

Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana

Evaluation of truck factors for cargo commercial vehicles that circulate on the colombian's primary road network

*Luis F. Macea¹, Luis G. Fuentes*¹, Alex E. Alvarez²*

¹ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte. Km. 5 Vía Puerto Colombia. Barranquilla, Colombia.

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad del Magdalena. Carrera 32 No 22-08. Santa Marta, Colombia.

(Recibido el 26 de septiembre de 2012. Aceptado el 9 de febrero de 2013)

Resumen

La estimación del tránsito es uno de los aspectos más importantes en el análisis y diseño estructural de pavimentos y para su adecuada determinación se hace necesario disponer de valores de factor camión actualizados. En el presente estudio se evaluaron los factores camión de los vehículos comerciales de carga de la red vial primaria de Colombia. Con este objetivo, en el año 2011 se realizaron treinta y ocho operativos móviles de pesaje de ejes en carretera, localizados en distintos puntos estratégicos de la red vial nacional. Como resultado se obtuvo, a través de procedimientos estadísticos, factores camión actualizados y representativos para cada tipo de camión que circula en las vías analizadas. Estos factores camión podrían ser utilizados en el diseño de tramos carreteros con características socioeconómicas similares a aquellas de las vías evaluadas. De igual forma, se encontró que a nivel nacional la flota vehicular de carga está compuesta por los camiones tipo C3-S3, C2, C3-S2, C3 y C2-S2 con una distribución del 36%, 35%, 13%, 11% y 5%, respectivamente. Adicionalmente, se observó que los camiones C3 y C3-S3 son los que mayor daño le causan a la infraestructura vial colombiana, ya que se encuentran circulando excesivamente sobrecargados en algunos tramos departamentales del país.

----- *Palabras clave:* factor de equivalencia de carga, factor camión, ejes, cargas de tránsito, daño, pavimento

* Autor de correspondencia. teléfono: 57 + 5 + 3509509 ext. 4236, fax: 57 + 5 + 4301292, correo electrónico: lfuentes@uninorte.edu.co (L. Fuentes)

Abstract

Traffic estimation is one of the most important aspects in the analysis and structural design of pavements and its adequate determination requires updated values of truck factors. This study aimed to evaluate the truck factors for cargo commercial vehicles operating in the Colombian's primary road network. For this purpose, in 2011, thirty-eight mobile weigh stations were positioned on different strategic points of the national road network to characterize the traffic loads. Based on statistical procedures, updated truck factors were obtained for each type of truck circulating on the roads analyzed. These truck factors can be used for design of road sectors with socioeconomic characteristics similar to those of the roads evaluated. It was found that the type of vehicles that circulate more along the national roads are: C3-S3, C2, C3-S2, C3, and C2-S2, with a distribution of 36%, 35%, 13%, 11%, and 5 %, respectively. Finally, it was observed that the C3 and C3-S3 trucks are the ones causing more damage to the road infrastructure in Colombia taking into account that these vehicles are circulating overloaded in some portions of the road network.

----- **Keywords:** load equivalency factor, truck factor, axles, traffic loads, damage, pavement

Introducción

El estado colombiano en su visión de fortalecer al máximo su desarrollo social y económico, ha venido realizando acuerdos comerciales importantes con diferentes naciones del mundo desde 1969. Entre estos acuerdos se pueden mencionar: el Pacto Andino de Naciones, el grupo de los tres (G-3), acuerdos con la Organización Mundial del Comercio, Acuerdo CAN-Mercosur, y recientemente el tratado de libre comercio con Estados Unidos (TLC), entre otros. Estos acuerdos han potencializado el transporte de carga que se moviliza por las carreteras del territorio nacional, lo que ha traído como consecuencia un incremento gradual, pero significativo, en la magnitud y frecuencia de las cargas transmitidas por los vehículos comerciales de carga a las estructuras de pavimento, lo que puede traducirse en un deterioro acelerado de tales estructuras.

En consecuencia, es relevante caracterizar adecuadamente el tráfico de carga incluyendo la determinación de factores camión actualizado que den cuenta de los efectos progresivos del incremento de cargas pesadas en las vías como resultado de los avances en materia de intercambio

comercial y actualización del parque automotor nacional. Consecuentemente, el presente trabajo de investigación provee una base de información fidedigna y actualizada para la caracterización del tránsito vehicular (i.e., factores camión) con fines de diseño estructural de pavimentos asfálticos. Para este fin, se determinaron los factores camión de la flota vehicular colombiana (i.e., transporte de carga) para distintas vías del territorio nacional, empleando una base de datos suministrada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) obtenida a partir de 38 operativos móviles de pesaje de ejes vehiculares en carretera ejecutados en el año 2011. Los operativos de pesaje se llevaron a cabo en distintos puntos estratégicos de la red vial nacional, involucrando diecisiete de los treinta y dos departamentos—correspondientes a aquellos de mayor desarrollo económico y volúmenes de tránsito— y cuatro de las cinco regiones que componen el territorio Colombiano.

Antecedentes

Varios expertos a nivel internacional han desarrollado investigaciones encaminadas a estudiar el daño producido a los pavimentos a partir de

las distintas configuraciones de ejes y camiones que generan las cargas de tránsito [1 - 4]. Salama et al. [1] indicaron que el ahuellamiento en pavimentos asfálticos (o flexibles) es producido mayormente por los ejes tridem de vehículos con altos niveles de carga, mientras que los agrietamientos (i.e., daño por fatiga) son generados principalmente por el efecto de los ejes tándem y simples de camiones pesados. Estas conclusiones fueron corroboradas por Prozzi y Hong [2], Chatti et al. [3] y Troncoso Rivera [4], al indicar que los ejes simples y tándem son los que generan los mayores efectos de fatiga en las estructuras de pavimento flexible.

En ese sentido, autores como Jeongho et al. [5] indicaron que el potencial de deterioro acelerado sobre el pavimento se debe principalmente al uso de camiones con sobrepeso, situación que según Wang et al. [6] es la principal causa de los agrietamientos longitudinales. Por otro lado, también se han llevado a cabo estudios orientados a examinar los efectos del incremento de cargas máximas legales de vehículos comerciales en el deterioro producido a las estructuras de pavimento [7, 8]. Según Omar et al. [7], un incremento de entre 17 y 36% en los límites de carga por eje de camiones repercute en un aumento en el factor camión de un 200%, lo que a su vez se vio reflejado en este estudio particular en un incremento del número de ejes simples equivalentes de 8,2 toneladas del 75 al 136%. Por su parte El Sharkawy et al. [8] demostraron que los daños por fatiga y ahuellamiento propiciados a las estructuras de pavimen-

to son sensibles a sobreesfuerzos generados por vehículos sobrecargados.

De otro lado, Ulloa et al. [9] indicaron que los factores camión para países desarrollados son bajos en comparación con los encontrados en países en vía de desarrollo, y que es necesario contar con valores de factor camión específicos por zona; dado que las características de cada región condicionan la solicitud de cargas que se le imponen a los pavimentos. Posteriormente, Casprowitz-Arias [10] indicó que el factor de equivalencia de carga (*FEC*) para ejes simples es similar al de los ejes tándem y más alto que para los ejes tridem, lo cual indica que los ejes simples generan más daño sobre la estructura del pavimento, debido comúnmente a la concentración de esfuerzos en la poca área de contacto entre el pavimento y los neumáticos. Finalmente esta investigación [10] estableció que entre mayores sean los valores de factor camión, mayores serán los efectos de pérdida de serviciabilidad, aspecto que se asocia con deterioro estructural acelerado del pavimento.

Metodología de cálculo

Para el desarrollo de la presente investigación se realizaron 38 operativos de pesaje móvil de camiones ubicados estratégicamente en diferentes tramos viales de movimiento de carga. De esta forma, los operativos de pesaje involucraron diecisiete departamentos y cuatro de las cinco regiones de Colombia según se especifica en la figura 1 y la tabla 1.

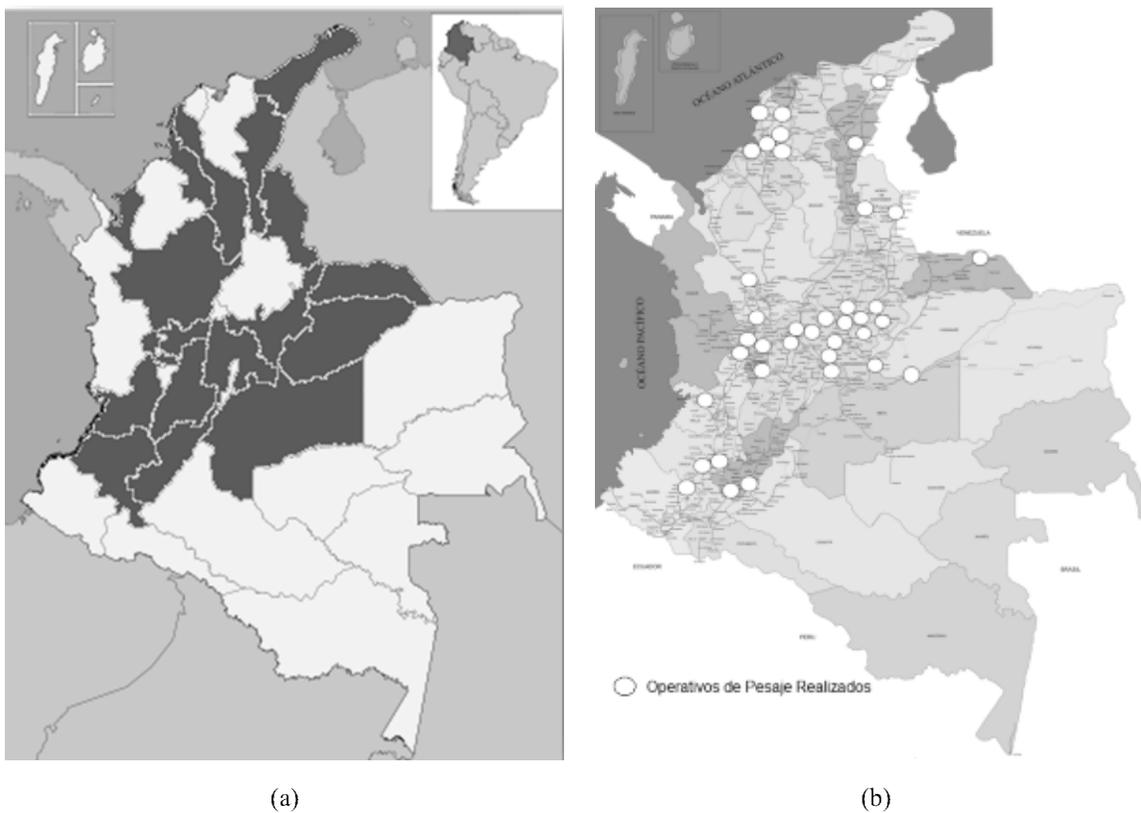


Figura 1 Departamentos considerados en la investigación (a) y ubicación geográfica de los operativos de pesaje (b)

Tabla 1 Tramos viales de los operativos de pesaje realizados

<i>Operativo</i>		<i>No de camiones</i>
Cauya	La Pintada	3.795
Medellin	Sta Fe de Antioquia	700
Tame	Arauca	182
Carmen de Bolívar	Zambrano	2.196
Carreto	Ponedera	1.270
Magangué	Puerta de Hierro	633
Mamonal	Gambote	4.211
Barbosa	Arcabuco	1.744
Tunja	Arcabuco	1.822
Chiquinquirá	Tunja	201
Duitama	La Palmera	681

<i>Operativo</i>		<i>No de camiones</i>
Otanche	Chiquinquirá	129
Sogamoso	El Crucero	739
Tunja	Páez	141
Cerritos	Cauya	375
Chinchiná	Manizales	848
Barranca de Upía	Monterrey	1.895
Mojarras	Higuerones	525
Mojarras	Popayan	1.752
Popayan	Patico	610
San Roque	La Paz	3.072
Zipacquirá	Briceño	3.229
Portal	El Antojito	986
Salitre	Briceño	1.502

<i>Operativo</i>		<i>No de camiones</i>
Yacopí	La Palma	46
Buenavista	Maicao	1.348
Orropihuasi	El Vergel	1.107
San Juan de Villalobos	Pitalito	698
Puerto Gaitán	Puerto López	2.284
Cúcuta	Puerto Santander	1.077
Ocaña	Alto del Pozo	869
La Virginia	Apia	986
Sincelejo	Tolú	665
Tolu Viejo	Cruz del Viso	1.099
Ibagué	Armenia	3.855
Honda	Dorada	4.993
Honda	Mariquita	4.975
Loboguerrero	Buenaventura	2.382

Cada operativo de pesaje se llevó a cabo durante 7 días calendario, con una intensidad de 24 horas por día, donde se pesaron de forma estática todos los ejes de los camiones que circulaban en un solo sentido (figura 2). A partir de los operativos realizados se obtuvo una muestra de 59.622 camiones pesados, correspondientes a 151.736 ejes de distintas configuraciones de camiones entre los distintos departamentos del país. En la tabla 2 se indican la cantidad de cada tipo de eje, pesados por departamento.



(a)

(b)

Figura 2 Operativo Carreto-Ponedera (Bolívar) (a) y Barranca de Upia-Monterrey (Casanare) (b)

Tabla 2 Cantidad de ejes por tipo y departamentos de Colombia

<i>Departamento</i>	<i>Cantidad de ejes por departamento</i>								
	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>T4</i>	<i>T5</i>	<i>T6</i>	<i>T7</i>	<i>T8</i>	<i>T9</i>
Antioquia	4.456	19	2.334	20	0	2.836	1.342	0	0
Arauca	180	2	134	0	0	50	17	0	0
Bolívar	8.267	29	3.292	14	0	7.035	3.371	0	0

Departamento	Cantidad de ejes por departamento								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Boyacá	5.417	3	2.318	37	0	3.435	2.361	0	0
Caldas	1.223	0	1119	0	0	117	69	0	0
Casanare	1.890	1	240	4	0	2.691	354	0	0
Cauca	2.885	0	1.835	0	0	1.172	494	0	0
Cesar	3.077	0	523	0	0	2.658	2.458	7	0
Cundinamarca	5.684	4	2.557	75	0	3.537	1.143	0	0
Guajira	1.345	2	447	0	0	954	803	0	0
Huila	1.799	1	1.120	5	0	819	254	0	0
Meta	2.419	8	229	3	0	3.271	545	0	0
Norte de Santander	1.944	2	984	0	0	1131	488	0	0
Risaralda	984	0	658	2	0	367	106	0	0
Sucre	1.750	9	1.065	5	0	1.061	356	0	0
Tolima	13.794	57	4.700	51	0	12.487	5.838	49	0
Valle del Cauca	2.372	5	475	5	0	2.717	1.459	0	0

T1: eje sencillo llanta sencilla direccional; T2: eje sencillo llanta sencilla trasera; T3: eje sencillo llanta doble; T4: eje tandem llanta sencilla; T5: eje tandem llanta mixta; T6: eje tandem llanta doble; T7: eje tridem llanta doble; T8: eje tridem llanta mixta; T9: eje tridem llanta sencilla.

En el análisis realizado se utilizó la Ecuación (1), propuesta inicialmente por Deacon (1969) [11,12], para el cálculo del *FEC* por eje.

$$FEC = \left(\frac{x_i}{L_s}\right)^m \quad (1)$$

Donde x_i es el peso del eje en toneladas, L_s es la carga equivalente de referencia sobre un eje estándar con el mismo número de ejes que el eje de peso x_i . Para el exponente m se adoptó un valor igual a 4 a partir de lo obtenido en el “AASHTO ROAD TEST”, donde se pudo establecer que el efecto de cada carga por eje en los pavimentos flexibles se puede estimar aproximadamente según “la ley de la cuarta potencia” [11, 12]. En el presente estudio se utilizaron las cargas equivalentes de referencia (L_s) estipuladas en la tabla 3, que corresponden a las adoptadas por el INVIAS [13] para los diferentes tipos de ejes de camiones con propósitos de evaluación y diseño de pavimentos asfálticos

[13,14]. Cada una de estas cargas da lugar a un *FEC* por tipo de eje (i.e., ecuación 1; tabla 3) expresado en términos del eje de referencia-eje simple de rueda doble de 80 kN (8.2 t) [13].

Tabla 3 Valores de carga equivalente de referencia (L_s)

Tipo de eje	Carga equivalente de referencia (L_s)
Eje simple de llanta simple	6,6 toneladas
Eje simple de llanta doble	8,2 toneladas
Eje tandem de llanta doble	15 toneladas
Eje tridem de llanta doble	23 toneladas

Para los vehículos evaluados en cada punto de pesaje, se determinó el factor camión (*FC*) a través de la sumatoria de los *FEC* de sus respectivos ejes (FEC_i) [11], tal como se presenta en la Ecuación (2):

$$FC = \sum_{i=1}^n FEC_i \quad (2)$$

Donde n es el número de ejes de la configuración del vehículo comercial de carga.

Posteriormente se agruparon los factores camión obtenidos a través de una media ponderada por tipo de vehículo comercial, generando así, los valores de factor camión representativos para vías con condiciones socioeconómicas y de tránsito semejantes a las evaluadas (figura 1, tabla 1).

Resultados y análisis

Esta sección presenta los resultados obtenidos en términos de: (i) factores camión calculados, (ii) evolución histórica de los factores camión a nivel

nacional, (iii) factores camión de vías representativas por departamentos, y (iv) factores camión en departamentos con altas tasas de sobrecarga.

Factores camión calculados

Según los resultados obtenidos a nivel nacional, del total de la muestra analizada el 99% corresponde a los vehículos tipo: C3-S3, C2G, C3-S2, C3 y C2-S2, siendo predominantes los C3-S3 y los C2 con un 36% y 35%, respectivamente. La tabla 4 resume los factores camión calculados, agrupados a nivel nacional por tipo de vehículo comercial de carga, reportados previamente por INVIAS en 1996 (FC-1996) y 2003 (FC-2003) [13] y aquellos calculados en la presente investigación (FC-2012).

Tabla 4 Factores Camión a Nivel Nacional

<i>Tipo de camión</i>	<i>FC-1996 (INVIAS)</i>	<i>FC-2003 (INVIAS)</i>	<i>FC-2012</i>
C2	3,44	2,15	2,29
C3	3,76	3,15	3,91
C2-S2	3,42	2,27	2,44
C3-S2	4,4	4,21	3,66
C3-S3	4,72	5,31	4,46

FC = factor camión.

En la actualidad, los factores camión reportados por INVIAS son utilizados comúnmente en el análisis de cargas de tránsito para el diseño estructural de pavimentos. No obstante, según se discute posteriormente, el uso de los factores camión agrupados a nivel nacional reportados en la presente investigación (i.e., FC-2012; tabla 4) debe realizarse con cautela para propósitos de diseño estructural de pavimentos. El uso de estos factores camión (i.e., tabla 4) podría por un lado subestimar los efectos dañinos de los camiones que circulan excesivamente sobrecargados por algunos tramos viales del país, lo cual puede repercutir en menores tiempos de vida útil de las estructuras de pavimento. Por otro lado, se podría sobreestimar el efecto de las cargas

sobre los pavimentos de algunas regiones y departamentos que presentan menores índices de carga, lo cual generaría como consecuencia mayores espesores de diseño de los pavimentos y por ende sobrecostos en la construcción de estas estructuras.

Evolución histórica de los factores camión a nivel nacional

Para cada uno de los tipos de camión analizados, la media muestral de los factores camión 2012 (tabla 4) y la media muestral obtenida por INVIAS en el 2003 (tabla 4) fueron analizadas a partir de prueba de hipótesis. En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en esta prueba de hipótesis.

Tabla 5 Resultados de Prueba de Hipótesis para Factores Camión

Estadístico	FC C2	FC C3	FC C2-S2	FC C3-S2	FC C3-S3
Cantidad (n) =	38	38	28	35	33
Promedio (X) =	2,29	3,91	2,44	3,66	4,46
Desv Estandar (s) =	0,98	4,58	1,69	1,98	2,36
Media Poblacional (μ) =	2,15	3,15	2,27	4,21	5,31
H0 =	$\mu = 2,15$	$\mu = 3,15$	$\mu = 2,27$	$\mu = 4,21$	$\mu = 5,31$
H1 =	$\mu > 2,15$	$\mu > 3,15$	$\mu > 2,27$	$\mu < 4,21$	$\mu < 5,31$
Z	0,86	1,03	0,54	-1,63	-2,06
P-valor =	0,19	0,15	0,30	0,05	0,02
P-valor (%) =	19%	15%	30%	5%	2%

FC = factor camión.

Los resultados indicados en la tabla 5 sugieren que los factores camión promedio obtenidos en 2012 para los vehículos tipo C2, C3 y C2-S2 presentan magnitudes mayores que las reportadas por el INVIAS en el 2003 para el diseño de pavimentos a nivel nacional [13]. Sin embargo, en la evaluación de dicha hipótesis se obtuvieron indicadores de P-valor de 19%, 15% y 30% para los camiones tipo C2, C3 y C2-S2, respectivamente. Estos resultados indican que existen pocas evidencias que permitan rechazar estadísticamente, con un nivel de confianza del 95%, la hipótesis de que la media poblacional de los factores camión para dichos vehículos a nivel nacional se ha reducido en el tiempo.

Por el contrario, los factores camión promedio encontrados en 2012 para los camiones tipo C3-S2 y C3-S3 registraron magnitudes menores que las publicadas por INVIAS en el 2003 [13]. Para estos tipos de camión se obtuvieron indicadores de

P-valor del 5% y 2%, respectivamente (tabla 5), aspecto que muestra una significancia estadística a un nivel del 5% en la comparación de los factores camión obtenidos para dichos tipos de vehículo.

Factores camión de vías representativas por departamento

Según investigación previa realizada en Costa Rica [9], es recomendable contar con valores de factor camión específicos para diferentes zonas de un país dado que las solicitudes de carga que se le impone a la infraestructura dependen de las características de la región que asiste. En vista de lo anterior, en la tabla 6 se presentan los factores camión agrupados por departamentos, los cuales pueden ser usados con fines de diseño de pavimentos en los tramos carreteros de los departamentos considerados en el estudio que poseen condiciones socioeconómicas y de tránsito semejantes a las de las vías analizadas.

Tabla 6 Factores camión de vías representativas por departamentos

Departamento	FC C2	FC C3	FC C2-S2	FC C3-S2	FC C3-S3
Antioquia	2,26	2,68	5,06	2,63	4,75
Arauca	1,35	1,63	ND	0,52	1,40
Bolívar	1,88	2,53	2,22	2,49	3,05
Boyacá	2,45	2,71	1,51	3,68	4,21

Departamento	FC C2	FC C3	FC C2-S2	FC C3-S2	FC C3-S3
Caldas	2,17	4,90	3,31	6,22	5,11
Casanare	3,10	3,43	1,11	4,52	4,14
Cauca	2,62	3,43	1,28	2,93	5,48
Cesar	2,81	29,47	2,72	3,77	14,55
Cundinamarca	2,41	4,32	2,03	3,30	2,32
Guajira	1,34	1,36	3,22	3,29	6,36
Huila	2,23	2,95	3,00	5,29	4,57
Meta	0,54	0,65	0,35	6,90	3,79
N de Santander	3,14	4,20	1,82	5,83	3,71
Risaralda	1,17	2,94	1,42	3,14	2,42
Sucre	2,80	2,87	5,18	3,68	5,78
Tolima	1,71	2,95	2,03	2,78	3,95
Valle	4,15	8,58	2,33	5,60	5,77

FC = factor camión; ND = No disponible.

Los resultados de la tabla 6 ponen de manifiesto las diferencias en factores camión que se presentan en los vehículos que circulan localmente por los pavimentos de algunos tramos carreteros importantes, pertenecientes a los departamentos analizados en el país. De especial atención es el caso del Cesar y del Valle del Cauca, departamentos que evidencian claramente que al desagregar los factores camión obtenidos a nivel nacional (tabla 4) se obtienen variaciones importantes. Para estos casos, las mayores diferencias—nacional versus departamental—se presentan en los factores camión de los vehículos tipo C3 y C3-S3.

De igual forma, los factores camión obtenidos para algunas vías representativas por departamentos brindan una visión panorámica del nivel de externalidades negativas que sufre cada sección territorial en relación con el daño en la infraestructura vial. Esta información puede permitir a las autoridades gubernamentales locales, departamentales y nacionales, planificadores de transporte, diseñadores de sistemas logísticos, etc., tomar decisiones ajustadas, implementar políticas de mantenimiento para las estructuras de pavimento, así como evaluar políticas de plani-

ficación de redes que contribuyan hacia la prestación de un mejor servicio en las carreteras del país.

Factores camión de vías representativas en departamentos con altas tasas de sobrecarga

La tabla 7 presenta la frecuencia de vehículos multados por violación de los límites máximos de carga permitidos en Colombia [15] discriminados según el tipo de vehículo. Las vías analizadas en los departamentos de Cesar, Caldas, Guajira y Norte de Santander presentan las mayores proporciones en el país de vehículos multados por sobrecarga. Adicionalmente, los resultados obtenidos permitieron concluir que departamentos que poseen una alta frecuencia de sanciones por violación de los límites máximos de carga tienden a exhibir factores camión elevados. Por ejemplo, los altos valores de factor camión calculados para las vías analizadas en el departamento del Cesar (tabla 6) coinciden con la alta frecuencia de sanciones 61% del total aplicado por efectos de sobrecarga en los departamentos incluidos en el estudio reportadas para este departamento (figura 3).

Tabla 7 Número de vehículos pesados por tipo y frecuencia de multas

Departamento	No vehículos pesados por tipo					Frecuencia de vehículos multados por tipo (%)				
	C2	C3	C2-S2	C3-S2	C3-S3	C2	C3	C2-S2	C3-S2	C3-S3
Antioquia	2.025	433	278	391	1.323	2%	2%	0%	0%	1%
Arauca	132	31	0	2	15	1%	0%	0%	0%	0%
Bolívar	2.312	596	941	1.057	3.356	2%	4%	0%	0%	1%
Boyacá	2.259	504	53	240	2.359	3%	2%	0%	0%	2%
Caldas	1.117	24	2	11	69	2%	8%	50%	18%	1%
Casanare	209	292	30	1.006	353	5%	2%	0%	0%	1%
Cauca	1.811	460	22	97	494	1%	3%	0%	0%	1%
Cesar	319	180	16	91	2.457	6%	78%	0%	1%	73%
Cundinamarca	2.507	1.706	45	286	1.140	7%	5%	0%	0%	0%
Guajira	430	61	15	38	802	3%	3%	7%	3%	28%
Huila	1.102	312	16	118	255	2%	2%	0%	1%	2%
Meta	190	261	14	1.184	545	1%	0%	0%	0%	1%
N de Santander	952	337	28	139	487	8%	9%	0%	1%	4%
Risaralda	640	199	16	22	106	1%	2%	6%	5%	2%
Sucre	847	194	192	160	348	2%	1%	2%	0%	1%
Tolima	3.796	708	825	2.531	5.818	1%	1%	0%	0%	1%
Valle	77	31	388	416	1.458	4%	6%	0%	1%	2%

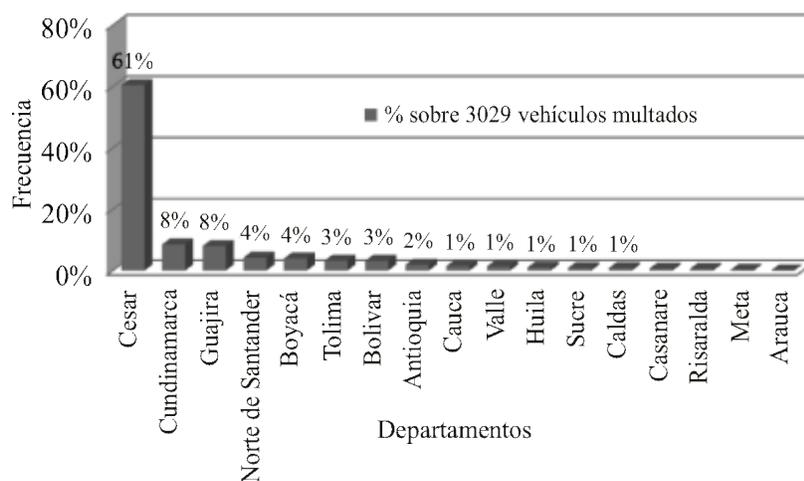


Figura 3 Vehículos multados por departamento

Adicionalmente, las sanciones generadas en el departamento del Cesar por efectos de sobrecarga pertenecen mayoritariamente a camiones tipo C3 y C3-S3 (ver figura 4), lo cual se encuentra en

concordancia con los factores camión registrados para estos tipos de vehículo en las vías analizadas en el departamento del Cesar, tal como se muestra en la figura 5.

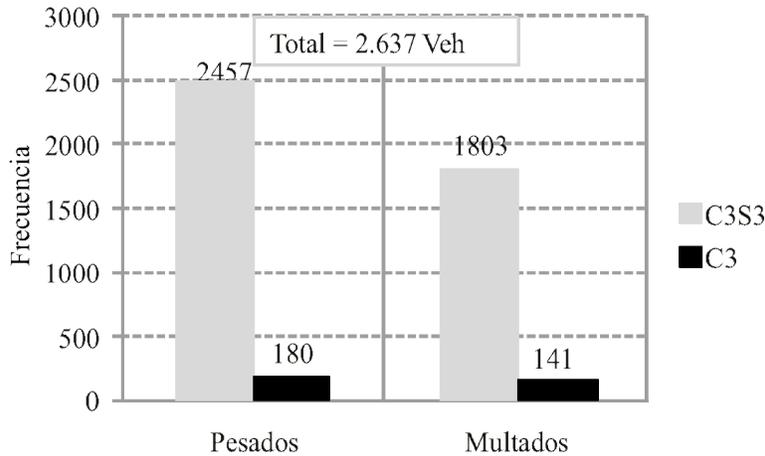


Figura 4 Vehículos tipo C3 y C3-S3 pesados y multados en el departamento del Cesar

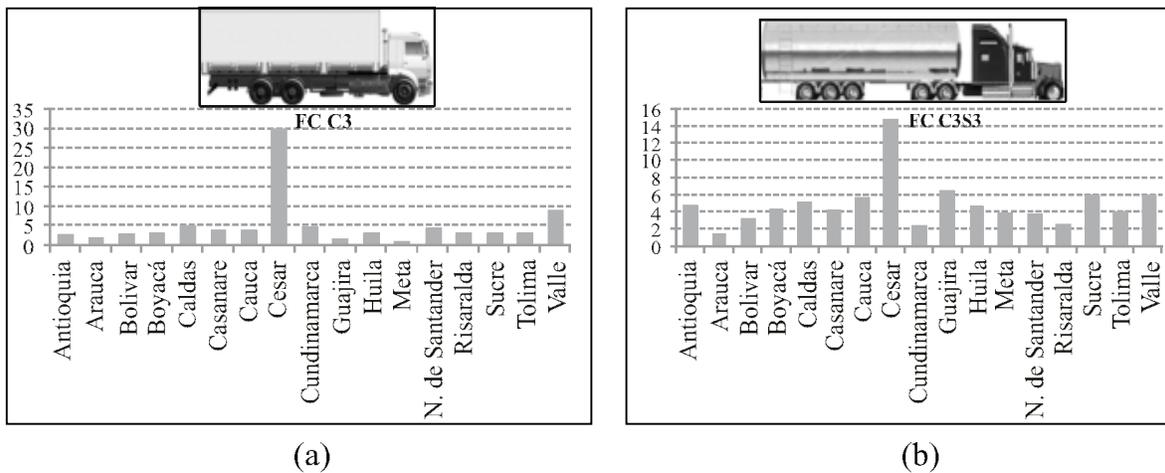


Figura 5 Factores camión por departamentos para los vehículos C3 y C3-S3

Es relevante mencionar que los factores camión obtenidos para los camiones tipo C3 (tablas 4 y 6) se encuentran en concordancia con los reportados en Egipto—donde los factores camión fueron de 20,7—por Omar et al. [7] para camiones C3 con un 25% de sobrecarga. Consistentemente, los datos reportados en las tablas 4 y 6 indican que los camiones tipo C3 están circulando sobrecargados por las vías evaluadas en los departamentos de Cesar, Caldas, Norte de Santander y Valle del Cauca. Esta situación, contrarrestada con las

conclusiones de investigación previa [10], revela que es de esperar la generación anticipada de daños estructurales sobre los pavimentos de las vías analizadas en estos departamentos. Estas conclusiones también fueron corroboradas por Salama et al. [1], Prozzi et al. [2] y Chatti et al. [3], ya que según estos investigadores, los ejes simples y tándem son los que generan los mayores efectos de fatiga y por ende de agrietamiento en las estructuras de pavimento.

En relación al vehículo tipo C3-S3, los resultados indican que éste tipo de camión debido a sus características de capacidad, es el que mayor carga transita por las carreteras del país causando el mayor potencial de deterioro en términos de ahuellamiento. Esta conclusión es soportada por investigaciones realizadas por El Sharkawy et al. [8] y corroboradas por Salama et al. [1] y Zhang et al. [16], según las cuales el ahuellamiento en pavimentos asfálticos es producido mayormente por los ejes tridem de vehículos con altos niveles de carga. Los resultados encontrados en ésta investigación para los vehículos tipo C3-S3, también se encuentran en concordancia con los obtenidos en Egipto por Omar et al. [7] (i.e., factor camión de 13,2) para camiones de éste tipo con un 25% de sobrecarga.

Conclusiones

Como resultado del desarrollo del presente estudio, tendiente a suministrar factores camión actualizados para el análisis y diseño de pavimentos asfálticos en vías con condiciones socioeconómicas y de tránsito semejantes a las analizadas en el desarrollo de la presente investigación en Colombia, fue posible establecer las siguientes conclusiones:

El parque automotor de vehículos comerciales de carga en Colombia está compuesto principalmente por camiones tipo C3-S3, C2, C3-S2, C3 y C2-S2 con una distribución del 36%, 35%, 13%, 11% y 5% respectivamente, evidenciándose como camiones predominantes los tipo C3-S3 y C2.

Los factores camión promedio obtenidos para los vehículos tipo C2, C3 y C2-S2, presentan magnitudes mayores que las registradas en estudios realizados por el INVIAS en 2003 para el diseño de pavimentos a nivel nacional. No obstante, la comparación estadística de los factores camión encontrados en la presente investigación con los suministrados por INVIAS en 2003 para los camiones tipo C2, C3 y C2-S2 indica que existe un bajo nivel de confianza a

favor de que la media poblacional de los factores camión para dichos tipos de vehículo haya aumentado entre 2003 y 2011.

Los factores camión promedio encontrados en ésta investigación para los vehículos tipo C3-S2 y C3-S3 registraron magnitudes menores a las publicadas por INVIAS en el 2003. El análisis estadístico realizado mostró una significancia estadística a un nivel del 5% a favor de que la media poblacional de los factores camión para los vehículos tipo C3-S2 y C3-S3 ha disminuido en el tiempo.

Los resultados obtenidos sugieren además que no es recomendable trabajar con factores camión a nivel nacional para el diseño de pavimentos. La unificación de los factores camión a nivel del país, puede generar desfases en los diseños realizados que pueden repercutir en deterioros acelerados de las estructuras de pavimento ó en sobrecostos de los mismos, debido principalmente a subestimaciones ó sobreestimaciones de los factores camión utilizados para algunos departamentos y regiones del país.

A partir de los factores camión obtenidos para los vehículos tipo C3 y C3-S3 en las vías analizadas en el departamento del Cesar, se puede concluir que éstos tipos de camión se encuentran circulando excesivamente sobrecargados en dicho departamento. De igual forma se concluye que éstos vehículos, debido a los factores camión registrados, están generando un deterioro acelerado en las estructuras de pavimento en términos de fatiga y ahuellamiento.

Finalmente se recomienda la ejecución de un número mayor de operativos de pesaje móvil de vehículos comerciales de carga por departamento en todo el país y la ejecución de un análisis detallado que permita la determinación de factores camión por departamento o región del país. De igual forma, es necesario establecer un registro de factores camión actualizado y ajustado para los distintos departamentos que no fueron considerados en la presente investigación.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de Colombia, por financiar la presente investigación enmarcada en el contrato 1326 – 2011, firmado entre el INVIAS y la Universidad del Norte.

Referencias

1. H. Salama, K. Chatti, R. Lyles. "Effect of Heavy Multiple Axle Trucks on Flexible Pavement Damage Using In-Service Pavement Performance Data". *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 132. 2006. pp. 763-770.
2. J. Prozzi, F. Hong. "Optimum Statistical Characterization of Axle Load Spectra based on Load-Associated Pavement Damage". *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 8. 2007. pp. 323-330.
3. K. Chatti, A. Manik, N. Brake. "Effect of Axle Configurations on Fatigue and Faulting of Concrete Pavements." 10th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology. Paris, Francia. 2008. pp. 117-126
4. J. Troncoso. "Evaluación Espectro de Carga y Coeficientes de Daño en el Corredor de la Avenida Boyacá". Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2011.
5. O. Jeongho, E. Fernando, R. Lytton. "Evaluation of Damage Potential for Pavements due to Overweight Truck Traffic". *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 133. 2007. pp. 308-317.
6. F. Wang, R. Machedehl, E. Popova. "Toward Monte Carlo Simulation-Based Mechanistic-Empirical Prediction of Asphalt Pavement Performance". *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 136. 2010. pp. 678-688.
7. O. Osman, M. El Ghazolly, R. Mousa. "Impact of Increasing Legal Axle Loads on Truck Factor in Egypt". Taylor & Francis Group. London. 2009. pp. 709-718.
8. S. El Sharkawy, H. Salem, A. Wahdan, M. Mohammed. "Structural and Economical Effect of Over Weight Trucks on Asphalt Pavement.". *International Journal of Pavement Research and Technology*. Vol. 3. 2010. pp. 303-310.
9. Á. Ulloa, G. Badilla, J. Allen, D. Obando. "Determinación de Factores Camión en Pavimentos de Costa Rica". *Infraestructura Vial*. Vol. 10. 2008. pp. 28-37.
10. L. Casprowitz. "Determinación de Factores de Camión para el Diseño de Pavimentos Flexibles en Guatemala". Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. 2010.
11. Y. Huang. "Pavement Analysis and Design". Pearson, Prentice Hall. Upper Saddle River. NJ. 2004. pp. 258-260.
12. AASHTO. "Guide for Design of Pavement Structures". Washington, D.C. 1993. pp. 31.
13. INVIAS. "Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carretera". Bogota, Colombia. 2008. pp. 57, 62.
14. A. Murgueitio, C. Benavides, E. Solano. "Estudio de los Factores Daño de los Vehículos que Circulan por las Carreteras Colombianas." XI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Cartagena D. T. y C. pp. 332-342. 1997.
15. Ministerio de Transporte de Colombia. "Límites de Pesos y Dimensiones en los Vehículos de Transporte Terrestre Automotor de Carga por Carretera." Resolución No 4100 de Diciembre 28 de 2004, Ministerio de Transporte de Colombia. Ed., Bogotá, Colombia. 2004. pp. 6-8.
16. Z. Zhang, S. Tighe. "Impact of Tridem and Trunnion Axle Groups on Premature Damage of Pavement Infrastructure". *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 34. 2007. pp. 156-161.