

EVALUACIÓN DE TARIFAS DE PEAJE POR FACTOR DAÑO AL PAVIMENTO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL

Presentado por:

KELLY SUSANA GARCÍA SOTO

Asesor:

ING. SILVIA CARO SPINEL



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
NOVIEMBRE DE 2013

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por guiar cada paso que doy y porque siempre me muestra el camino a seguir.

Igualmente a mi esposo, Jorge Luis Almanza Lyons, que con su amor y paciencia me ayudó para que este sueño fuera realidad. De la misma manera agradezco a mi mamá Zulma Inés Soto Alarcón y a mi hermanito Kevin José Causil Soto por sus oraciones y por su confianza.

A todos aquellos familiares y amigos que con su cariño siempre esperan lo mejor de mí.

A la empresa Servinc Ltda por permitirme cursar la maestría.

A la Ingeniera Silvia Caro Spinel por su constante paciencia, cariño, comprensión y asesoría en este proyecto, de la misma manera por enseñarme a querer más los pavimentos y disfrutar la maestría.

A los docentes de la Universidad de Los Andes: Bernardo Caicedo, David González, Alejandro Arboleda y Nicolás Estrada por compartir su conocimiento con nosotros.

A mis compañeros de estudio Paula García, Rodolfo Olivo, Katherine Hernández, Juan Pablo Vargas, Daniel De La Pared, Luis Hernán Goenaga y los que faltan ya que sin ellos no hubiese disfrutado este sueño.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVOS.....	7
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
3. ANTECEDENTES.....	8
4. COMPARACIÓN RESOLUCIÓN 4100 DE 2004 CON REGLAMENTACIÓN DE ALGUNOS PAÍSES SURAMERICANOS.....	9
5. ANÁLISIS FACTOR DAÑO.....	12
5.1 FACTOR DE CONVERSIÓN DE CARGA.....	12
5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS EMPLEADOS PARA EL ANÁLISIS DEL FACTOR DAÑO 13	
5.3 CÁLCULO DEL FACTOR DE DAÑO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	14
5.4 ANÁLISIS MECÁNICO DEL IMPACTO DEL PESO VEHÍCULAR EN LA VIDA A FATIGA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO	19
6. MODELO TARIFARIO ACTUAL EN COLOMBIA.....	23
7. EVALUACIÓN TARIFAS DE PEAJE SEGÚN FACTOR DAÑO – EALF - GENERADO.....	26
7.1 MODELO 1 - CONDICIÓN TARIFARIA ACTUAL.....	26
7.2 MODELO 2 - CONDICIÓN TARIFARIA POR NÚMERO DE EJES Y EALF	27
7.3 MODELO 3 – TARIFAS VARIABLES	29
7.3.1 Modelo 3.1	29
7.3.2 Modelo 3.2	31
7.3.3 Modelo 3.3	33
7.4 MODELO 4 – TARIFAS VARIABLES A PARTIR DE UNA TARIFA BASE	35
7.4.1 Modelo 4.1	35
7.4.2 Modelo 4.2	37
7.5 VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS MODELOS.....	39
7.6 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS.....	41
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	42
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
ANEXO 1.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Camiones pesados Vs. Camiones con sobrepeso.....	14
Figura 2 COV de EALF según categorías de vehículos.....	16
Figura 3 Cálculo EALF para las diferentes categorías vehiculares.	18
Figura 4 Estructura del Pavimento – Análisis mecánico.....	19
Figura 5 Distribución de eje tándem – Kenlayer	20
Figura 6– Regresión Modelo 1	27
Figura 7 – Regresión Modelo 2	29
Figura 8 – Regresión Modelo 3.1	31
Figura 9 – Regresión Modelo 3.2	33
Figura 10 – Regresión Modelo 3.3	35
Figura 11 - Regresión Modelo 4.1	37
Figura 12 - Regresión Modelo 4.2	39
Figura 13 – Valoración económica de los modelos	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 Comparación máximos PBV.....	9
Tabla 4.2 Comparación pesos máximos por eje	10
Tabla 5.1 Cargas de referencia para conversión a ejes de 8.2 ton	12
Tabla 5.2 Cálculo EALF para diferentes tipos de ejes (para conversión a ejes estándar de 8.2 ton).....	12
Tabla 5.3 No. de Vehículos pesados.....	13
Tabla 5.4 Cálculo EALF en ejes de 8.2 ton para diferentes categorías de vehículos	14
Tabla 5.5 Cálculo EALF máximo expresado en ejes de 8.2 ton.....	16
Tabla 5.6 Propiedades de los materiales	19
Tabla 5.7 Parámetros carga máxima.....	20
Tabla 5.8 Parámetros carga máxima excedida	20
Tabla 5.9 Cargas máximas permitidas y excedidas	21
Tabla 5.10 Resultados de e_t y N_f	21
Tabla 6.1 Tarifas de peaje Categorías III - VII.....	24
Tabla 7.2 Parámetros ecuación 3	27
Tabla 7.3 – Tarifas Modelo 2	28
Tabla 7.4 Parámetros ecuación 5	29
Tabla 7.5– Tarifas Modelo 3.1	30
Tabla 7.6 Parámetros ecuación 7	31
Tabla 7.7– Tarifas Modelo 3.2	32
Tabla 7.8 Parámetros ecuación 9.....	33
Tabla 7.9 – Tarifas Modelo 3.3	34
Tabla 7.10 Parámetros ecuación 10	35
Tabla 7.11 – Tarifas Modelo 4.1	36
Tabla 7.12 Parámetros ecuación 12	37
Tabla 7.13 – Tarifas Modelo 4.2	38
Tabla 7.14 Parámetros ecuación 14	39
Tabla 7.15 – Valoración económica para los usuarios (gastos por concepto de peaje de acuerdo al modelo tarifario)	40
Tabla 7.16 – Afectación económica por categoría para el camionero	40

1. INTRODUCCIÓN

Según Sánchez (2009) el factor de equivalencia de carga por eje (EALF) es el factor numérico que relaciona el número de aplicaciones de las cargas por eje de referencia que produce en el pavimento un determinado deterioro y el número requerido de aplicaciones de otra carga por eje para producir el mismo deterioro. Sobre el EALF existen varios estudios como por ejemplo el realizado por Troncoso (2011) sobre la Evaluación del espectro de carga y coeficientes de daño en el corredor de la Avenida Boyacá en la ciudad de Bogotá D.C. de la Universidad Nacional de Colombia. En este contexto, el presente documento muestra un análisis sobre la relación que existe entre las tarifas actuales de peaje por tipo de camión en Colombia y los daños asociados con el paso de dichos vehículos, así como posibles nuevos modelos tarifarios que podrían incluir de forma más directa dicha relación (i.e., pagos tarifarios en función del daño que realizan los vehículos) . El análisis se basa en los cálculos de los factores daño (EALF) y la base para el análisis consistió en la información de 4076 camiones que fueron pesados el día 31 de julio de 2013 en las dos (2) estaciones de pesaje de una Concesión vial del país. Para esto, además de realizar un análisis técnico de los modelos propuestos, se realizó también una valoración económica con el fin de analizar el impacto que dichos modelos ocasionan al administrador de la vía (i.e., Concesión o Estado) y los usuarios, quienes en el presente estudio corresponden a los dueños de los camiones.

Adicionalmente, la información obtenida sobre las cargas en las concesiones se empleó para realizar un análisis de la reducción del número de ciclos a la falla (N_f) de una estructura determinada de pavimento ocasionadas por las excedencias de las máximas cargas permitidas por tipo de vehículo, de acuerdo con la Resolución 4100 de 2004 modificada por la 1782 de 2009. De la misma manera, dichas cargas son comparadas con lo reglamentado en algunos países suramericanos y, por último, se presentan las conclusiones del presente proyecto de grado y algunas recomendaciones para futuros estudios y para las Concesiones viales del país.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un análisis de sistemas tarifarios de peajes que tengan en cuenta el factor daño producido por los diferentes tipos de vehículos al pavimento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los factores daño por cada categoría de vehículo.
- Establecer la reducción del número de ciclos a la falla (N_f) por los camiones con mayores excedencias a lo reglamentado en la Resolución 4100 de 2004, modificada por la 1782 de 2009.
- Desarrollar varios modelos que capturen el factor daño ocasionado por los vehículos versus la tarifa a cancelar por el usuario.
- Realizar una evaluación económica con el fin de evaluar los impactos de los modelos propuestos.

3. ANTECEDENTES

El tráfico es uno de los principales parámetros a tener en cuenta para el diseño de pavimentos, el cual tradicionalmente se convierte a un número de ejes equivalentes a través de los factores de equivalencia de carga (EALF). Mediante este procedimiento se pretende relacionar el daño que sufre un pavimento expresado, según Sánchez (2009), en el número requerido de aplicaciones de otra carga por eje para producir el mismo deterioro, el cual depende de la carga transportada y el tipo de eje (simple, simple dual, tándem y tridem). Aunque existen diversas teorías sobre la validez o pertinencia de las metodologías para realizar conversión entre ejes, en este trabajo se empleará la conversión más comúnmente empleada en la Ingeniería de Pavimentos y recomendada en el país por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

En cuanto a la carga transportada por los vehículos en el país, existe la reglamentación de los máximos pesos brutos vehiculares (PBV) y pesos por ejes, contenidos en la Resolución 4100 de diciembre 28 de 2004, modificada por la 1782 de 2009, expedidas por el Ministerio de Transporte de Colombia. Estos valores deben controlarse estrictamente ya que su sobrepeso produce daños en los pavimentos que afectan negativamente su vida útil, generando mayores niveles de intervención en cuanto al mantenimiento periódico, mantenimiento rutinario y rehabilitación parcial o total de las estructuras de pavimento.

Ahora bien, los gastos que se generan por la operación y mantenimiento de la estructura de pavimento en vías nacionales se cubren con la tarifa de peaje que cancela cada vehículo al transitar por el trayecto vial. Vale aclarar que el sistema tarifario actual del país consiste en la asignación de una tarifa que depende del número de ejes del vehículo, lo cual se encuentra regulado en los contratos de Concesión, que lo administra bien sea el Estado o en su mayoría un ente privado como son las Concesionarias, partiendo del supuesto de que entre más grande sea un camión (i.e., mayor número de ejes) mayor es el daño que se produce el pavimento. No obstante, la teoría de mecánica de pavimentos demuestra que esta afirmación no es necesariamente verdadera, situación que motiva el presente estudio, el cual presenta una evaluación de las tarifas a partir del factor daño producido por 4076 vehículos que fueron pesados el 31 de julio de 2013 en una Concesión vial del país.

4. COMPARACIÓN RESOLUCIÓN 4100 DE 2004 CON REGLAMENTACIÓN DE ALGUNOS PAÍSES SURAMERICANOS

Este capítulo presenta el contexto nacional en cuanto a la normativa que rige el transporte de carga en el país. Esta información es fundamental para entender las exigencias máximas permitidas en las vías nacionales y para contar con información de base que será empleada en la construcción de los modelos tarifarios propuestos en los siguientes capítulos.

La Resolución 4100 de diciembre 28 de 2004, expedida por el Ministerio de Transporte de Colombia y modificada por la Resolución 1782 de 2009, contempla los límites de dimensiones y pesos de los vehículos de transporte de carga por carretera, los cuales se encuentran reglamentados teniendo en cuenta los máximos pesos brutos vehiculares (PBV) y la configuración que se detalla en la Tabla No. 4.1

Ahora bien, si se compara la regulación Colombiana con algunos países suramericanos se tiene que el máximo PBV supera, en general, a países como Argentina, Perú y Ecuador en un 54%, 24% y 17%, respectivamente. Es importante mencionar que los vehículos con la designación: 4 (2) y 3S3 superan su máximo peso en cuatro (4) toneladas a lo decretado en los países evaluados, tal como lo refleja la Tabla No. 4.1.

Tabla 4.1 Comparación máximos PBV

Vehículos	Designación	Descripción	Colombia	Argentina	Ecuador	Perú
			Máximo PBV (Ton)	Máximo PBV (Ton)	Máximo PBV (Ton)	Máximo PBV (Ton)
Camiones	2	Camión de 2 ejes - Camión sencillo	17,00	16,50	18,00	18,00
	3	Camión de 3 ejes - Dobletroque	28,00	24,00	27,00	25,00
	4 (1)	Camión de 4 ejes (Un eje direccional y eje trídém)	31,00	30,00	31,00	30,00
	4 (2)	Camión de 4 ejes (Dos ejes direccionales y uno tándem)	36,00	28,00	32,00	32,00
	4 (3)	Camión de 4 ejes (Dos ejes delanteros de suspensión independiente)	32,00	-	-	-
Tracto-camión con semirremolque	2S1	Tractocamión de 2 ejes con semirremolque de un eje	27,00	27,00	29,00	29,00
	2S2	Tractocamión de 2 ejes con semirremolque de 2 ejes	32,00	34,50	38,00	36,00
	2S3	Tractocamión de 2 ejes con semirremolque de 3 ejes	40,50	42,00	42,00	43,00
	3S1	Tractocamión de 3 ejes con semirremolque de 1 eje	29,00	42,00	38,00	36,00
	3S2	Tractocamión de 3 ejes con semirremolque de 2 ejes	48,00	-	47,00	43,00
	3S3	Tractocamión de 3 ejes con semirremolque de 3 ejes	52,00	45,00	48,00	48,00
Camiones con remolque	R2	Remolque de 2 ejes	16,00	-	22,00	-
	2R2	Camión de 2 ejes con remolque de 2 ejes	31,00	37,50	40,00	40,00
	2R3	Camión de 2 ejes con remolque de 3 ejes	47,00	45,00	48,00	47,00

Vehículos	Designación	Descripción	Colombia	Argentina	Ecuador	Perú
			Máximo PBV (Ton)	Máximo PBV (Ton)	Máximo PBV (Ton)	Máximo PBV (Ton)
	3R2	Camión de 3 ejes - Dobletroque con remolque de 2 ejes	44,00	45,00	48,00	47,00
	3R3	Camión de 3 ejes - Dobletroque con remolque de 3 ejes	48,00	45,00	48,00	48,00
Camiones con remolque	4R2	Camión de 4 ejes con remolque de 2 ejes	48,00	-	-	48,00
	4R3	Camión de 4 ejes con remolque de 3 ejes	48,00	-	-	48,00
	4R4	Camión de 4 ejes con remolque de 4 ejes	48,00	-	-	48,00
Camiones con remolque balanceado	2B1	Camión de 2 ejes con remolque balancín de 1 eje	25,00	-	29,00	29,00
	2B2	Camión de 2 ejes con remolque balancín de 2 ejes	32,00	-	38,00	36,00
	2B3	Camión de 2 ejes con remolque balancín de 3 ejes	32,00	-	42,00	-
	3B1	Camión de 3 ejes - Dobletroque con remolque balancín de 1 eje	33,00	-	38,00	36,00
	3B2	Camión de 3 ejes - Dobletroque con remolque balancín de 2 ejes	40,00	-	47,00	43,00
	3B3	Camión de 3 ejes - Dobletroque con remolque balancín de 3 ejes	48,00	-	48,00	-
	B1	Remolque balancín de 1 eje	8,00	-	11,00	-
	B2	Remolque balancín de 2 ejes	15,00	-	20,00	-
	B3	Remolque balancín de 3 ejes	15,00	-	24,00	-

De la misma manera, la Resolución 4100 de 2004 también reglamenta los máximos pesos permitidos por tipo de eje (Artículo 9); sin embargo, vale aclarar que actualmente los sistemas de pesajes del país controlan únicamente el máximo PBV, independientemente de la restricción por eje que rige en la actualidad. En cuanto a lo regulado por países como Argentina, Paraguay, Ecuador y Perú se tiene que, en general, Colombia los supera en los máximos pesos por eje en un 71%, 67%, 40% y 17% respectivamente, llama la atención el eje tándem de ocho (8) llantas debido a que supera en 2 toneladas a lo reglamentado en dichos países, tal como lo refleja la Tabla No. 4.2.

Tabla 4.2 Comparación pesos máximos por eje

Colombia		Argentina	Ecuador	Perú	Paraguay	
Vehículos	Designación	Peso máximo por eje (Ton)	Peso máximo por eje (Ton)	Peso máximo por eje (Ton)	Peso máximo por eje (Ton)	
Eje sencillo	Dos llantas	6,00	6,00	4,00	7,00	6,00
	Cuatro llantas	11,00	10,50	11,00	11,00	10,50
Eje tándem	Cuatro llantas	11,00	10,00	12,00	14,00	-
	Seis llantas	17,00	14,00	-	-	14,00
	Ocho llantas	22,00	18,00	20,00	18	18

Colombia			Argentina	Ecuador	Perú	Paraguay
Vehículos	Designación	Peso máximo por eje (Ton)	Peso máximo por eje (Ton)	Peso máximo por eje (Ton)	Peso máximo por eje (Ton)	Peso máximo por eje (Ton)
Eje trídem	6 llantas	16,50	-	-	-	-
	8 llantas	19,00	-	-	-	-
	10 llantas	21,50	21,00	-	23,00	21,00
	12 llantas	24,00	25,50	24,00	25,00	25,50

Lo descrito refleja que en relación con algunos países suramericanos, Colombia presenta restricciones de tonelajes en los vehículos de carga más flexibles comparadas con países como Argentina ya que en el caso colombiano en ambos escenarios (máximo PBV y peso por eje) se superan en un 54% y 71% las máximas admisibilidades con respecto al caso argentino, situación que afecta en gran medida a los pavimentos del país, tal como se describirá en el siguiente capítulo.

5. ANÁLISIS FACTOR DAÑO

5.1 FACTOR DE CONVERSIÓN DE CARGA

El tráfico es uno de los parámetros más importantes el diseño de pavimentos ya que éste proporciona la exigencia estructural a las cuales deberán ser sometidas las estructuras. Usualmente, el tráfico comercial se convierte a un número de ejes equivalentes, a través de los factores de equivalencia de carga (EALF), con el fin de relacionar el daño que causa un eje determinado al pavimento con el paso de un eje de carga estándar. Aunque hay diversas teorías para calcular dichos factores de conversión, típicamente éstas dependen del tipo de eje del vehículo, de la carga que éste soporte y del las características de la estructura de pavimento sobre la cual circulan los vehículos (Huang 2002). No obstante, los factores de conversión de carga se han simplificado para relacionar únicamente el peso del vehículo y tipo de eje con el eje estándar al cual se desea convertir la carga. De esta manera, en el presente capítulo se calcularán diferentes elementos de conversiones de carga mediante el factor de agresividad tradicional a ejes estándar (simples con llantas duales) de 8.2 ton, el cual se describe a continuación en la Ecuación 1.

$$\text{Factor de conversión de carga} = (P/P_{ref})^4 \quad (1)$$

en donde:

P: Carga del eje expresado en toneladas.

P_{ref} : Carga de referencia teniendo en cuenta la siguiente distribución plasmada en la Tabla No. 5.1.

Tabla 5.1 Cargas de referencia para conversión a ejes de 8.2 ton

Eje	Pref (Toneladas)
Simple	6,6
Simple con rueda doble	8,2
Tándem	15
Trídem	23

Como se mencionó con anterioridad, la principal restricción que tiene la conversión de ejes equivalentes (EALF) por el método tradicional, comúnmente llamado “Ley de la Cuarta Potencia”, es que éste no contempla factores importantes del pavimento que otros métodos si consideran (e.g., número estructural (SN), índice de serviciabilidad (PSI) y tipo de pavimento, variables que se consideran en métodos de conversión como en el de AASHTO).

Teniendo en cuenta lo enunciado, la Tabla No. 5.2 presenta a manera de ejemplo el cálculo del factor daño al pavimento, expresado en términos de factor de conversión de carga (ver ecuación 1), para los diferentes tipos de ejes con una carga en común.

Tabla 5.2 Cálculo EALF para diferentes tipos de ejes (para conversión a ejes estándar de 8.2 ton)

Eje	Carga-Eje (Ton)	Pref (Ton)	EALF (P/Pref) ⁴
Simple	5,00	6,6	0,329
Simple dual		8,2	0,138

Eje	Carga-Eje (Ton)	Pref (Ton)	EALF (P/Pref) ⁴
Tándem		15	0,012
Trídem		23	0,002

Como puede notarse, existe una variabilidad entre los diferentes factores de daño calculados de hasta el 126%, donde se observa claramente que el eje que más daño causa a un pavimento es el simple con llanta simple, seguido del simple dual, del tándem y del trídem, situación que preocupa debido a que la mayoría de vehículos de carga que transitan por el país poseen mínimo un (1) eje de dichas características, por ello la importancia de controlar por parte de las autoridades o entidades competentes el peso máximo por eje.

5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS EMPLEADOS PARA EL ANÁLISIS DEL FACTOR DAÑO

Para el cálculo del factor daño al pavimento se escogió una muestra de 4076 camiones de diferentes categorías, cuyo peso fue suministrado por una Concesión Vial de Colombia respecto de la operación del día miércoles 31 de julio de 2013 en las dos (2) estaciones de pesajes del trayecto vial concesionado, los cuales en su mayoría la componen las categorías 3S3 (34,74%), 2 (26,62%) y 3S2 (20,39%), tal como refleja la Tabla No. 5.3.

Tabla 5.3 No. de Vehículos pesados

Categoría	No. camiones pesados	Porcentaje de camiones pesados
2	1085	26,62%
3	411	10,08%
4	2	0,05%
2S1	1	0,02%
2S2	223	5,47%
2S3	21	0,52%
3S1	73	1,79%
3S2	831	20,39%
3S3	1416	34,74%
2R2	2	0,05%
3R2	6	0,15%
2B1	2	0,05%
2B2	3	0,07%
Total	4076	100%

De la misma manera, un análisis preliminar de los datos muestra que existe un sobrepeso total del 20% de los vehículos pesados, donde la categoría que más infringe la normatividad corresponde a: 3S3 (39%), 3S2 (16%), 3 (12%) y 2 (8%). Vale aclarar que aunque la categoría 3R2 presenta un sobrepeso del 50%, para el día evaluado sólo se pesaron 6 camiones, tal como se muestra a continuación en la Figura No. 1.

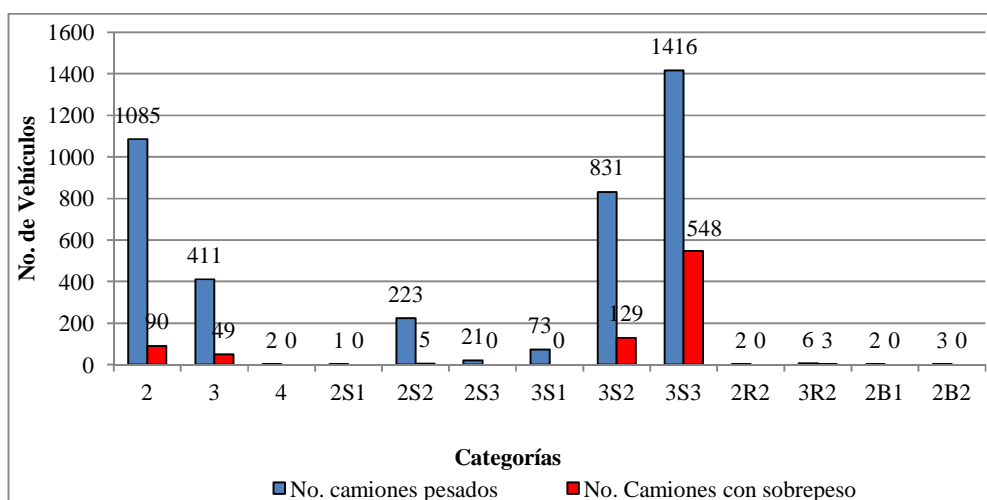








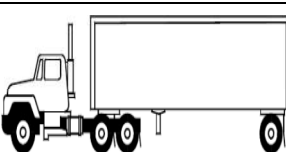
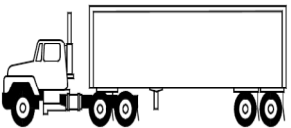
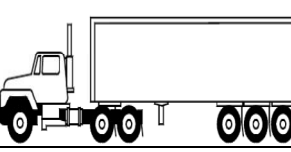
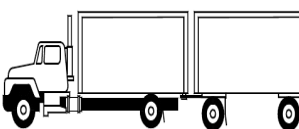
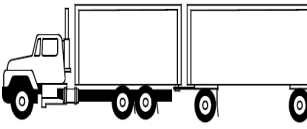

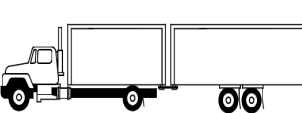
Figura 1 Camiones pesados Vs. Camiones con sobrepeso

5.3 CÁLCULO DEL FACTOR DE DAÑO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta el cálculo del factor daño al pavimento, expresado en términos de factor de conversión de carga (ver ecuación 1), para los vehículos descritos en la Tabla No. 5.3. Es importante recordar que los sistemas de pesaje del país controlan el peso máximo bruto vehicular (PBV) sin contar con la distribución por eje. Por ello, para los vehículos 2, 3, 4, 2S1, 2S2, 2S3, 3S1, 3S2 y 3S3 ésta fue supuesta teniendo en cuenta el estudio realizado por la Universidad Nacional de Bogotá y el IDU – Tabla No. 6-2 (Convenio No. 020 de 2008), las de 2R2 y 3R2 por la empresa Express Global (2010), mientras que para los vehículos 2B1 y 2B2 fue supuesta la misma de los 2S1 y 2S2. Los resultados de EALF mínimos y máximos por categorías se muestran en la siguiente Tabla No. 5.4.

Tabla 5.4 Cálculo EALF en ejes de 8.2 ton para diferentes categorías de vehículos

Categoría	Configuración	EALF	
		Mínimo	Promedio
2		Mínimo	0,01
		Promedio	1,49
		Máximo	4,93
3		Mínimo	0,02
		Promedio	2,38
		Máximo	6,51
4		Mínimo	1,51
		Promedio	3,25
		Máximo	4,99
2S1		Mínimo – Máximo	2,09
		Promedio	

Categoría	Configuración	EALF	
2S2		Mínimo	0,09
		Promedio	1,26
		Máximo	4,55
2S3		Mínimo	0,07
		Promedio	1,69
		Máximo	3,87
3S1		Mínimo	0,11
		Promedio	0,44
		Máximo	2,18
3S2		Mínimo	0,04
		Promedio	4,10
		Máximo	9,90
3S3		Mínimo	0,03
		Promedio	4,98
		Máximo	7,41
2R2		Mínimo	0,04
		Promedio	0,81
		Máximo	1,58
3R2		Mínimo	0,15
		Promedio	3,34
		Máximo	7,80
2B1		Mínimo	1,14
		Promedio	2,39
		Máximo	3,64
2B2		Mínimo	0,38
		Promedio	0,40
		Máximo	0,42

De los diferentes vehículos evaluados se observa que la menor y mayor agresividad al pavimento lo ocasionan los camiones 2 y 3S2, respectivamente. De la misma manera, estos camiones presentan un sobrepeso en el caso de estudio del 8% y el 16%, tal como lo muestra la Figura No. 1.

Para las mismas categorías de vehículo, como se nota en la Figura No. 2, existe una gran variabilidad (COV) en cuanto a los factores daños calculados, los cuales varían entre el 5% (2B2) y el 135% (2R2). De la misma manera, se observa que un 75% de los COV calculados para las diferentes categorías superan el 70%, lo que indica que los factores de daño producidos por un mismo vehículo son altamente sensibles debido a la carga que transporta, lo cual no es congruente con las tarifas de peajes canceladas en la actualidad vs. el daño producido al pavimento. Esta afirmación se justifica en el hecho de que con el actual sistema de cobro de peajes en el país, la tarifa para los camiones es función exclusiva del número de ejes de vehículos más no de la carga que transporten o del daño real que generan, situación que es directamente proporcional con el mantenimiento y/o rehabilitación que requieren los pavimentos.

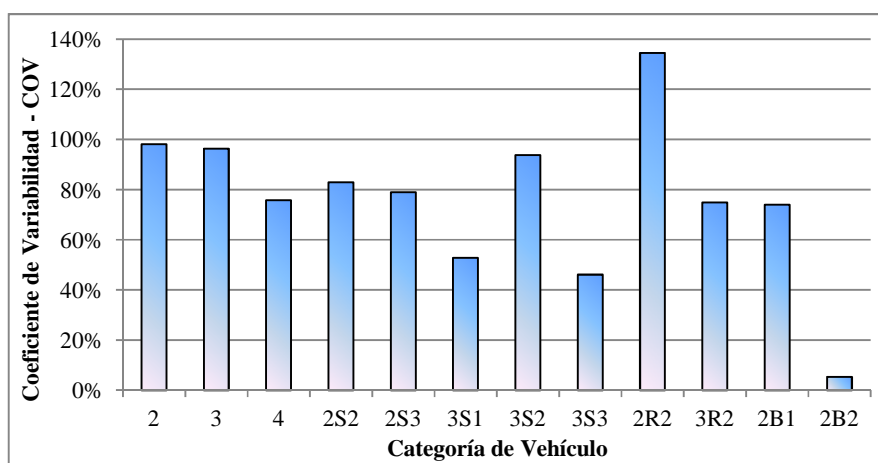


Figura 2 COV de EALF según categorías de vehículos

Para el cálculo del factor de daño (EALF) máximo de cada uno de los vehículos se tomó el máximo PBV permitido por la Resolución 4100 de diciembre 28 de 2004, expedida por el Ministerio de Transporte de Colombia, modificada por la Resolución 1782 de 2009, teniendo en cuenta la distribución de carga de la Tabla No. 6-2 del estudio realizado por la Universidad Nacional de Bogotá y el IDU (Convenio No. 020 de 2008) para las categorías 2R2, 3R2, 2B1 y 2B2 fue supuesta por el autor tal como se muestra en el Anexo No. 1. Los EALF máximos calculados se muestra a continuación en la Tabla No. 5.5.

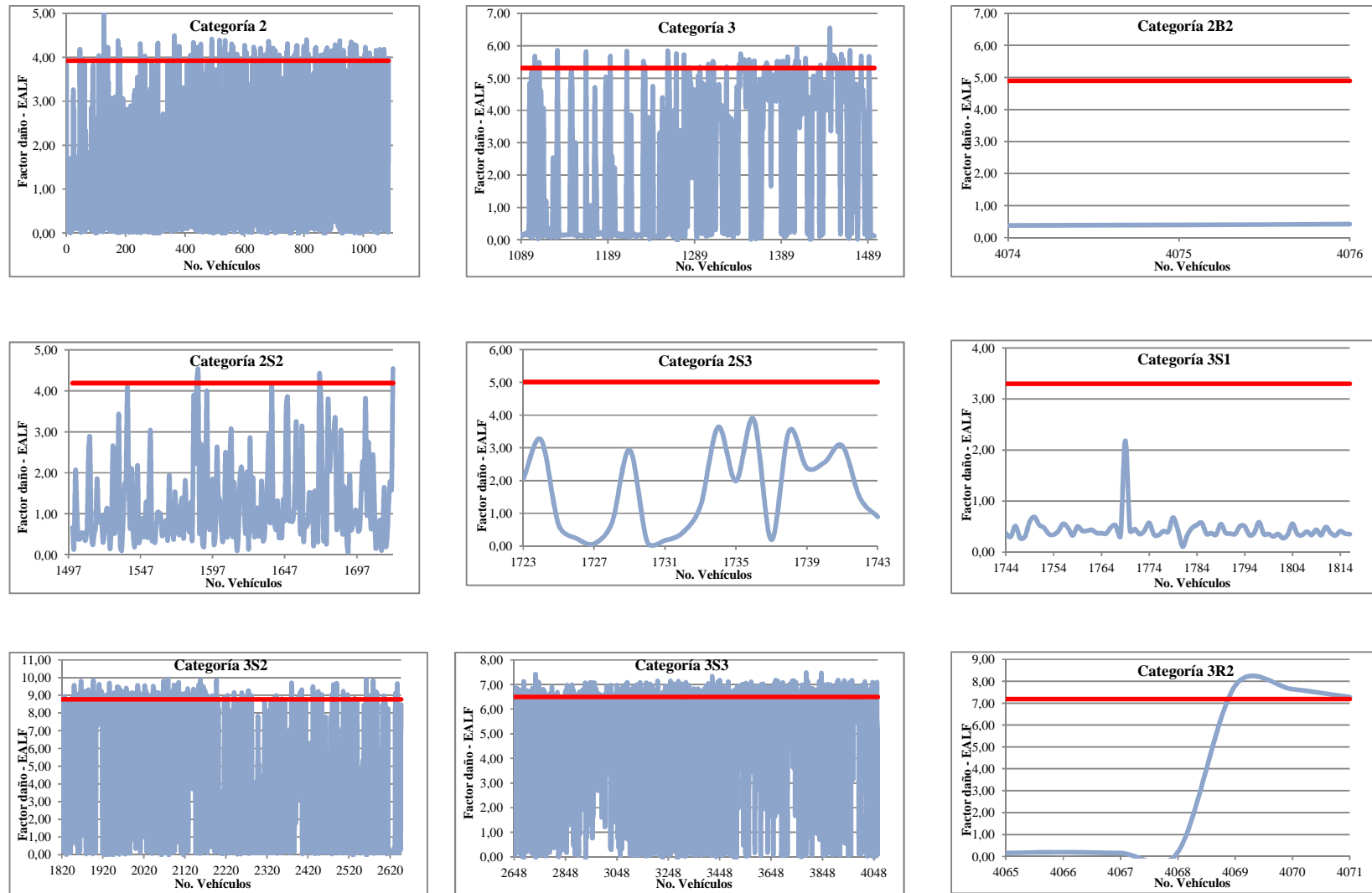
Tabla 5.5 Cálculo EALF máximo expresado en ejes de 8.2 ton

Categoría	EALF - Máximo
2	3,92
3	5,31
4	6,50
2S1	6,81
2S2	4,19
2S3	5,01
3S1	3,30

Categoría	EALF - Máximo
3S2	8,77
3S3	6,50
2R2	4,05
3R2	7,18
2B1	5,02
2B2	4,90

Teniendo en cuenta los cálculos realizados y lo plasmado en la Tabla No. 5.5 se tiene que las categorías que sobrepasan los factores de daños máximos son en su orden 3R2, 3S3, 3S2, 3 y 2 con el 50% (vale aclarar que de la 3R2 se pesaron sólo 6 camiones, donde 3 presentaron sobrepeso), 39%, 16%, 12%, 8% y 2%, respectivamente, lo cual es congruente con lo mostrado en la Figura No. 1.

La Figura No. 3 muestra el cálculo de los diferentes EALF Vs. EALF máximos en ejes de 8.2 ton para los 4076 camiones que, como arriba se mencionó, fueron pesados en una Concesión Vial de Colombia, para el día 31 de julio de 2013 en las dos (2) estaciones de pesaje del trayecto vial concesionado. Vale aclarar que las categorías 4, 2S1, 2R2 y 2B1 no se muestran debido a que éstos transitaban pocas veces por el trayecto vial concesionado, lo que indica que no son representativos para los cálculos realizados.



Convenciones:
— Factor daño - EALF — EALF Máximo

Figura 3 Cálculo EALF para las diferentes categorías vehiculares.

5.4 ANÁLISIS MECÁNICO DEL IMPACTO DEL PESO VEHÍCULAR EN LA VIDA A FATIGA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

A continuación se presenta el análisis mecánico realizado empleando el software de libre uso Kenlayer, a la estructura de pavimento que se observa en la Figura No. 4, con las propiedades de los materiales que se presentan en la Tabla No. 5.6. En este análisis se supone que todos los materiales son lineales, elásticos y homogéneos y que las capas están ligadas. El objetivo último de este análisis es determinar el número de ciclos a la falla (N_f) de las capas asfálticas empleando los valores de deformación a tensión en la base de las capas como parámetro de entrada en la ecuación 2. Esta ecuación corresponde a la Ley de Fatiga empírica propuesta por el Instituto del Asfalto para mezclas asfálticas. El análisis se realizó para cada uno de los ejes bajo la carga máxima permitida como de la excedida para las categorías C2, C3, C3S2 y C3S3, que son las que presentan sobrepeso en un: 8%, 12%, 16% y 39% respectivamente.

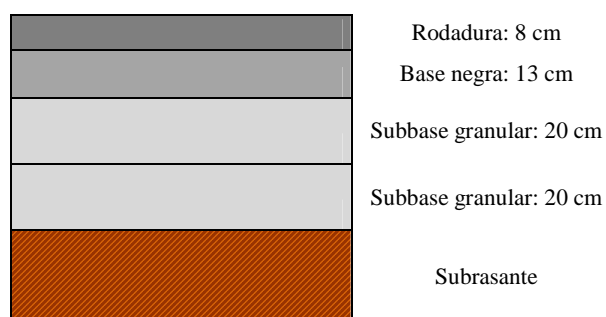


Figura 4 Estructura del Pavimento – Análisis mecánico

Tabla 5.6 Propiedades de los materiales

Material	Módulo (Mpa)	Espesor (cm)	Poisson
Rodadura	2800	8	0,35
Base asfáltica	3700	13	0,35
Subbase granular	350	20	0,4
Subbase granular	350	20	0,4
Subrasante	55	α	0,45

$$Nf = 0.0796\varepsilon_h^{-3.291}(E^*)^{-0.854} \quad (2)$$

donde:

N_f : número de ciclos a la falla.

ε_h : deformación máxima a tensión.

E^* : valor del módulo dinámico del material en PSI.

A continuación se muestra un breve ejemplo del análisis realizado para el eje tándem del vehículo C3S3, teniendo en cuenta la evaluación de las deformaciones, en los puntos que se muestran en la Figura 5, con los parámetros descritos en la Tabla No. 5.7 para la condición de máxima carga permitida (22 Ton).

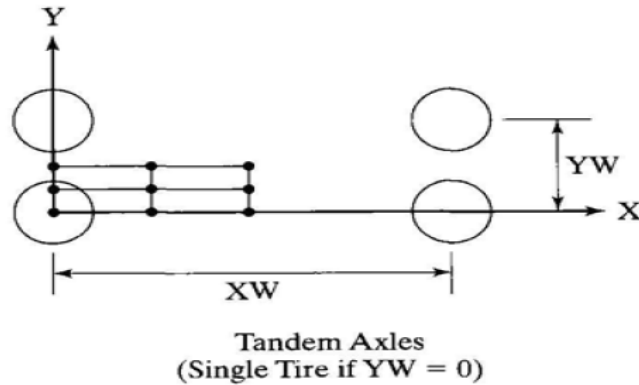


Figura 5 Distribución de eje tándem – Kenlayer

Fuente: Yang H. Huang (2002)

Tabla 5.7 Parámetros carga máxima

Parámetro	Valor	Punto	X (cm)	Y (cm)
P (KN)	215,82	1	0	0
No. llantas	8	2	0	11,8
q (Kpa)	620	3	0	17,7
Radio de contacto (cm)	11,8	4	30	0
No. puntos a evaluar	9	5	30	11,8
XW (cm)	120	6	30	17,7
YW (cm)	35,4	7	60	0
et máx. - (Base negra)	1,154E-04	8	60	11,8
		9	60	17,7

Como puede notarse en la Tabla No. 5.7, se tiene como resultado la deformación máxima ocasionada (1,154E-04) en la base asfáltica debido a que la capa de rodadura no presenta fatiga para las condiciones dadas. En ese orden de ideas, para el mismo eje tándem del vehículo C3S3, con la mayor carga excedida (22,6 Ton), se tiene la deformación máxima en la base negra de 1,165E-04, bajo los parámetros plasmados en la Tabla No. 5.8.

Tabla 5.8 Parámetros carga máxima excedida

Parámetro	Valor	Punto	X (cm)	Y (cm)
P (KN)	221,67	1	0	0
No. llantas	8	2	0	11,9
q (Kpa)	620	3	0	17,85
Radio de contacto (cm)	11,9	4	30	0
No. puntos a evaluar	9	5	30	11,9
XW (cm)	120	6	30	17,85
YW (cm)	35,7	7	60	0
et máx.-Excedido - (Base negra)	1,165E-04	8	60	11,9
		9	60	17,85

Como es lógico, la deformación aumenta a medida que la carga también lo hace, tal como lo refleja los resultados anteriormente mostrados, vale la pena mencionar que éstas se presentaron sólo en la base negra o base asfáltica, es decir que ésta fue la capa que controla la fatiga de la estructura bajo los escenarios planteados. A continuación en la Tabla No. 5.9 se presentan las cargas máximas permitidas y excedidas con que se realizó el análisis y en la Tabla No. 5.10 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5.9 Cargas máximas permitidas y excedidas

Categoría	Eje	Capa	Carga máxima (Ton)	Carga excedida (Ton)
C2	Simple	Base negra	6,00	6,29
	Simple dual		11,00	11,67
C3	Simple	Base negra	6,00	6,17
	Tándem		22,00	23,22
C3S2	Simple	Base negra	5,00	4,93
	Tándem		21,50	22,19
	Tándem		21,50	22,19
C3S3	Simple	Base negra	6,00	6,46
	Tándem		22,00	22,60
	Trídem		24,00	24,75

Tabla 5.10 Resultados de ϵt y N_f

Categoría	Eje	Capa	ϵt máx.-Permitida	ϵt máx.-Excedida	N_f esperado a carga máxima	N_f -Excedido	Disminución de N_f (%)
C2	Simple	Base negra	5,126E-05	5,220E-05	133.931.497	126.156.746	6%
	Simple dual		1,237E-04	1,280E-04	7.375.228	6.590.769	11%
C3	Simple	Base negra	5,126E-05	5,185E-05	133.931.497	128.981.057	4%
	Tándem		1,154E-04	1,187E-04	9.269.254	8.447.862	9%
C3S2	Simple	Base negra	4,752E-05	4,723E-05	171.855.631	175.352.856	-2%
	Tándem		1,132E-04	1,154E-04	9.875.419	9.269.254	6%
	Tándem		1,132E-04	1,154E-04	9.875.419	9.269.254	6%
C3S3	Simple	Base negra	5,126E-05	5,273E-05	133.931.497	122.031.508	9%
	Tándem		1,154E-04	1,165E-04	9.269.254	8.984.326	3%
	Trídem		8,862E-05	9,071E-05	22.102.283	20.470.146	7%

En resumen, se tiene que las cargas máximas excedidas disminuyen el número de ciclos a la falla (N_f) en promedio en un 6%, mientras que para los ejes simples, simple dual, tándem y trídem acortan el N_f en promedio un 4%, 11%, 6% y 7% respectivamente, lo que indica una reducción considerable, a pesar de que no es muy alta. Estos resultados reiteran una vez más la necesidad y urgencia de controlar los pesos máximos vehiculares, por ejes, en las vías del país.

Aunado a lo anterior, vale mencionar que los camiones que circulan con la carga máxima excedida están afectando en gran medida la vida útil del pavimento, situación que repercute en mayores costos de operación y mantenimiento, que debe asumir bien sea el concesionario o el Estado. De este análisis se evidencia la necesidad de realizar un control estricto a las excedencias de cargas de los vehículos con el fin de que dicha situación no se presente, o por lo menos de que se reduzca.

6. MODELO TARIFARIO ACTUAL EN COLOMBIA

Actualmente en las Concesiones viales nacionales de Colombia se cobra la tarifa de peaje por el número de ejes del vehículo, partiendo de diferentes categorías de los camiones, una que va de la III a la VII y otra de la II a la V, tal como lo reflejan las Tablas No. 6.1 y 6.2, respectivamente. Esta evaluación se realiza, debido a que se tiene como partida para la evaluación de las tarifas de peaje que se describirán en el capítulo 7.

De la misma manera, en las Tablas No. 6.1 y 6.2, las tarifas no son constantes en las diferentes concesiones del país, presentando una variabilidad promedio del 17% para las categorías del II – V y del 26% para las categorías III – VII, lo cual es razonable ya que cada trayecto vial concesionado es diferente en cuanto a las condiciones de operación y mantenimiento a que se encuentran sometidas. Así mismo, la mayor variabilidad la presenta la categoría V (camiones de 3 y 4 ejes) para lo descrito en la Tabla No. 6.1 y la categoría II (buses, busetas y camiones de 2 ejes) para la primera designación de la Tabla No. 6.2 con un 27% y 19% respectivamente.

Tabla 6.1 Tarifas de peaje Categorías III - VII

Fuente: <http://siinco.inco.gov.co/>

Categoría - Camiones	Descripción	Concesión/Peaje									
		Sabana de Occidente	Concesión CCFC S.A.	Devinorte			Malla Vial del Meta				
		Siberia	Río Bogotá y Corzo	Andes y Fusca	Teletón	Iracá	La Libertad	Ocoa	Vanguardia	Veracruz	Puente Amarillo
III	Camión pequeño 2 ejes	\$ 9.400	\$ 8.100	\$ 7.500	-	\$ 8.400	\$ 11.500	\$ 8.400	\$ 6.200	\$ 6.700	\$ 6.200
IV	Camión grande 2 ejes	\$ 12.600	\$ 10.900	\$ 17.100	-	\$ 14.700	\$ 19.200	\$ 14.700	\$ 9.500	\$ 10.400	\$ 9.500
V	Camiones de 3 y 4 ejes	\$ 22.000	\$ 18.400	\$ 25.800	\$ 25.800	\$ 21.900	\$ 28.600	\$ 21.900	\$ 13.500	\$ 14.700	\$ 13.500
VI	Camiones de 5 ejes	\$ 29.400	\$ 24.900	\$ 33.500	\$ 33.500	\$ 29.100	\$ 37.800	\$ 29.100	\$ 18.100	\$ 19.800	\$ 18.100
VII	Camiones de 6 ejes ó más	\$ 32.400	\$ 2.700	\$ 36.900	\$ 36.900	\$ 31.400	\$ 43.200	\$ 31.600	\$ 20.500	\$ 22.300	\$ 20.500

Categoría - Camiones	Descripción	Concesión/Peaje					
		San Rafael	Autopistas del Café S.A.			Devimed	
		Chicoral	Pavas - San Bernardo - Santagueda - Corozal	Circasia	Tarapaca I y Tarapaca II	Guarne - Cocorná y Puerto Triunfo	Las Palmas
III	Camión pequeño 2 ejes	\$ 8.500	\$ 9.800	\$ 13.700	\$ 11.900	\$ 11.600	\$ 8.100
IV	Camión grande 2 ejes	\$ 11.100	\$ 9.800	\$ 13.700	\$ 11.900	\$ 12.800	\$ 8.100
V	Camiones de 3 y 4 ejes	\$ 22.200	\$ 24.000	\$ 33.600	\$ 29.800	\$ 26.500	\$ 17.800
VI	Camiones de 5 ejes	\$ 29.700	\$ 30.000	\$ 41.100	\$ 39.400	\$ 35.700	\$ 23.900
VII	Camiones de 6 ejes ó más	\$ 32.700	\$ 34.800	\$ 45.700	\$ 44.100	\$ 40.200	\$ 26.800

Tabla 6.2 Tarifas de peaje Categorías II – V

Fuente: <http://siinco.inco.gov.co/>

Categoría – Camiones	Descripción	Concesión/Peaje								
		Ruta del Sol - Sector II		Ruta del Sol - Sector III			Transversal de las Américas		Sabana de Occidente	Bogotá - Girardot
		Agua Negras y La Gómez	Morrison y Pailitas	El Copey y Tucurínca	La Loma y Valencia	Puente Plato y El Díficil	Purgatorio	Los Cedros	Caiquero	Chinauta y Chusacá
II	Buses, busetas y camiones de 2 ejes	\$ 9.600	\$ 7.400	\$ 6.900	\$ 7.100	\$ 9.000	\$ 7.200	\$ 7.200	\$ 9.500	\$ 8.700
III	Camiones de 3 y 4 ejes	\$ 22.500	\$ 15.400	\$ 15.900	\$ 15.200	\$ 18.900	\$ 15.300	\$ 15.300	\$ 23.400	\$ 18.200
IV	Camiones de 5 ejes	\$ 26.900	\$ 19.800	\$ 20.900	\$ 19.600	\$ 26.700	\$ 19.700	\$ 19.600	\$ 28.300	\$ 29.800
V	Camiones de 6 ejes	\$ 31.500	\$ 22.500	\$ 24.100	\$ 22.300	\$ 28.700	\$ 22.300	\$ 22.200	\$ 32.500	\$ 34.000

Categoría - Camiones	Descripción	Concesión/Peaje				
		Devinar S.A.		Concesión BTS	San Rafael	Comuneros
		De El Placer	De Daza	Albarracín y Tuta	Gualanday	Casablanca - Curos - Oiba - Saboyá y San Gil
II	Buses, busetas y camiones de 2 ejes	\$ 8.300	\$ 4.300	\$ 6.800	\$ 9.100	\$ 6.800
III	Camiones de 3 y 4 ejes	\$ 17.600	\$ 17.600	\$ 17.500	\$ 21.700	\$ 17.500
IV	Camiones de 5 ejes	\$ 22.800	\$ 22.800	\$ 21.800	\$ 28.900	\$ 21.800
V	Camiones de 6 ejes	\$ 26.200	\$ 26.200	\$ 21.500	\$ 31.900	\$ 25.400

7. EVALUACIÓN TARIFAS DE PEAJE SEGÚN FACTOR DAÑO – EALF - GENERADO

Como se observa en la información presentada en el capítulo anterior, el modelo tarifario actual empleado en los peajes de las vías Nacionales contempla un cobro fijo en función del número de ejes del vehículo. A continuación se realiza un ejercicio académico bajo diferentes escenarios, en cuanto a la evaluación de tarifas a partir de los factores de daño para los 4076 vehículos descritos en la Tabla No. 5.3, presentando una breve descripción de la metodología empleada, sus principales ventajas y desventajas en los diferentes modelos realizados. El objetivo de éstos es explorar si se podría implementar uno nuevo que logre capturar la relación el daño real que generan los diferentes vehículos a las estructuras de pavimento. En total se presentan siete (7) modelos, cuyas diferencias básicas son en los rangos de los EALF escogidos así como las tarifas de partidas, lo cual se describirá en los siguientes subcapítulos.

7.1 MODELO 1 - CONDICIÓN TARIFARIA ACTUAL

El modelo 1 consiste en evaluar la condición actual tarifaria (i.e., cobro fijo en función del número de ejes del vehículo) comparada con los factores de daños calculados para cada uno de los 4076 vehículos, teniendo en cuenta las tarifas plasmadas en la Tabla No. 7.1.

Tabla 7.1 Tarifas escogidas para los 4076 vehículos

Categoría	Descripción	Tarifa
II	Buses, busetas y camiones de 2 ejes	\$ 9.600
III	Camiones de 3 y 4 ejes	\$ 22.500
IV	Camiones de 5 ejes	\$ 26.900
V	Camiones de 6 ejes	\$ 31.500

Las principales ventajas del modelo actual son:

- ✓ La metodología es de dominio y conocimiento nacional ya que es el sistema que se está implementando actualmente.
- ✓ El usuario de la vía cancela un único valor que es previamente informado en la estación de peaje.
- ✓ El transportador puede llevar la carga que desea (inferior a la máxima permitida) sin tener en cuenta que esto va a afectar el valor de la tarifa de peaje a cancelar.
- ✓ El sistema se encuentra reglamentado en los contratos de concesión.
- ✓ Existe una relación directa del pago con el tamaño del vehículo o la ocupación en la vía, debido a que entre más grande es el camión mayor es la tarifa a cancelar.
- ✓ No se necesita de un software independiente para el cálculo del factor daño de cada camión.

En cuanto a las principales desventajas de este modelo se tienen:

- ✓ Se recauda independiente del daño que cada vehículo realiza al pavimento.
- ✓ El sistema no es equitativo debido a que algunos vehículos que realizan menos daño que otros están pagando una tarifa más alta.

- ✓ Con el sistema actual tarifario no se está controlando el daño que cada camión genera sobre la vía, lo que se ve reflejado en la reducción de la vida de fatiga del pavimento.
- ✓ No existe retribución económica por un mayor daño generado al pavimento por los vehículos.
- ✓ La concesión no recibe retribución económica alguna por el sobrepeso que lleven los camiones, ya que en caso de existir estas multas, el dinero generado no llega a los fondos del concesionario sino de la policía de carreteras; por lo que dicho dinero no se reinvierte en actividades de operación y mantenimiento al trayecto vial concesionado.

La Figura No. 6, la ecuación No. 3 y la Tabla No. 7.2 presentan la regresión calculada con ayuda del software 2R-Soft, a partir de las tarifas planteadas en la Tabla No. 7.1 y los factores de daño de la Figura No. 3.

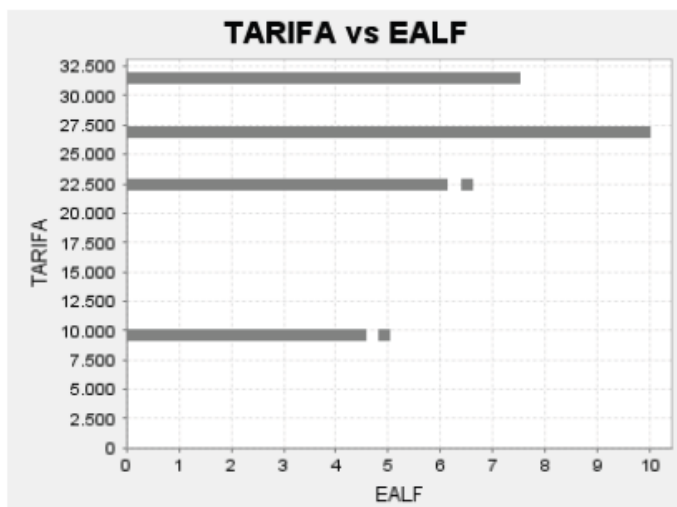


Figura 6– Regresión Modelo 1

$$\begin{aligned}
 \text{Tarifa} &= a + b * EALF^{0,5} + c * \\
 &2,71828^{0,5 * EALF} + d * EALF^{0,5} * \\
 &Ln(EALF) + e * Ln(EALF) \quad (3)
 \end{aligned}$$

R²: 0,33488.

Tabla 7.2 Parámetros ecuación 3

Parámetro	Valor
a	129928,75986
b	-112119,01755
c	-273,72453
d	31947,88463
e	21791,03436

Como puede notarse, la ecuación 3 presenta un R² (0,33488) bajo, tal como era de esperarse, lo que indica que con el sistema de cobro actual no existe una correlación entre el valor que cancelan los vehículos y el daño que realizan al pavimento. En conclusión, el modelo actual no es capaz de capturar el daño que producen los camiones que transitan por el trayecto vial concesionado.

En cuanto a la evaluación económica de este modelo se tiene que para los 4076 vehículos, el recaudo con las tarifas propuestas en la Tabla No. 7.1, corresponde a NOVENTA Y CUATRO MILLONES DOSCIENTOS TREINTA Y SIETE MIL CIEN PESOS M/CTE (\$ 94.237.100). Vale recordar que esta suma corresponde a sólo un (1) día de la semana que para el caso del estudio corresponde al miércoles 31 de julio de 2013.

7.2 MODELO 2 - CONDICIÓN TARIFARIA POR NÚMERO DE EJES Y EALF

El modelo 2 consiste en asignar tarifas a partir del sistema actual, es decir por el número de ejes, pero teniendo en cuenta el mínimo factor de daño calculado (EALF) para los pesos máximos brutos vehiculares (PBV) permitidos, por cada categoría (Tabla No. 5.5.), con un rango mínimo y máximo de tarifa por cada configuración de vehículo, lo cual puede verificarse en la siguiente Tabla No. 7.3. Vale la pena aclarar que

las tarifas de partida se escogieron arbitrariamente, sin embargo se trató de que no estuvieran alejadas del valor de cobro actual (Modelo 1), así mismo el rango mínimo y máximo de las tarifas se desarrolló teniendo en cuenta la siguiente ecuación 4:

$$\text{Tarifa} = \text{Si}(\text{EALF} < \text{Rango} - \text{EALF}; \text{Tarifa mínima}; \text{Tarifa máxima}) \quad (4)$$

A manera de ejemplo se tienen dos vehículos 2S2 (C4) con EALF=1,81y 4,09 por tanto se tiene lo siguiente:

$$\text{Tarifa} = \text{Si}(1,81 < 3,9; \$22.500; \$26.900) = \$22.500$$

$$\text{Tarifa} = \text{Si}(4,09 < 3,9; \$22.500; \$26.900) = \$26.900$$

Tabla 7.3 – Tarifas Modelo 2

Rango - EALF	Categorías	Tarifa mínima	Tarifa máxima
EALF<3,3	C2	\$ 10.000	\$ 15.000
EALF<3,9	C3 y C4	\$ 22.500	\$ 26.900
EALF<5	C5	\$ 26.900	\$ 31.500
EALF<6,5	C6	\$ 31.500	\$ 36.500

En cuanto a las principales ventajas se tienen:

- ✓ El modelo tiene en cuenta el factor de daño producido por el vehículo al pavimento.
- ✓ Dos vehículos con el mismo número total de ejes pagan diferente ya que el modelo captura una tarifa distinta que depende del factor daño producido.
- ✓ Existe incentivo económico para el concesionario a implementar este modelo ya que a mayor daño producido se cancela por parte del usuario una mayor tarifa.
- ✓ El mayor valor a pagar por la tarifa obliga a que el transportador no exceda el máximo PBV permitido.
- ✓ Se incentiva el cumplimiento de la Resolución 4100 de diciembre 28 de 2004, expedida por el Ministerio de Transporte de Colombia, modificada por la Resolución 1782 de 2009.
- ✓ Indirectamente se está controlando el sobrepeso en las concesiones viales debido a que entre mayor factor daño resulte mayor es la tarifa a cancelar.
- ✓ La diferencia entre la tarifa mínima y máxima es de cinco mil pesos (\$5.000).
- ✓ Se conserva la tendencia actual de que entre más grande sea el camión o más espacio ocupe en la vía mayor es su tarifa a cancelar.

En cuanto a las desventajas se tiene:

- ✓ Se necesita una nueva tecnología para su implementación debido a que su tarifa depende del EALF calculado el cual se deriva del peso que lleve el camión al momento de pasar por el peaje, lo que conlleva a una inversión por parte del concesionario.
- ✓ Es necesario reglamentar el modelo en los contratos de concesión.

- ✓ Dos vehículos con igual EALF pero diferente categoría pueden pagar distinto, por ejemplo para un EALF=3,5 un C2 cancelaría \$ 15.000, mientras que un C3S3 pagaría \$ 31.500.
- ✓ Inicialmente se podría generar inconvenientes con los transportadores por ser un sistema nuevo a implementar.
- ✓ Existen dos (2) tarifas diferentes, por cada categoría, a cancelar por parte del usuario. Aunque el usuario será previamente informado al paso por el peaje, esto puede generar algo de dificultad en el usuario quien no podrá estimar el pago total de peajes en un trayecto. Además, dado que el valor es función del EALF y no del peso ni del número de ejes, el significado será de difícil comprensión por parte de los usuarios.

En la Figura No. 7 se presenta la regresión calculada, con ayuda del software 2R-Soft, cuyos parámetros se encuentran listados en la Tabla No. 7.4 y en la ecuación 5.

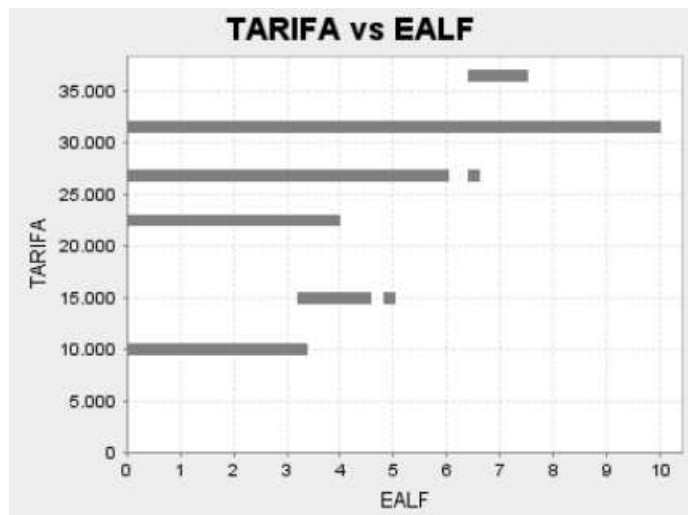


Figura 7 – Regresión Modelo 2

$$\begin{aligned}
 \text{Tarifa} &= a + b * EALF^{0.5} + c * \\
 &2,71828^{0,5 * EALF} + d * EALF^{0,5} * \\
 &Ln(EALF) + e * Ln(EALF) \quad (5)
 \end{aligned}$$

R^2 : 0,49017.

Tabla 7.4 Parámetros ecuación 5

Parámetro	Valor
a	137045,68397
b	-119343,17314
c	-283,07801
d	34626,98621
e	22917,36831

La ecuación 5 presenta un $R^2=0,49017$, situación que mejora en cuanto al modelo 1. Sin embargo su valor indica que existe poca correlación de la tarifa a cancelar con el factor daño producido.

En cuanto al aspecto financiero, se tiene que bajo los diferentes EALF calculados y las condiciones plasmadas en la Tabla No. 7.3, para un (1) sólo día se tiene una suma de CIEN MILLONES SEISCIENTOS TRECE MIL NOVECIENTOS PESOS M/CTE (\$ **100.613.900**). En comparación con el valor actual éste es un 6,34% mayor que el modelo tarifario actual – Modelo 1 (\$ 94.237.100).

7.3 MODELO 3 – TARIFAS VARIABLES

El modelo 3 se planteó bajo tres (3) diferentes escenarios donde se consideró la existencia de una tarifa variable que depende del EALF calculado, para todos los tipos de camiones, tal como se describe a continuación.

7.3.1 Modelo 3.1

El modelo 3.1 consiste en cada camión pagará una tarifa diferente, dependiendo del factor daño calculado, con el rango y las tarifas que se presentan a continuación en la Tabla No. 7.5.

En cuanto a las tarifas de partida se tienen las del modelo 1 (categorías II, IV y V) con un rango de EALF que fue seleccionado arbitrariamente. Lo anterior, teniendo en cuenta la siguiente ecuación 6:

$$\text{Tarifa} = SI(EALF < 1; \$9600; SI(EALF < 2; \$22500; SI(EALF < 3; \$26900; SI(EALF < 4; \$31500; \$36100)))) \quad (6)$$

A manera de ejemplo se tienen dos vehículos C2 con EALF=3,83y 0,11 por tanto se tiene:

$$\text{Tarifa} = Si(3,83 < 4; \$31.500) = \$31.500$$

$$\text{Tarifa} = Si(0,11 < 1; \$9.600) = \$9.600$$

Tabla 7.5– Tarifas Modelo 3.1

Rango - EALF	Tarifa
EALF<1	\$ 9.600
1<EALF<2	\$ 22.500
2<EALF<3	\$ 26.900
3<EALF<4	\$ 31.500
EALF>4	\$ 36.100

Las ventajas principales de este modelo son:

- ✓ Se captura el factor daño producido al pavimento por cada vehículo.
- ✓ Existe una retribución económica al trayecto vial concesionado por el mayor daño producido por cada vehículo.
- ✓ Se estimula que los transportadores cumplan los máximos PBV permitidos, por lo que indirectamente se está controlando el sobrepeso en la vía.
- ✓ Los valores de las tarifas planteadas son razonables debido a que son en su mayoría iguales a las iniciales (modelo 1).
- ✓ Se incentiva para que los transportadores transiten con cargas razonables.

En cuanto a las desventajas se tiene:

- ✓ El rango del EALF es restringido y exigente.
- ✓ No existe una tarifa única; la tarifa es variable en función del peso que se transporte.
- ✓ Se presenta una diferencia de \$26.500 entre la tarifa mínima, \$9.600 y la máxima \$36.100, para un tipo de vehículo.
- ✓ La variación de tarifas puede generar inconformidades en los transportadores debido a que para una misma categoría se presentan grandes diferencias lo que implicaría un valor diferente a cancelar por parte del usuario.
- ✓ Es necesario implementar nuevas tecnologías para su implementación.
- ✓ Se requiere reglamentar el sistema en el contrato de concesión.

En cuanto a la regresión calculada, con ayuda del software 2R-Soft, para los 4076 vehículos con las tarifas plasmadas en la Tabla No. 7.5, se tiene la siguiente Figura No. 8, ecuación 7 y la Tabla No. 7.6.

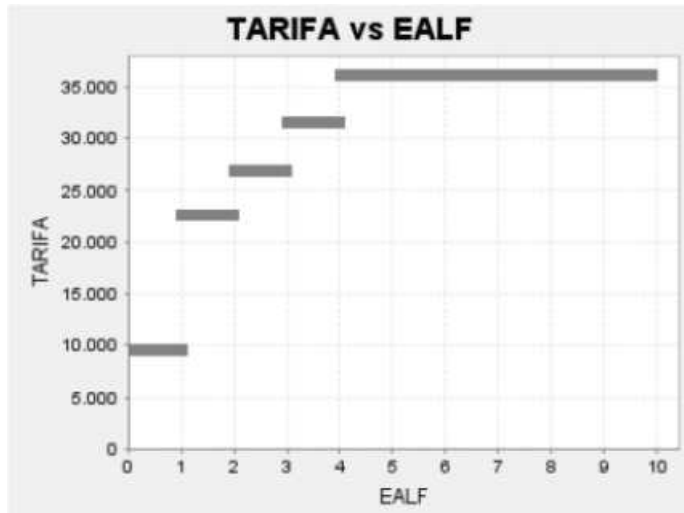


Figura 8 – Regresión Modelo 3.1

$$Tarifa = a + b * EALF^{0,5} + c * 2,71828^{-0,5 * EALF} + d * EALF^{0,5} * Ln(EALF) + e * (LnEALF)^2 \quad (7)$$

R²: 0,98396.

Tabla 7.6 Parámetros ecuación 7

Parámetro	Valor
a	116823,04244
b	-52247,67895
c	-81118,74294
d	12287,22877
e	-833,71399

Con un R²: 0,98396, se tiene que el modelo planteado refleja una muy buena correlación entre la tarifa cancelada y el factor de daño producido.

En cuanto a la valoración económica del presente modelo se tiene que bajo las condiciones de la Tabla No.7.5 una suma de NOVENTA Y NUEVE MILLONES CIENTO OCHENTA MIL OCHOCIENTOS PESOS M/CTE (\$ 99.180.800). Este valor es 4,98% mayor que el modelo actual – Modelo 1 (\$ 94.237.100)

7.3.2 Modelo 3.2

En cuanto a este modelo se tiene que existe una tarifa variable para los vehículos que transitan por el trayecto vial, teniendo en cuenta un rango para el mínimo factor daño calculado (EALF) para los pesos máximos brutos vehiculares (PBV) permitidos, que se encuentra plasmado en la Tabla No. No. 5.5., lo cual se puede sintetizar en la siguiente Tabla No. 7.7.

Vale la pena aclarar que las tarifas de partida se escogieron arbitrariamente, sin embargo se trató de que estuvieran en el rango del cobro actual (Modelo 1), así mismo el EALF se seleccionó de los valores más restrictivos de la Tabla No. 5.5 (pesos brutos vehiculares máximos permitidos) por categorías de vehículos (C2, C3, C4, C5 y C6) teniendo la condición que a mayor EALF mayor es la tarifa a cancelar. Lo anterior, siguiendo la ecuación 8 que se describe a continuación:

$$Tarifa = SI(EALF < 3,3; $15500; SI(EALF < 3,9; $21000; SI(EALF < 5; $26500; SI(EALF < 6,5; $32000; $37500))) \quad (8)$$

A manera de ejemplo se tienen dos vehículos 3S2 (C5) con EALF=5,68y 0,34 por tanto se tiene lo siguiente:

$$\text{Tarifa} = \text{Si}(5,68 < 6,5; \$32.000) = \$32.000$$

$$\text{Tarifa} = \text{Si}(0,84 < 3,3; \$15.500) = \$15.500$$

Tabla 7.7– Tarifas Modelo 3.2

Rango – EALF	Tarifa
EALF<3,3	\$ 15.500
3,3<EALF<3,9	\$ 21.000
3,9<EALF<5	\$ 26.500
5<EALF<6,5	\$ 32.000
EALF>6,5	\$ 37.500

Entre las principales ventajas del modelo se tiene:

- ✓ Es un modelo justo ya que se captura el factor daño producido por los vehículos en las tarifas planteadas.
- ✓ A mayor daño causado se genera una mayor tarifa a cancelar.
- ✓ Existe un control indirecto al sobrepeso generado ya que se desincentiva ir con valores cercanos a las cargas máximas permitidas, por tanto se estimula el cumplimiento de la Resolución 4100 de diciembre 28 de 2004, expedida por el Ministerio de Transporte de Colombia, modificada por la Resolución 1782 de 2009.
- ✓ Se genera un incentivo económico para la concesión por las mayores tarifas canceladas por el incremento del factor daño generado.
- ✓

Entre las principales desventajas se tiene:

- ✓ Un solo vehículo, dependiendo de su EALF, puede pagar \$15.500 ó \$37.500, es decir una diferencia de \$22.000, variabilidad en que puede generar inconformidades en los usuarios.
- ✓ Es necesario implementar nuevas tecnologías para la puesta en marcha del modelo.
- ✓ Se requiere reglamentar el modelo en el contrato de concesión.

En cuanto a la regresión calculada con la ayuda del software de 2R-Soft, se tiene como resultado la Figura No. 9, ecuación 9 y Tabla No. 7.8.

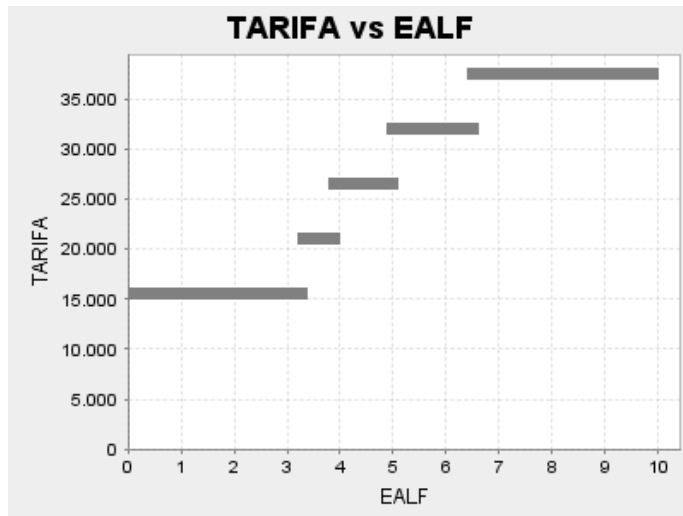


Figura 9 – Regresión Modelo 3.2

$$\text{Tarifa} = a + b * EALF + c * EALF^2 + d * EALF^3 + e * EALF^4 + f * EALF^5 \quad (9)$$

R²:0,97856.

Tabla 7.8 Parámetros ecuación 9

Parámetro	Valor
a	15603,26526
b	-68,61370
c	-1182,80442
d	805,30356
e	-118,22270
f	5,19565

Los resultados de la correlación muestran un valor de R² de 0,97856, lo que refleja que existe una buena correlación entre la tarifa a cancelar por los vehículos de carga contra el factor daño producido al pavimento.

El recaudo para este modelo bajo las condiciones plasmadas en la Tabla No. 7.7 asciende a la suma de NOVENTA Y CINCO MILLONES DOSCIENTOS NOVENTA Y OCHO MIL PESOS M/CTE (\$ 95.298.000). Este valor es un 1,11% mayor que el modelo tarifario actual – Modelo 1 (\$95.298.000).

7.3.3 Modelo 3.3

Este modelo se deriva de una tarifa variable, partiendo de un rango de EALF calculado para los pesos máximos brutos vehiculares (PBV) permitidos, que se encuentran plasmados en la Tabla No. 5.5., con dos valores de tarifa, una mínima y una máxima por cada configuración de vehículo, lo cual puede verificarse en la siguiente Tabla No. 7.9.

Las tarifas de partida se escogieron arbitrariamente, sin embargo se trató de que estuvieran en el rango del cobro actual (Modelo 1), así mismo el EALF se seleccionó de los valores más restrictivos de la Tabla No. 5.5 (pesos brutos vehiculares máximos permitidos) por categorías de vehículos (C2, C3, C4, C5 y C6) teniendo la condición que a mayor EALF mayor es la tarifa a cancelar. Vale aclarar que éste modelo se diferencia del anterior debido a que el rango de tarifas fue seleccionado a partir de las categorías vehiculares (C2, C3, C4, C5 y C6). Lo anterior, siguiendo la ecuación 9 que se describe a continuación:

$$\text{Tarifa Categoría} = SI(EALF < \text{Rango} - EALF; \text{Tarifa mínima}; \text{Tarifa máxima}) \quad (9)$$

A manera de ejemplo se tienen dos vehículos 3S3 (C6) con EALF=6,97 y 0,10 por tanto se tiene lo siguiente:

$$\text{Tarifa C6} = Si(6,97 < 6,5; \$29.600; \$34.600) = \$34.600$$

Tarifa C6 = Si(0,10 < 6,5; \$29.600; \$34.600) = \$29.600

Tabla 7.9 – Tarifas Modelo 3.3

Rango – EALF	Categorías	Tarifa mínima	Tarifa máxima
EALF<3,3	C2	\$ 9.600	\$ 14.600
3,9<EALF<5	C3 y C4	\$ 19.600	\$ 29.600
EALF<6,5	C5 y C6	\$ 29.600	\$ 34.600

Dentro de las principales ventajas del modelo se tienen:

- ✓ El modelo captura el factor daño producido por cada vehículo.
- ✓ Las diferencias entre la mínima y máxima tarifa para las categorías C2, C5 y C6 no superan los \$5.000 y para la C3 y C4 los \$10.000, las cuales son significativamente menores que en los modelos anteriores.
- ✓ Se estimula al transportador para que cargue pesos razonables en sus vehículos.
- ✓ Entre mayor sea el EALF del camión mayor será el incremento en la tarifa para las diferentes categorías.
- ✓ Existe un incentivo económico para la concesión en cuanto a que entre mayor sea el daño producido al pavimento mayor será la tarifa a cancelar, lo que se podrá retribuir en gastos de operación y mantenimiento para el trayecto vial concesionado.
- ✓ Se incentiva el cumplimiento de las normas en cuanto al sobrepeso de los vehículos.

En cuanto a las desventajas se tiene:

- ✓ Se requiere de nuevas tecnologías para implementar el modelo, lo que generaría una inversión por parte del concesionario.
- ✓ Es necesario reglamentar el modelo en los contratos de concesiones.

En cuanto a la regresión del modelo, calculada con ayuda del software 2R-Soft, se tiene la siguiente Figura No. 10, Tabla No. 7.10 y la ecuación 10.

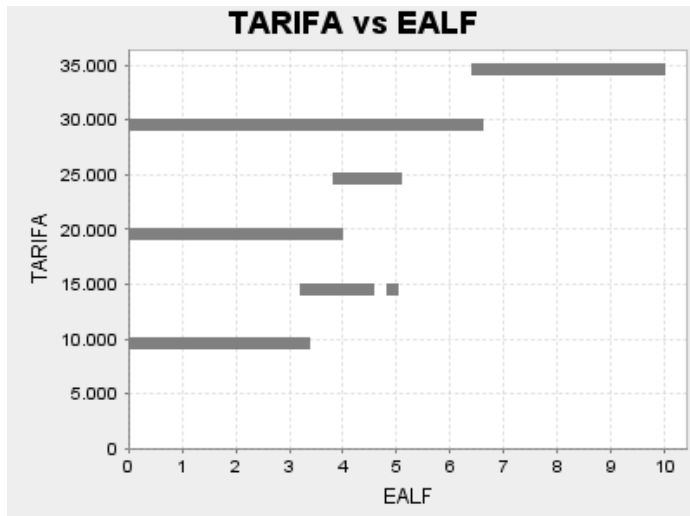


Figura 10 – Regresión Modelo 3.3

$$Tarifa = a + b * EALF^{0,5} + c * 2,71828^{0,5 * EALF} + d * EALF^{0,5} * Ln(EALF) + e * Ln(EALF)^2 \quad (10)$$

R²: 0,49933.

Tabla 7.10 Parámetros ecuación 10

Parámetro	Valor
a	62172,35519
b	-45455,88935
c	-180,31925
d	20648,05284
e	-2205,46029

Con un R²: 0,49933 el modelo 3.3 refleja que existe una baja correlación entre la tarifa a cancelar versus el factor daño producido por los camiones.

En cuanto a la valoración económica del modelo, partiendo de la Tabla No. 7.9, se tiene que el recaudo para un (1) día asciende a la suma DE NOVENTA Y OCHO MILLONES CIENTO OCHENTA Y CUATRO MIL SEISCIENTOS PESOS M/CTE (\$ **98.184.600**). Comparado con el modelo tarifario actual, este valor es 4,02% mayor que el actual – Modelo 1 (\$ 98.184.600).

7.4 MODELO 4 – TARIFAS VARIABLES A PARTIR DE UNA TARIFA BASE

A continuación se plantean dos (2) modelos donde se parte de una tarifa base más un incremento que depende del factor daño producido al pavimento por cada vehículo, obligando de esta manera que el vehículo pague por usar la vía y además entre mayor sea el daño generado al pavimento mayor es la tarifa a cancelar.

7.4.1 Modelo 4.1

Este modelo consiste en partir de una tarifa base, cuya razón es el costo inicial a pagar por concepto del uso físico de la vía la cual se planteó en DIECISÉIS MIL QUINIENTOS PESOS M/CTE (\$16.500) más una tarifa variable, que depende de un rango de EALF calculado para los pesos máximos brutos vehiculares (PBV) permitidos (ver Tabla No. 5.5.) y un incremento por el mayor daño ocasionado, desarrollando la ecuación 11 y teniendo en cuenta la siguiente Tabla No. 7.11. Es importante mencionar que la tarifa base se determinó luego de analizar que éste es un valor razonable económicamente para los vehículos que transitan por el trayecto vial concesionado y para el Concesionario. Así mismo, se tiene que a mayor daño generado al pavimento mayor es el incremento a cancelar por el usuario.

$$Tarifa = Tarifa\ base\ (\$16.500) + \left(\frac{EALF}{EALF_{Referencia}} \right) * Incremento \quad (11)$$

Tabla 7.11 – Tarifas Modelo 4.1

Rango - EALF	Tarifa base - Uso de la vía	Incremento	Categorías	Tarifa mínima	Tarifa máxima
EALF<3,3	\$ 16.500	\$ 0	C2	\$ 16.500	\$ 26.400
3,3<EALF<3,9		\$ 5.000	C3	\$ 16.500	\$ 36.500
3,9<EALF<5		\$ 10.000	C4	\$ 16.500	\$ 30.400
EALF<6,5		\$ 15.000	C5	\$ 16.500	\$ 36.500
EALF>6,5		\$ 20.000	C6	\$ 16.500	\$ 36.500

Como ejemplo de este modelo se tiene que para un C2 con un EALF=3,81, su tarifa corresponde a \$21.400, tal como se muestra a continuación:

$$\text{Tarifa} = (\$16.500) + \left(\frac{3,81}{3,9}\right) * \$5.000 \cong \$21.400$$

Entre las principales ventajas del modelo se tienen:

- ✓ Se tiene en cuenta el daño producido por el vehículo al pavimento en la tarifa recaudada.
- ✓ Es un modelo justo ya que a mayor daño mayor es la tarifa a cancelar.
- ✓ Se presenta un incentivo económico para el concesionario ya que el recaudo de las mayores tarifas se re invertiría en la concesión.
- ✓ Se estimula que los transportadores transiten con cargas razonables.

En cuanto a las desventajas se tiene:

- ✓ La diferencia entre la tarifa máxima y mínima es considerable ya que está del orden de \$9.900 a \$21.000.
- ✓ Las tarifas a cancelar son variables por lo que se puede generar inconformidades a los transportadores.
- ✓ Es necesario reglamentar el modelo en los contratos de concesión.
- ✓ Se requiere una inversión adicional para la implementación del modelo.

En cuanto a las regresiones calculadas se tiene, con ayuda del software 2R-Soft, la siguiente Figura No. 11, descrita en la ecuación 12, con los parámetros de la Tabla No. 7.12.

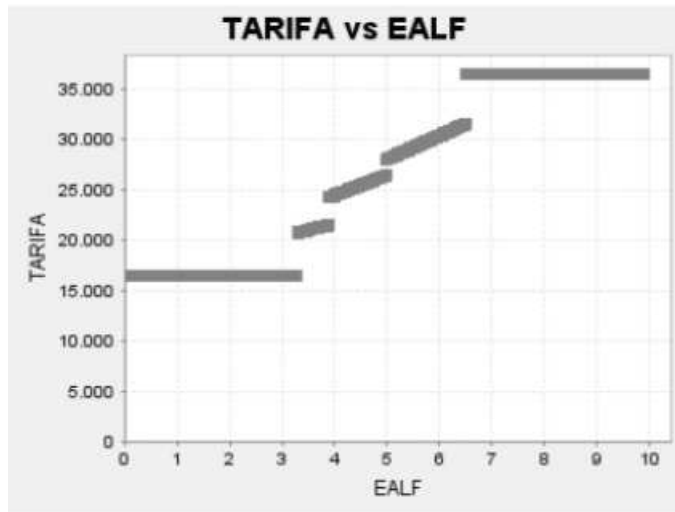


Figura 11 - Regresión Modelo 4.1

$$\text{Tarifa} = a + b * \text{EALF} + c * \text{EALF}^2 + d * \text{EALF}^3 + e * \text{EALF}^4 + f * \text{EALF}^5 \quad (12)$$

R²:0,98224.

Tabla 7.12 Parámetros ecuación 12

Parámetro	Valor
a	16485,62528
b	479,96257
c	-1305,55967
d	697,43651
e	-92,24663
f	3,69825

El R²:0,98224 del modelo 4.1 demuestra que existe correlación entre la tarifa planteada y el factor daño producido al pavimento por los vehículos. Ahora bien, en cuanto a la valoración económica del modelo se tiene que bajo las condiciones planteadas en la Tabla No. 7.11 el recaudo asciende a la suma para un (1) día de NOVENTA Y CINCO MILLONES DOSCIENTOS SESENTA Y TRES MIL CUATROCIENTOS PESOS M/CTE (\$ 95.263.400). En comparación con el valor de recaudo del modelo tarifario actual (\$ 94.237.100), el valor de recaudo en este modelo es un 1,08% mayor.

7.4.2 Modelo 4.2

Este modelo se diferencia del anterior (Modelo 4.1), en que la tarifa base no es constante sino que es función del tipo de vehículo, es decir, entre mayor número de ejes tenga el camión mayor es el incremento aplicado. Así, la ecuación general del modelo (ecuación 13) es:

$$\text{Tarifa} = \text{Tarifa base segun categorias} + \left(\frac{\text{EALF}}{\text{EALF}_{\text{Referencia}}} \right) * \text{Incremento} \quad (13)$$

Vale aclarar que el segundo término de la ecuación se aplica cuando el EALF calculado supere el rango plasmado en la Tabla No. 7.13. También se menciona que las tarifas de partida se escogieron arbitrariamente, sin embargo se trató de que estuvieran en el rango del cobro actual (Modelo 1), así mismo el EALF se seleccionó de los valores más restrictivos de la Tabla No. 5.5 (pesos brutos vehiculares máximos permitidos) por categorías de vehículos (C2, C3, C4, C5 y C6) teniendo la condición que a mayor EALF mayor es la tarifa a cancelar.

Para mayor claridad se tiene que para dos vehículos C3 con EALF=4,72 y 0,12 lo siguiente:

$$\text{Tarifa} = (\$17.000) + \left(\frac{4,72}{5} \right) * \$5.000 = \$21.720 \cong \$21.700$$

Los \$21.700 corresponden a la tarifa redondeada a cancelar por el usuario.

Para el EALF=0,12 se tiene que como éste no supera al Rango – EALF (Tabla No. 7.13), es decir que es menor a 3,3 (C3) y además que no hay incremento, por tanto la tarifa a cancelar por éste C3 es igual a la Tarifa base que corresponde a \$17.000.

La información consolidada del modelo y el rango de tarifas resultantes se muestra a continuación:

Tabla 7.13 – Tarifas Modelo 4.2

Rango - EALF	Categorías	Incremento	Tarifa base - Uso de la vía	Tarifa mínima	Tarifa máxima
EALF<3,9	C2	\$ 4.500	\$ 11.000	\$ 11.000	\$ 16.700
3,3<EALF<5	C3 y C4	\$ 5.000	\$ 17.000	\$ 17.000	\$ 23.500
3,9<EALF<5	C5	\$ 5.000	\$ 22.500	\$ 22.500	\$ 32.400
EALF>6,5	C6	\$ 4.500	\$ 32.000	\$ 32.000	\$ 37.100

Entre las principales ventajas del modelo se tienen:

- ✓ Existe una relación directa entre el daño producido vs.la tarifa cancelada.
- ✓ Las diferencias de tarifa mínima y máxima no superan los \$9.900.
- ✓ Se incentiva el cumplimiento de la Resolución 4100 de diciembre 28 de 2004, expedida por el Ministerio de Transporte de Colombia, modificada por la Resolución 1782 de 2009.
- ✓ Existe un estímulo económico para el concesionario debido a que el daño causado por el vehículo, incluyendo su sobrepeso se verá reflejado en un mayor ingreso que podrá invertirse en labores de operación y mantenimiento del trayecto vial concesionado.
- ✓ Es un modelo justo ya que a mayor ocupación o uso de la vía y mayor daño producido al pavimento mayor es el valor a cancelar por el usuario.

Dentro de las principales desventajas se tienen:

- ✓ Las tarifas a cancelar por los usuarios son muy variables lo que puede generar inconformidades a los usuarios de la vía.
- ✓ Es necesario reglamentar el modelo en los contratos de concesión.
- ✓ Se requiere nuevas tecnologías para la implementación del sistema.
- ✓ En algunas ocasiones dos vehículos que produzcan el mismo daño pagarán diferente por la configuración de ejes, por ejemplo para un EALF=3,9, bajo el modelo un C2 cancelaría \$15.500, mientras que un C3S3 \$32.000.

En cuanto a la regresión calculada con ayuda del software 2R-Soft, se tiene la siguiente Figura No. 12, con la ecuación 14 que la describe y con sus parámetros que se encuentran plasmados en la Tabla No. 7.14.

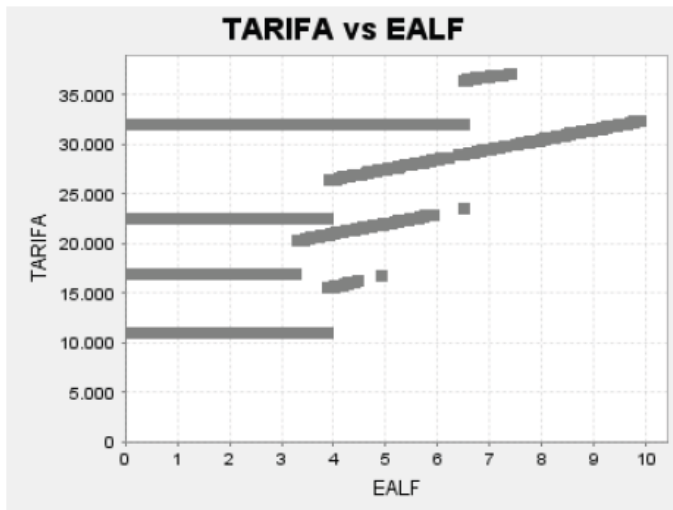


Figura 12 - Regresión Modelo 4.2

$$Tarifa = a + b * EALF^2 + c * 2,71828^{0,5 * EALF} + d * EALF^{-0,5} * Ln(EALF) + e * Ln(EALF) \quad (14)$$

R²:0,56695.

Tabla 7.14 Parámetros ecuación 14

Parámetro	Valor
a	16398,70838
b	832,03264
c	-507,05706
d	503,19393
e	-2863,81077

El valor de R² (0,56695) refleja que existe poca correlación entre el daño producido contra la tarifa cancelada. Esto se debe a que, similar a algunos de los modelos anteriores, la tarifa está controlada por el tipo de vehículo y no exclusivamente por el factor de daño vehicular o EALF. Sin embargo, en cuanto a la valoración económica se tiene que bajo las condiciones de la Tabla No. 7.13 el recaudo es de NOVENTA Y CINCO MILLONES SETECIENTOS SESENTA Y TRES MIL CIEN PESOS M/CTE (**\$ 95.763.100**). Este valor es 1,59% mayor que el modelo tarifario actual – Modelo 1 (\$ 94.237.100).

7.5 VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS MODELOS

Teniendo en cuenta la valoración económica realizada bajo los diferentes escenarios de los modelos, se tiene que con las tarifas asignadas se garantiza como mínimo el recaudo inicial, es decir, el del modelo 1 (columna roja), en síntesis se tiene la siguiente Figura No. 13.

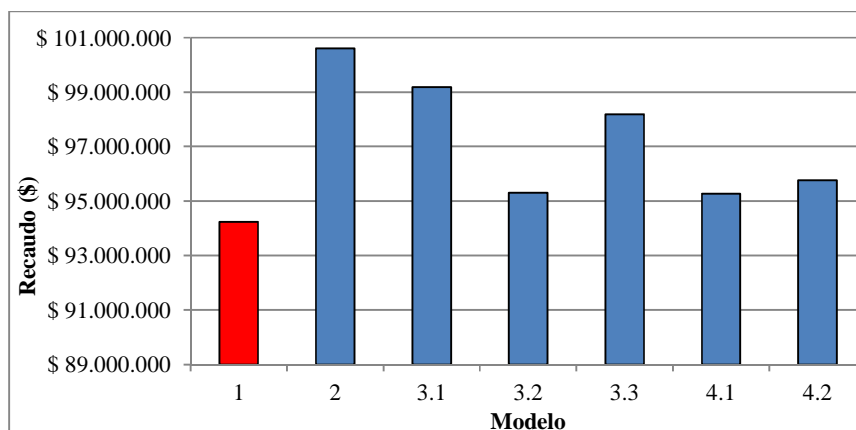


Figura 13 – Valoración económica de los modelos

Como puede observarse, el modelo con mayor y menor recaudo corresponde al 2 y al 4.1, respectivamente. Vale la pena recordar que estos modelos presentan un $R^2= 0,49017$ y $0,98224$ en las regresiones que se realizaron entre la tarifa y el EALF. Ahora bien, en términos de operatividad del sistema, especialmente para el concesionario, se tiene que los modelos más convenientes corresponden al 2 y al 3.3, debido a que se garantiza el recaudo mínimo dado por el modelo actual (Modelo 1) y además en ambos modelos, para cada categoría, se garantizan tan sólo dos (2) tarifas diferentes, las cuales para el modelo 2 no presentan una diferencia mayor a los \$5.000 y para el 3.3 de \$10.000, según lo descrito en las Tablas No. 7.3 y 7.9.

De otra parte, si se evalúa desde el punto de vista del usuario, que para el caso es el operario del camión, se tiene los egresos por pago de peaje que se describen en la Tabla No. 7.15 y que corresponden a las clases de vehículos que transitan en promedio en un 97% por el trayecto vial. Como puede notarse, los menores ingresos en general corresponden a los modelos: 1, 4.1, 3.2, 4.2, 3.3, 3.1 y 2, respectivamente.

Tabla 7.15 – Valoración económica para los usuarios (gastos por concepto de peaje de acuerdo al modelo tarifario)

Categoría	No. Pasos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3.1	Modelo 3.2	Modelo 3.3	Modelo 4.1	Modelo 4.2
C2	1085	\$ 10.416.000	\$ 11.870.000	\$ 20.269.000	\$ 18.489.500	\$ 11.436.000	\$ 19.216.200	\$ 12.414.100
C3	411	\$ 9.247.500	\$ 9.947.100	\$ 9.134.500	\$ 8.719.000	\$ 9.260.600	\$ 8.626.000	\$ 7.872.100
C2S2	223	\$ 5.017.500	\$ 5.048.300	\$ 3.735.900	\$ 3.577.500	\$ 4.405.800	\$ 3.777.300	\$ 3.850.400
C3S2	831	\$ 22.353.900	\$ 23.973.100	\$ 19.881.000	\$ 21.103.000	\$ 26.157.600	\$ 21.047.700	\$ 21.870.200
C3S3	1416	\$ 44.604.000	\$ 47.159.000	\$ 44.685.800	\$ 41.605.000	\$ 44.468.600	\$ 40.692.300	\$ 47.701.000
Total		\$ 91.638.900	\$ 97.997.500	\$ 97.706.200	\$ 93.494.000	\$ 95.728.600	\$ 93.359.500	\$ 93.707.800

De la misma manera, si se compara la afectación económica de cada categoría con el modelo actual (Modelo 1) (gastos actuales vs. gastos esperados en cada modelo) se tiene la Tabla No. 7.16., donde se nota claramente que la categoría más afectada corresponde a la C2, lo cual se debe a que en todos los modelos la tarifa de partida es superior a la cobrada actualmente. Además vale recordar que este vehículo, a pesar de ser pequeño, posee los ejes más agresivos al pavimento, tal como se describió en el subcapítulo 5.1, Tabla No. 5.1. Así mismo, en la Tabla No. 7.16 se muestra que los modelos más beneficiarios para el usuario o camionero corresponden al 4.1 y 3.2 debido a que se presenta una diferencia a favor de lo pagado inicialmente. Sin embargo, dicha diferencia la asume el C2. Ahora bien, éstos modelos en cuanto a su operatividad son un poco complejos debido a que como arriba se mencionó, para ambos las tarifas son muy variables, es decir que un solo camión podría pagar cinco (5), o más, tarifas diferentes dependiendo del EALF calculado, lo cual podría generar inconformidad a los usuarios. También se recuerda, que para el caso del modelo 4.1 se presentan diferencias considerables de la tarifa a cancelar, las cuales están del orden de \$9.900 a \$21.000 y para el modelo 3.2 de hasta \$22.000.

Tabla 7.16 – Afectación económica por categoría para el camionero

Categoría	No. Pasos	Modelo 2	Modelo 3.1	Modelo 3.2	Modelo 3.3	Modelo 4.1	Modelo 4.2
C2	1085	\$ 1.454.000	\$ 9.853.000	\$ 8.073.500	\$ 1.020.000	\$ 8.800.200	\$ 1.998.100
C3	411	\$ 699.600	\$ 113.000	\$ 528.500	\$ 13.100	\$ 621.500	\$ 1.375.400
C2S2	223	\$ 30.800	\$ 1.281.600	\$ 1.440.000	\$ 611.700	\$ 1.240.200	\$ 1.167.100
C3S2	831	\$ 1.619.200	\$ 2.472.900	\$ 1.250.900	\$ 3.803.700	\$ 1.306.200	\$ 483.700
C3S3	1416	\$ 2.555.000	\$ 81.800	\$ 2.999.000	\$ 135.400	\$ 3.911.700	\$ 3.097.000
Total		\$ 6.358.600	\$ 6.067.300	\$ 1.855.100	\$ 4.089.700	\$ 1.720.600	\$ 2.068.900

7.6 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS

En cuanto a la implementación de los modelos tarifarios propuestos, a continuación se plantean brevemente dos alternativas, una que corresponde a la modificación del sistema actual de peajes y otra que contemple la aplicación de nuevas tecnologías.

En cuanto a la adecuación del sistema actual, se contempla que como existen casetas de recaudo de peaje, es decir, que el cobro se realiza manual, el camión necesariamente tiene que parar para realizar el pago, por ello se instalarían básculas estáticas con sensores que identifiquen los tipos de ejes que posee cada vehículo. Además se requiere un software que realice la automatización interna del cálculo del factor daño y, así mismo, lo relacione con la tarifa a cobrar dependiendo del modelo escogido.

Existen tecnologías que se han desarrollado recientemente en el país como por ejemplo el “Telepeaje”, el cual fue implementado por la Concesión Vial de Cartagena, que consiste en que el sistema detecta automáticamente un vehículo que pasa por un carril a través de un dispositivo denominado TAG, para el cual se debe tener una cuenta registrada con dinero donde se pueda debitar instantáneamente el valor de la tarifa, a lo anterior sería necesario la instalación de básculas dinámicas que contengan un software que calcule el factor daño y así mismo relacione junto con el TAG el valor de la tarifa a cancelar por el usuario.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Colombia presenta restricciones flexibles de transporte de carga en cuanto a los máximos pesos brutos vehiculares (PBV) permitidos, debido a que si se compara con países suramericanos como Argentina, Ecuador y Perú, un sólo vehículo, como es el caso del C3S3, puede transitar por las carreteras Colombianas con cuatro (4) toneladas más de lo permitido en dichos países. Esta misma situación se observa cuando se evalúa el peso por eje, ya que, por ejemplo el eje tándem de ocho (8) llantas puede circular con cuatro (4) toneladas más que en países como Argentina, Perú y Paraguay.

Para realizar el análisis del factor daño (EALF) al pavimento fue escogido el día miércoles 31 de julio de 2013 en dos (2) estaciones de pesajes de una Concesión vial de Colombia, donde se presentó un 20% de sobrepeso para los 4076 camiones pesados. De éstos se tiene que los EALF son altamente variables ya que presentan un COV que está del orden del 5% al 135%, lo que indica que un solo vehículo puede producir diferentes daños dependiendo de la carga que transporte y del tipo de eje que éste tenga. El sobrepeso de los diferentes camiones afecta negativamente el número de ciclos a la falla (N_f), lo que se refleja en una reducción del N_f en promedio del 6%, bajo los escenarios planteados, situación que obliga a un control estricto en cuanto al cumplimiento de la Resolución 4100 de 2004 por parte de las autoridades competentes. De la misma manera, los vehículos que circulan con la carga máxima excedida están afectando en gran medida la vida útil del pavimento, situación que repercute en mayores costos de operación y mantenimiento, que debe asumir bien sea el Concesionario o el Estado.

El sistema tarifario de peajes usado en la actualidad no es capaz de capturar el daño que ocasionan los vehículos al trayecto vial por donde transitan, ya que la tarifa depende del número de ejes del vehículo y no del daño ocasionado, lo cual se califica como un modelo poco equilibrado debido a que se está castigando a los camiones grandes, que no son necesariamente quienes generan una mayor agresividad a la estructura del pavimento. Así mismo, con éste modelo no se está recibiendo retribución económica alguna por el mayor daño producido, lo cual es indebido ya que al incrementar el daño se encarecen los costos de operación y mantenimiento del trayecto vial.

En este contexto, se decidió plantear diversos modelos tarifarios que capturen de alguna forma el factor daño producido al pavimento y lo relacione con la tarifa a cancelar por cada vehículo, luego de garantizar que el recaudo por parte del administrador de la vía es igual o superior al de la condición tarifaria actual (Modelo 1).

Los resultados encontrados muestran que desde el punto de vista de la operatividad del sistema, para el concesionario y para el usuario, los Modelos 2 (asignación de tarifas mínimas y máximas por número de ejes y por Rango de EALF según los máximos PBV) y 3.3 (asignación de tarifas máximas y mínimas por categorías: C2, C3 y C4, C5 y C6 y por Rango de EALF según los máximos PBV) son los más adecuados debido a que en ambos, para cada categoría, se garantizan tan sólo dos (2) tarifas, cuya diferencia no superan los \$5.000 y los \$10.000, respectivamente. Por otra parte, se encontró que los Modelos 4.1 (asignación de tarifas partiendo de una tarifa base más un incremento que depende del Rango de EALF calculado para los máximos PBV) y 3.2 (tarifa variable que parte del Rango de EALF calculado para los máximos PBV) son los más apropiados para los usuarios de los camiones: C3, C2S2, C3S2 y C3S3, debido a que existe un ahorro, bajo las condiciones planteadas, en cuanto a lo cancelado inicialmente. Sin

embargo, dicha diferencia la asume el C2 y además la operatividad de dichos modelos son complejos ya que parten de tarifas muy variables donde se pueden presentar diferencias de \$21.000 y \$22.000, para el 4.1 y 3.2 respectivamente, dependiendo de la carga que transporten y por ende del EALF ocasionado.

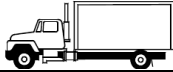
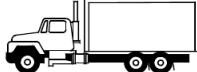
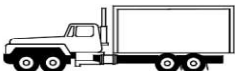




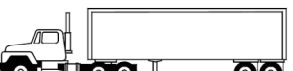


Para futuros estudios se recomienda desarrollar nuevos modelos que equilibren la operatividad del sistema y el beneficio económico a los usuarios, es decir que se garantice el recaudo mínimo y las tarifas de peaje sean beneficiosas para los camioneros. De la misma manera, se sugiere realizar una comparación de la reglamentación de pesos con otros países, con el fin de realizar un análisis mecánico para los máximos pesos brutos vehiculares por ejes y su afectación a la vida de fatiga de los pavimentos y con los resultados que se obtengan, realizar una valoración económica partiendo de los costos mensuales de operación y mantenimiento del trayecto vial.

Finalmente, se concluye que sería de gran beneficio para la ejecución de estudios de esta naturaleza que las Concesiones viales realicen un control de pesaje por ejes y no sólo de peso total del vehículo. Esto además permitiría avanzar en la consecución de información de carga confiable que se podría implementar en los diseños mecanicistas del país y, simultáneamente, permitiría realizar controles a la Resolución 4100 de 2004 y a la agresividad ocasionada por cada vehículo.

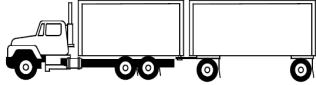


9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Sánchez F. (2009). Introducción a la guía AASHTO de diseño empírico – mecánico de pavimentos. *Escuela Colombiana de Ingeniería*. Colombia.
- Ministerio de Transporte. Resolución 4100 de diciembre 28 de 2004. Bogotá D.C.
- Ministerio de Transporte. Resolución 1782 del 8 de mayo de 2009. Bogotá D.C.
- Huang Yang H. (2002). Pavement analysis and design. Second edition. Chapter 3. Page 94 – 146.
- Caro S. (2012). Clasificación y modelación del tráfico – Modelación y comportamiento de pavimentos. Universidad de los Andes. Colombia.
- Decreto Supremo N° 058-2003-MTC, 2003. Reglamento Nacional de Vehículos. Perú.
- Dirección Nacional de Viabilidad. Transporte de carga y Pesos máximos por eje permitidos para los vehículos. Argentina.
- Registro Oficial No. 717. 2012. Distribución máxima de carga por eje. Ecuador.
- Resolución No. 1762. Normativa sobre pesos y dimensiones vehiculares – MOPC. Paraguay.
- Troncoso. 2011. Evaluación del espectro de carga y coeficientes de daño en el corredor de la Avenida Boyacá, Bogotá D.C. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia.
- Contrato Interadministrativo No. 020 de 2008. Concepto No. 10 – Espectros de Carga. Instituto de Desarrollo Urbano – IDU. Universidad Nacional de Colombia.
- Macea, Fuentes y Álvarez. 2013. Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana. Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia No. 66 Pág. 57 – 69.
- Descripción de capacidad y pesos brutos máximos por camión. 2010. Schenker. Expressglobal.
- Concesionaria Ruta del Sol S.A.S. Estaciones de peaje. 2013.
- Concesión Sabana de Occidente – Autopista Bogotá – Villeta. Tarifas 2013.
- Concesión CCFC S.A. Vía Bogotá (Fontibón) – Facatativá – Los Alpes. Tarifas año 2013.
- Agencia Nacional de Infraestructura. Concesión vial Briceño – Tunja – Sogamoso. Malla vial del Meta. Concesión vial Patios – La Calera – Guasca. Peajes. 2013.
- Concesión San Rafael. Tarifas 2013.
- Autopista del Café S.A. Peajes. 2013.
- Concesión Devimed. Autopista Medellín – Puerto Triunfo. Tarifas 2013.
- Concesión vial de Cartagena S.A. Telepeajes.

ANEXO 1

Categoría	Configuración	Eje Simple	Eje Simple dual	Eje Simple dual	Eje Simple dual	Eje Tándem	Eje Tándem	Eje Trídem
2		35%	65%	-	-	-	-	-
3		21%	-	-	-	79%	-	-
4		16%	31%	-	-	53%	-	-
2S1		19%	41%	41%	-	-	-	-
2S2		16%	31%	-	-	53%	-	-
2S3		15%	27%	-	-	-	-	58%
3S1		18%	34%	-	-	48%	-	-
3S2		10%	-	-	-	45%	45%	-
3S3		12%	-	-	-	42%	-	46%
2R2		19%	29%	26%	26%	-	-	-

Evaluación de tarifas de peaje por factor daño al pavimento

Categoría	Configuración	Eje Simple	Eje Simple dual	Eje Simple dual	Eje Simple dual	Eje Tándem	Eje Tándem	Eje Trídem
3R2		14%	23%	23%	40%	-	-	-
2B1		19%	41%	41%		-	-	-
2B2		16%	31%	-	-	53%	-	-