

# ANÁLISIS DE LA ESTABILIZACIÓN DEL FACTOR CAMIÓN MEDIANTE EL CONTROL DE SOBRECARGAS EN COSTA RICA

Jaime ALLEN<sup>1</sup>, Ana Catalina VARGAS<sup>2</sup>, Henry HERNÁNDEZ<sup>3</sup>,  
José Pablo AGUIAR<sup>4</sup>, Luis Guillermo LORÍA<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), San José, Costa Rica, jaime.allenmonge@ucr.ac.cr

<sup>2</sup> Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), San José, Costa Rica, anacatalina.vargas@ucr.ac.cr

<sup>3</sup> Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), San José, Costa Rica, henry.hernandezvega@ucr.ac.cr

<sup>4</sup> Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), San José, Costa Rica, jose.aguiar@ucr.ac.cr

<sup>5</sup> Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), San José, Costa Rica, luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

## Resumen

En Costa Rica, se reactivaron las estaciones de pesaje de vehículos pesados a partir del año 2008, mediante la implementación de un control del pesaje para los vehículos de carga que circulan por las carreteras del país. Se identificó una tendencia de estabilización en el porcentaje de vehículos pesados que circulan con exceso de carga en esas rutas, y en consecuencia también de los factores camión, evidenciado en el presente estudio. Se exceptúa el eje tándem del vehículo T3-S3, se demostró estadísticamente al procesar la totalidad de los datos recolectadas en diferentes estaciones de pesaje ubicadas en la red vial nacional durante el período 2008-2011.

En el estudio se obtuvo que, si se considera un porcentaje constante de incumplimiento en el exceso de las cargas, el factor camión de los vehículos C2, C3 y T3-S2 tiende a valores de 0,20 - 0,66 - 1,19, respectivamente. Se recomienda realizar controles de pesaje adecuados sobre el exceso de peso en el eje tándem del vehículo T3-S3, pues controlado de forma eficiente se proyecta una disminución de 0,17 en el valor del factor camión. En futuras investigaciones se analizará la tendencia a seguir de los factores camión utilizando los datos de cada estación de pesaje de manera desagregada, considerando también variaciones temporales que quedaron fuera del alcance del presente estudio. Los resultados del análisis son promisorios para otros países de la región, que no tengan estaciones de pesaje implementadas.

**Palabras Clave:** Factor camión, incumplimiento, estación de pesaje, regulación.

## 1 Importancia

La Red Vial de Costa Rica corresponde al principal medio de transporte terrestre tanto de personas como de mercancías, por lo que es de gran importancia mantenerla en buen estado y así brindar condiciones de desplazamiento que sean seguras y confortables para los usuarios.

Actualmente, la mayoría de la carga que es recibida en los puertos marítimos o en las fronteras terrestres es transportada por medio de vehículos pesados a diferentes destinos del país; los cuales en ocasiones exceden los pesos máximos permitidos en la legislación Costarricense por medio del Decreto Ejecutivo 31363-MOPT y sus respectivas modificaciones.

Los vehículos pesados son el tipo de vehículos que mayor influencia tienen en el deterioro de los pavimentos flexibles, pues transmiten la mayor cantidad de cargas a la estructura de pavimento. Por ello, un adecuado control de pesaje influye directamente en la vida útil de los pavimentos, es decir, corresponde a una forma de controlar o mantener en buenas condiciones uno de los activos más significativos del Estado.

El LanammeUCR se abocó a la tarea de identificar las cargas reales con que transitan regularmente los automotores de más de 4 toneladas, especialmente las categorías C2, C3, T3-S2 y T3-S3 ya que representan un 98,5% de esta flota vehicular en Costa Rica, según los datos recopilados. Con estas investigaciones se ha impulsado al Gobierno de Costa Rica para la reactivación de las estaciones de pesaje a lo largo de toda la Red Vial Nacional (RVN) con el propósito de extender la vida útil de estas carreteras por medio de la disminución del sobrepeso de los vehículos de carga que transitan en el país.

## 2 Antecedentes

### 2.1 Encuestas de carga

Una encuesta de carga constituye una herramienta para determinar el efecto tangible de las cargas aplicadas sobre las estructuras de pavimento. En Costa Rica se determinó la necesidad encuestas de carga para obtener los datos a utilizar en el diseño de pavimentos, como lo recomienda la Guía de Diseño de AASHTO [1]. En la guía de diseño *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* se define utilización de encuestas de campo para obtener los datos a utilizar en el diseño de pavimentos [2].

En el año 2007, se realizó el primer acercamiento al estudio de las cargas a las cuales estaban sometidos los pavimentos nacionales mediante encuestas de carga [7]. En este documento, los autores establecen que el exceso de peso en los vehículos de carga tiene un impacto negativo sobre el desempeño de los pavimentos, y contribuyen al deterioro prematuro de las vías nacionales. Asimismo, producto de la investigación se logró inferir los factores camiones típicos por tipo de vehículo, eje, y ruta, a los cuales están sometidas las vías nacionales. En la Tabla 99, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 99. Factores camión reportados en la encuesta de carga realizada en el 2007

Ruta	Tipo de vehículo					
	Pickup	C2+	C2	Bus-C2	C3	T3-S2
<b>Ruta 1 - General Cañas (peaje)</b>	0,011	0,019	0,734	2,022	2,721	2,102
<b>Ruta 1 - Bernardo Soto Naranjo (peaje)</b>	0,011	0,016	0,902	3,680	1,971	3,701
<b>Ruta 1 - Bernardo Soto Esparza (peaje)</b>	0,011	0,233	0,723	2,911	2,834	4,153
<b>Ruta 2 - Florencio del Castillo (peaje)</b>	0,015	0,031	0,827	1,437	3,202	3,021
<b>Ruta 2 - Pérez Zeledón (tránsito)</b>	0,012	0,014	0,446	1,858	3,330	2,080
<b>Ruta 27 - Próspero Fernández (peaje)</b>	0,011	0,016	1,163	1,957	3,155	2,695
<b>Ruta 32 - Braulio Carrillo (peaje)</b>	0,011	0,022	0,695	3,692	2,271	4,229
<b>Ruta 140 - San Carlos (Ciudad Quesada)</b>	0,012	0,014	0,521	2,107	3,773	3,861
<b>Promedio</b>	0,012	0,046	0,751	2,458	2,907	3,230
<b>Desviación estándar</b>	0,001	0,076	0,223	0,861	0,585	0,878

Nota. Fuente: Ulloa, Allen, Badilla, Sibaja, 2008 [7]

Además, Allen y Badilla realizaron un estudio más detallado sobre las cargas reales de los pavimentos nacionales, evidenciando en series de tiempo, el porcentaje de vehículos que excede el peso reglamentario máximo [4]. Analizaron el comportamiento de las cargas de los vehículos en el período que comprende de noviembre del 2008 y hasta octubre del 2010, en las estaciones de pesaje. De la investigación realizada, los autores concluyeron que existía una tendencia visual hacia la baja y

estabilización en los porcentajes de vehículos que excedían la regulación de peso, esto producto de la toma de conciencia por parte de los conductores debido a la reglamentación que se les aplicaba. No obstante, y a pesar de lo anterior, Vargas-Sobrado et al. [8] reportan que para rutas Municipales y Nacionales, los vehículos tipo C3, T3-S2 y T3-S3 presentan sobrepesos por encima de los 10,000 kg.

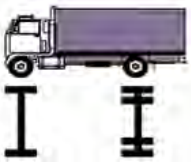
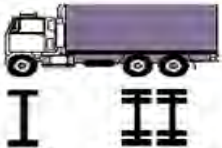

## 2.2 Regulación de pesos y tipos de ejes y vehículos

La clasificación oficial de tipos de ejes y vehículos es dictada por la Dirección de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), la cual consiste en:

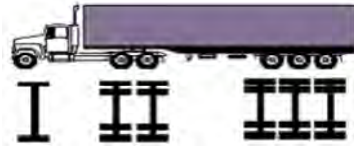
- Liviano: automóviles para personas, jeeps, busetas livianas.
- Buses: todos los buses que tienen doble llanta en el eje trasero.
- Carga liviana: pick-ups, y carros acondicionados para cargas pequeñas (no se limita a vehículos de placa de carga liviana, eje sencillo o eje doble atrás).
- Tándem (2 ejes): configuración con dos ejes doble llanta en la parte posterior.
- Tridem (3 ejes): configuración con tres ejes doble llanta en la parte posterior.
- 5 ejes: incluye tracto-camiones (furgones), dos parejas de dos ejes con doble llanta.

La regulación de pesos oficial en Costa Rica se rige según lo dispuesto en el Decreto 31363-MOPT. En dicho documento se presenta la configuración de ejes y pesos legales para los diferentes tipos de vehículos que circulan en el país. En la Tabla 100 se detalla la regulación por peso para cada tipo de vehículo y eje en estudio, así como su comparación con normativas internacionales.

Tabla 100. Tipos de vehículos según la regulación nacional y normativas internacionales

Tipo	Configuración del vehículo y peso por eje [Ton]		Peso vehicular bruto [Ton]
<b>C2</b> 	México (2008)	6,5      11	17,5
	Estados Unidos (2011)	5,5      9	14,5
	Costa Rica (2005)	6,0      10	16
			
<b>C3</b>	México (2008)	6,5      18,0	24,5
	Estados Unidos (2011)	5,5      15,5	21,0
	Costa Rica (2005)	6,0      16,5	22,5
<b>T3-S2</b> 	México (2008)	6,5      18,0      17,0	41,5
	Estados Unidos (2011)	5,5      15,5      15,5	36,5
	Costa Rica (2005)	6,0      16,5      16,5	39,0

### T3-S3



México (2008)	6,5	18,0	23,5	48,0
Estados Unidos (2011)	5,5	15,5	19,0	40,0
Costa Rica (2005)	6,0	16,5	23,0	45,5

Nota. Fuente : Allen y Badilla, 2008 [4]

### 3 Datos utilizados en la investigación

La recopilación de los datos se llevó a cabo en ocho sitios distintos: Autopista General Cañas (Ruta 1), Autopista Bernardo Soto a la altura de Naranjo y Esparza (Ruta 1), Autopista Florencio del Castillo (Ruta 2), Pérez Zeledón (Ruta 2), Autopista Próspero Fernández (Ruta 27), Carretera Braulio Carrillo (Ruta 32) y en la Carretera hacia San Carlos (Ruta 140). Los datos fueron recopilados por la administración. Se muestra en la Figura 166 la distribución vehicular de los datos utilizados en el análisis.

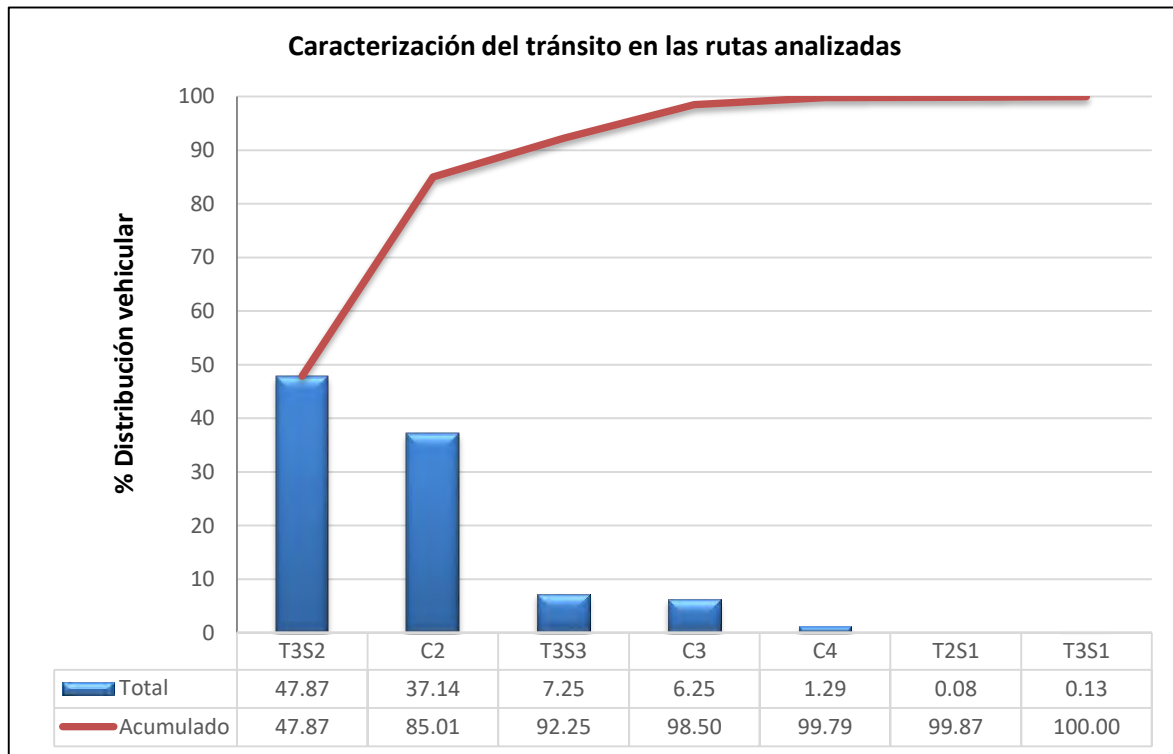


Figura 166. Porcentaje por cada tipo de vehículo evaluado.

### 4 Desarrollo de la investigación

#### 4.1 Tendencia del incumplimiento de la regulación de peso por tipo de vehículo

Se estudió el comportamiento del porcentaje de vehículos de carga que excede la regulación nacional de peso por medio de análisis mensuales por tipo de eje de cada tipo de vehículo. También se analizaron modelos de regresión lineal y gráficas de control, se detalla a continuación.

En la Figura 167, Figura 168, Figura 169 y Figura 170, se muestra la tendencia del porcentaje de incumplimiento con su variación temporal para los tipos de vehículos: C2, C3, T3-S2 y T3-S3. Además,

se realiza un análisis del comportamiento de la variación temporal utilizando el modelo de regresión potencial mostrado en la Ecuación (1), cuando mejor se ajuste a la serie de datos disponibles.

$$y = \alpha t^{\beta} \quad (1)$$

Donde  $y$  corresponde al porcentaje de determinado vehículo que incumple el peso máximo, y la variable  $t$  corresponde al mes en el cual se realizó la medición, iniciando con valor de  $t = 1$  en noviembre del 2008. En la Figura 167 y la Figura 168, se evidencia una disminución significativa en el porcentaje de vehículos con exceso de carga a lo largo del período analizado; en ambos ejes (simple y dual). Además, en el último año el porcentaje de exceso tiende a la estabilización.

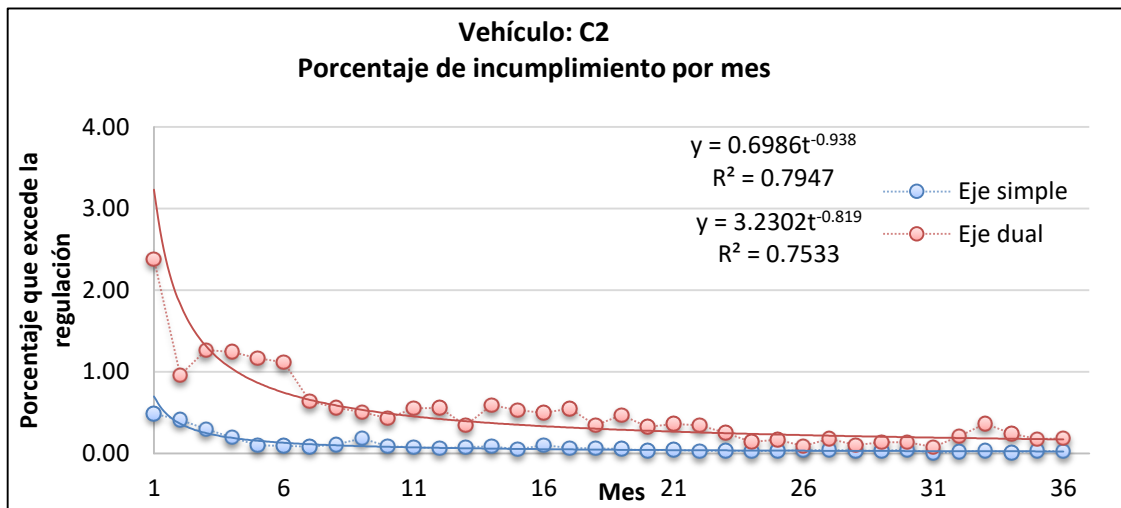


Figura 167. Porcentaje vehículos C2 con exceso de peso desde noviembre del 2008 a octubre 2011

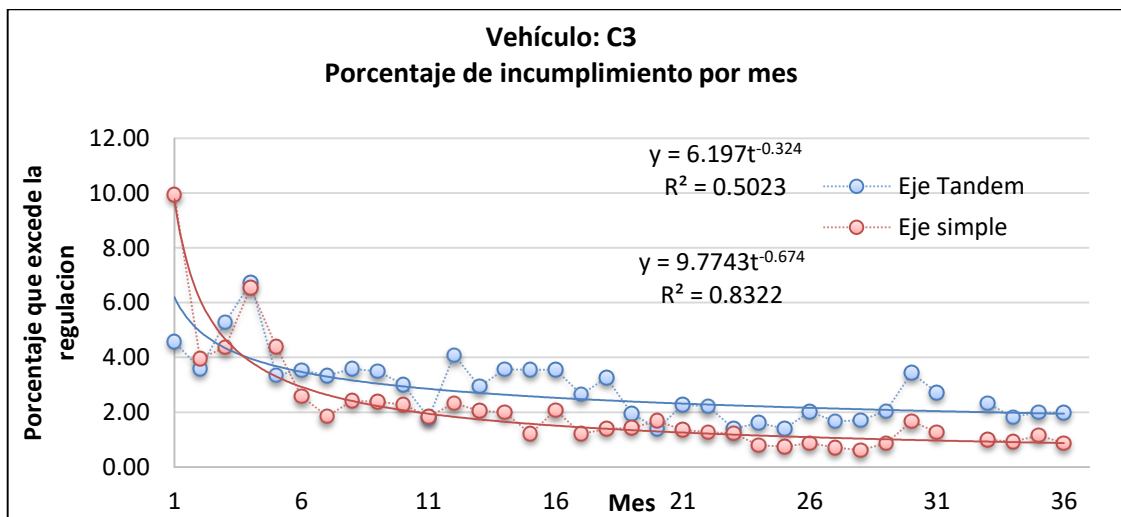


Figura 168. Porcentaje vehículos C3 con exceso de peso desde noviembre del 2008 a octubre 2011

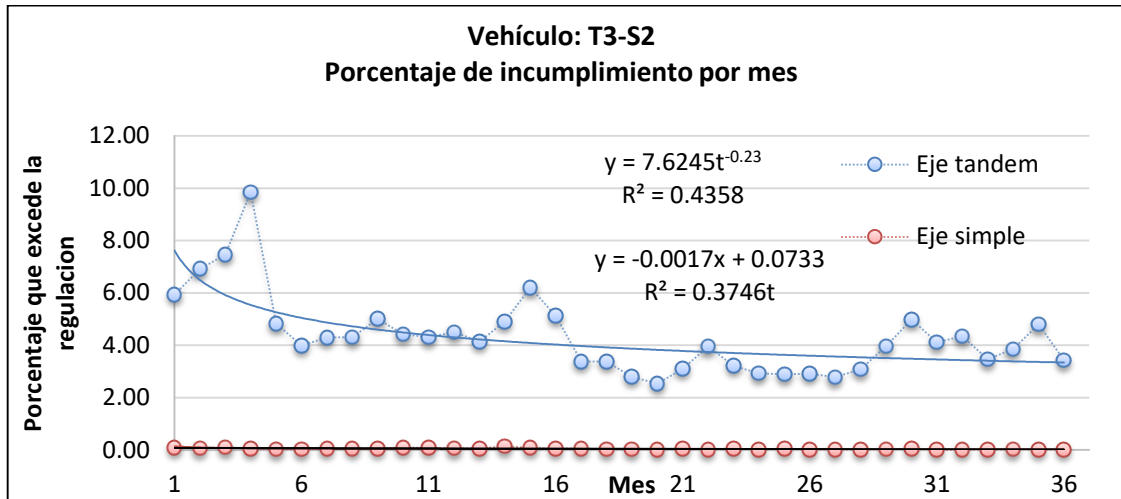


Figura 169. Porcentaje vehículos T3-S2 con exceso de peso desde noviembre del 2008 a octubre 2011

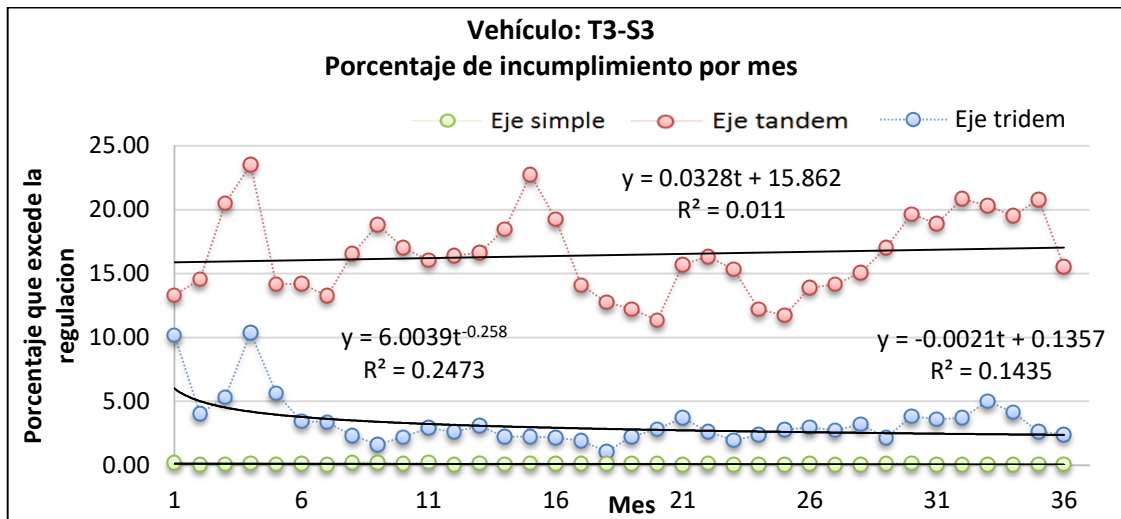


Figura 170. Porcentaje vehículos T3-S3 con exceso de peso desde noviembre del 2008 a octubre 2011

Además, según la gráfica de la Figura 169, el vehículo T3-S2 posee un comportamiento diferente para ambos ejes. En el caso del eje tándem, se da una disminución en el porcentaje de incumplimiento, y en el eje simple, se mantuvo constante en todo el período de análisis, con valores cercanos al 0 % de exceso.

Por último, en el caso del vehículo T3-S3 mostrado en la Figura 170, se obtienen comportamientos diferentes para cada uno de sus tres ejes: simple, tándem y trídem. En el eje trídem se evidencia una disminución en el porcentaje de exceso durante los primeros 9 meses del análisis, luego, el comportamiento se mantiene constante con una mínima tendencia a la baja. En el eje tándem no se evidencia ningún efecto de estabilización, por el contrario, se evidencia una tendencia mínima al aumento del porcentaje de incumplimiento. Muchos de estos casos corresponden al hecho de que los transportistas deciden hacer caso omiso a la regulación de carga establecida legalmente. Finalmente, al igual que el eje simple del vehículo T3-S2, el incumplimiento en el eje simple del vehículo T3-S3 se mantuvo constante durante el período de análisis con valores cercanos al 0 % de exceso.

#### 4.2 Determinación de ecuaciones de estabilización estadística

Como análisis adicional y con el propósito de determinar si los valores tienden hacia un valor específico, para cada eje de cada tipo de vehículo se estudia el efecto de la estabilización de los datos mediante

regresiones lineales y gráficas de control anuales. La división del análisis anual se realiza por medio de la disponibilidad de los datos suministrados de las estaciones de pesaje, de manera que se analiza en un rango de noviembre a octubre del año siguiente. Este análisis de estabilización se realiza mediante la significancia de la regresión lineal del modelo utilizando el mes como regresor del porcentaje de vehículos con exceso de peso. Se muestra a continuación los resultados.

Tabla 101. Regresiones anuales del porcentaje de incumplimiento del vehículo C2 en el eje simple

Rango	Promedio [%]	Desviación estándar [%]	Ecuación (t = mes)
Nov 08 -Oct 09	0,1818	0,1420	$y = -0,032t + 0,3895$ $R^2 = 0,6591$
Nov 09 -Oct 10	0,0560	0,0236	$y = -0,0054t + 0,0912$ $R^2 = 0,6836$
Nov 10 -Oct 11	0,0295	0,0124	$y = -0,0014t + 0,0385$ $R^2 = 0,1614$

Mediante el análisis de regresión anual por rangos, se evidencia una estabilización marcada de los porcentajes de vehículos tipo C2 que exceden la regulación por mes, ya que la pendiente del rango analizado disminuye con respecto al anterior.

Tabla 102. Regresiones anuales del porcentaje de incumplimiento del vehículo C2 en el eje dual

Rango	Promedio [%]	Desviación estándar [%]	Ecuación (t = mes)
Nov 08 -Oct 09	0,9485	0,5506	$y = -0,1244t + 1,7572$ $R^2 = 0,6636$
Nov 09 -Oct 10	0,3958	0,1334	$y = -0,0273t + 0,5734$ $R^2 = 0,5456$
Nov 10 -Oct 11	0,1725	0,0780	$y = 0,0100t + 0,1076$ $R^2 = 0,2129$

Tabla 103. Regresiones anuales de porcentaje de incumplimiento del vehículo T3-S2 en el eje simple

Rango	Promedio [%]	Desviación estándar [%]	Ecuación (t = mes)
Nov 08 -Oct 09	0,0578	0,0242	$y = -0,0006t + 0,062$ $R^2 = 0,009$
Nov 09 -Oct 10	0,0472	0,0341	$y = -0,0058t + 0,0847$ $R^2 = 0,3729$
Nov 10 -Oct 11	0,0193	0,0136	$y = -0,0016t + 0,0298$ $R^2 = 0,1811$

Tabla 104. Regresiones anuales de porcentaje de incumplimiento del vehículo T3-S2 en el eje tandem

Rango	Promedio [%]	Desviación estándar [%]	Ecuación (t = mes)
Nov 08 -Oct 09	5,4844	1,7664	$y = -0,3003t + 7,4363$ $R^2 = 0,3757$
Nov 09 -Oct 10	3,8028	1,1083	$y = -0,2016t + 5,1134$ $R^2 = 0,4302$
Nov 10 -Oct 11	3,7163	0,7480	$y = 0,1137t + 2,9772$ $R^2 = 0,3005$

Para el caso del vehículo T3-S2 en su eje simple, no se evidencian variaciones. Por lo tanto, el comportamiento de este eje es similar a lo largo de los meses de recopilación de datos, tendiendo a 0 %. Analizando la regresión anual del eje tandem, se muestra una disminución en el porcentaje de vehículos que excede la normativa de pesos y una estabilización al final de las observaciones. En el eje simple del vehículo C3, se observó una estabilización en el porcentaje de exceso debido a que la pendiente de la regresión lineal en el último rango anual posee valores cercanos a cero. En el análisis de regresión anual del eje tandem, se muestra una disminución en el porcentaje de vehículos que excede la normativa de pesos. A pesar de que la variación se reduce con el tiempo, se observan comportamientos cíclicos.

Mediante el análisis del gráfico de control en el vehículo T3-S3, no se evidencian puntos atípicos, por lo que se considera que la estabilización es marcada alrededor de un 0,0692% de incumplimiento. Tal y como se mencionó en el análisis de tendencia, el eje tándem no posee un comportamiento de estabilización, ya que la pendiente de las regresiones lineales por rangos anuales no converge hacia cero ni tiene una tendencia hacia la baja.

#### 4.2.1 Resumen de valores de estabilización

Tabla 105. Resumen de los hallazgos de estabilización del porcentaje de incumplimiento

Vehículo	Eje	Estabiliza	% Incumplimiento Estabilizado
<b>C2</b>	Simple	Sí	0,029
	Dual	Sí	0,173
<b>C3</b>	Simple	Sí	0,974
	Tándem	Sí	<b>2,099</b>
<b>T3-S2</b>	Simple	Sí	0,019
	Tándem	Sí	<b>3,716</b>
<b>T3-S3</b>	Simple	Sí	0,069
	Tándem	No	-
	Trídem	Sí	<b>3,270</b>

El incumplimiento de peso en el eje trídem evidencia una leve estabilización desde el año 2010, sin embargo, presenta una tendencia hacia el alza en el año 2011. En la Tabla 105 se resumen los hallazgos respecto a la estabilización en función de un período de observación de 36 meses analizados, realizada por medio de los gráficos de control, en negrita los valores considerados altos.

#### 4.3 Comportamiento del Factor Camión

El factor camión promedio corresponde a un índice del daño que se transfiere al pavimento, mostrado en la Ecuación (2), su cálculo se basa en los factores de equivalencia de carga según la Ecuación (3) [7].

$$\text{Factor equivalencia de carga} = \left( \frac{\text{Peso del eje medido}}{\text{Peso del eje patrón}} \right)^4 \quad (2)$$

$$\text{Factor camión promedio} = \frac{\sum(\text{Número de ejes} * \text{Factor de equivalencia de carga})}{\text{Número de vehículos encuestados}} \quad (3)$$

Por esto, la segunda relación de importancia por analizar corresponde a la tendencia del factor camión, el cual se analizó según el tipo de vehículo únicamente, es decir, no se hizo distinción de estación de la cual provengan los datos.

A continuación, se muestran series de variaciones temporales de la evolución del factor camión en el período analizado, desde octubre del 2008 hasta noviembre del 2011, por medio del modelo de regresión potencial mostrado en la Ecuación (1). Cada uno de los factores camión de los diferentes tipos de vehículos tienden a la baja, se muestra a continuación las gráficas de regresión potencial para el vehículo C2 y el vehículo T3-S2.



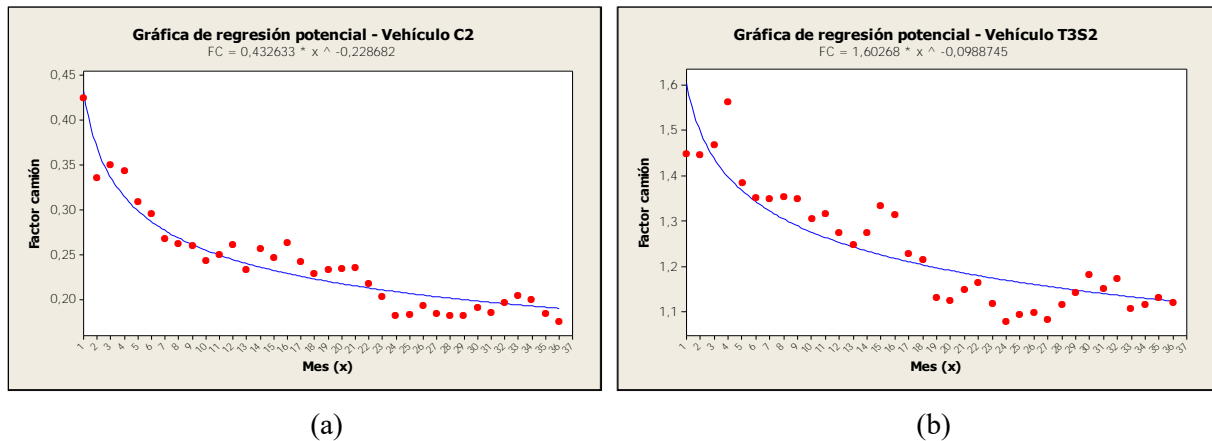


Figura 171. Tendencia del factor camión promedio en los vehículos C2 y T3-S2

En la Tabla 106 se resumen los hallazgos referentes a la tendencia y estabilización de los factores camión resultantes en vehículos C2, C3, T3-S2, T3-S3.

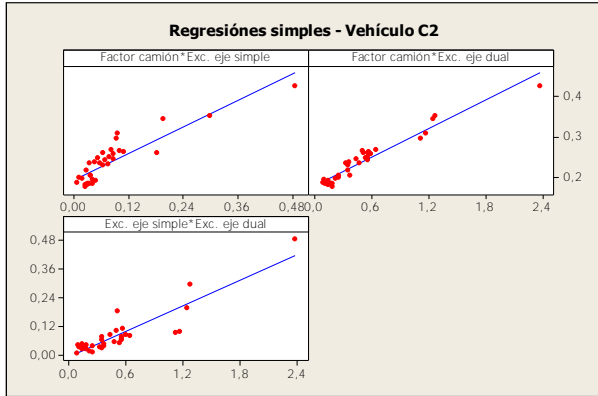
Tabla 106. Resumen de los hallazgos de estabilización del factor camión

Tipo de vehículo	Ecuación	FC (proyectado mes 36)	Estabiliza
C2	$FC = 0,43263 * t^{-0,228682}$	0,1906	Sí
C3	$FC = 1,11331 * t^{-0,154178}$	0,6407	Sí
T3-S2	$FC = 1,60268 * t^{-0,098875}$	1,1245	Sí
T3-S3	$FC = 1,98712 * t^{-0,085254}$	1,4640	Sí

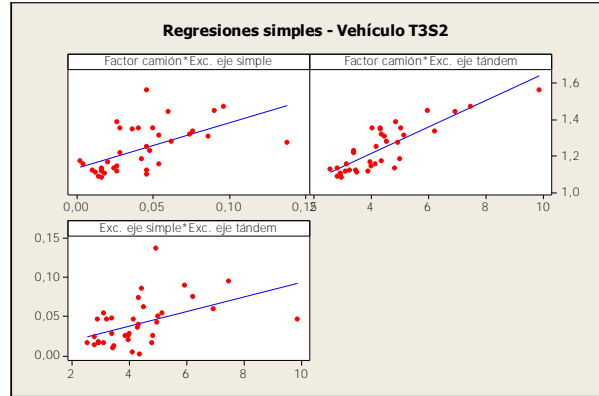
#### 4.4 Comportamiento del Factor Camión

Existe una relación directamente proporcional entre el porcentaje de vehículos que exceden la regulación y el factor camión promedio producido por estos vehículos. Por lo tanto, el objetivo de esta sección corresponde a determinar dicha relación, y posteriormente realizar una proyección del factor camión con incumplimiento constante, que es el porcentaje de estabilización anteriormente calculado.

El análisis se realiza mediante el uso de la regresión lineal simple, analizando como variable independiente el porcentaje de excedente en cada eje por tipo de vehículo, y como variable dependiente el factor camión; así como también se estudia la correlación entre los porcentajes de incumplimiento de peso de diversos ejes de un mismo tipo de vehículo. En caso de no existir correlación entre el porcentaje de incumplimiento de los tipos de ejes para un vehículo específico, se estudia un modelo de regresión múltiple, esto con el fin de mejorar la predicción del modelo de regresión simple.



(a)



(b)

Figura 172. Regresiones entre factor camión e incumplimiento en los ejes de los vehículos C2 y T3-S2

En la regresión realizada para el vehículo C2, se muestra una relación más significativa entre el porcentaje de exceso en el eje dual y el factor camión. Además, existe correlación entre los factores Exceso eje simple y Exceso eje dual, por lo que no es recomendable una regresión múltiple, debido a la auto correlación de los predictores del modelo.

Tabla 107. Resultado de regresiones entre factor camión e incumplimiento por eje en vehículo C2

Factor dependiente (y)	Factor independiente (x)	Ecuación
Factor camión	Exceso eje simple (%)	$y = 0,5424x + 0,1942$ $R^2 = 0,7873$
Factor camión	Exceso eje dual (%)	$y = 0,1165x + 0,1802$ $R^2 = 0,9286$
Exceso eje simple (%)	Exceso eje dual (%)	$y = 0,1785x - 0,008$ $R^2 = 0,8144$

Tabla 108. Resultado de regresiones entre factor camión e incumplimiento por eje en vehículo T3-S2

Factor dependiente (y)	Factor independiente (x)	Ecuación
Factor camión	Exceso eje simple (%)	$y = 2,4948x + 1,1332$ $R^2 = 0,3291$
Factor camión	Exceso eje tándem (%)	$y = 0,073x + 0,92$ $R^2 = 0,7137$
Exceso eje simple (%)	Exceso eje tándem (%)	$y = 0,0094x + 0,0009$ $R^2 = 0,2215$

Para la regresión del factor camión en el vehículo T3-S2, se encontró la mayor relación entre factor camión y el exceso en el eje tándem. Debido a que los excesos entre ejes no mostraron una relación significativa, se realizó una regresión múltiple, sin embargo, tampoco se evidenció una mejora en el modelo.

Para el vehículo C3, se muestra una mayor correlación del factor camión con el porcentaje de incumplimiento en el eje simple y tándem; sin embargo, debido a que existe una correlación entre factores, no se recomienda realizar una regresión múltiple. En este caso se utiliza el eje simple como variable independiente ya que tiene mayor correlación.

Con respecto al vehículo tipo T3-S3, se observa una correlación baja entre cada uno de los factores y el factor camión, el factor que posee mayor coeficiente de correlación corresponde al incumplimiento en el eje trídem con una correlación de 39%, aproximadamente. Además, se puede concluir la inexistencia de correlación entre los factores del modelo para el vehículo T3-S3, por lo que se realizó una regresión múltiple entre los factores. La regresión múltiple cumplió con todos los supuestos de los residuos y posee un valor de correlación de 61,5%, lo cual es significativamente mejor que las obtenidas con regresiones simples. En la Ecuación (4) se muestra la regresión múltiple obtenida.

$$FC = 1,10 + 0,998 * Exceso\_eje\_simple + 0,0149 * Exceso\_eje\_tándem + 0,0434 * Exceso\_eje\_tridem \quad (4)$$

## 5 Resultados

De acuerdo con los resultados del apartado anterior, a continuación, en la Tabla 109 se presenta un resumen de las ecuaciones más significativas que se encontraron para la determinación del factor camión. Es importante detallar brevemente cada uno de los tipos de factores camión que se plantean en la tabla.

- Factor camión potencial: El factor camión potencial se infiere por medio de las series de tiempo realizadas y proyectadas mediante la regresión potencial en el mes 36, es decir, es el factor camión estimado después de las intervenciones de pesaje durante tres años.

- Factor camión de incumplimiento constante: Se calcula utilizando la mejor regresión obtenida entre el factor camión y el incumplimiento en uno o varios ejes, y sustituyendo en dicha ecuación el valor de incumplimiento constante. Este análisis se realiza para cada uno de los vehículos de carga.
- Factor camión de incumplimiento 0 % (regresión lineal): Se calcula mediante el intercepto de las regresiones realizadas entre el factor camión y el incumplimiento en uno o varios ejes, según corresponda. Este indica el factor camión teórico más bajo al que se podría llegar.
- Factor camión considerando un 5, 10 y 15 % de exceso: Se calcula el valor del factor camión con las ecuaciones propuestas en la Tabla 20, bajo el supuesto de que los porcentajes de vehículos que exceden el peso permitido corresponde a un 5, 10 o 15 % (para el caso del T3-S3 se considera exceso únicamente en los ejes tándem y trídem). El mismo sirve como referencia de un caso donde se incumple con la normativa.

Tabla 109. Comparación entre los factores camión estimados

Vehículo	Eje de inferencia	%Exceso Estabilizado del estudio	Ecuaciones FC vs. %Exceso	R <sup>2</sup>	FC incumplimiento 0 % (lineal)
C2	Dual	0,17	FC = 0,1165*Exd. + 0,1802	0,929	0,18
C3	Simple	0,97	FC = 0,0857*Exd. + 0,5781	0,849	0,58
T3-S2	Tándem	3,72	FC = 0,073*Exd. + 0,92	0,714	0,92
T3-S3	Simple	0,07	FC = 0,998*Exc_simple + 0,0149*Exc_tandem + 0,0434*Exc_tridem+1,10	0,615	1,1
	Tándem	17,29			
T3-S3 (Inferencias con Tándem T3-S2)	Trídem	3,26			
	Simple	0,07			
	Tándem	3,72			
	Trídem	3,27			

Tabla 11. Comparación entre los factores camión estimados (continuación)

Vehículo	Eje de inferencia	FC incumplimiento constante	FC (potencial)	FC considerando 5 % Exceso	FC considerando 10 % Exceso	FC considerando 15 % Exceso
C2	Dual	0,2	0,19	0,76	1,35	1,93
C3	Simple	0,66	0,64	1,01	1,44	1,86
T3-S2	Tándem	1,19	1,12	1,29	1,65	2,02
T3-S3	Simple	1,54	1,46	1,39	1,75	2,04
	Tándem					
T3-S3 (Inferencias con Tándem T3-S2)	Simple	1,37				
	Trídem					

Además, se realizó un estudio adicional en el caso del vehículo T3-S3, ya que, según lo demostrado en apartados anteriores, no existe estabilización en su eje tándem; por lo tanto, para este eje se utiliza el valor de estabilización del eje tándem del vehículo T3-S2, para mostrar el impacto que se puede obtener si se controla el incumplimiento de peso en este eje.

En la Tabla 109, se muestra el resultado y ecuaciones para obtener los diferentes valores de factor camión; de estos valores se puede inferir que el factor camión calculado mediante la regresión y estabilización del incumplimiento de peso, posee una relación significativa con el factor camión calculado mediante el modelo potencial. El valor de factor camión se incrementa conforme se aumenta la cantidad de ejes articulados del vehículo de carga, además, se evidencian diferencias de hasta 25 % entre los factores camión con incumplimiento constante y con incumplimiento cero.

En el caso del vehículo de carga T3-S3, se realizaron dos análisis para los factores camión estabilizados, el primero utilizando los valores de estabilización de los ejes simple y trídem, y el promedio anual mínimo obtenido para el eje tándem; el otro análisis se realizó de forma similar al anterior, pero utilizando el valor de estabilización del eje tándem del vehículo T3-S2. El resultado obtenido refleja que se podría tener una disminución en los valores de factor camión de hasta 0,17 al exigir controles más estrictos y eficientes sobre el exceso de carga en el eje tándem del vehículo T3-S3.

## 6 Conclusiones

En forma general, se determinó que la implementación de controles de pesaje en las rutas nacionales produce un efecto de estabilización en los factores camión y en el porcentaje de incumplimiento.

El vehículo T3-S3 en su eje tándem no mostró evolución en la estabilización del incumplimiento, pero de forma general este vehículo estabilizó el factor camión en el período de análisis. Los vehículos C2, C3, T3-S2, T3-S3 estabilizaron a factores camión de 0,19 - 0,64 - 1,12 - 1,46 respectivamente mediante el uso de series de tiempo con regresión potencial; y estabilizaron a valores de 0,20 - 0,66 - 1,19 - 1,54 respectivamente por medio de la estabilización del porcentaje de vehículos con incumplimiento de peso en sus ejes y regresiones lineales entre el factor camión y el porcentaje de vehículos con incumplimiento en los ejes.

Mediante el análisis de regresión entre los factores camión y el porcentaje de exceso, se evidencia diferencias entre el ajuste de los factores, es decir, algunos ejes son mejores estimadores del factor camión, tal es el caso del vehículo C3, ya que la regresión factor camión contra porcentaje de exceso del eje simple mostró un ajuste del modelo  $R^2$  de 0,85 a diferencia de la regresión factor camión contra porcentaje de exceso eje tándem con un  $R^2$  de 0,76. La diferencia anterior se puede originar debido a que por ser un eje simple es bastante sensible a la sobrecarga, por lo tanto es de importancia controlar el exceso de carga en el eje simple con el fin de reducir los factores camión en este tipo de vehículo.

Para el diseño de pavimentos es importante considerar la evolución de los factores camión generales calculados en la presente investigación, debido a que se podría sobrestimar un diseño al utilizar factores camión que no responden a la realidad y evolución de la carga del pavimento en el tiempo. Estos resultados pueden servir para concientizar a las autoridades del beneficio en reducción del daño a los pavimentos que se obtiene con un control estricto y prolongado con estaciones de pesaje.

## 7 Pasos siguientes

A partir de la presente investigación se han realizado dos Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica. La primera de ellas realizada por Arrieta, se enfocó en el análisis de las rutas nacionales alternas a las estaciones de pesaje permanentes [5]. En ella se concluye que los vehículos que tienen una mayor excedencia de peso son los de tipo T3-S3, seguidos de los T3-S2 y los C3, en donde se determina que entre más ejes posea un camión, mayor es el rango de excedencia en las carreteras de nuestro país, sin control de pesaje [5].

El Trabajo Final de Graduación realizado por Rodríguez, se enfoca en rutas de la red vial cantonal [6]. En la red vial cantonal se identificó que predomina el tránsito de vehículos cortos tipo C2 (67% de los vehículos encuestados) y de carrocería tipo granel y vagoneta, mientras que en rutas nacionales predominó el vehículo T3-S2 (42%) asociados con trailetas y cisternas [5]. Asimismo, se determinó que la mayoría de las excedencias corresponden al transporte de material de tajo, construcción y mercadería para ambas vías; a pesar de que proporcionalmente en las rutas nacionales circule el doble de vehículos pesados (18%) en relación con rutas cantonales (8%) [6].

Los resultados de estas investigaciones fueron mostrados mediante parámetros como factores camión y espectros de carga, con el propósito de estimar cargas realistas y actualizadas que puedan ser incluidas en manuales y guías de diseño de pavimentos que desarrolla el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) [3].

## 8 Referencias

- [1] AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures (4 ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Obtenido de <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAASHTO21/aashto-guide-design-pavement>
- [2] AASHTO. (2002). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- [3] Allen, J. (2013). Propuesta de línea de investigación: determinación de parámetros de carga para diseño estructural de pavimentos en Costa Rica. Unidad de Materiales y Pavimentos. Programa de Infraestructura del Transporte Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.
- [4] Allen, J., Badilla, G. (2011). Determinación de la carga de diseño para pavimentos flexibles en Costa Rica. XVI CILA – Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP.
- [5] Arrieta, J. (2017). Espectros de carga asociados a distintos tipos de vehículos pesados en rutas de la red vial estratégica nacional no reguladas por estaciones de pesaje. Trabajo Final de Graduación.. San José: Universidad de Costa Rica.
- [6] Rodríguez, L. (2018). Desarrollo de espectros de carga para la red vial cantonal. Trabajo Final de Graduación. San José: Universidad de Costa Rica.
- [7] Ulloa, Á., Allen, J., Badilla, G., Sibaja, D. (2008). Determinación de factores camión en pavimentos de Costa Rica. *Infraestructura Vial*, 10(19), 28-37.
- [8] Vargas-Sobrado, A., Rodríguez-Solano, L., Aguiar-Moya, J., Hernández-Vega, H., Loría-Salazar, L. Truck Weights on Municipal and National Roads without Weight Enforcement. *Transportation Research Record* (2019), Vol. 2673(2) 275–284.