
% EXCESO DE CARGA	0%

EJE SIMPLE



INTERVALO DE PESAJE (kN)	24,5 - 132,4
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	66,2
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	4
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	21
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	3
% EXCESO DE CARGA	14%

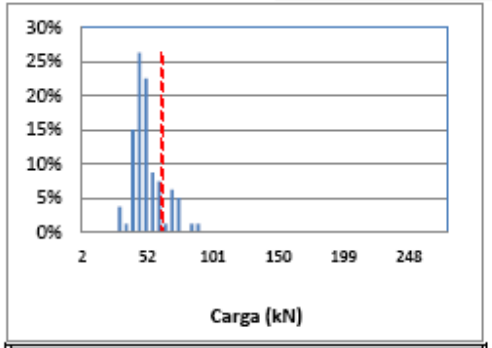
EJE TANDEM

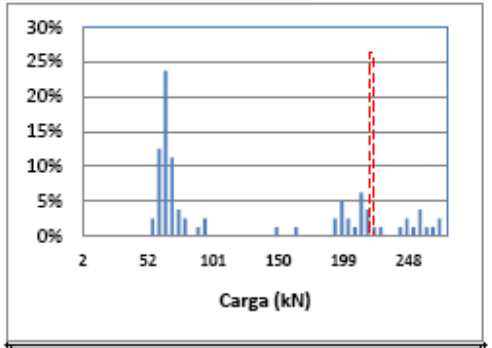


INTERVALO DE PESAJE (kN)	34,3 - 46,6
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	46,5975
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	4
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	21
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	0
% EXCESO DE CARGA	0%

ESPECTRO DE CARGA AVENIDA BOYACA CON CALLE 170 SENTIDO SUR NORTE	ESPECTROS DE CARGA CAMION TIPO 2S2	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA TRABAJO FINAL DE MAESTRIA

PESO MÁXIMO PERMITIDO POR EJE (kN)					
EJE SIMPLE DIRECCIONAL	58,86	EJE TANDEM	215,82	-	-





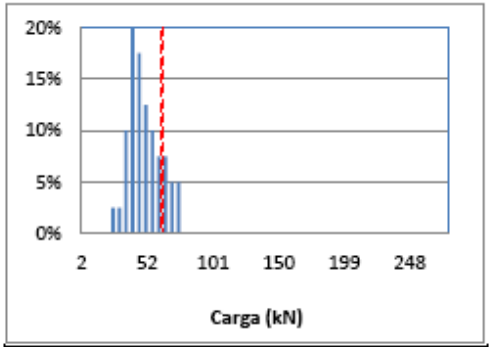
INTERVALO DE PESAJE (kN)	29,4 - 93,2
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	46,5975
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	21
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	80
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	18
% EXCESO DE CARGA	23%

INTERVALO DE PESAJE (kN)	54 - 66,2
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	66,2175
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	19
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	80
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	16
% EXCESO DE CARGA	20%

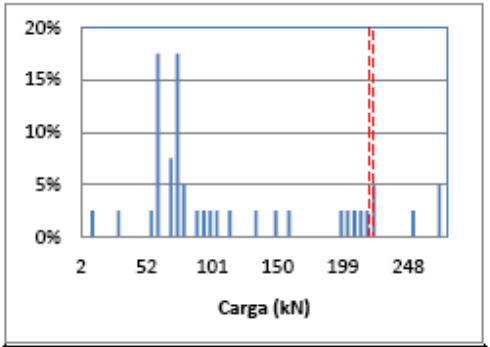
ESPECTRO DE CARGA AVENIDA BOYACA CON CALLE 170 SENTIDO NORTE SUR	ESPECTROS DE CARGA CAMION TIPO 3	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA TRABAJO FINAL DE MAESTRIA

PESO MÁXIMO PERMITIDO POR EJE (kN)					
EJE SIMPLE DIRECCIONAL	58,86	EJE TANDEM	215,82	-	-

EJE SIMPLE DIRECCIONAL



EJE TANDEM



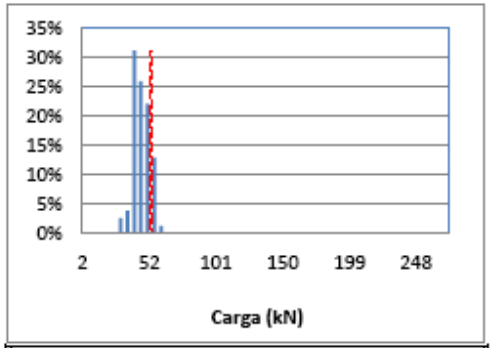
INTERVALO DE PESAJE (kN)	24,5 - 78,5
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	41,7
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	8
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	40
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	10
% EXCESO DE CARGA	25%

INTERVALO DE PESAJE (kN)	9,8 - 274,7
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	63,8 - 76,0
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	68,67
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	40
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	6
% EXCESO DE CARGA	15%

ESPECTRO DE CARGA AVENIDA BOYACA CON CALLE 170 SENTIDO SUR NORTE	ESPECTROS DE CARGA CAMION TIPO 3	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA TRABAJO FINAL DE MAESTRIA

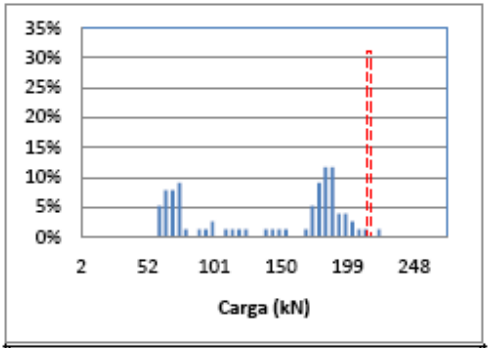
PESO MÁXIMO PERMITIDO POR EJE (kN)					
EJE SIMPLE DIRECCIONAL	49,05	EJE TANDEM	210,92	EJE TANDEM	210,92

EJE SIMPLE DIRECCIONAL



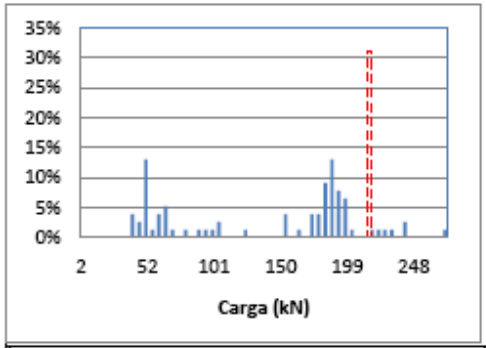
INTERVALO DE PESAJE (kN)	29,43 - 63,77
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	41,69
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	24,00
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	77
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	28
% EXCESO DE CARGA	36%

EJE TANDEM



INTERVALO DE PESAJE (kN)	58,86 - 225,63
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	183,94 - 188,84
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	9
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	77
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	2
% EXCESO DE CARGA	3%

EJE TANDEM

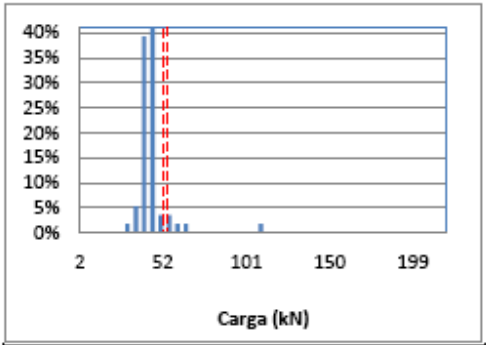


INTERVALO DE PESAJE (kN)	39,24 - 274,68
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	51,50 - 188,84
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	10
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	77
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	7
% EXCESO DE CARGA	9%

ESPECTRO DE CARGA AVENIDA BOYACA CON CALLE 170 SENTIDO NORTE SUR	ESPECTROS DE CARGA CAMION TIPO 3S2	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA TRABAJO FINAL DE MAESTRIA

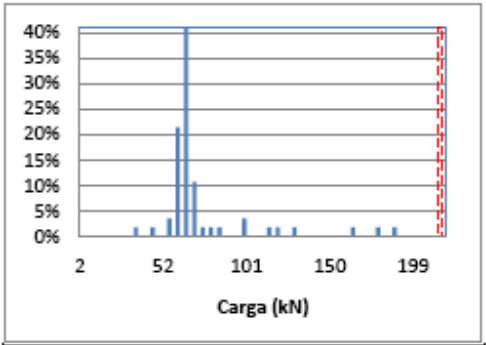
PESO MÁXIMO PERMITIDO POR EJE (kN)					
EJE SIMPLE DIRECCIONAL	49,05	EJE TANDEM	210,92	EJE TANDEM	210,92

EJE SIMPLE DIRECCIONAL



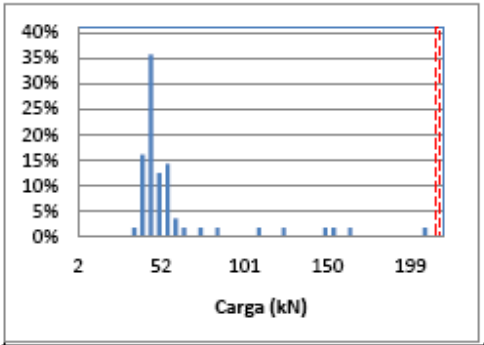
INTERVALO DE PESAJE (kN)	29,4 - 112,8
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	46,6
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	23
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	56
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	7
% EXCESO DE CARGA	13%

EJE TANDEM



INTERVALO DE PESAJE (kN)	34,3 - 191,3
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	66,2
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	23
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	56
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	0
% EXCESO DE CARGA	0%

EJE TANDEM



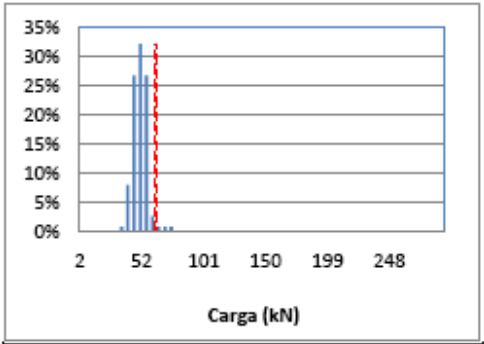
INTERVALO DE PESAJE (kN)	34,3 - 210,9
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	46,6
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	20
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	56
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	0
% EXCESO DE CARGA	0%

ESPECTRO DE CARGA AVENIDA BOYACA CON CALLE 170 SENTIDO SUR NORTE	ESPECTROS DE CARGA CAMION TIPO 3S2	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA TRABAJO FINAL DE MAESTRIA

X

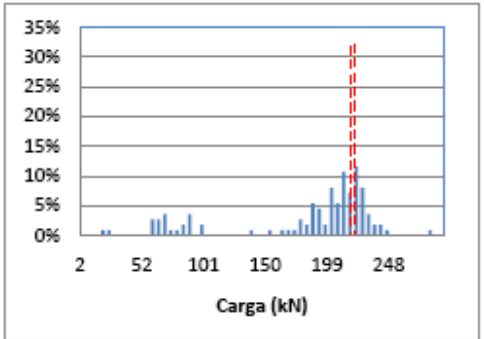
PESO MÁXIMO PERMITIDO POR EJE (kN)					
EJE SIMPLE DIRECCIONAL	58,86	EJE TANDEM	215,82	EJE TRIDEM	235,44

EJE SIMPLE DIRECCIONAL



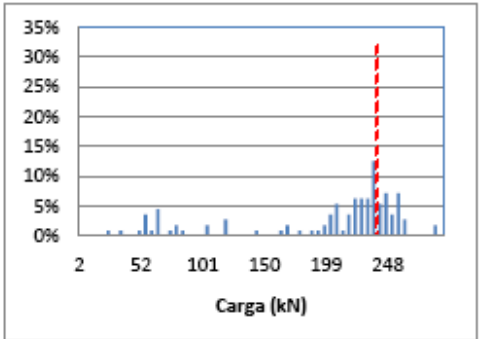
INTERVALO DE PESAJE (kN)	34,34 - 78,48
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	51,5
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	36
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	112
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	6
% EXCESO DE CARGA	5%

EJE TANDEM



INTERVALO DE PESAJE (kN)	19,62 - 284,49
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	223,2
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	13
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	112
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	40
% EXCESO DE CARGA	36%

EJE TRIDEM

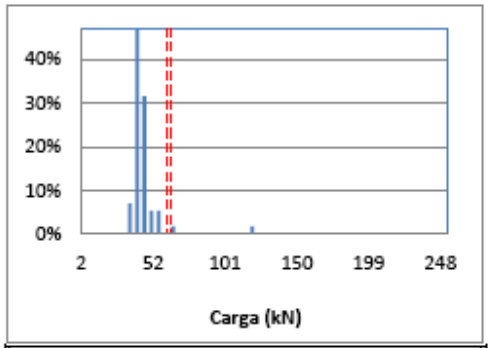


INTERVALO DE PESAJE (kN)	24,53 - 289,4
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	237,9
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	14
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	112
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	45
% EXCESO DE CARGA	40%

ESPECTRO DE CARGA AVENIDA BOYACA CON CALLE 170 SENTIDO NORTE SUR	ESPECTROS DE CARGA CAMION TIPO 3S3	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA TRABAJO FINAL DE MAESTRIA

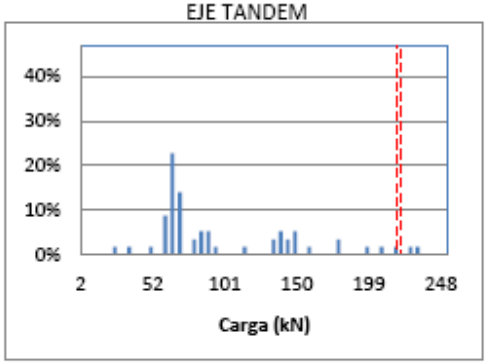
PESO MÁXIMO PERMITIDO POR EJE (kN)					
EJE SIMPLE DIRECCIONAL	58,86	EJE TANDEM	215,82	EJE TRIDEM	235,44

EJE SIMPLE DIRECCIONAL



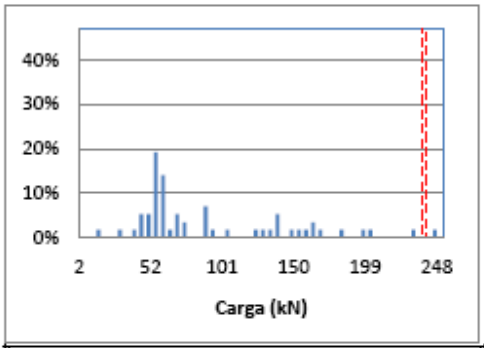
INTERVALO DE PESAJE (kN)	34,4 - 122,6
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	41,7
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	27
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	57
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	2
% EXCESO DE CARGA	4%

EJE TANDEM



INTERVALO DE PESAJE (kN)	24,5 - 235,4
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	66,2
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	13
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	57
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	3
% EXCESO DE CARGA	5%

EJE TRIDEM



INTERVALO DE PESAJE (kN)	14,7 - 250,2
MARCA MÁS FRECUENTE (kN)	56,4
FRECUENCIA DE LA MARCA MÁS FRECUENTE	11
TAMAÑO DE LA MUESTRA (Camiones)	57
PESAJES SUPERIORES AL PERMITIDO	1
% EXCESO DE CARGA	2%

ESPECTRO DE CARGA AVENIDA BOYACA CON CALLE 170 SENTIDO SUR NORTE	ESPECTROS DE CARGA CAMION TIPO 3S3	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA TRABAJO FINAL DE MAESTRIA