

Análisis temporal-espacial del efecto de la implementación de estaciones de pesaje en los factores camión para diseño de pavimentos

Time-spatial analysis of the effect of the implementation of weighing stations on the esals for pavement design

Allan Gerardo Ureña Bermúdez

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
allan.urena@ucr.ac.cr

Jaime Allen

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jaime.allenmonge@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 05/08/2021 - **Fecha de aprobación:** 11/01/2022

RESUMEN

El *factor camión* es uno de los principales factores dentro de la estimación de la demanda de cargas que tendrá el pavimento de una carretera. El objetivo de este estudio es analizar los pesajes realizados entre los años 2008 y 2017. A partir de lo anterior, se contabilizaron más de 12 millones de vehículos pesados, los cuales estaban distribuidos en la estación de pesaje de Limón y Cartago. Para cada vehículo se calculó el *factor camión* asociado y se determinó si el vehículo, según el peso de cada uno de sus ejes, incumplía lo establecido en el Decreto N° 31363 del Ministerio de Obras Públicas y Transportes. A partir de las variables *factor camión* y el incumplimiento se realizan modelos econométricos. Estos modelos toman el efecto de distintas variables de tipo de camión, espaciales y temporales, y el tipo de medición, sobre el *factor camión* y el incumplimiento. Los modelos econométricos consideran las siguientes variables: año, mes, tipo de vehículo, día, hora y el tipo de medición aplicado en las estaciones analizadas. Uno de los resultados más relevantes del presente estudio es que hubo un incremento en los *factores camión* y porcentajes de incumplimiento analizados al pasar de un sistema de pesaje manual a uno automatizado.

Palabras clave: Factor camión, incumplimiento, automatización, pavimento

ABSTRACT

The *truck factor* is one of the main components in computing the load demand for highway pavements. The aim of this study is to analyse the databases on weighing carried out between 2008 and 2017. Therefore, more than 12 million heavy transport vehicles were counted, these vehicles were distributed in Limon and Cartago weighing stations. For each vehicle, the associated *truck factor* was calculated. Besides, according to the weight of each of its axles, it was determined if the vehicle did not comply with the provisions of the Legal Decree no 31363 of the MOPT. The econometric models are computed from the *truck factor* variables and non-compliance percentages. These models take the effect from different variables of the type of truck on the *truck factor* and non-compliance: spatial and temporal, and the type of measurement. The econometric models consider the following variables: year, month, type of vehicle, day, hour, and the type of measurement applied in the analysed stations. One of the results of this research is that there was an increase in the *truck factors* and non-compliance percentages analysed when going from a manual weighing system to an automated one.

Keywords: ESALs, noncompliance, automation, pavement

Introducción

Según el informe sobre el estudio especial efectuado en el Consejo Nacional de Vialidad sobre la rehabilitación de las estaciones de pesaje realizado por la Contraloría General de la República en el año 2013 se detalla lo siguiente:

Se observaron debilidades en la normativa que regula la prestación del servicio de control de pesos y dimensiones, debido a la desvinculación entre los artículos 114 y 145 de la Ley 9078, y **la falta de aplicación de multas a los conductores que evaden los puestos de control (...)** (Contraloría General de la República, 2013).

En este informe de auditoría se sustenta la hipótesis de que los pesajes manuales, debido a omisiones, horario de medición menor a las 24 horas o menor cantidad de vehículos registrados, subestiman el sobrepeso o incumplimiento de los vehículos que transitan por las vías que supervisan. Los sistemas de pesaje automáticos, aparte de ofrecer un registro continuo de pesajes, aumentan el incumplimiento de los estándares de peso establecidos por la Administración.

Cuando existe poco control de pesaje de los vehículos que transitan por la red vial nacional se genera un desconocimiento acerca de las variables reales para el diseño de estructuras de pavimentos. Lo anterior podría ocasionar sobrecarga y, consecuentemente, un acelerado deterioro de las estructuras de pavimento cuando los vehículos se trasladan con algún tipo de sobrepeso, ya que el efecto del peso de los ejes de los vehículos crece en forma exponencial respecto al incremento de carga (Allen y Badilla, 2011). Asimismo, se podría dar una predisposición en diseños excesivos. Lo anterior es igual de contraproducente para el Estado, debido al incremento en el gasto económico generado, tanto en subdiseños como en sobrediseños.

Ahora bien, para el diseño de cualquier estructura de pavimento se necesita conocer la distribución y la magnitud de las cargas que tendrá que soportar la estructura. Estos parámetros, permiten calcular los *factores camión* -daño que los ejes de cada vehículo le generan al pavimento- y *los espectros de carga* -histograma de la frecuencia de pesos-. A partir de ello, se podría definir, de manera acertada, la capacidad

de soporte que requerirá la estructura de pavimento durante su vida útil. La disminución de esta vida útil se puede deber a distintas razones, por ejemplo: el tipo y la cantidad de vehículos que circulan sobre la estructura, el proceso constructivo, las condiciones ambientales, entre otros. Sin embargo, uno de los factores que más ocasiona daño prematuro en las estructuras y uno de los más críticos es el sobrepeso de los vehículos pesados.

En la actualidad, en Costa Rica existen estaciones de pesaje, encargadas de medir el peso de los vehículos que transitan por las vías. A partir de las bases de datos de pesajes de Cartago y Limón, se calcularon los *factores camión*. También, se estimaron, según el tipo de medición y los factores temporales, modelos econométricos tipo regresiones lineales, regresiones logísticas y modelos SEM (del inglés *structural equation models*). Los análisis se realizaron para los cuatro sentidos de pesaje (San José-Limón, Limón-San José, San José-Cartago y Cartago-San José) y para las dos estaciones de pesaje (Cartago y Limón). Pese a que los análisis se realizaron para los cuatro sentidos antes mencionados, en el presente artículo solamente se detallan los resultados del sentido de pesaje San José-Limón; esto porque estos resultados resultaron ser los más representativos de la investigación.

Los registros de pesaje de las estaciones antes mencionadas abarcan dos efectos temporales importantes desde su implementación:

- a. El efecto de la implementación de estaciones de pesaje como mecanismo de control de daño.
- b. El efecto de la implementación de estaciones de pesaje automáticas.

El presente artículo se compone de cuatro secciones: 1. Objetivo general, 2. Metodología, 3. Análisis de resultados y 4. Conclusiones.

Objetivo

El objetivo principal de este estudio fue analizar el efecto de la implementación de estaciones de pesaje como mecanismos de control de daño, en los pavimentos de Costa Rica, mediante el análisis temporal y espacial de los *factores camión* la estación de Limón (sentido de pesaje San José-Limón), desde el año 2008 y hasta el año 2017.

Metodología

La principal tarea metodológica de la investigación fue la generación de los modelos que describieran el comportamiento de los *factores camión*, tanto para la condición de mediciones de tipo manual como para las mediciones de tipo automática. A continuación, en la Figura 1 se muestra la metodología.

En la primera fase de la metodología se realizó una revisión bibliográfica de documentos relacionados con el cálculo y el análisis de *factores camión* a partir de encuestas de carga y estaciones de pesaje en Costa Rica. Al concluir esta primera fase, se ejecutó una selección muestral tanto de los tipos de vehículos como de los años y las estaciones de pesaje.

Posteriormente, se procedió a realizar el cálculo de los *factores camión* para cada uno de los vehículos registrados. Para esto, se generó una herramienta en el programa estadístico R. Dicha herramienta estimó los *factores camión* para cada uno de los vehículos, según el peso de los ejes que lo componían. Todo ello, a través del cálculo exacto de los factores equivalentes

de carga (factores LEF), lo que, finalmente, permitió la obtención de *factores camión* con alta precisión (AASHTO, 2003). Una vez obtenidos los *factores camión*, se analizaron estos resultados según las distintas variables consideradas: el comportamiento general de las variables, las posibles relaciones entre las variables y se definieron las regresiones que se utilizarían. Si la categorización y el análisis de las variables es satisfactorio, se continúa con la siguiente etapa que utiliza la información obtenida para generar modelos de ajuste.

En la segunda parte de la metodología se generaron los modelos antes mencionados y, a partir de ellos, se analizaron los distintos efectos temporales, espaciales y aquellos generados por el tipo de medición que conforman los resultados de la investigación. Se generaron tres tipos de modelos o regresiones: (i) modelos de regresión lineal múltiple, que describen el comportamiento de la variable *factor camión* -sin el efecto mediador de la variable incumplimiento-; (ii) modelos de regresión logística, que describen el comportamiento de la variable incumplimiento; y (iii) modelos SEM, que son modelos de ecuaciones

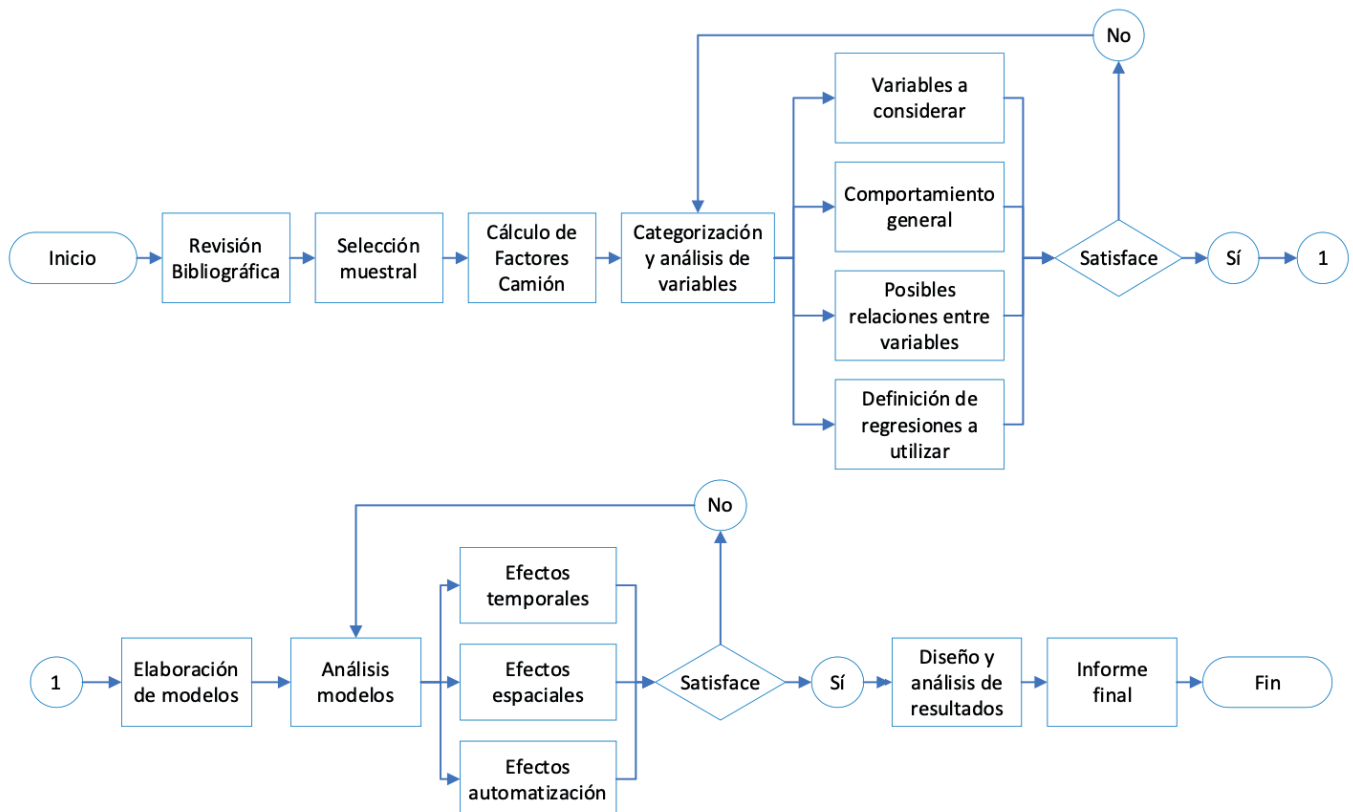


Figura 1. Esquema metodológico de la investigación

estructurales que describen el comportamiento total neto sobre la variable *factor camión* -con el efecto mediador de la variable incumplimiento-. Si el análisis y la información obtenida a través de los modelos es satisfactoria, se procede a realizar el análisis de resultados final y se genera el informe final de resultados, de lo contrario, se regresa a la etapa de ajuste, generación y análisis de los modelos.

Análisis de resultados

El término de estaciones de pesaje automáticas se refiere a la implementación de estaciones con sensores y cámaras que eliminan las mediciones manuales. En este sentido, los sistemas de pesaje automatizados establecen un sistema de control eficaz y moderno que permite sancionar a los conductores que infringen la ley. En este sistema, cualquier vehículo que tenga un peso bruto de 4 000 kg o más debe entrar al pesaje en las 24 horas del día, exceptuando buses, busetas y camiones de bomberos. Las estaciones de pesaje cuentan con una cámara en la ruta principal que detecta camiones evasores de la estación (este sistema aún no se encuentra funcionando en Costa Rica por temas legislativos). Estas estaciones poseen dos sensores que miden el largo del vehículo, dos placas que registran el peso, dos sensores que miden la altura, una cámara que registra la placa de matrícula y revisa permisos especiales y, finalmente, un semáforo que autoriza la salida de la estación de pesaje.

La estación posee dos controles: selectivo y de precisión. En primer lugar, el control selectivo es el primer contacto entre los conductores y la estación de pesaje. Este está ubicado 500 metros antes de la estación, hay un rótulo que alerta al conductor sobre la parada obligatoria que debe realizar más adelante. Cuando el vehículo pesado se está acercando, las cámaras de vigilancia son las primeras que lo detectan. En ese momento, el vehículo debe ingresar a una velocidad inferior a 40 km/h. Posteriormente, una cámara de reconocimiento óptico identifica la matrícula del vehículo, lo mide y lo registra en la base de datos de pesos y dimensiones. Hasta aquí, si el vehículo cumple con el peso permitido puede reincorporarse a la carretera principal. En caso

contrario, el semáforo le indica al conductor que debe continuar con el proceso de pesaje. En segundo lugar, en el pesaje de precisión, el vehículo debe avanzar a menos de 5 km/h. En el caso de que en este segundo pesaje el vehículo cuente con algún tipo de sobrecarga en uno o en varios de sus ejes, se avanza a un control de manera estática. Si el sobrepeso persiste, se aplica la multa correspondiente y los conductores deben entrar al predio para el reacomodo de la carga o el transbordo de esta a otro vehículo. En el caso de que algún camión evada el control de pesaje, este es registrado por las cámaras ubicadas en la carretera. Según Radiografía Costarricense (RACSA), en el futuro esta multa se generaría de manera automática y se ejecutaría vía *web*. En la actualidad, estas multas no se ejecutan y lo que se hace es llevar un control estadístico de las evasiones.

A continuación, se detallan y se describen las variables consideradas para los modelos que describen el comportamiento general del *factor camión*, en las estaciones analizadas:

- **FC:** esta variable es de tipo numérica y está compuesto por los valores de los *factores camión* para cada uno de los camiones pesados, tanto en la estación de Limón como la de Cartago, en ambos sentidos.
- **Cumplimiento:** la variable *cumplimiento* posee una tipología binaria. En este sentido, posee dos clases: “CUMPLE” o “NOCUMPLE” (ver Cuadro 1). En los modelos, se clasifica la variable binaria de incumplimiento como 1=NOCUMPLE y 0=CUMPLE. Esto porque se requiere que cuando la variable tome un valor de 1 el *factor camión* crezca (efecto positivo de mayor daño). Lo anterior, permite una mejor interpretación de los modelos de regresión logística.

En Costa Rica, el Decreto N° 31363–MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2003) establece los límites de peso legales permitidos. Así, a partir de estos límites se determina el cumplimiento, o no, de cada uno de los vehículos considerados en la investigación (ver Figura 2). Si uno o más ejes incumplen se categoriza como INCUMPLE y si todos los ejes cumplen se categoriza como CUMPLE.

Cuadro 1. Pesos permitidos en la legislación costarricense según el tipo de vehículo y eje de carga

Clase	Total (T)	Conjunto 1 (T)	Tipo conjunto 1	Conjunto 2 (T)	Tipo conjunto 2	Conjunto 3 (T)	Tipo conjunto 3
C2	16,0	6,0	Simple	10,0	Simple (dual)	–	–
C3	22,5	6,0	Simple	16,5	Tándem	–	–
C4	26,0	6,0	Simple	20,0	Trídem	–	–
T3–S2	39,0	6,0	Simple	16,5	Tándem	16,5	Tándem
T3–S3	45,5	6,0	Simple	16,0	Tándem	23,0	Trídem

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2003).

Tipo de vehículo	Representación gráfica
C2: Camión con eje dual trasero	
C3: camión con eje tándem trasero	
C4: camión con eje trídem trasero	
T3-S2: camión con eje tándem trasero	
T3-S3: camión con eje trídem trasero	

Figura 2. Esquemas de los vehículos considerados

Fuente: Ulloa, Allen, Sibaja, y Badilla, (2008).

- **Hora:** la variable hora consta de 12 clases. Para un mejor análisis, las 24 horas del día se fraccionaron en 12 clases de dos horas cada una. Esto es, la clase 1 sería la fracción horaria de 00:00-2:00, por su parte, la clase 2 sería la fracción horaria 2:00-4:00 y así sucesivamente para las demás clases.
- **Día:** la variable día contiene dos clases, se fraccionó la semana en dos clases de interés, los pesajes registrados de lunes a viernes "LV" y las mediciones realizadas los sábados y domingos "SD".
- **Mes:** la variable mes cuenta con 12 clases, las cuales van del mes 01 (enero) al mes 12 (diciembre), como en el calendario.
- **Año:** la variable año es de tipo numérica, con valores que van del año 2008 al año 2017, para el caso de la estación de Limón, y con valores que van del año 2009 al año 2017, para la estación de Cartago. En el modelo, esta variable sigue la secuencia según el año correspondiente. Es decir, si se toma, por ejemplo, el período que comprende los años que van desde el 2008 hasta el año 2017 la variable año de los modelos en realidad sería el siguiente conjunto de datos (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9). Por ejemplo, en el modelo, el año 2017 correspondería a un valor de 9, el año 2018 un valor de 10 y así sucesivamente.

- **Dirección:** esta variable posee dos clases: "0" cuando son mediciones realizadas en el sentido "hacia San José" (sentido Limón–San José y sentido Cartago–San José) y "1" cuando son mediciones realizadas en el sentido "de San José" (sentido San José–Limón y sentido San José–Cartago).
- **Tipo de vehículo:** esta variable contiene 5 clases que corresponden a cada una de las categorías vehiculares incluidas en el estudio: "C2", "C3", "C4", "T3–S2" y "T3–S3".
- **Tipo de medición:** esta variable consta de 2 clases, "manual" y "auto". Así, para el caso de la estación de Limón toda medición comprendida entre el período que va desde el año 2008 y hasta el año 2013 será clasificada como "manual" y toda medición registrada en el período que

va desde el año 2013 hasta el año 2017 serán clasificadas como "auto".

Una vez que se categorizaron cada una de las variables, se elaboraron los distintos modelos: modelos de regresión lineal múltiple, modelos de regresión logística y modelos SEM. Para realizar los modelos de regresión lineal (variable *factor camión*) y logística (variable incumplimiento) se realizó un esquema (ver Figura 3). En este esquema se detallan de mejor manera tanto el modelado como las variables involucradas en cada uno de los modelos. Dado que existe endogeneidad entre la variable *factor camión* y la variable incumplimiento, se plantean dos modelos por separado. Posteriormente, se plantea un tercero mediante modelos de ecuaciones estructurales, el cual describe el comportamiento general de la variable *factor camión* para cada estación y para cada sentido de pesaje, en un solo modelo.

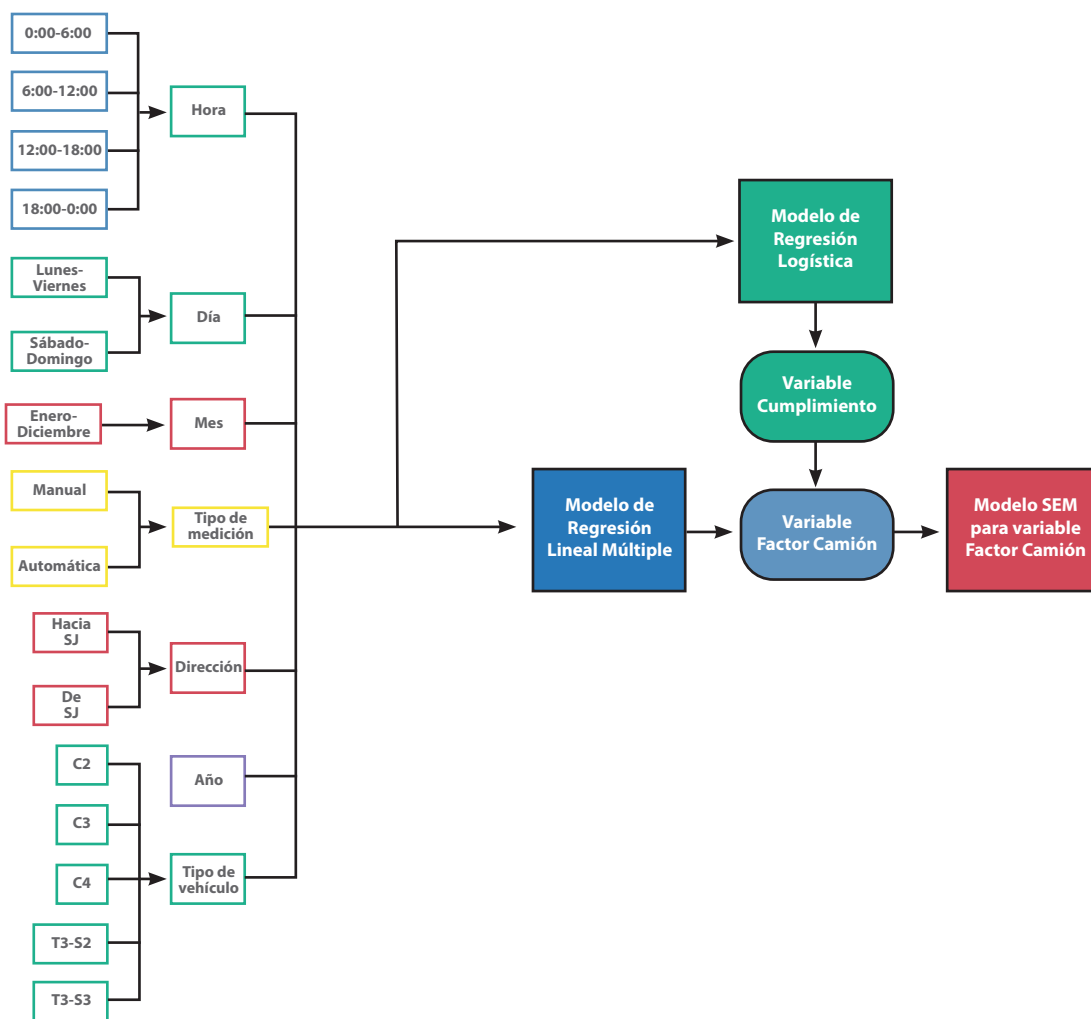


Figura 3. Modelos utilizados para la descripción general del comportamiento de la variable factor camión

La aplicación de los modelos SEM al desarrollo de la presente investigación se lleva a cabo a través de un análisis de mediación simple (ver Figura 4), también llamado análisis de efectos directos e indirectos (Byrne, 2011). Este tipo de modelos se utilizan para analizar el efecto de una variable mediadora (Incumplimiento) en la relación entre una variable independiente y otra variable dependiente o explicada (*Factor Camión*). Dicho en otras palabras, una vez que se hayan obtenido los modelos de regresión lineal y los modelos de regresión logística se podrá elaborar un modelo SEM. Este modelo permite evaluar el efecto que tienen las variables independientes sobre la variable mediadora *Incumplimiento*, antes de hacer su aporte respectivo a la variable dependiente final, el *Factor Camión*.

En cuanto a los registros de pesaje considerados en la investigación, en el sentido de pesaje San José-Limón se tomaron en cuenta los registros del período 2008-2017. Se tomó en consideración la estación de pesaje de Limón porque esta estación registra los vehículos de una ruta principal de tráfico medio de Costa Rica (Estado de la Nación, 2018).

Con relación a los resultados obtenidos en la investigación, pese a que se hicieron distintos análisis; en este artículo se presentan los resultados más representativos que son los correspondientes al sentido de pesaje San José-Limón. Este sentido de pesaje demostró características particulares de acuerdo con la tipología vehicular predominante y los

valores de *factor camión*. Además, existen diferencias estadísticamente significativas, las cuales permiten afirmar que los *factores camión* y los porcentajes de incumplimiento son mayores en el sentido San José-Limón que los obtenidos para el sentido Limón-San José. Lo anterior se asocia con el movimiento de cargas hacia el puerto de Limón.

Factor camión según la hora de registro

De acuerdo con la fracción horaria en la cual se realizó el pesaje, en la Figura 5 se muestra que de 20:00–22:00 y de 00:00–02:00 se registran los mayores valores de *factor camión*, en tanto que en la fracción horaria de 06:00–08:00 se registraron los menores valores de *factor camión*. En este caso es más marcada la tendencia de que en las zonas centrales de la gráfica los *factores camión* sean menores que en las franjas horarias extremas (20:00–04:00).

En la Figura 6 se muestra el gráfico de efectos principales para el factor *hora* y para el factor tipo de vehículo para la variable de respuesta *factor camión* en la estación de Limón. En el gráfico se muestra que la fracción horaria que genera mayores valores de *factor camión* corresponde al período que va de 18:00 – 0:00. Mientras que en la fracción horaria de 6:00 a 12:00 se presentan los *factores camión* más bajos. Se aprecia también que el mayor valor de *factor camión* promedio lo presenta el tipo de vehículo T3–S3 y que el menor valor lo presenta el tipo de vehículo C2.

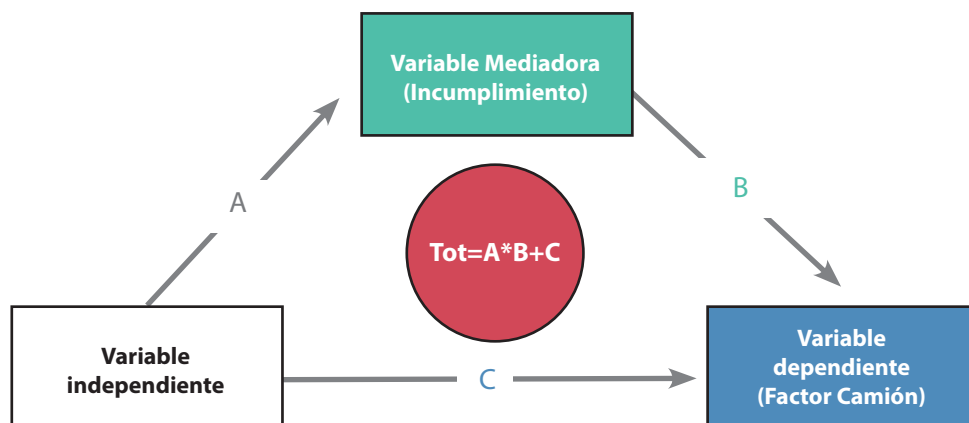


Figura 4. Esquema sobre la mediación de los modelos SEM

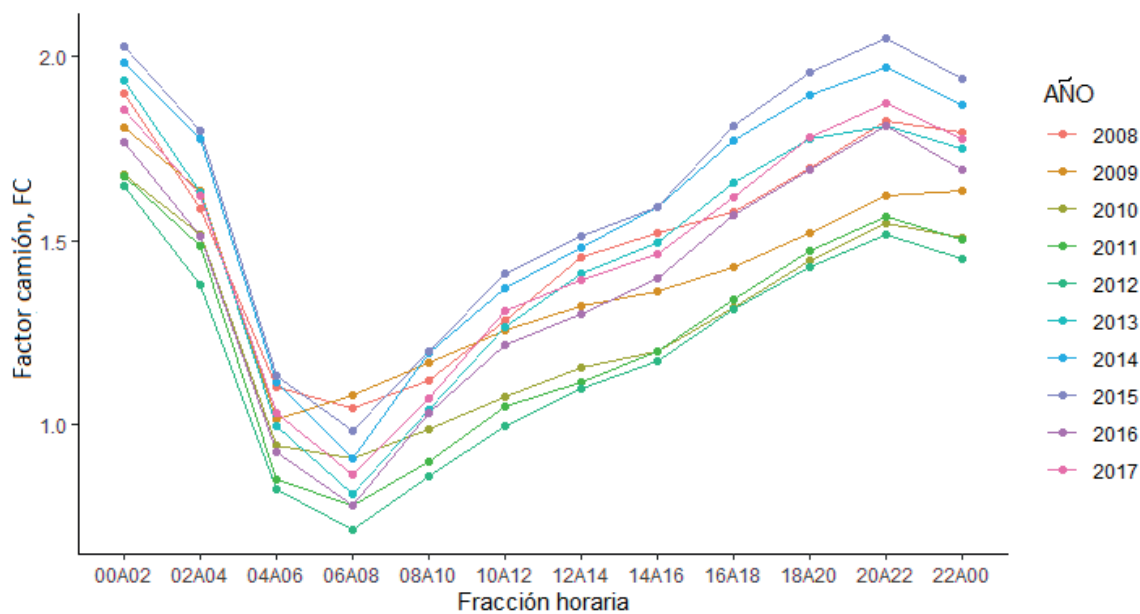


Figura 5. Factor camión promedio según la hora de medición en el sentido San José-Limón

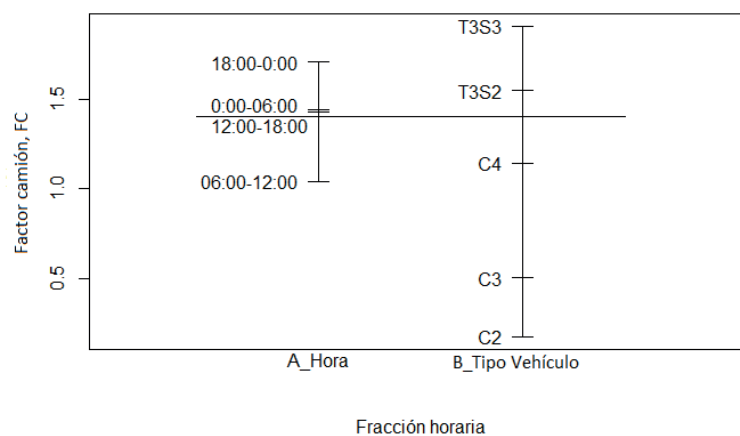


Figura 6. Gráfico de efectos principales del factor camión para el factor Hora y Tipo de vehículo de la estación del sentido San José-Limón

Factor camión según el tipo de medición

En la Figura 7 se muestran las diferencias entre los valores del *factor camión* según el tipo de medición y según el cumplimiento. Cuando los vehículos no cumplen; los *factores camión* incrementan al pasar de un sistema de pesaje manual a uno automatizado.

Factor camión según el tipo de vehículo

En la Figura 8 se muestra el gráfico de interacción entre las variables *tipo de vehículo* y el *tipo de medición*. En general, la figura permite apreciar que cuando se automatizó la estación de pesaje los *factores camión* presentaron pequeñas variaciones. Los vehículos C2, C4, T3-S2, T3-S3 presentaron un incremento en los valores de *factores camión* al pasar de un sistema de pesaje manual a un sistema de pesaje automático. Finalmente, el C3 presentó una disminución en los valores promedio de *factor camión*.

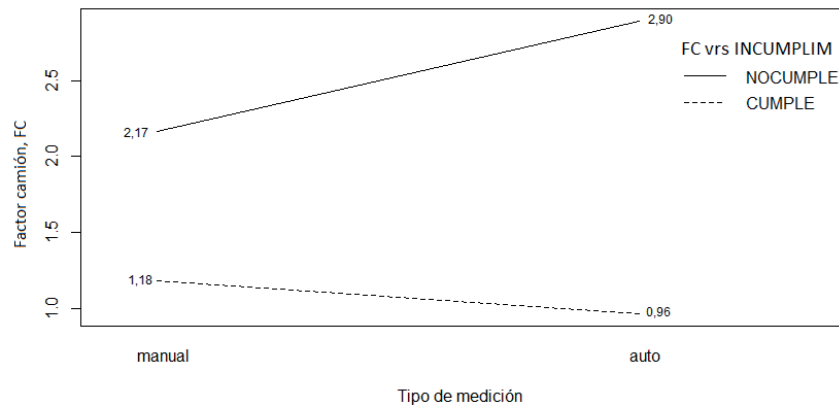


Figura 7. Interacción entre la variable incumplimiento, el tipo de medición y el factor camión para el sentido San José-Limón

Factor camión según el mes de registro

En la Figura 9 se muestra el comportamiento del *factor camión* promedio mensual, a lo largo de todos los meses analizados. En general, se muestra una tendencia decreciente en todo el registro, salvo en el aumento que se da tras la automatización. Posteriormente, se establece una ecuación de regresión para describir este comportamiento.

Correlación para el factor camión

En la Figura 10 se muestra, según el mes de registro, la relación utilizada para describir el comportamiento de la variable *factor camión*, para los meses en los que se realizaron mediciones de tipo manual. Durante la investigación se probaron distintos ajustes y en este caso, la regresión potencial fue la que mostró el mejor ajuste de los datos. En general, se aprecia una tendencia decreciente -con tendencia a estabilización- desde que se comenzaron a hacer las mediciones manuales. La ecuación mostrada describe un 72,1% de la variabilidad de los datos reales. Este ajuste se debe a la tendencia marcada de los datos y a la baja varianza de los datos a lo largo de los años.

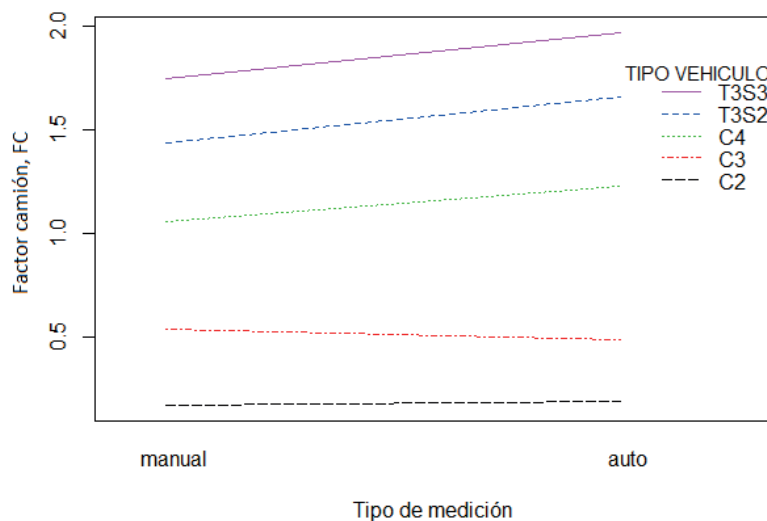


Figura 8. Interacción entre la variable tipo de vehículo, el tipo de medición y el factor camión para el sentido San José-Limón

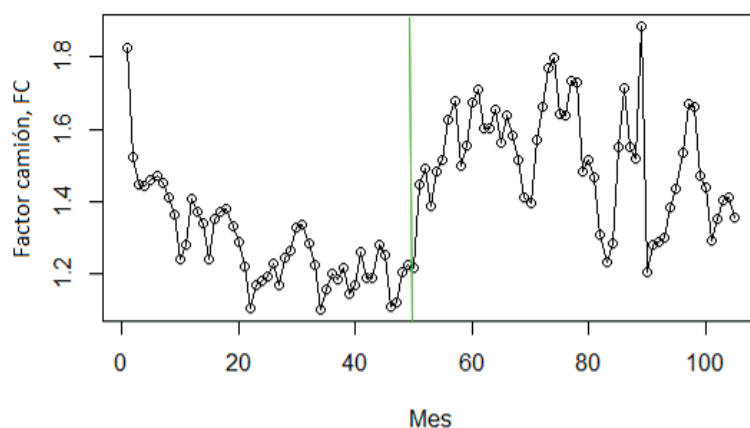


Figura 9. Factor camión promedio según todos los meses de registro del sentido San José-Limón

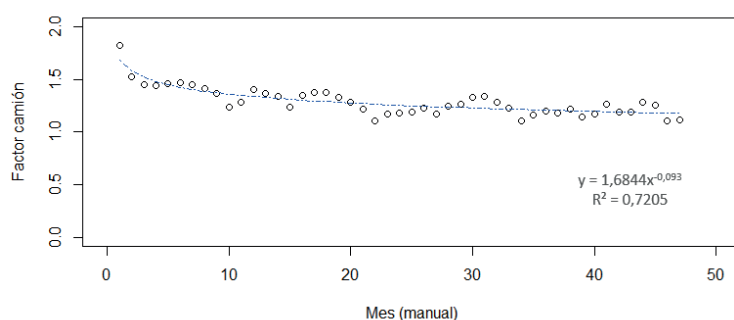


Figura 10. Regresión utilizada para relacionar los factores camión y los meses de registro en el sentido San José-Limón (manual)

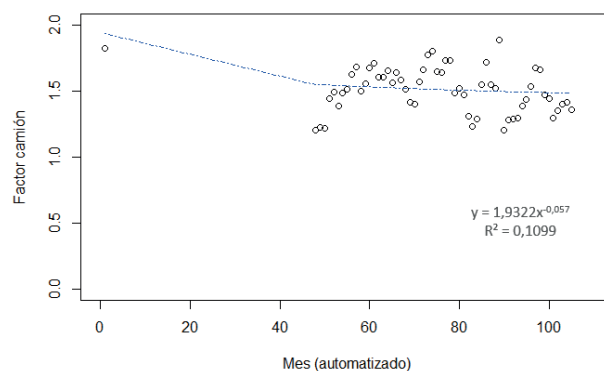


Figura 11. Regresión utilizada para relacionar los factores camión y los meses de registro en el sentido San José-Limón (automática)

En la Figura 11 se muestra la relación utilizada para describir el comportamiento de la variable *factor camión*, según los meses de registro automático. En este caso el mejor ajuste se obtuvo a través de una ecuación potencial y conservando el valor de *factor camión* promedio del mes inicial, esto porque los datos se mostraban bastante dispersos y tomando en consideración el aporte del mes 1 se logró un ajuste que permitiera describir el efecto de estabilización en los *factores camión* por causa de la automatización. En general, se aprecia una tendencia decreciente, desde que se comenzaron las mediciones tanto manuales como automáticas. Pese al bajo porcentaje de representación de los datos (R^2), la ecuación obtenida describe el comportamiento general de los datos.

En el Cuadro 2 se muestran algunas proyecciones para el *factor camión* para los años 2017, 2020, 2025 y 2035. A partir de las proyecciones obtenidas, es evidente que las variaciones del *factor camión*,

a lo largo de los años, bajo un sistema de pesaje automatizado y manual son pequeñas y, en general, existe cierta tendencia a decrecer y a estabilizarse. Sin embargo, se observan diferencias entre las proyecciones según el tipo de medición: la proyección del sistema de pesaje manual es menor que la de la automática.

Por otra parte, en la Figura 12 y Figura 13 se muestran las relaciones utilizadas para describir el comportamiento de la variable *factor camión*, según el porcentaje de incumplimiento para dos tipos de ajustes, un ajuste exponencial y un ajuste lineal. Los anteriores fueron los dos mejores ajustes que se lograron hallar para los datos, las ecuaciones permiten proyectar *factores camión* promedio según el porcentaje de incumplimiento de los vehículos. Así, se puede conocer el valor del *factor camión* si el porcentaje de incumplimiento fuera 0% y se podría hacer de igual manera el ejercicio para cualquier otro valor de incumplimiento.

Cuadro 2. Proyecciones de factor camión según la regresión hallada para el sentido de pesaje San José–Limón que relaciona factor camión con mes de registro

Año	Factor camión proyectado (manual)	Factor camión proyectado (automático)
2017	1,0926	1,4820
2020	1,0631	1,4573
2025	1,0286	1,4281
2030	1,0039	1,4070
Ecuación de ajuste	$1,6844 (\text{Mes})^{-0,0930}$	$1,9322 (\text{Mes})^{-0,0570}$

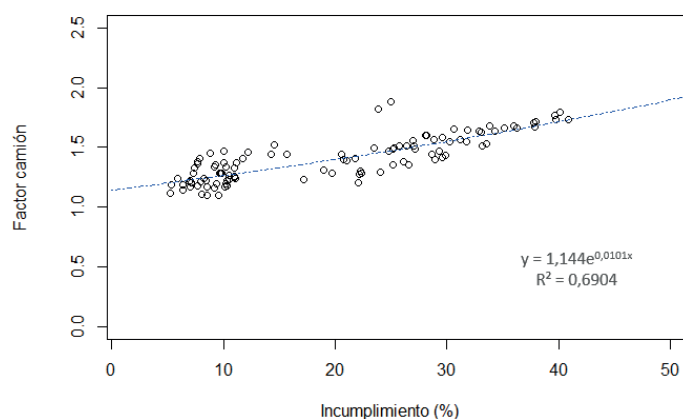


Figura 12. Regresión exponencial utilizada para relacionar el factor camión y el incumplimiento (%) en el sentido San José–Limón

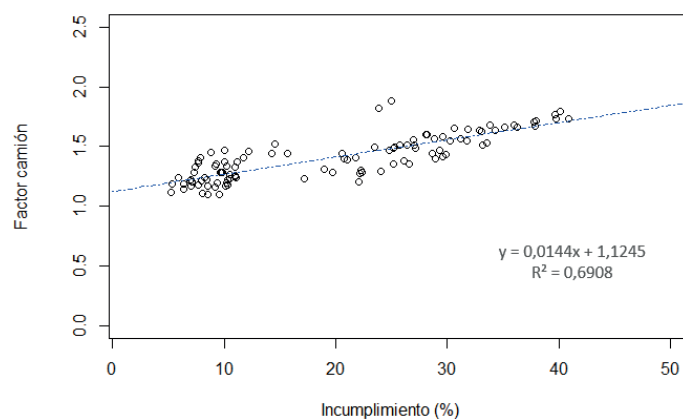


Figura 13. Regresión lineal utilizada para relacionar el factor camión y el incumplimiento (%) en el sentido San José–Limón

En el Cuadro 3 se presentan algunas proyecciones de los *factores camión*, según los porcentajes de incumplimiento para el ajuste lineal y para el ajuste potencial. A partir de la información mostrada, se puede deducir que, si el incumplimiento fuera cero, el valor de *factor camión* sería, para el caso del ajuste potencial, de 1,14. Mientras que en el caso del ajuste lineal sería de 1,12. En un caso extremo, si los porcentajes de incumplimiento fueran de un 20%, los valores del *factor camión*, según el ajuste potencial y lineal, serían de 1,40 y 1,41, respectivamente. El incremento del *factor camión* entre el valor de 0% incumplimiento y 20% incumplimiento sería de 0,26 para el ajuste potencial, y de 0,29 para el ajuste lineal. Esto demuestra la importancia de implementar controles de pesaje para disminuir consecuentemente los factores de daño en pavimentos nacionales, al buscar un incumplimiento cercano a 0%.

Comparaciones antes y después de la automatización para la cantidad de registros y composiciones porcentuales vehiculares

En esta sección se comparan: la cantidad de observaciones registradas, la cantidad de meses antes de la automatización y la cantidad de meses equivalentes después de la automatización.

Posteriormente, para cada una de estas relaciones se aplica una prueba estadística para establecer si existen o no diferencias significativas. Al final de la sección se replica el ejercicio comparativo, pero esta vez según la composición porcentual vehicular y según la cantidad de pesajes según la fracción horaria registrada.

La Figura 14 permite apreciar que el vehículo T3-S3 presentó un incremento en todas las fracciones horarias. Mientras tanto, el vehículo T3-S2 presentó una disminución porcentual en todas las fracciones horarias, al igual que el tipo de vehículo C2.

De manera análoga, se hizo un ejercicio similar al anterior, pero esta vez con la cantidad de vehículos sometidos al pesaje (ver Figura 15 y Cuadro 4). Se aprecia que, en promedio, los T3-S2 en la fracción horaria 06:00–00:00, al pasar de una medición manual a una medición automatizada, presentaron una disminución en la cantidad de observaciones registradas. En todas las fracciones horarias se registró mayor cantidad de vehículos T3-S3 al pasar de un sistema de pesaje manual a un sistema de pesaje automatizado. En el Cuadro 4 se muestra que, al hacer una comparación de la cantidad de vehículos registrados 46 meses antes con 46 meses después de la automatización, se presenta un incremento estadísticamente significativo de 10,37% mediciones adicionales.

Cuadro 3. Proyecciones de factores camión los porcentajes de incumplimiento para el ajuste lineal y potencial para el sentido de pesaje San José–Limón

Incumplimiento (%)	Ajuste potencial		Ajuste lineal	
	FC	Incremento	FC	Incremento
0	1,14	–	1,12	–
5	1,20	0,06	1,20	0,07
10	1,26	0,06	1,27	0,07
15	1,33	0,06	1,34	0,07
20	1,40	0,07	1,41	0,07

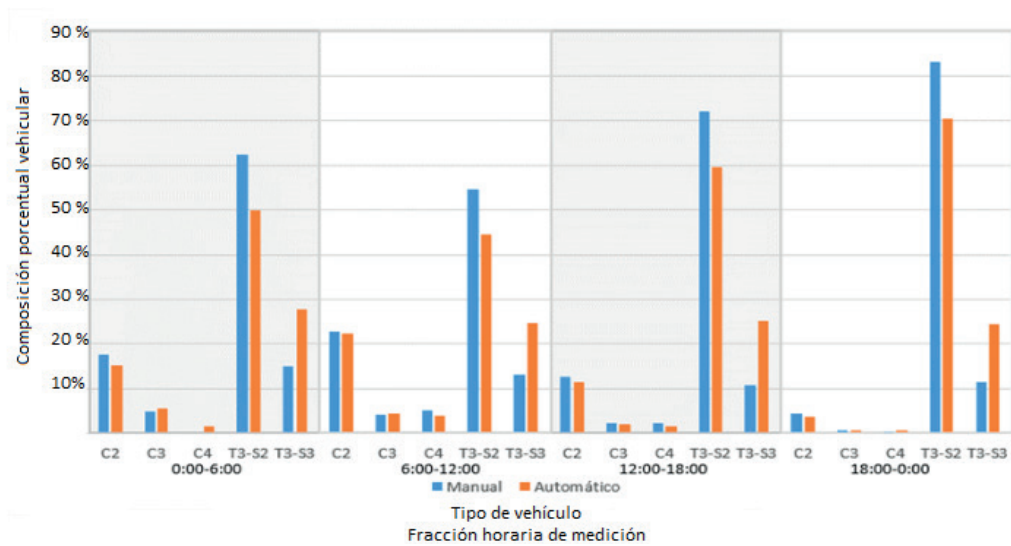


Figura 14. Composición porcentual vehicular en el sentido San José-Limón, según el tipo y horario de medición

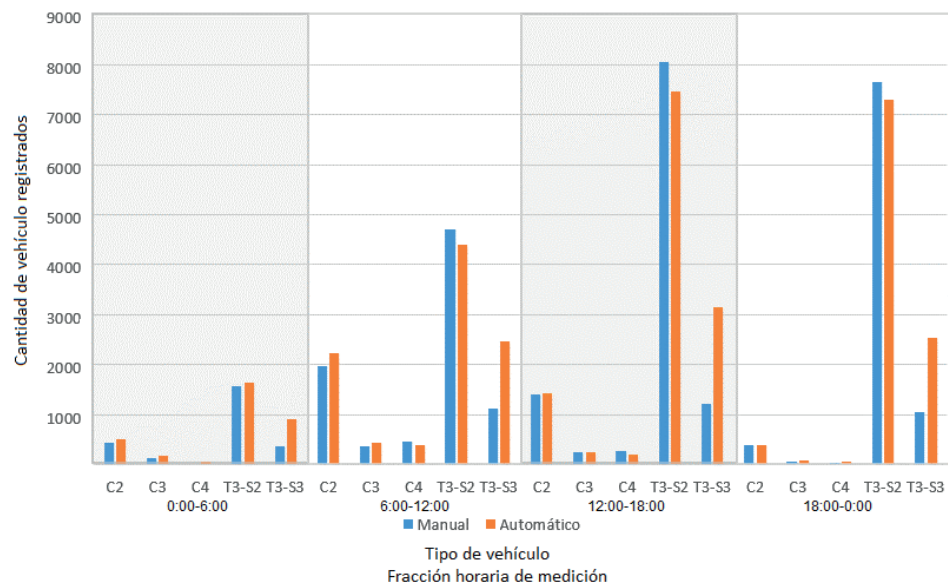


Figura 15. Cantidad de observaciones promedio mensuales en el sentido San José-Limón, según el tipo y el horario de la medición

Cuadro 4. Resultados de las comparaciones de cantidad de observaciones promedio mensuales antes y después de la automatización para el sentido de pesaje SJ-LIM

Período analizado antes y después de la automatización (meses)	Cantidad de observaciones promedio mensuales	Diferencia
12 antes	33 197	+ 185 *
12 después	33 382	+ 0,55%
24 antes	33 964	+ 359 *
24 después	34 323	+ 1,06%
36 antes	32 296	+ 2767
36 meses después	35 063	+ 5,31%
46 meses antes	32 449	+ 3366
46 meses después	35 815	+ 10,37%

*Las diferencias no son estadísticamente significativas

Modelo SEM

En esta sección se presentan los coeficientes de los modelos SEM, para el sentido de pesaje San

José-Limón (ver Cuadro 5), para el modelo de incumplimiento y para el modelo de *factor camión*.

Cuadro 5. Coeficientes del modelo SEM para el sentido de pesaje San José-Limón

Regresiones	Coeficiente	Error Estándar	Valor-Z	Valor-p	Estandarizado	R ²
Incumplimiento						0,36
Año	0,093	0,00	91,94	<0,001	0,20	
Febrero	0,088	0,00	20,57	<0,001	0,02	
Marzo	0,119	0,00	28,67	<0,001	0,03	
Abril	0,051	0,00	12,16	<0,001	0,01	
Mayo	0,054	0,00	13,11	<0,001	0,01	
Junio	0,098	0,00	23,27	<0,001	0,02	
Julio	0,056	0,00	13,18	<0,001	0,01	
Agosto	0,067	0,00	15,94	<0,001	0,02	
Setiembre	0,042	0,00	9,93	<0,001	0,01	
Octubre	0,069	0,00	16,49	<0,001	0,02	
Noviembre	0,032	0,00	7,85	<0,001	0,01	
Diciembre	0,022	0,00	5,05	<0,001	0,01	
C3	1,181	0,01	149,02	<0,001	0,15	
C4	3,200	0,01	428,58	<0,001	0,37	
T3-S2	1,458	0,01	240,50	<0,001	0,56	

Cuadro 5. cont.

Regresiones	Coefficiente	Error Estándar	Valor-Z	Valor-p	Estandarizado	R ²
T3-S3	2,052	0,01	333,04	<0,001	0,65	
Lunes-Viernes	-0,096	0,00	-45,14	<0,001	-0,03	
02:00-04:00	-0,025	0,01	-3,62	<0,001	0,00	
04:00-06:00	-0,291	0,01	-45,86	<0,001	-0,04	
06:00-08:00	-0,454	0,01	-90,21	<0,001	-0,11	
08:00-10:00	-0,298	0,01	-59,66	<0,001	-0,07	
10:00-12:00	-0,235	0,01	-46,51	<0,001	-0,05	
12:00-14:00	-0,251	0,01	-51,54	<0,001	-0,06	
14:00-16:00	-0,225	0,01	-47,73	<0,001	-0,06	
16:00-18:00	-0,154	0,01	-33,13	<0,001	-0,04	
18:00-20:00	-0,119	0,01	-25,38	<0,001	-0,03	
20:00-22:00	-0,077	0,01	-16,10	<0,001	-0,02	
22:00-00:00	-0,069	0,01	-14,00	<0,001	-0,01	
Automática	0,035	0,00	24,46	<0,001	0,05	
Factor camión						0,99
Año	-0,100	0,00	-115,93	<0,001	-0,24	
Febrero	-0,039	0,00	-11,57	<0,001	-0,01	
Marzo	-0,021	0,00	-6,64	<0,001	-0,01	
Abril	0,022	0,00	6,85	<0,001	0,01	
Mayo	-0,001	0,00	-0,39	<0,001	0,00	
Junio	-0,042	0,00	-12,70	<0,001	-0,01	
Julio	-0,077	0,00	-23,32	<0,001	-0,02	
Agosto	-0,076	0,00	-23,39	<0,001	-0,02	
Setiembre	-0,048	0,00	-14,69	<0,001	-0,01	
Octubre	-0,063	0,00	-19,71	<0,001	-0,02	
Noviembre	-0,039	0,00	-12,23	<0,001	-0,01	
Diciembre	-0,045	0,00	-12,82	<0,001	-0,01	
C3	-0,813	0,01	-120,66	<0,001	-0,12	
C4	-2,083	0,01	-314,50	<0,001	-0,27	
T3-S2	-0,166	0,01	-32,70	<0,001	-0,07	
T3-S3	-0,379	0,01	-73,65	<0,001	-0,13	
Lunes-Viernes	-0,076	0,00	-45,72	<0,001	-0,03	
02:00-04:00	-0,011	0,01	-2,13	<0,001	0,00	
04:00-06:00	-0,103	0,01	-21,18	<0,001	-0,02	
06:00-08:00	-0,169	0,00	-43,85	<0,001	-0,05	
08:00-10:00	-0,154	0,00	-39,90	<0,001	-0,04	
10:00-12:00	-0,080	0,00	-20,66	<0,001	-0,02	
12:00-14:00	-0,052	0,00	-13,96	<0,001	-0,01	
14:00-16:00	-0,039	0,00	-10,74	<0,001	-0,01	

Cuadro 5. cont.

Regresiones	Coefficiente	Error Estándar	Valor-Z	Valor-p	Estandarizado	R ²
16:00-18:00	0,007	0,00	2,00	<0,001	0,00	
18:00-20:00	0,045	0,00	12,47	<0,001	0,01	
20:00-22:00	0,065	0,00	17,83	<0,001	0,02	
22:00-00:00	-0,032	0,00	-8,45	<0,001	-0,01	
Incumplimiento	0,961	0,00	3360,98	<0,001	1,08	
Automática	0,008	0,00	7,18	<0,001	0,01	
Total de observaciones	CFI	TLI	GFI	AGFI	RMSEA	SRMR
3 568 623	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00

Cuadro 6. Mediación SEM para los modelos del sentido de pesaje San José-Limón

Variable	Estimador según modelo Incumplimiento (A)	Coefficiente Incumplimiento (B)	Estimador según modelo Factor camión (C)	Efecto total (A)*(B)+(C)
Año	0,093	0,961	-0,100	-0,011
C3	1,181		-0,813	0,322
C4	3,200		-2,083	0,992
T3-S2	1,458		-0,166	1,235
T3-S3	2,052		-0,379	1,593
Lunes-Viernes	-0,096		-0,076	-0,168
Automática	0,035		0,008	0,042

Para determinar el efecto total que implica una variable independiente en una variable dependiente (*Factor Camión*) se realiza un análisis de mediación; se analiza el efecto que supone la variable mediadora (Incumplimiento) en la variable independiente, antes de que esta realice su aporte a la variable dependiente. Asimismo, en el Cuadro 6 es posible apreciar que las variables que se derivan del tipo de vehículo son variables que dependen mayoritariamente de la mediación, pues, son estas variables las que presentan mayores porcentajes de incumplimiento. La variable incumplimiento afecta directamente y en gran proporción el efecto total de cada una de las variables en el cálculo del *factor camión*. En la columna Efecto Total se muestra el efecto neto que tiene cada variable en el *factor camión*.

Conclusiones

Se logró modelar con éxito el comportamiento del incumplimiento y de la variable *factor camión*. Los modelos obtenidos contemplan el efecto de las variables Año, Mes, Tipo de Vehículo, Día, Hora, Tipo de Medición y Sentido de Pesaje en las variables de respuesta Incumplimiento y *Factor Camión*. Estos modelos permiten cuantificar el efecto de la implementación de las estaciones de pesaje automáticas en el *factor camión*, a través de la interacción entre las variables Tipo de Medición y Tipo de vehículo. Los modelos econométricos obtenidos también permiten hacer estimaciones acerca del efecto de una variable sobre otra y/o hacer predicciones acerca del valor futuro de las variables.

Es importante recalcar que este es el primer estudio en Costa Rica que analiza el tema de los *factores camión* con este nivel de detalle. Las proyecciones de la tendencia hallada para el FC según el Incumplimiento (%) pueden ser utilizados para plantear metas de reducción de FC a través de una disminución de los porcentajes de incumplimiento, por medio de políticas más estrictas en cuanto a las multas por incumplimiento y su fiscalización.

A nivel general, el vehículo tipo C4 presenta los mayores porcentajes de incumplimiento. Además de eso, pese a que una vez que se automatizan las estaciones de pesaje este incumplimiento tiene una tendencia general decreciente, los altos porcentajes de incumplimiento son igualmente dañinos para las estructuras de pavimento. En este sentido, se deben utilizar *factores camión* actualizados que consideren este tipo de cambios.

Asimismo, hubo un incremento en los *factores camión* y porcentajes de incumplimiento analizados, al pasar de un sistema de pesaje manual a uno automatizado. Este cambio permite ver que lo realista es considerar *factores camión* mayores y, por ende, se requiere de estructuras de pavimento más resistentes para evitar su daño prematuro. Además, el sistema de pesaje automatizado ofrece un mejor control de tránsito pesado, y, por lo tanto, permite captar verazmente mayor cantidad de vehículos sobrecargados. Este estudio permite evidenciar que, para poder disminuir el *factor camión* en las estaciones de pesaje, es necesario aplicar políticas de control de cargas más estrictas que las que actualmente se aplican. Esto porque, según los valores hallados en los análisis de modelos estructurales, el efecto total de cada una de las variables está influido directamente y, en gran parte, por la variable incumplimiento.

Reconocimientos

Para la realización de la investigación se contó con el apoyo y la colaboración de: Ing. Catalina Vargas Sobrado, MEng de la Unidad de Gestión Municipal y de Ing. Eliécer Arias Barrantes, MSc de la Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte, ambos del PITRA-LanammeUCR.

Referencias

- Allen, J. y Badilla, G. (2011). *Determinación de la carga de diseño para pavimentos flexibles en Costa Rica*. XVI Congreso Ibero-Latinoamericano de Asfalto, Rio de Janeiro, Brasil. Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/516>
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2003). *Guide for Design of Pavement Structures*. AASHTO: Washington D. C.
- Byrne, B. (2011). *Structural equation modeling with AMOS: Basic concepts, applications, and programming*. Routledge: Londres.
- Contraloría General de la República (2013). *Informe del estudio especial efectuado en el Consejo Nacional de Vialidad, sobre la rehabilitación de las estaciones de pesaje (DFOE-IFR-IF-07-2013)*. Recuperado de: https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docs_cgr/2013/SIGYD_D_2013016059.pdf
- Estado de la Nación (2018). *Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Programa Estado de la Nación*. Recuperado de: <https://estadonacion.or.cr/informes/>
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2003). *Decreto N° 31363. Reglamento de circulación por carretera con base en el peso y las dimensiones de los vehículos de carga*.
- Ulloa, Á., Allen, J., Sibaja, D. y Badilla, G. (2008). *Determinación de factores camión en pavimentos de Costa Rica. Infraestructura Vial, 10(19), 28-37*.