



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

REPORTE: LM-PI-USVT-003-16

# DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CARGA PARA DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS EN COSTA RICA Informe de Avance

Preparado por:

Unidad de Seguridad Vial y Transporte

San José, Costa Rica

Febrero, 2016

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA-LanammeUCR [diana.jimenez@ucr.ac.cr](mailto:diana.jimenez@ucr.ac.cr)



# DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CARGA PARA DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS EN COSTA RICA. INFORME DE AVANCE

Hernandez-Vega, Henry <sup>1</sup>; Jimenez-Romero, Diana <sup>2</sup>; Aguiar-Moya, José Pablo <sup>3</sup>; Loria-Salazar, Luis Guillermo <sup>4</sup>

1. Investigador Unidad de Seguridad Vial y Transporte PITRA-Lanamme UCR
2. Coordinador de Unidad de Seguridad Vial y Transporte PITRA-Lanamme UCR
3. Coordinador de Unidad de Materiales y Pavimentos PITRA-Lanamme UCR
4. Coordinador General Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) Lanamme UCR

**Palabras Clave:** PITRA, Carga, Presión, Desviación Lateral, Tránsito Vehicular, Velocidad, Pavimentos, Modelación.

**Resumen:** La Con el Proyecto de Investigación se busca la determinación de los parámetros de carga más representativos en el diseño estructural de los pavimentos utilizados en las carreteras de Costa Rica. La información recopilada servirá como insumo a la futura Guía de Diseño Estructural de Pavimentos de nuestro país.

Específicamente, el proyecto se enfoca en: a) evaluar la información de tráfico recopilada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), b) realizar estudios de campo para recopilar datos de tránsito promedio diario (TPD) por tipo de vehículo y recopilar parámetros y estadísticos de flujo y velocidades de operación utilizando contadores neumáticos y c) generar parámetros y estadísticos de tránsito requeridos para el diseño estructural de pavimentos en la Red Vial Nacional Primaria de Costa Rica.

En este informe se presentan los resultados obtenidos en la primera fase de la línea de investigación para la determinación de parámetros de carga para el diseño estructural de pavimentos de Costa Rica; se han recopilado datos de campo sobre los cuatro principales parámetros: la carga, la presión de inflado, la desviación lateral y el tránsito vehicular. Se realiza un análisis de los datos de los proyectos de investigación que desarrolla la Unidad de Materiales y Pavimentos, la Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA-LanammeUCR, y de los trabajos finales de graduación de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.

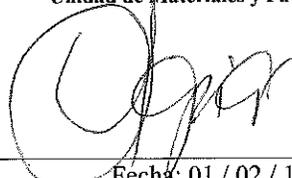
---

## Referencias

1. Allen, J. (2014). Recomendaciones técnicas para el diseño estructural de pavimentos flexibles con la incorporación de criterios mecánico-empíricos. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.
2. Allen, J., Vargas, C., & Sánchez, E. (2015). Análisis exploratorio de la variación del factor camion mediante el control de sobrepeso en el transporte de carga para el diseño de pavimentos en Costa Rica. San José: Unidad de Gestión Municipal. Programa de Infraestructura del Transporte Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.
3. Magaña, J. (2014). Determinación de patrones típicos de distribución temporal de tránsito en Costa Rica. San Jose, Costa Rica: Tesis para proporcionar el grado de licenciatura, Universidad de Costa Rica
4. Morales, M., & Hernandez, H. (2016). Patrones de velocidad a partir de datos de estaciones permanentes de monitoreo del tránsito de Costa Rica. San Jose: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
5. Sibaja, L. M. (2014). Trabajo Final de Graduación: Determinación de presión de neumáticos de vehículos de carga típicos de Costa Rica. (Tesis inédita de licenciatura). Universidad de Costa Rica. San Pedro.

**Hernandez-Vega, H.; Jimenez-Romero, D.; Aguiar-Moya, J.P. & Loría-Salazar, L.G. (2016).**  
Determinación de Parámetros de Carga para diseño estructural de Pavimentos en Costa Rica. Informe de Avance

Información técnica del documento

<b>1. Informe</b> LM-PI-USVT-003-16		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> Determinación de Parámetros de Carga para diseño estructural de Pavimentos en Costa Rica. Informe de Avance		<b>4. Fecha del Informe</b> Febrero, 2016
<b>5. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>6. Resumen</b> <p><i>Con el Proyecto de Investigación se busca la determinación de los parámetros de carga más representativos en el diseño estructural de los pavimentos utilizados en las carreteras de Costa Rica. La información recopilada servirá como insumo a la futura Guía de Diseño Estructural de Pavimentos de nuestro país.</i></p> <p><i>Específicamente, el proyecto se enfoca en: a) evaluar la información de tráfico recopilada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), b) realizar estudios de campo para recopilar datos de tránsito promedio diario (TPD) por tipo de vehículo y recopilar parámetros y estadísticos de flujo y velocidades de operación utilizando contadores neumáticos y c) generar parámetros y estadísticos de tránsito requeridos para el diseño estructural de pavimentos en la Red Vial Nacional Primaria de Costa Rica.</i></p> <p><i>En este informe se presentan los resultados obtenidos en la primera fase de la línea de investigación para la determinación de parámetros de carga para el diseño estructural de pavimentos de Costa Rica; se han recopilado datos de campo sobre los cuatro principales parámetros: la carga, la presión de inflado, la desviación lateral y el tránsito vehicular. Se realiza un análisis de los datos de los proyectos de investigación que desarrolla la Unidad de Materiales y Pavimentos, la Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA-LanammeUCR, y de los trabajos finales de graduación de la Escuela de Ingeniería Civil de la UCR.</i></p>		
<b>7. Palabras clave</b> PITRA, Carga, Presión, Desviación Lateral, Tránsito Vehicular, Velocidad, Pavimentos, Modelación.	<b>8. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>9. Núm. de páginas</b> 75
<b>10. Preparado por:</b>		
Ing. Henry Hernández Vega, MSc. Investigador Unidad de Seguridad Vial y Transporte  Fecha: 01 / 02 / 16	COLABORADORA Mónica Daniela Tello Villegas Asistente Unidad de Seguridad Vial y Transporte	
<b>11. Revisado por:</b>		
Ing. Diana Jiménez Romero, MSc., MBA Coordinadora Unidad de Seguridad Vial y Transporte  Fecha: 01 / 02 / 16	Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 01 / 02 / 16	<b>11. Aprobado por:</b> Ing. Guillermo Loria Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: 01 / 02 / 16



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>8</b>
<b>DESCRIPCIÓN:.....</b>	<b>11</b>
<b>OBJETIVO GENERAL: .....</b>	<b>11</b>
<b>ANTECEDENTES:.....</b>	<b>11</b>
<b>ESQUEMA CONCEPTUAL: .....</b>	<b>12</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....</b>	<b>14</b>
<b>JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>14</b>
<i>IMPORTANCIA PRÁCTICA.....</i>	<i>14</i>
<i>VALOR TEÓRICO Y UTILIDAD METODOLÓGICA.....</i>	<i>14</i>
<b>FASE 1: RECOPIACIÓN DE DATOS EN CAMPO Y SU ANÁLISIS .....</b>	<b>15</b>
<b>PARÁMETRO DE CARGA .....</b>	<b>16</b>
<i>PROYECTO DE GRADUACIÓN: DETERMINACIÓN DE PATRONES TÍPICOS DE DISTRIBUCIÓN TEMPORAL .....</i>	<i>16</i>
<i>RUTAS .....</i>	<i>17</i>
<i>RESULTADOS DE LA ENCUESTA DE CARGA .....</i>	<i>18</i>
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</i>	<i>19</i>
<i>INFORME: VARIACIÓN DEL FACTOR CAMIÓN MEDIANTE EL CONTROL DE SOBREPESO.....</i>	<i>20</i>
<i>PORCENTAJE DE VEHÍCULOS QUE INCUMPLEN LA REGULACIÓN DE PESO.....</i>	<i>21</i>
<i>FACTOR CAMIÓN.....</i>	<i>22</i>
<i>RELACIÓN ENTRE EL FACTOR CAMIÓN Y EL PORCENTAJE DE VEHÍCULOS CON INCUMPLIMIENTO DE PESO .....</i>	<i>23</i>
<i>ANÁLISIS DE REGRESIÓN ENTRE EL FACTOR CAMIÓN Y EL PORCENTAJE DE VEHÍCULOS CON INCUMPLIMIENTO DE PESO.....</i>	<i>23</i>
<i>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</i>	<i>24</i>
<i>CONCLUSIONES.....</i>	<i>25</i>
<i>RECOMENDACIÓN .....</i>	<i>25</i>
<b>PRESIÓN DE INFLADO .....</b>	<b>25</b>
<i>INFORME DEL PITRA-LANAMMEUCR .....</i>	<i>26</i>
<i>FUNCIONES DEL NEUMÁTICO .....</i>	<i>26</i>
<i>TIPOS DE NEUMÁTICOS .....</i>	<i>26</i>
<i>NOMENCLATURA DE LOS NEUMÁTICOS.....</i>	<i>27</i>



<i>NEUMÁTICOS Y PRESIÓN DE INFLADO</i> .....	27
<i>PRESIÓN DE INFLADO Y PAVIMENTOS</i> .....	28
<i>SISTEMAS DE PRESIÓN DE INFLADO CENTRAL</i> .....	29
<i>NEUMÁTICOS “SUPERSINGLE”</i> .....	29
<i>RESPUESTA Y DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO: AHUELLAMIENTO Y FATIGA</i> .....	29
<i>AHUELLAMIENTOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES</i> .....	30
<i>VEHÍCULOS DE CARGA EN TEXAS Y ENCUESTAS DE CARGA EN EGIPTO</i> .....	30
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i> .....	31
<i>TRABAJO DE GRADUACIÓN: DETERMINACIÓN DE PRESIÓN DE NEUMÁTICOS DE VEHÍCULOS DE CARGA TÍPICOS DE COSTA RICA</i> .....	31
<i>ESPECTROS DE PRESIÓN</i> .....	33
<i>Florida Ice &amp; Farm</i> .....	34
<i>Estación de Pesaje de Búfalo</i> .....	35
<i>Estación de Pesaje de Ochomogo</i> .....	37
<i>Estación de Pesaje de Esparza</i> .....	39
<i>IMPACTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS</i> .....	41
<i>ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)</i> .....	42
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i> .....	43
<i>DESVIACIÓN LATERAL DE LLANTA</i> .....	44
<i>TRÁNSITO VEHICULAR</i> .....	45
<i>PROYECTO DE GRADUACIÓN: DETERMINACIÓN DE PATRONES TÍPICOS DE DISTRIBUCIÓN TEMPORAL</i> .....	45
<i>FACTORES DE TRÁNSITO</i> .....	46
<i>DETERMINACIÓN DE DÍAS DE LA SEMANA Y MESES CON PATRONES TÍPICOS</i> .....	47
<i>VARIACIONES TEMPORALES DE TRÁNSITO POR HORA DEL DÍA Y DÍA DE LA SEMANA</i> .....	50
I. <i>Sumatoria de todo tipo de vehículos (SUM)</i> .....	50
II. <i>Vehículos livianos y de carga liviana o Tipo 1 (T1)</i> .....	51
III. <i>Autobuses o Tipo 2 (T2)</i> .....	52
IV. <i>Camiones unitarios o Tipo 3 (T3)</i> .....	53
V. <i>Camiones con remolque o Tipo 4 (T4)</i> .....	54
<i>VARIACIONES DE TRÁNSITO POR MES DEL AÑO</i> .....	56
I. <i>Sumatoria de todo tipo de vehículo (SUM)</i> .....	56
II. <i>Vehículos livianos y de carga liviana o Tipo 1 (T1)</i> .....	56
III. <i>Autobuses o Tipo 2 (T2)</i> .....	57
IV. <i>Camiones unitarios o Tipo 3 (T3)</i> .....	57
V. <i>Grupo 2 (T3-M2): Camiones con remolque o Tipo 4 (T4)</i> .....	57



*ASIGNACIÓN DE SEGMENTOS A GRUPOS DE PATRONES DE TRÁNSITO* .....58

*VALIDACIÓN DE FACTORES DE TRÁNSITO,* .....59

*CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES* .....59

*INFORME DE PATRONES DE VELOCIDAD*.....60

*CONCLUSIONES*.....62

*RECOMENDACIONES*.....64

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS** ..... **65**

**ANEXOS:** ..... **68**

*PARÁMETROS DE CARGA* .....68

    GRUPOS DE PATRONES PARA: .....69

*TOTAL DE VEHÍCULOS* .....69

*TIPO 1: VEHÍCULOS LIVIANOS Y DE CARGA LIVIANA*.....69

*TIPO 2. AUTOBUSES*.....70

*TIPO 3: CAMIONES UNITARIOS* .....70

*TIPO 4: CAMIONES CON REMOLQUE*.....71

**A. GRUPOS DE PATRONES POR MES DEL AÑO PARA CADA CATEGORIA:** ..... **71**

    GRUPOS DE PATRONES PARA: .....73

*DETERMINACIÓN DE FACTORES POR HORA DEL DÍA* .....74



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESPECTRO DE CARGA. FUENTE: ALLEN Y BADILLA, 2011 .....	12
FIGURA 2. ESQUEMA CONCEPTUAL. FUENTE: ALLEN (2013) .....	13
FIGURA 3. FACTOR CAMIÓN DE AUTOBUSES. FUENTE: ESPINOZA, 2013.....	18
FIGURA 4. ESPECTRO DE CARGA TOTAL. FUENTE: ESPINOZA, 2013 .....	19
FIGURA 5. FACTORES CAMIÓN TÍPICOS. FUENTE: ULLOA, ALLEN, BADILLA, & SIBAJA, 2008.....	21
FIGURA 6. RESUMEN COMPARACIÓN ENTRE FACTOR CAMIÓN CON INCUMPLIMIENTO CONSTANTE Y POTENCIAL. ....	24
FIGURA 7. EQUIVALENCIA DE ÍNDICES DE VELOCIDAD. FUENTE: ALLEN & SIBAJA, 2014.....	27
FIGURA 8. FLORIDA ICE & FARM, C2: ESPECTRO DE PRESIÓN. FUENTE: SIBAJA, 2014 ....	34
FIGURA 9. FLORIDA ICE & FARM, T3-S2: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA. FUENTE: SIBAJA, 2014.....	34
FIGURA 10. FLORIDA ICE & FARM, C2: ESPECTRO DE PRESIÓN. FUENTE: SIBAJA, 2014 ..	35
FIGURA 11. FLORIDA ICE & FARM, C2: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA. FUENTE: SIBAJA, 2014.....	35
FIGURA 12. BÚFALO, T3-S2: ESPECTRO DE PRESIÓN. FUENTE: SIBAJA, 2014 .....	36
FIGURA 13. ESTACIÓN DE BÚFALO, T3-S2: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA. FUENTE: SIBAJA, 2014.....	36
FIGURA 14. BÚFALO, C2: ESPECTRO DE PRESIÓN. FUENTE: SIBAJA, 2014.....	37
FIGURA 15. BÚFALO, C2: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA. FUENTE: SIBAJA, 2014.....	37
FIGURA 16. OCHOMOGO, T3-S2: ESPECTRO DE PRESIÓN. FUENTE: SIBAJA, 2014.....	38
FIGURA 17. OCHOMOGO, T3-S2: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA. FUENTE: SIBAJA, 2014 .....	38
<b>FIGURA 18.</b> ESTACIÓN DE OCHOMOGO, C2: ESPECTRO DE PRESIÓN. FUENTE: SIBAJA, 2014.....	39
<b>FIGURA 19.</b> OCHOMOGO, C2: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA. FUENTE: SIBAJA, 2014 .....	39
<b>FIGURA 20.</b> ESPARZA, T3-S2: ESPECTRO DE PRESIÓN. SIBAJA, 2014.....	40



**FIGURA 21.** ESPARZA, T3-S2: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA. SIBAJA, 2014 40

**FIGURA 22.** ESPARZA, C2: ESPECTRO DE PRESIÓN. SIBAJA, 2014 ..... 41

**FIGURA 23.** ESPARZA, C2: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA. SIBAJA, 2014 ..... 41

**FIGURA 24.** PATRONES HORARIOS DEL TOTAL DE VEHÍCULOS, ESTACIÓN PK+7100. FUENTE: MAGAÑA, 2014 ..... 47

**FIGURA 25.** ESTACIONES DE CONTEO PERMANENTES DE LA DIRECCIÓN DE PLANIFICACIÓN SECTORIAL DEL MOPT. FUENTE: MAGAÑA, 2014 ..... 48

**FIGURA 26.** UBICACIÓN DE ESTACIONES DE CONTEO PERMANENTE EN LA R.N. FUENTE: MAGAÑA, 2014 ..... 49

**FIGURA 27.** EJEMPLO DE CUADRO DE DECISIÓN. FUENTE: MAGAÑA, 2014 ..... 58

**FIGURA 28.** EJEMPLO DE TABLA DE FACTORES SEGÚN MES DEL AÑO FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 58

**FIGURA 29.** AFOROS EFECTUADOS POR LA USVT HASTA EL 30 DE OCTUBRE DE 2013. FUENTE: MAGAÑA, 2014 ..... 68

**FIGURA 30.** GRUPOS DE PATRONES DE FACTORES POR DÍA DE LA SEMANA. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 69

**FIGURA 31.** GRUPOS DE PATRONES DE FACTORES POR DÍA DE LA SEMANA. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 69

**FIGURA 32.** GRUPOS DE PATRONES DE FACTORES POR HORA DEL DÍA. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 69

**FIGURA 33.** GRUPOS DE PATRONES DE FACTORES POR DÍA DE LA SEMANA. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 69

**FIGURA 34.** GRUPOS DE PATRONES DE FACTORES POR HORA DEL DÍA. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 70

**FIGURA 35.** GRUPOS DE PATRONES DE FACTORES POR DÍA DE LA SEMANA. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 70

**FIGURA 36.** GRUPOS DE PATRONES DE FACTORES POR HORA DEL DÍA. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 70

**FIGURA 37.** GRUPOS DE PATRONES DE FACTORES POR DÍA DE LA SEMANA. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 70

**FIGURA 38.** GRUPOS DE PATRONES DE FACTORES POR HORA DEL DÍA. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 71



FIGURA 39. GRUPOS DE PATRONES DE FACTORES POR DÍA DE LA SEMANA. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 71

FIGURA 40. GRUPOS DE PATRONES PARA EL TOTAL DE VEHÍCULOS. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 71

FIGURA 41. GRUPOS DE PATRONES PARA LOS VEHÍCULOS TIPO 1. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 71

FIGURA 42. GRUPOS DE PATRONES PARA LOS VEHÍCULOS TIPO 2. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 72

FIGURA 43. GRUPOS DE PATRONES PARA LOS VEHÍCULOS TIPO 3. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 72

FIGURA 44. GRUPOS DE PATRONES PARA LOS VEHÍCULOS TIPO 3. FUENTE: MAGAÑA, 2014..... 72



### **DESCRIPCIÓN:**

El Proyecto de Investigación de los Parámetros de Carga surge de la necesidad de un adecuado diseño de pavimentos en el país. Para que esto se dé "es importante caracterizar las cargas de tránsito, los materiales y su variación en el entorno geológico y climático; y definir los criterios de falla acorde con la realidad en cada caso: país, región o macro-región" (Allen, 2013).

En este informe se sintetizan los aspectos generales y avances de la primera fase de la línea de investigación, en la cual recopila y analiza información de campo sobre cada uno de los cuatro principales parámetros a tomar en cuenta en el diseño de las carreteras: la carga, la presión de inflado, la desviación lateral y el tránsito vehicular, recopilados por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), o contenidos en proyectos finales de graduación de estudiantes de la Universidad de Costa Rica.

### **OBJETIVO GENERAL:**

Determinar y cuantificar las propiedades de los principales parámetros de carga requeridos en el diseño estructural de pavimentos que actualmente imperan sobre el comportamiento de las rutas nacionales primarias en Costa Rica, que servirán como insumo para la modelación de su efecto en el desempeño de las estructuras de pavimentos y así mejorar las labores de diseño, construcción, reconstrucción y mantenimiento de carreteras.

### **ANTECEDENTES:**

En el año 2004, la Unidad de Investigación del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) del LanammeUCR, inició una revisión y análisis de la Guía de Diseño Mecanicista - Empírico 2002 de Estados Unidos. Actualmente, se está en proceso de desarrollar una guía calibrada para las condiciones nacionales.

Para esto, la Guía de Diseño Mecanicista - Empírico requiere insumos relacionados con el suelo, materiales, clima, tráfico y estructura de pavimento. En el PITRA-LanammeUCR se han estado implementando proyectos relacionados con las variables más importantes de dicha guía, incluyendo los siguientes temas: zonificación climática, uso de materiales no tradicionales, uso de granulometrías discontinuas, desempeño en deformación permanente, fatiga, resistencia al daño por humedad, módulo resiliente y curva maestra en mezclas asfálticas, variación estacional de módulos, módulos resilientes y deformación permanente sobre materiales cohesivos, granulares y estabilizados y la caracterización de



pesos por tipo de vehículo mediante la encuesta de carga. En los últimos años las necesidades a las que deben responder los pavimentos han acrecentado su severidad en cuanto a cargas, velocidades y condiciones climáticas.

Además, Allen (2013) indica que el LanammeUCR utilizó los datos de estaciones de pesaje con el objetivo de generar parámetros de carga para el diseño de pavimentos. Adicionalmente, se definieron espectros de carga por tipo de eje y tipo de vehículo, con lo que fue posible obtenerlos espectros de carga para las principales carreteras del país. En la Figura 1 presenta un ejemplo de la información generada gráficamente a partir del proceso de análisis de los datos recopilados.

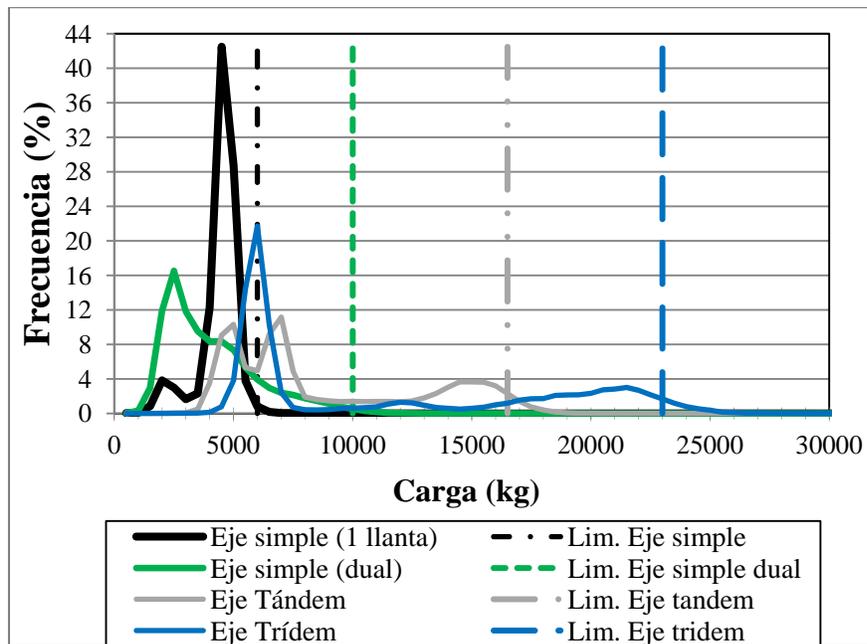
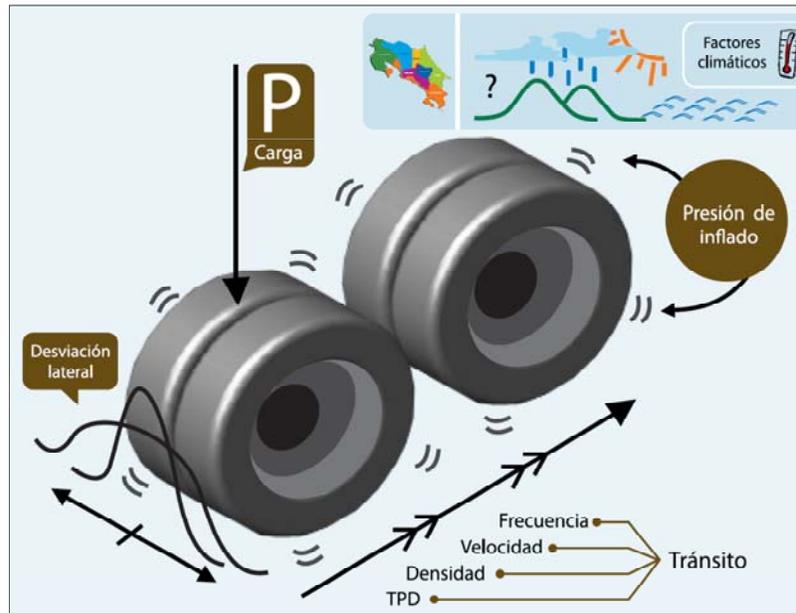


Figura 1. Espectro de Carga. Fuente: Allen y Badilla, 2011

De esta y otras investigaciones que se realizan actualmente en la Unidad de Materiales y Pavimentos-PITRA, surge la necesidad de formular una Línea de Investigación macro sobre el tema Parámetros de Carga de modo que sirva de insumo a la futura Guía de Diseño Estructural de Pavimentos para Costa Rica(Allen, 2013).

### ESQUEMA CONCEPTUAL:

En la siguiente figura se muestran los principales factores de carga que afectan el desempeño estructural de un pavimento en los que se basa la propuesta de investigación.



**Figura 2. Esquema Conceptual. Fuente: Allen (2013)**

Según explica Allen (2013) la Carga (P) se entiende como la magnitud de carga aplicada por los distintos ejes de los vehículos sobre la estructura del pavimento, la desviación lateral de la llanta se refiere a la distribución estadística de la posición lateral del eje central de cada pasada de llanta en un carril específico, la presión de inflado indica el estado de inflado de las llantas. Mientras que los parámetros de tránsito (frecuencia, velocidad, densidad y tránsito promedio diario o TPD) establecen la cantidad de vehículos de diseño así como la velocidad o frecuencia a la que transitan.

Para modelar las cargas correctamente es necesario conocer la frecuencia, velocidad, volumen y clasificación vehicular de la flotilla en cada proyecto; ya que es preciso identificar la cantidad de vehículos de cada tipo que están transitando diariamente, pues en general sólo los vehículos más pesados son de interés para el diseño de pavimentos (el daño generado por los vehículos livianos es marginal). La velocidad del tráfico y la presión de inflado de las llantas de los mismos también es importante conocerla, pues los materiales que componen los paquetes estructurales pueden tener un comportamiento visco-elástico y por tanto sus propiedades dependen de la velocidad y frecuencia de las cargas a las que están sujetos. Por esto, es necesario determinar perfiles de velocidad para los vehículos de diseño.



### OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Determinar, mediante un análisis bibliográfico, los principales parámetros de carga para el diseño estructural de pavimentos.
- Desarrollar una base de datos de parámetros de carga medidos en campo.
- Cuantificar estadísticamente, mediante mediciones in situ, los valores típicos para Costa Rica de los principales parámetros de carga para el diseño estructural de pavimentos.
- Desarrollar un sistema de modelación estructural mediante la teoría del elemento finito (FE) para los parámetros de carga típicos para diseño de pavimentos en Costa Rica.
- Verificar teóricamente, mediante análisis de sensibilidad, el modelo de respuesta de estructuras de pavimentos típicos de Costa Rica, basado en cada una de las distribuciones estadísticas de los principales parámetros de carga definidos.
- Contribuir a la calibración de los modelos de falla generados basados en ensayos a escala natural realizados en el Pave-Lab (Simulador de Vehículos Pesados, HVS).

### JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

#### Importancia práctica.

Allen (2013) explica que la macro-investigación brindará información relativa a parámetros de carga y a su modelación para incorporarse a la Guía de Diseño Estructural de Pavimentos para Costa Rica, la cual resulta sumamente necesaria, dado que el país no cuenta con una guía calibrada y debe diseñarse con guías extranjeras, provocando que el diseño estructural del pavimento conlleve un gran componente de error e incertidumbre y por lo tanto se genere un mal uso de los recursos destinados a este fin.

#### Valor teórico y utilidad metodológica.

La propuesta de investigación busca a su vez desarrollar conocimiento y experiencia en temas como:

- Diseño de experimentos de recopilación de parámetros de carga in situ.
- Análisis estadístico y desarrollo de distribuciones estadísticas de los parámetros tránsito.
- Modelación estructural avanzada en software de elemento finito.
- Calibración de modelos de deterioro con ensayos a escala natural.



## FASE 1: RECOPIACIÓN DE DATOS EN CAMPO Y SU ANÁLISIS

En esta fase se definen los parámetros de estudio, según Allen (2013) "a la fecha, se han identificado cuatro parámetros principales: carga, presión de inflado, desviación lateral de llanta y tránsito vehicular."

En primer lugar se estudia el paramento de carga para los vehículos más representativos en el diseño de pavimentos de Costa Rica, para esto el PITRA-LanammeUCR colaboró con el proyecto de graduación de Juan Carlos Espinoza, presentado en setiembre del 2013 titulado: *Determinación de Factores Camión y Espectros de Carga Representativos de autobuses Urbanos e Interurbanos para diseño de pavimentos flexibles en carreteras de Costa Rica*, el cual se enfoca en determinar los factores camión de autobuses urbanos e interurbanos de Costa Rica, además se realizó un informe elaborado por Allen (2015) titulado: *Análisis exploratorio de la variación del factor camión mediante el control de sobrepeso en el transporte de carga para el diseño de pavimentos de Costa Rica*, a cargo de la Unidad de Gestión Municipal.

Luego se analiza la presión de inflado, por medio de una colaboración del LanammeUCR con el proyecto de graduación desarrollado por Sibaja (2014) para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, denominado: *Determinación de presión de neumáticos de vehículos de carga típicos de Costa Rica*. Sobre este tema se cuenta además con el informe del PITRA-LanammeUCR del año 2014 a cargo de Allen & Sibaja (2014) titulado: *Presión de inflado de los neumáticos y la forma en que afecta la estructura del pavimento*, donde se investiga la evolución de los neumáticos, su aumento de demanda en los vehículos pesados y como afectan al pavimento por medio de una recopilación bibliográfica, analizando la información y comparándola con casos internacionales.

Para el análisis del tema del desplazamiento lateral de los vehículos se dispone del trabajo final de graduación de Morris (2016) titulado *Medición del desplazamiento lateral de vehículos en estaciones de conteo de Costa Rica*, que busca generar datos sobre el desplazamiento lateral de las ruedas de los vehículos en el carril para realizar diseños más acordes con la realidad.

Mientras que para el tema del tránsito vehicular se dirigió el proyecto de graduación de Magaña (2014) denominado: *Determinación de patrones típicos de distribución temporal de tránsito en Costa Rica* y se elaboró un informe a cargo del PITRA-LanammeUCR sobre las velocidades de los vehículos en las carreteras, utilizando datos obtenidos de la Unidad de Gestión de Carreteras de la Dirección de Panificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) por medio de dispositivos neumáticos de conteo.



## PARÁMETRO DE CARGA

### Proyecto de Graduación: Determinación de patrones típicos de distribución temporal

En su proyecto de graduación Espinoza (2013) cita las siguientes características que debe cumplir el pavimento para garantizar la seguridad y eficiencia en el transporte de personas y cargas.

- Superficie uniforme e impermeable.
- Resistencia a cargas cíclicas y medio ambiente.
- Disminución de los esfuerzos transmitidos al suelo.
- Adecuada reflexión luminosa.

Este indica además que los factores que se deben considerar a la hora de diseñar los pavimentos son: el tránsito, la capa subrasante, el clima, los materiales, el drenaje y los esfuerzos y deformaciones del pavimento.

Es por esto que para determinar el daño provocado al pavimento, resulta conveniente utilizar el factor camión (FC) el cual "permite conocer el daño que los ejes de cada vehículo le generan al pavimento, y corresponden a la suma de los factores de equivalencia de carga LEF (*load equivalency factors*) de cada vehículo" (Allen, 2014). Gracias al factor camión, se puede proporcionar el daño sufrido en el pavimento de una zona con el causado por un vehículo en particular, sin embargo este factor resulta difícil de estimar para cada zona del país debido a las complicaciones prácticas que surgen para realizar un estudio específico en cada zona, por lo que normalmente se utilizan factores camión previamente establecidos, las ecuaciones utilizadas para su cálculo se muestran en el Anexo.

En la actualidad no se encuentra calculado el factor camión para los autobuses a pesar de que este tipo de vehículos requiere una consideración importante al diseñar carreteras, debido no solo a que la magnitud de su peso genera un daño mayor al de los vehículos convencionales, sino que al ser uno de los principales métodos de transporte del país el daño que provocan es constante y repetitivo.

De acuerdo con Espinoza (2013) el proyecto de graduación busca determinar los factores camión para autobuses por medio de campañas de pesaje, en las cuales se consideraron los siguientes factores:

- Pendiente
- Superficie del terreno
- Suspensión del vehículo
- Fuerzas de reacción del frenado
- Oscilación del vehículo
- Duración del pesaje



Para el caso del pesaje de los autobuses Espinoza (2013) aclara que las variaciones que se presentan pueden ser causadas por la configuración del autobús (ya que estos se ven afectados por el peso propio y el tipo de ejes) y la cantidad de pasajeros que depende de la hora del día, pues para rutas urbanas lo usual es que exista una mayor cantidad de personas utilizando este medio de transporte en las horas pico. Sin embargo, en los autobuses interurbanos el comportamiento suele ser diferente, ya que según estudios realizados por las empresas, al ser lo normal que salgan de su estación con la mayoría de sus asientos ocupados, la variación va a estar dada por el día de la semana, el mes o si es semana de pago. Además, considerando que los autobuses interurbanos también transportan equipaje, el peso suele ser mayor por lo que el muestreo hizo para ambos tipos de autobús en las rutas que se detallan a continuación.

### Rutas

Para seleccionar las rutas utilizadas en el muestreo, se escogieron las que son usadas por autobuses urbanos e interurbanos, basándose en el tráfico promedio diario específico de estos y en el número de líneas de servicio obtenidos gracias a conteos vehiculares suministrados por ProDUS (Espinoza, 2013). En la siguiente tabla se describen las rutas seleccionadas:

**Cuadro 1. Características de las rutas estudiadas**

Ruta	Ubicación de la ruta	Detalles de la ruta	Ubicación de puntos de muestreo
2	Inicia en el Parque Metropolitano La Sabana y finaliza en el sector de Paso Canoas	-	De autobuses urbanos: Curridabat frente a la Fundación Neotrópica. De autobuses interurbanos: Ochomogo, en las estaciones de pesaje del MOPT y en la Lima de Cartago.
32	Inicia en Barrio Tournón en San José y finaliza en la provincia de Limón en las cercanías del muelle Alemán	Ruta con alto porcentaje de vehículos pesados	San Miguel de Santo Domingo de Heredia, específicamente en el cruce de San Luis ya que se enfoca en autobuses interurbanos.
218	Entre barrio La California en San José hasta barrio la Turbina en Cartago	Brinda servicio a centros de población como Guadalupe, Moravia y Coronado.	Cerca de la iglesia de Jesucristo de los Santos de los Últimos Días, en el Alto de Guadalupe ya que se enfoca en autobuses interurbanos.

Fuente: Modificado de Espinoza, 2013

Para los puntos detallados se realizó muestreos durante cuatro meses: desde abril hasta julio, durante los cuales se realizaron cuatro pesajes por mes, dos para cada tipo de autobús, variando cada mes el sentido de circulación. También se realizaron conteos vehiculares, con cortes de 15 minutos, durante 10 horas desde las 7:30 am, el factor de cantidad de pasajeros no fue tomado en consideración ya que no era factible mantener el autobús detenido por largos periodos.



### Resultados de la encuesta de Carga

Espinoza (2013) indica que para el cálculo de los factores camión de cada vehículo se asumió un numero estructural (SN por sus siglas en inglés)de cinco, el cual corresponde a la capacidad de un pavimento para resistir las cargas bajo las condiciones consideradas en su diseño, y una pérdida de capacidad del pavimento para proveer un adecuado servicio a los vehículos que lo transitan, lo cual se conoce como pérdida de serviciabilidad ( $P_i$ ) de 2,5con lo cual se obtuvieron los valores para cada tipo de vehículo y para cada una de las rutas analizadas que se muestran a continuación:

	Factor camión		
	Mínimo	Promedio	Máximo
<b>MOPT/CONAVI</b>	1,25	1,71	2,29
<b>Clasificación</b>			
Urbanos	0,17	1,02	3,86
Interurbanos	0,48	2,88	5,64
<b>Ruta</b>			
No. 218	0,22	1,01	2,35
No. 032	0,33	2,90	5,64
No. 002-Total	0,17	1,19	4,63
No. 002-Curridabat	0,17	0,85	3,06
No. 002-Ochomogo y La Lima	0,32	1,83	4,63
<b>Total</b>	0,17	1,34	5,64

**Figura 3.Factor camión de autobuses. Fuente: Espinoza, 2013**

Para comparar las medias del Factor Camión en los diferentes sitios, se efectuó un análisis de varianza (ANOVA) en el programa estadístico Minitab con un nivel de confianza del 95 %, con el objetivo de determinar si hay alguna diferencia estadística significativa entre los factores camión de los grupos que se utilizaron como muestras. Espinoza (2013) resume algunos de los resultados encontrados a continuación:

- Existe una diferencia significativa entre las medias de los factores camión de cada grupo de autobuses comparados.
- En la mayoría de los casos, las medias de los factores camión de un sitio, calculados en un mes son iguales a los factores calculados en el mismo sitio durante otro mes. Con la Excepción de ruta N° 218 (abril a junio) y N° 32 para mayo y junio.
- Solo la Ruta Nacional N°218 presentó diferencias significativas dependiendo del sentido de circulación. Los que indica que en ciertas rutas es necesario hacer una distinción por sentido.

El autor expone además que, de acuerdo con los ejes equivalentes calculados, se generaron gráficas de comparación con los valores propuestos por el MOPT/CONAVI, así como diferentes espectros de carga para las rutas. El espectro total muestra que el 11 % de los ejes simples exceden el peso límite,



mientras que alrededor del 12, 5% de los ejes duales están por encima del límite. En la siguiente figura se resumen los espectros de carga totales obtenidos.

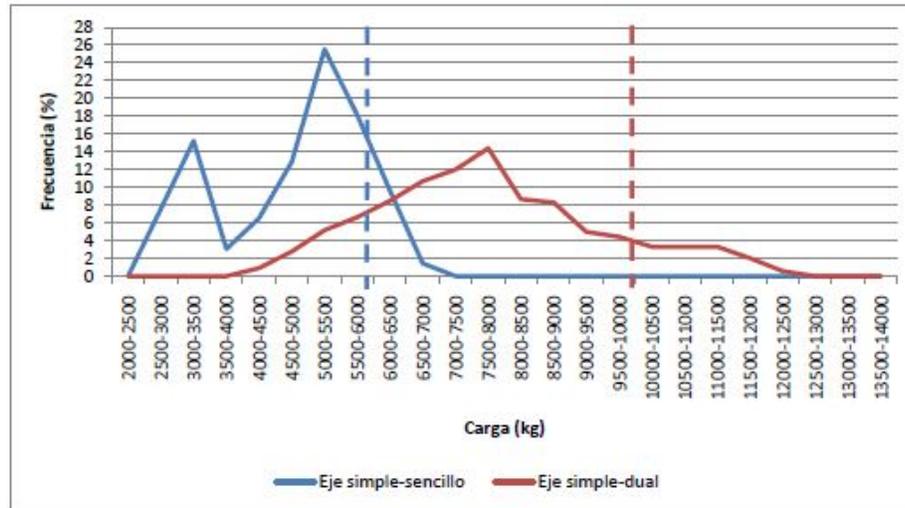


Figura 4. Espectro de carga total. Fuente: Espinoza, 2013

### Conclusiones y Recomendaciones

De acuerdo con Espinoza (2013) se puede concluir que:

- Gracias a los resultados obtenidos a través de la encuesta de carga se determinó que los factores utilizados por el MOPT/CONAVI no son representativos para la flota de autobuses de Costa Rica. El factor camión es mayor en aquellas rutas que tienen una mayor presencia de autobuses interurbanos, por lo tanto el factor promedio utilizado por los entes gubernamentales sobreestima las cargas para autobuses urbanos y las subestima en el caso de los interurbanos.
- La cantidad de pasajeros, equipaje y el tamaño de los autobuses interurbanos causa que el 42 % de los ejes delanteros y el 65 % de los ejes traseros excedan el límite de peso establecido.
- El factor de equivalencia de carga aumenta de forma exponencial al aumentar el peso por eje, por lo que los vehículos con sobrepeso someten al pavimento a grandes esfuerzos, lo que acelera el proceso de falla.
- La variación en el peso del autobús debido a su ocupación (personas) puede variar entre los 600 kg y 5 toneladas, aumentando el peso del autobús hasta en un 40 %.
- La mayoría de los autobuses interurbanos que presentaron sobrepeso en alguno de sus ejes durante la encuesta de carga no transportaban pasajeros de pie, lo que indica que la sobrecarga es debida principalmente al tipo de vehículo.



- Debido a la variación espacial de la flota vehicular no puede utilizarse un factor camión único en el país. Sin embargo, debido al costo no es viable realizar estudios de pesaje en cada ruta, por lo que deben determinarse para las principales rutas y aplicarse a las otras que presenten una similitud.
- Existen lineamientos nacionales que delimitan el peso, sin embargo se carece de sistemas de control y sanción.

### **Informe: Variación del Factor Camión Mediante el Control de Sobre peso**

Como se mencionó en la sección anterior, los vehículos pesados presentan la mayor influencia en el deterioro de los pavimentos al transmitir cargas mayores. A pesar de esto si el pavimento se diseña para dichas cargas el pavimento resistirá el tránsito que se desplace sobre él. Sin embargo Allen, Vargas y Sánchez (2015) aclaran que si los vehículos pesados presentan sobre peso la calzada debe soportar cargas mayores a aquellas para las que fue diseñada, aumentando el deterioro de la carretera de manera exponencial. Es por esto que el informe pretende analizar si la regulación de carga por parte del gobierno ha generado alguna variación favorable (reducción del peso) del factor camión para los vehículos tipo C2, C3, T3-S2 y T3-S3 en las rutas nacionales que disponen de sistemas de control de peso para vehículos pesados.

En el año 2007 se comenzó a estudiar las cargas a las cuales se someten los pavimentos nacionales por medio de encuestas de carga, el documento desarrollado por Ulloa, Allen, Badilla, & Sibaja (2008) establece que el exceso de peso en los vehículos repercute negativamente en el desempeño de los pavimentos, acelerando el deterioro de las vías, con la investigación se obtuvieron además los factores camión típicos por tipo de vehículo, ruta y eje, los cuales se muestran a continuación, se utilizaron las mismas ecuaciones que en apartado anterior para el cálculo del factor camión.



Ruta	Tipo de vehículo					
	Pickup	C2+	C2	Bus-C2	C3	T3-S2
Ruta 1 - General Cañas (peaje)	0,011	0,019	0,734	2,022	2,721	2,102
Ruta 1 - Bernardo Soto Naranjo (peaje)	0,011	0,016	0,902	3,68	1,971	3,701
<b>Ruta 1 - Bernardo Soto Esparza (peaje)</b>	<b>0,011</b>	<b>0,233</b>	<b>0,723</b>	<b>2,911</b>	<b>2,834</b>	<b>4,153</b>
Ruta 2 - Florencio del Castillo (peaje)	0,015	0,031	0,827	1,437	3,202	3,021
<b>Ruta 2 - Pérez Zeledón (tránsito)</b>	<b>0,012</b>	<b>0,014</b>	<b>0,446</b>	<b>1,858</b>	<b>3,33</b>	<b>2,08</b>
Ruta 27 - Próspero Fernández (peaje)	0,011	0,016	1,163	1,957	3,155	2,695
<b>Ruta 32 - Braulio Carrillo (peaje)</b>	<b>0,011</b>	<b>0,022</b>	<b>0,695</b>	<b>3,692</b>	<b>2,271</b>	<b>4,229</b>
Ruta 140 - San Carlos (Ciudad Quesada)	0,012	0,014	0,521	2,107	3,773	3,861
Promedio	0,012	0,046	0,751	2,458	2,907	3,23
Desviación estándar	0,001	0,076	0,223	0,861	0,585	0,878

Figura 5. Factores camión típicos. Fuente: Ulloa, Allen, Badilla, & Sibaja, 2008

El estudio realizado por Allen y Badilla (2011) mostró una tendencia a la estabilización y a la baja de los porcentajes de vehículos que excedían la regulación de peso oficial de Costa Rica, la cual se rige por el Decreto Ejecutivo 31363-MOPT titulado “*Reglamento de Circulación por Carretera en base en el Peso y las Dimensiones de los Vehículos de Carga*”.

Para evaluar la estabilidad de los datos se utilizó el análisis estadístico por medio de la regresión lineal y las cartas de control o gráficas de control.

### Porcentaje de vehículos que incumplen la regulación de peso

Allen, Vargas y Sánchez (2015) explican que el comportamiento del porcentaje de vehículos de carga que exceden la regulación nacional de peso se estudió por medio de análisis mensuales para cada tipo de vehículos según el número de ejes, como análisis de la pendiente de la regresión lineal y gráficos de control.

Para realizar el análisis de comportamiento de la variación temporal se utilizó el modelo de regresión lineal potencial mostrado en la ecuación 1 buscando el mejor ajuste con la serie de datos disponibles.

$$y = ax^{\beta} \quad 1)$$

Donde:

$y$  representa el porcentaje de incumplimiento de peso promedio de un vehículo y

$x$  corresponde al mes en el que se realizó la medición.



A continuación se muestran los resultados obtenidos:

**Cuadro 2. Resultados del porcentaje de vehículos que incumplen la regulación de peso**

Tipo de vehículo	Tipo de eje	
C2	<b>Simple</b>	
	$y = 0.698x^{-0.93}$ $R^2 = 0.794$	Se presenta una disminución importante en el porcentaje de vehículos con exceso de carga a lo largo del periodo analizado.
C2	<b>Dual</b>	
	$y = 3.230x^{-0.81}$ $R^2 = 0.753$	Al igual que en el caso anterior se evidencia una disminución importante en el porcentaje de vehículos con exceso de carga a lo largo del periodo analizado.
C3	<b>Simple</b>	
	$y = 9.774x^{-0.67}$ $R^2 = 0.832$	Se da una marcada disminución en el porcentaje que excede la regulación y se alcanza un porcentaje de vehículos con exceso estabilizado.
C3	<b>Tandem</b>	
	$y = 6.197x^{-0.32}$ $R^2 = 0.502$	Igual al caso simple
T3-S2	<b>Simple</b>	
	$y = -0.001x + 0.073$ $R^2 = 0.374$	Se mantuvo constante en todo el periodo de análisis.
T3-S2	<b>Tandem</b>	
	$y = 7.624x^{-0.23}$ $R^2 = 0.435$	Se da una disminución en el porcentaje de incumplimiento
T3-S2	<b>Simple</b>	
	$y = -0.002x + 0.135$ $R^2 = 0.143$	Se mantuvo constante durante el periodo de análisis, con valores cercanos al 0 % de exceso.
	<b>Tándem</b>	
T3-S2	$y = 0.032x + 15.86$ $R^2 = 0.011$	No se evidencia ningún efecto de estabilización, por el contrario se observa una tendencia mínima al aumento del porcentaje de incumplimiento.
	<b>Tridem</b>	
T3-S2	$y = 6.003x^{-0.25}$ $R^2 = 0.247$	Se evidencia una disminución en el porcentaje de exceso durante los primeros 9 meses de análisis, posteriormente el comportamiento se mantiene constante con una mínima tendencia a la baja.

**Fuente: Modificado de PITRA, 2015**

### Factor Camión

**Tendencia:** El factor camión corresponde a la segunda relación de importancia por estudiar, la cual se analizará según el tipo de vehículo únicamente. No se hizo distinción de porcentaje de participación de cada eje o estación de la cual provengan los datos.

Para la evaluar la estabilización de los datos se utilizó el método estadístico de regresión lineal y se usaron además graficas de control por variables individuales con rango móvil. Para esto se calculan los límites de control basados en tres desviaciones estándar de los datos y se le realizan pruebas que

rechacen cualquier muestra que se salga del límite de control. En el Cuadro 3 se resumen los hallazgos referentes a la tendencia y estabilización de los factores camión resultantes en vehículos C2, C3, T3-S2, T3-S3.

**Cuadro 3.** Resumen de los hallazgos de estabilización del factor común

Tipo de vehículo	Ecuación	FC( proyectado mes 36)	Estabiliza	Comentarios
C2	$FC=0,43263*x^{-0.228682}$	0.1906	sí	Se evidenció un comportamiento decreciente en el valor del factor camión hasta alcanzar valores relativamente estables, para el año 2011. El modelo de regresión lineal cumple con los supuestos de normalidad, homogeneidad e independencia de los residuos.
C3	$FC=1,11331*x^{-0.154178}$	0.6407	sí	Se evidenció una tendencia hacia la estabilización, pues los valores de factor camión disminuyen en forma constante; aunque menos marcada para el 2011; mostrando un aumento significativo. El modelo de regresión lineal verifica todos los supuestos de los residuos.
T3-S2	$FC=1,60268*x^{-0.098874}$	1.1245	sí	Los factores camión tienden a bajar alcanzando valores estables en los últimos meses del periodo de análisis.
T3-S3	$FC=1,98712*x^{-0.085254}$	1.4640	sí	Los factores camión mostraron una disminución significativa durante el 2009; pero durante el 2010-2011 se mostró una aleatoriedad significativa de los valores y una mínima tendencia a la baja.

**Fuente: Modificado de PITRA, 2015**

### Relación entre el factor camión y el porcentaje de vehículos con incumplimiento de peso

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 objeto de esta sección corresponde a determinar dicha relación.

### Análisis de regresión entre el factor camión y el porcentaje de vehículos con incumplimiento de peso

El análisis se realiza mediante el uso de 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; en caso de no existir correlación entre el porcentaje de incumplimiento se estudia un modelo de regresión lineal múltiple. El análisis de estabilización se realizó para un periodo de 36 meses para los vehículos tipo: C2, C3, T3-S2, T3-S3.



### Discusión de resultados

En la Figura 6 se muestra el resumen de las ecuaciones más significativas para la determinación del factor camión encontradas, en esta se hace la comparación entre el factor camión con incumplimiento cero, con incumplimiento contante y potencial.

El factor camión potencial se infiere a través de series de tiempo proyectadas elaboradas mediante regresión potencial en el mes 36. El factor camión de incumplimiento constante se calcula usando una regresión lineal múltiple entre el factor camión y el incumplimiento en uno o varios ejes y sustituyendo en la ecuación el valor de incumplimiento constante para cada uno de los vehículos de carga, mientras que el factor camión de incumplimiento de 0% se calcula mediante el intercepto de las regresiones realizadas entre el factor camión y el incumplimiento de uno o varios ejes.

Vehículo	Eje de inferencia	%Exceso Estabilizado	Estabiliza	Ecuaciones FC vs. %Exceso	R <sup>2</sup>	FC incumplimiento 0% (lineal)	FC incumplimiento constante	FC (potencial)	Diferencia
C2	Dual	0,17	Sí	$FC = 0,1165 * Exc_d + 0,1802$	0,9286	0,18	0,20	0,19	
C3	Simple	0,97	Sí	$FC = 0,0857 * Exc_s + 0,5781$	0,8492	0,58	0,66	0,64	
T3-S2	Tándem	3,72	Sí	$FC = 0,073 * Exc_t + 0,92$	0,7137	0,92	1,19	1,12	
T3-S3	Simple	0,07	Sí	$FC = 0,998 * Exc_{sim} + 0,0149 * Exc_{lan} + 0,0434 * Exc_{tri} + 1,10$	0,615	1,10	1,54	1,46	0,17
	Tándem	15,59	No						
	Tridem	3,26	Sí						
T3-S3 (Inferencias con Tándem T3-S2)	Simple	0,07	Sí						
	Tándem	3,72	Sí				1,37		
	Tridem	3,26	Sí						

**Figura 6. Resumen Comparación entre factor camión con incumplimiento constante y potencial.**  
Fuente: PITRA, 2015

En la figura anterior se muestran las ecuaciones utilizadas para obtener los diferentes valores de factor camión, de donde se obtuvo que el factor camión calculado mediante regresión y estabilización del incumplimiento de peso presenta una relación significativa con el factor camión calculado mediante el modelo potencial. El factor camión aumenta al incrementarse la cantidad de ejes articulados del vehículo de carga y se evidencian además, diferencias de hasta 25% entre los factores camión con incumplimiento constante y con incumplimiento cero.



De los análisis realizados a vehículos de carga T3-S3, se concluye que es posible disminuir 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.

### Conclusiones

- 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 estabilizó en forma general el factor camión en el periodo de análisis.
- Los vehículos C2, C3, T3-S2, T3-S3 estabilizaron a factores camión de 0,19-0,64-1,12-1,46 respectivamente, por medio de series de tiempo con regresión potencial, y estabilizaron a valores de 0,2-0,66-1,19-1,54 respectivamente a través 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.
- Se debe de considerar la evolución de los factores camión generales obtenidos, ya que se podría sobreestimar un diseño al usar factores camión que no correspondan a los reales.

### Recomendación

- Realizar una validación de las inferencias realizadas en el informe por medio de series de tiempo para el periodo de 2011-2014.
- Elaborar espectros de carga por cada tipo de eje para cada modelo de vehículo y para cada estación de control en ambos sentidos de circulación de forma que se muestren los porcentajes de vehículos que transiten con cierta cantidad de carga.
- El análisis mostrado se puede realizar en cada estación de pesaje, lo cual puede brindar información detallada sobre la evolución y diferencias de los factores camión de incumplimiento cero e incumpliendo constante en las principales rutas nacionales.

### Presión de Inflado

Como se mencionó con anterioridad, para el estudio de la presión de inflado de los neumáticos de los automóviles en Costa Rica se cuenta con el informe realizado por el PITRA-LanammeUCR denominado: “*Presión de inflado de los neumáticos y la forma en que afecta la estructura del pavimento*”, que busca determinar la evolución histórica y el estado actual en cuanto al conocimiento sobre la medición de la presión de inflado y el aporte que tiene esta en el deterioro de las carreteras del



país, aprovechando las investigaciones realizadas a nivel internacional para utilizar conclusiones aplicables a la realidad actual de Costa Rica.

Además el PITRA-LanammeUCR colaboró con el proyecto de graduación de Sibaja (2014), que estudia el parámetro presión de inflado, con el principal objetivo de generar espectros de carga para los vehículos tipo T3-S2 y C2, los cuales según una encuesta realizada por el LanammeUCR son los vehículos de carga típicos en Costa Rica, para el diseño de pavimentos en las carreteras del país. La investigación combina la información existente obtenida del Concejo Nacional de Vialidad (CONAVI), el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), el LanammeUCR y además de estudios de campo y el posterior análisis de los datos obtenidos en este, con el propósito de obtener conclusiones generales que permitan destacar la importancia del parámetro de presión de inflado.

## Informe del PITRA-LanammeUCR

### Funciones del Neumático

Allen & Sibaja (2014) citan las siguientes funciones que deben cumplir los neumáticos:

- Soportar el peso del vehículo y las cargas verticales que se le apliquen.
- Asegurar la transmisión de la fuerza del motor para generar el movimiento del vehículo.
- Promover una correcta maniobrabilidad del vehículo en movimiento.
- Coadyuvar con el frenado del vehículo.

### Tipos de Neumáticos

Según Martínez (2008) existen dos estructuras principales en los neumáticos, cuya diferencia significativa es la dirección de las fibras que posean, ya que estas afectan las propiedades mecánicas, que se definen por el ángulo formado entre la cuerda y la línea circunferencial central en la llanta (según se citó en Allen & Sibaja, 2014).

En los primeros años de la industria automotriz de Norteamérica se utilizaban los neumáticos diagonales (bias-ply) hasta que alrededor de los años 1960s se desarrollaran en Europa los neumáticos radiales, que sustituyeron las diagonales sobretudo en los vehículos de pasajeros. En la actualidad los radiales son los más usados, dejando de lado a los diagonales debido a las ventajas que ofrecen, como la cubierta flexible, bajo calentamiento al operar el vehículo, la alta capacidad de carga y reducción de desgaste entre otras. (Allen & Sibaja, 2014).



### Nomenclatura de los Neumáticos

A continuación se muestra la nomenclatura utilizada para denominar las características de los neumáticos independientemente de su marca, necesaria para entender las propiedades y características de los mismos.

- Ancho de la sección (mm)
- Relación de altura/ancho de la sección (%)
- Diámetro de llanta (pulgadas)
- Índice de carga
- Índice de velocidad (velocidad máxima a la cual el neumático puede soportar el peso correspondiente a su índice de carga).

En la siguiente figura se muestran las equivalencias en los índices de velocidades utilizadas en los neumáticos.

Índice de Velocidad	V máxima (km/h)						
<b>B</b>	50	<b>J</b>	100	<b>Q</b>	160	<b>W</b>	270
<b>C</b>	60	<b>K</b>	110	<b>R</b>	170	<b>Y</b>	300
<b>D</b>	65	<b>L</b>	120	<b>S</b>	180	<b>ZR</b>	>240
<b>E</b>	70	<b>M</b>	130	<b>T</b>	190		
<b>F</b>	80	<b>N</b>	140	<b>H</b>	210		
<b>G</b>	90	<b>P</b>	150	<b>V</b>	240		

Figura 7. Equivalencia de índices de velocidad. Fuente: Allen & Sibaja, 2014

### Neumáticos y presión de inflado

Allen & Sibaja (2014) mencionan que al aumentar los límites máximos de peso permitidos por eje no solo se dio la sustitución de los neumáticos tipo bias-ply por los radiales, sino que la *American Association of State Highway Officials* (antes llamada AASHO y actualmente AASHTO) creó una carretera de prueba en la que los vehículos transitaban con presiones de entre 75 y 80 libras por pulgada cuadrada (psi, por sus siglas en inglés), con la cual surgieron estudios que demostraron la viabilidad de utilizar presiones mayores, por lo que presente los automóviles utilizan presiones de inflado que van de 95 a 105 psi e incluso hay vehículos que llegan hasta 120 y 130 psi.



Al aumentar o variar la presión de inflado es necesario analizar cómo va a afectar esto a los neumáticos y pavimentos. Allen & Sibaja (2014) describen como la presión de inflado del neumático afecta la forma en que este se desempeña y su área de contacto con la carretera, ya que si la presión es menor a la adecuada provoca que los extremos de la banda entren en contacto con la superficie de rodamiento, causando desgaste en las paredes e incremento en la temperatura de la llanta causada por la flexión excesiva, lo que puede provocar una falla en las capas que componen la estructura de la llanta. Por otro lado, si se da un aumento en la presión, la rigidez de la llanta disminuye el área de contacto entre la superficie de este y el pavimento: para un aumento de presión de 50% el área de contacto neta se disminuye entre un 8 % y 20 %, lo que causa inestabilidad en el vehículo.

Aunque normalmente se asumen que el área de contacto del neumático con el pavimento es circular, "la forma verdadera del área de contacto de un neumático se desvía principalmente a un área elipsoidal debido a la forma de la banda de rodadura y los hilos de refuerzo de los que se componen los neumáticos bias-ply aproximan a una elipse mientras que los neumáticos radiales asemejan un rectángulo" (Allen y Sibaja 2014)

Allen & Sibaja (2014) concluyen basándose en Huang (2003) que la rigidez ante la flexión se ve sumamente influenciada por la presión de inflado que tenga el neumático, por lo que al alterar la presión de inflado va a variar la distribución de la presión.

Fernando et al. (2006) señalan que estudios realizados respaldan que en los neumáticos radiales las presiones de contacto tienden a ser más uniformes que en neumáticos diagonales, ya que estos últimos suelen producir elevadas concentraciones de esfuerzos, por lo que se deduce que los neumáticos radiales tienden a ser menos dañinos para el pavimento que los diagonales en cuanto a lo que presión de inflado se refiere.

### **Presión de Inflado y Pavimentos**

Allen & Sibaja (2014) mencionan que al aumentarse la carga que los ejes deben soportar, se ha dado la tendencia de aumentar la presión de inflado, lo que disminuye el área de contacto entre el neumático y la superficie de la carretera. Esto lleva a una disminución en la fricción que siente el neumático y un incremento de esfuerzos en el neumático, lo que contribuye al deterioro de los pavimentos flexibles, que se evidencia en ahuellamiento bajo la huella del neumático, donde puede acumularse el agua arriesgando la seguridad vial de las carreteras (Kim, Bell, & Wilson, 1989) lo cual hace evidente la importancia de considerar la presión de inflado al momento de diseñar los pavimentos.



### Sistemas de presión de inflado central

El uso de presiones de inflado variables en el lastre o pavimentos asfálticos delgados permite reducir las vibraciones del vehículo, lo que permitiría minimizar los costos de mantenimiento de las carreteras y neumáticos (Owende, Hartman, Ward, Gilchrist, & O'Mahony, 2001), ya que al adaptarse la presión de inflado a las cargas y velocidad que tenga, se reducen las deformaciones estructurales, esto se explica ya que las presiones bajas permiten reducir el agrietamiento, lo que aumenta la vida útil del pavimento y permite reducir la sub base granular hasta en un 10% (Allen & Sibaja, 2014).

Las altas presiones de inflado reducen la deflexión y el esfuerzo que siente el neumático, aumentando la vida útil de este y reduciendo la resistencia al rodamiento, lo que conlleva a un ahorro en combustible. Sin embargo también provocan variaciones en el esfuerzo de contacto entre el pavimento y el neumático, que a su vez causan desgastes diferenciales en el neumático (Owende, Hartman, Ward, Gilchrist, & O'Mahony, 2001).

Por estas razones se considera que utilizar presiones de inflado que varíen con la carga y el tipo de pavimento reducen el daño que causan los vehículos.

### Neumáticos "Supersingle"

Según estudios, ya que los neumáticos supersingle o de base ancha tienen un área mayor de contacto con el pavimento generan mayores esfuerzos verticales y transversales a lo largo del pavimento. Pruebas de campo llevaron a conclusiones similares, ya que se encontró que los neumáticos de base ancha inducen mayores esfuerzos verticales de compresión en todas las capas, mayores esfuerzos de tensión en la capa inferior del asfalto y cerca del doble de ahuellamiento que los neumáticos duales bajo las mismas cargas y presión de inflado. Además se determinó que la vida útil del pavimento se redujo una cuarta parte al utilizar los neumáticos de base ancha en comparación de los duales, y que estos son más dañinos que los duales por un factor de 2,3 a 4 para las mismas condiciones de presión de inflado y carga (Kim, Salgado, & Altschaeffl, 2005).

### Respuesta y desempeño del pavimento: Ahuellamiento y Fatiga

Allen & Sibaja (2014) explican que las presiones de inflado elevadas aumentan especialmente el agrietamiento que se da por fatiga, además de la forma y profundidad de los ahuellamientos.

Para los ejes simples, los tipo tándem y los direccionales se da la respuesta del pavimento ante el ahuellamiento debajo del área de contacto de los neumáticos con el pavimento, por lo que la respuesta crítica se encuentra cerca del borde del ancho del neumático para presión de inflado baja y para presiones altas se da en el centro del área de de contacto (Gillespe et al., 1993).



### Ahuellamientos en Pavimentos Flexibles

Said & Hakim (2012) definen el ahuellamiento como una deformación excesiva de las capas de asfalto que aumenta con el incremento de carga que siente el pavimento por el movimiento de vehículos, y es ocasionado por dos mecanismos:

- Densificación: es una disminución en el volumen y por ende aumento de densidad de la capa de concreto asfáltico bajo cargas de tránsito repetitivas.
- Deformación por cortante: provoca desplazamientos de material causados por el tráfico vehicular que provocan esfuerzos de cortante.

Allen & Sibaja (2014) mencionan que al darse un aumento de presión de 70 a 130 psi, la profundidad del ahuellamiento promedio (en la superficie, no producto de una deformación en la sub rasante) aumenta alrededor de un 40 %, y que el desempeño ante el ahuellamiento no presenta una relación significativa con el espesor de la capa asfáltica, por lo que se puede concluir que el espesor de la carpeta asfáltica no va a tener una incidencia con el control del ahuellamiento de la estructura.

El hecho de que la presión de inflado no presenta una relación importante con el ahuellamiento a causa de una deformación de la sub-rasante, pero si lo haga con la formación del este en la capa asfáltica, es un indicador del que el efecto de la presión de inflado se limita a una profundidad cercana a la superficie del pavimento, por lo que puede verse como una solución el utilizar materiales asfálticos de mayor rigidez, ya que mitigarían el efecto de la presión de inflado de los neumáticos (Wang, 2005).

### Vehículos de carga en Texas y encuestas de Carga en Egipto

En el estudio “*la presión de inflado de los neumáticos de camiones circulando por el estado de Texas*” (Wang & Machemehl, 2003), estudiaron entre otras cosas, los factores que provocan las alteraciones en la presión de inflado que se resumen a continuación.



**Cuadro 4. Efectos de factores causantes de cambios de presión de inflado.**

Factor	Efecto
Temperatura del neumático	Influye en la presión del neumático ya que en verano la presión va a ser mayor que en el invierno debido a las más altas temperaturas presentes en el ambiente y por lo tanto en los pavimentos.
Carga por eje	Presenta una diferencia significativa de presión de inflado entre los camiones cargados y los vacíos, ya que el peso extra va a ejercer un esfuerzo de compresión adicional sobre el neumático aumentando la presión
Área geográfica	El tipo de autopistas y las direcciones de estas varían los efectos que sufran los neumáticos, ya que va a variar el tipo de bienes y productos, y por lo tanto las cargas, que transporten los camiones en las diferentes regiones geográficas.
Comparación de Ejes tipo 3-S2 (T3-S2 para Costa Rica)	El eje direccional posee una presión de inflado promedio por eje mucho mayor a los demás ejes, mientras que el eje tándem del centro posee entre ambos ejes una variación prácticamente inexistente En el eje tándem trasero existen variaciones significativas entre los ejes, por lo que se concluye que el eje direccional del vehículo T3-S2 es el más dañino para la estructura del pavimento.
Distancia de viaje	La presión de inflado es directamente proporcional a la distancia que va a recorrer el vehículo, ya que para viajes con distancias muy largas se suele aumentar la presión de inflado del neumático, lo cual representa mayores daños potenciales para el pavimento.

Fuente: Modificado de Espinoza, 2013

### Conclusiones y Recomendaciones

Allen y Sibaja (2014) llegan a varias conclusiones, entre las que se destacan las siguientes:

- Los neumáticos radiales son los que predominan en el mercado sobre los bias-ply, ya que al poder soportar una mayor carga, son los más utilizados por los conductores de vehículos pesados.
- La presión de inflado en los neumáticos influye negativamente en el pavimento, debido a que problemas como el ahuellamiento y agrietamiento por fatiga pueden empeorar si transitan vehículos con presiones de inflado no adecuadas.
- Se recomienda ajustar los factores camión para el país, específicamente para la presión promedio de vehículos de carga, y de esta manera reducir el daños que generan sobre el pavimento.
- Se recomienda elaborar e implementar reglamentaciones que sancionen el uso de presiones de inflado que se salgan de los límites admisibles.

### Trabajo de graduación: Determinación de presión de neumáticos de vehículos de carga típicos de Costa Rica

Sibaja (2014) abarca el estudio de la presión de inflado desde una perspectiva más práctica, buscando los índices de presión para los neumáticos en los camiones tipo T3-S2 y C2, ya que como se mencionó



anteriormente son los más comunes en el país. Sin embargo debido al alcance de la investigación y las limitaciones de recursos, se seleccionaron específicamente tres estaciones de pesaje del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), elegidas gracias al análisis de los datos sobre los pesos y dimensiones de los vehículos de carga permitidos para el tránsito en la Red Vial Nacional y las estaciones de pesaje activas, facilitados por el CONAVI. En cuanto a la elección de la empresa utilizada en la investigación, se buscó que dispusiera de una flotilla considerable de los vehículos de estudio.

Este proceso se dio en la primera etapa del proyecto, que corresponde a la búsqueda y análisis de la información existente con respecto a la presión de inflado. La segunda etapa consistió en la instauración del método de muestreo. Sibaja (2014) explica que no existe una diferencia significativa entre los vehículos T2-S2, más allá de la longitud de la carreta que porten, mientras que los C2 pueden diferenciarse por su tamaño y se clasifican por carga pesada y liviana, poseen además la ventaja de ser fácilmente diferenciables ya que los vehículos de carga pesada inician su matrícula con CL y los de carga liviana comienzan con C.

Sibaja (2014) detalla las estaciones de muestreo seleccionadas y la empresa elegida para el estudio, que se describen a continuación:

- Estación de pesaje de Esparza: ubicada sobre la ruta No. 1 de la Red Vial Nacional, de aproximadamente 290 km de largo, es una carretera de gran relevancia turística y que comunica rutas nacionales e internacionales, utilizada generalmente para el transporte masivo de productos, esta estación controla los vehículos pesados que circulan de Esparza a San Ramón.
- Estación de pesaje de Búfalo: ubicada sobre la ruta No. 32 de la Red Vial Nacional (Autopista Braulio Carrillo), de 157 km aproximadamente de largo, con una gran relevancia turística y utilizada para el transporte masivos de productos a causa de su conexión con el puerto marítimo del Atlántico de Limón, esta estación controla los vehículos pesados que circulan de Limón a San José y viceversa.
- Estación de pesaje de Ochomogo: ubicada sobre la ruta No. 2 de la Red Vial Nacional (Autopista Florencio del Castillo), al ser una carretera primaria posee un alto tránsito vehicular, con relevancia turística y como ruta de interconexión, utilizada para transporte masivo de productos en el Gran Área Metropolitana (GAM), esta estación controla los vehículos que transitan de Cartago a San José.



- Empresa Florida Ice & Farm: dedicada a comercializar bebidas esta empresa elabora, envasa y vende gran variedad de bebidas tanto dentro como fuera del país, por lo que recurre a una amplia flotilla de camiones para trasportar sus productos y la hacen ideal para realizar el estudio.

El muestreo se elaboró en un lapso de tres meses que van de septiembre a noviembre del año 2013. Se programaron tres visitas a distintas horas, para cada una de las estaciones de pesaje, y se llegó al acuerdo de realizar los muestreos en un martes durante tres semanas de cada mes (Sibaja, 2014).

En la tercera etapa se realizó el análisis estadístico y los espectros de presión. Sibaja (2014) detalla cómo los pesos por eje se obtuvieron en la estación por medio de un "parte" que se encuentra a ambos lados del vehículo que contiene el peso de cada eje, excepto en la estación de pesaje de Búfalo ya que en esta se muestran los pesos totales por eje y para Florida Ice & Farm donde se tomaron los pesos por ejes, las presiones y temperatura en las llantas, así como el tipo y marca de las mismas.

Se realizó un muestreo de 119 camiones tipo T3-S2 y 159 camiones tipo C2, y se obtuvo un total de 1190 mediciones de presión de inflado para los vehículos T3-S2 y 636 para los tipo C2, lo cual representa un total de 1826 mediciones de presión de inflado (Sibaja, 2014).

Para realizar el análisis Sibaja (2014) señala que se consideró que aquellos vehículos cuyos ejes direccionales estén en un rango de entre 90 y 110 psi, así como los camiones cuyos ejes de tracción y trasero doble que estén entre 80 y 100 psi, cumplen con los rangos de presión, dando un rango de tolerancia de  $\pm 10$  psi que considere la aleatoriedad entre los tipos de neumáticos y temperaturas que pudieron afectar la presión de inflado. Una vez analizados y comparados los datos obtenidos se concluyó que en general los vehículos C2 no deben considerarse en el mismo rango de presiones ya que presentan una gran variación dependiendo del modelo y dimensiones. Mientras que los vehículos tipos T3-S2 suelen cumplir en su mayoría en el rango de presión recomendada, siendo los ejes direccionales los que mostraron una frecuencia mayor y los tándems los que presentaron un déficit de presión con mayor frecuencia porcentual.

### Espectros de presión

Como explica Sibaja (2014), se determinaron las frecuencias de cada estación de pesaje por medio de espectros de presión de cada visita y los totales por tipo de eje calculados con los datos recopilados en cada estación, lo cual permitió encontrar las diversas características y conclusiones para cada zona, entre las que se destacan las siguientes:

### Florida Ice & Farm

En la siguiente figura se muestran las frecuencias de los tres tipos de ejes para los vehículos tipo T3-S2 donde Sibaja (2014) describe como se da una concentración entre 90 y 105 psi, el eje direccional presenta su máximo entre los 100 y 115 psi, el eje tándem intermedio tiene su máximo entre a 95 y 105 psi mientras el eje tándem trasero lo tiene entre los 85 y 90 psi, por lo que cada eje se encuentran dentro de los límites de presión aceptables.

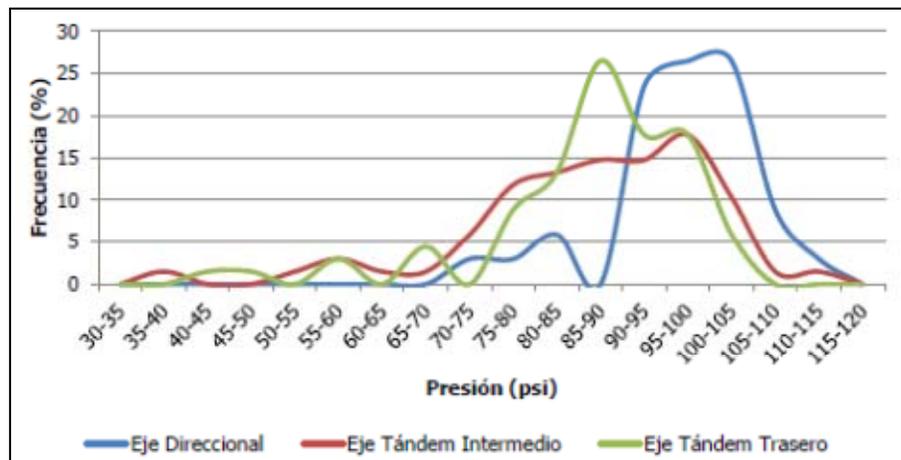


Figura 8. Florida Ice & Farm, C2: Espectro de Presión. Fuente: Sibaja, 2014

En la Figura 9 a continuación se muestra la distribución acumulada para todos los tres tipos de ejes, donde es evidente que la presión en todos los casos presentó un comportamiento adecuado ya que se mantiene dentro de los límites preestablecidos

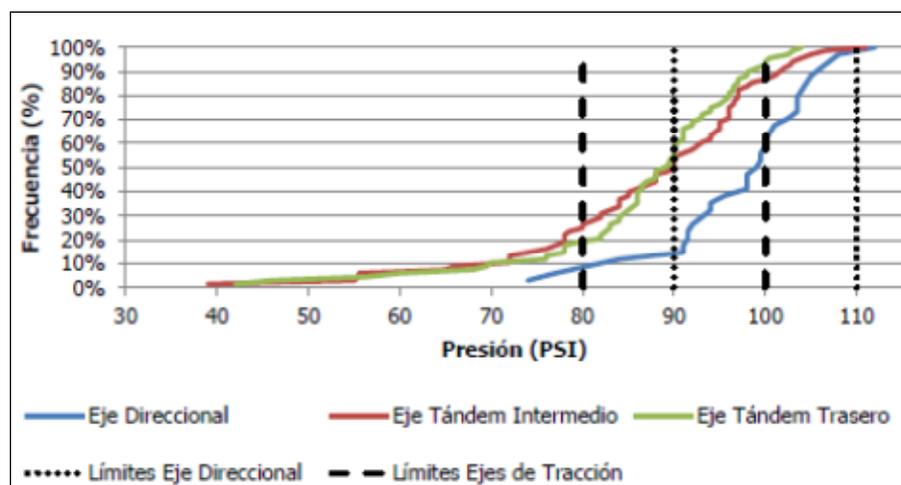


Figura 9. Florida Ice & Farm, T3-S2: Función de Distribución Acumulada. Fuente: Sibaja, 2014

Al realizar el espectro de presión total de los vehículos tipo C2 se observa que los ejes direccionales presentan el pico de presión entre los 95 a 100 psi, mientras los de eje trasero lo presentan entre los 90

a 95 psi, por lo que se encuentra dentro de los límites aceptables. Para esta clasificación la muestra es uniforme ya que la empresa estudiada cuenta solamente con vehículos tipo C2 (Sibaja, 2014), como se observa en la Figura 10 y Figura 11 a continuación.

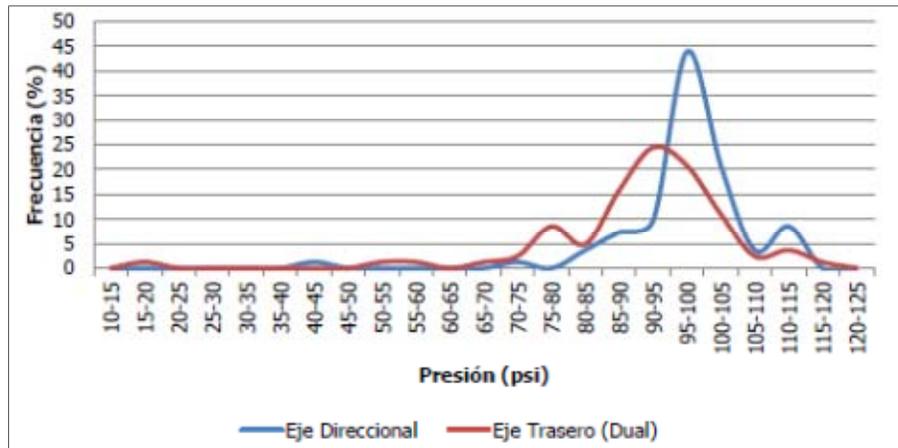


Figura 10. Florida Ice & Farm, C2: Espectro de Presión. Fuente: Sibaja, 2014

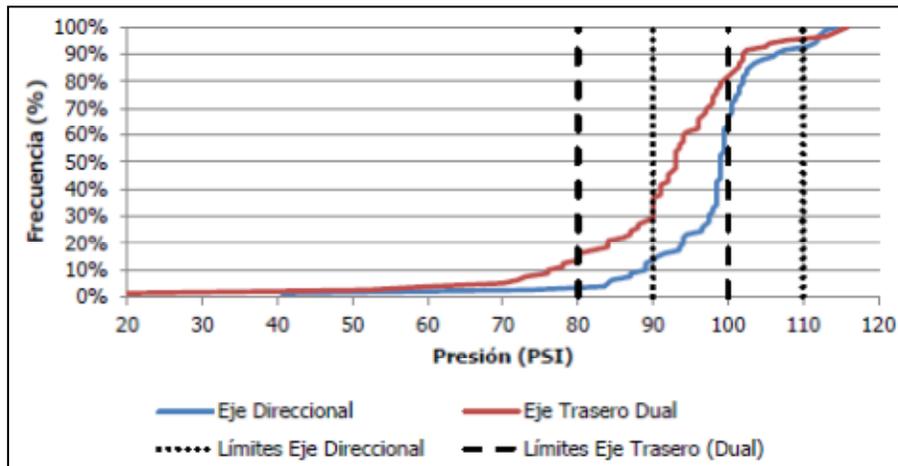
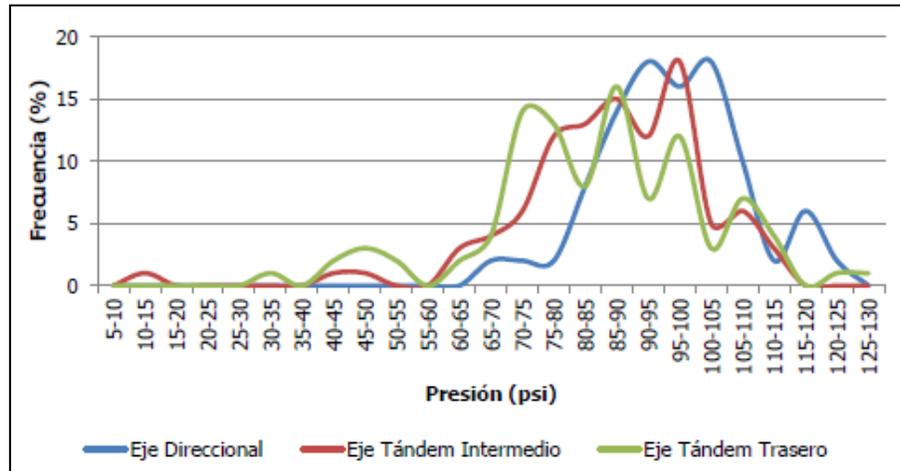


Figura 11. Florida Ice & Farm, C2: Función de Distribución Acumulada. Fuente: Sibaja, 2014

### Estación de Pesaje de Búfalo

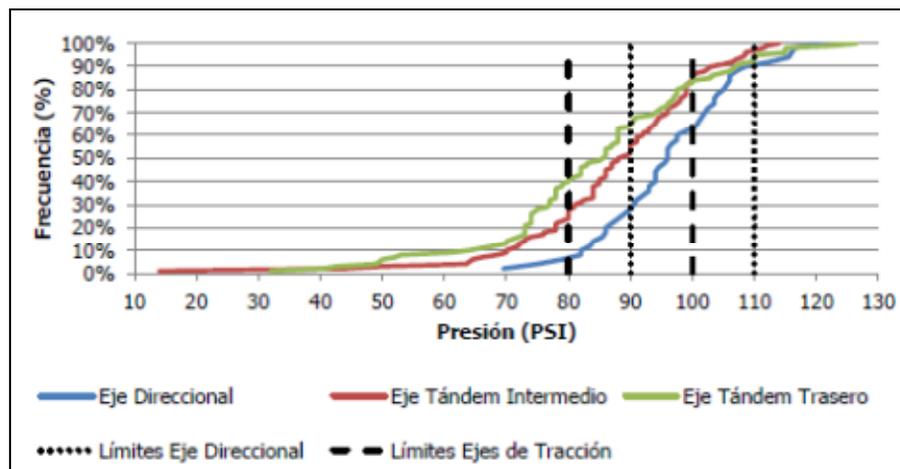
Sibaja (2014) describe cómo esta estación de pesaje presentó una distribución irregular, con múltiples "picos" que poseen frecuencias porcentuales muy similares para distintas presiones. En la Figura 12 se puede observar que el eje direccional es el que muestra un comportamiento más estable, teniendo sus puntos máximos entre los 90 y 105 psi, los cuales se encuentran dentro de un rango aceptable, el eje tándem intermedio presenta su frecuencia porcentual mayor a una presión de 95 a 100 psi, teniendo sin embargo un máximo secundario a una presión de 85 a 90 psi. El eje tándem trasero es el que presenta

la distribución más irregular, sin embargo su pico máximo esta dentro del rango aceptable al estar en entre 85-90 psi.



**Figura 12. Búfalo, T3-S2: Espectro de Presión. Fuente: Sibaja, 2014**

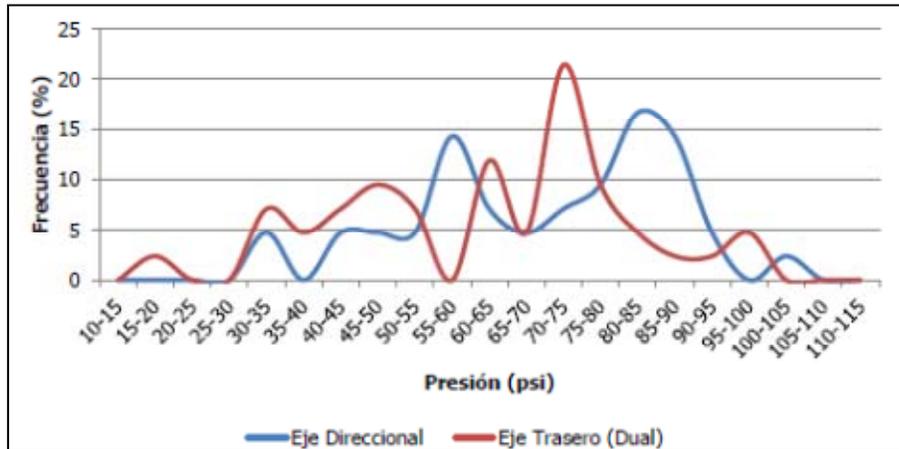
Como se observa en la Figura 13 que muestra la función de distribución acumulada, en el caso de los ejes direccionales cerca de un 60% de los datos de frecuencia se mantuvieron dentro de los límites de presión recomendados, mientras que solamente lo hicieron aproximadamente un 40% de los ejes tándem traseros (Sibaja, 2014).



**Figura 13. Estación de Búfalo, T3-S2: Función de Distribución Acumulada. Fuente: Sibaja, 2014**

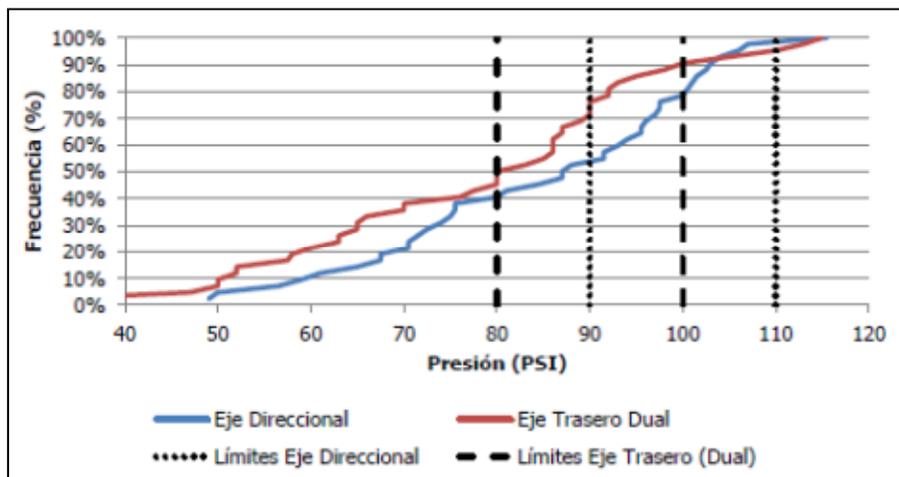
En cuanto a los vehículos tipo C2 se observa un comportamiento de "picos" principales dobles como se observa en la Figura 14, esto podría deberse a que se hizo la muestra con vehículos C2 de carga ligera y carga pesada (que presentan recomendaciones mayores de presión que los de carga liviana), ya que aunque no hay diferencia en la carga que transportan utilizan un tipo diferente de neumáticos, se puede

observa que para los dos tipo de ejes se presentaron presiones menores a la de los límites preestablecidos (Sibaja, 2014).



**Figura 14. Búfalo, C2: Espectro de Presión. Fuente: Sibaja, 2014**

Sibaja (2014 comenta como cerca del más del 50% de los vehículos de ejes direccionales poseen presiones menores al límite inferior, y lo mismo ocurre con el 45% de los ejes traseros duales, esto se aprecia de mejor manera en la Figura 15.

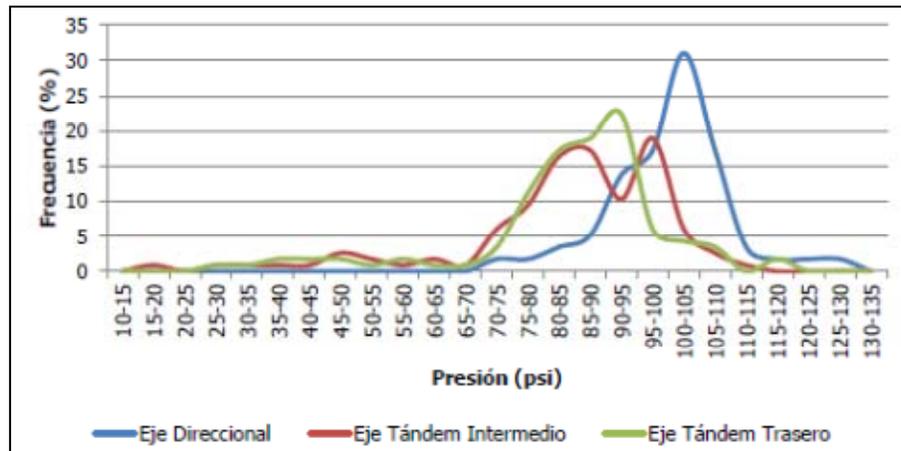


**Figura 15. Búfalo, C2: Función de Distribución Acumulada. Fuente: Sibaja, 2014**

### **Estación de Pesaje de Ochomogo**

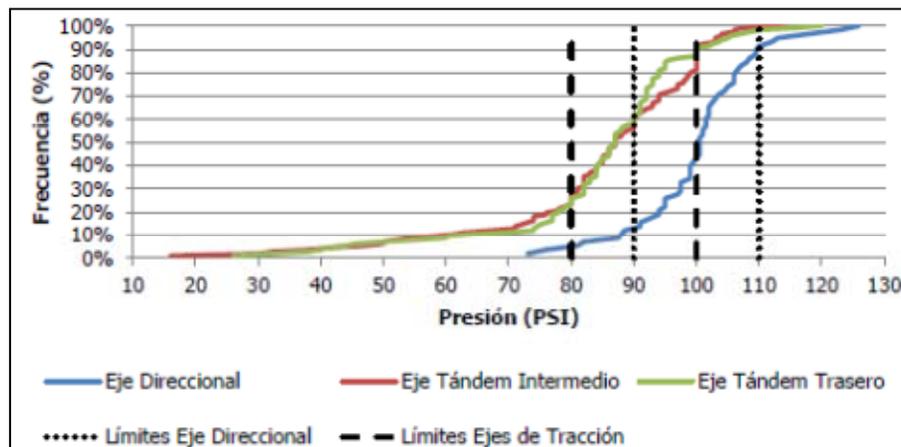
Esta estación, según Sibaja (2014) se caracterizó por presentar valores de presión bastante constantes a lo largo de los tres meses de muestreo, por lo que se tiene un solo punto máximo de presión para el vehículos de ejes direccionales y de ejes tipo tándem trasero. Para los de ejes tipo tándem intermedio se obtuvieron dos valores máximos de porcentaje de frecuencia muy similares para dos intervalos de

presión diferentes, estando los "picos" de los tres tipos de ejes dentro de los límites aceptables como se muestra Figura 16 y el la Figura 17, es esta última se observa además que más del 70 % de los ejes direccionales y de tracción se encuentran dentro de los límites establecidos.



**Figura 16. Ochoмого, T3-S2: Espectro de Presión. Fuente: Sibaja, 2014**

Como se mencionó anteriormente en la siguiente figura se muestra como se da un comportamiento muy cercano al recomendado para los tres tipos de ejes analizados, alcanzando valores de hasta 80 % de cumplimiento en las presiones para los ejes direccionales.



**Figura 17. Ochoмого, T3-S2: Función de Distribución Acumulada. Fuente: Sibaja, 2014**

Para los vehículos tipo C2 se dio un espectro de presión con un comportamiento de "pico" doble para los dos tipos de ejes como se aprecia en la Figura 18, según Sibaja (2014) esto se explica por la diversidad en tipos y modelos que se dan en este tipo de camiones, y aunque los picos más cercanos tienen valores muy similares a los rangos que estipula el MOPT, los otros presentan presiones

sumamente alejadas a los recomendados lo cual Sibaja (2014) explica como consecuencia de una falta de interés por parte de los conductores por cumplir con los requerimientos de presión estipulados.

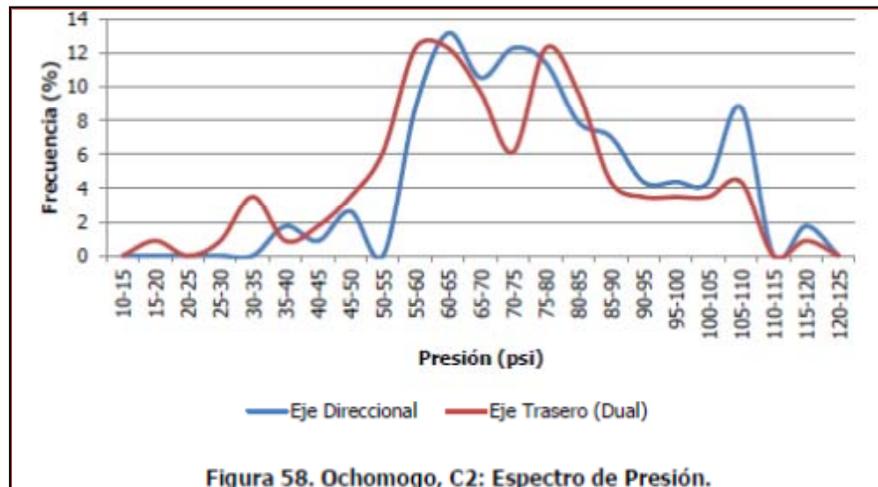


Figura 18. Estación de Ochoмого, C2: Espectro de Presión. Fuente: Sibaja, 2014

Cuando se analiza la distribución acumulada mostrada en la Figura 19 se evidencia que los vehículos tipo C2 tiene un porcentaje de cumplimiento de presión muy bajo, ya que solo aproximadamente un 25% de los ejes direccionales y un 20 % de los ejes traseros se encuentran dentro de los límites de presiones recomendadas (Sibaja, 2014).

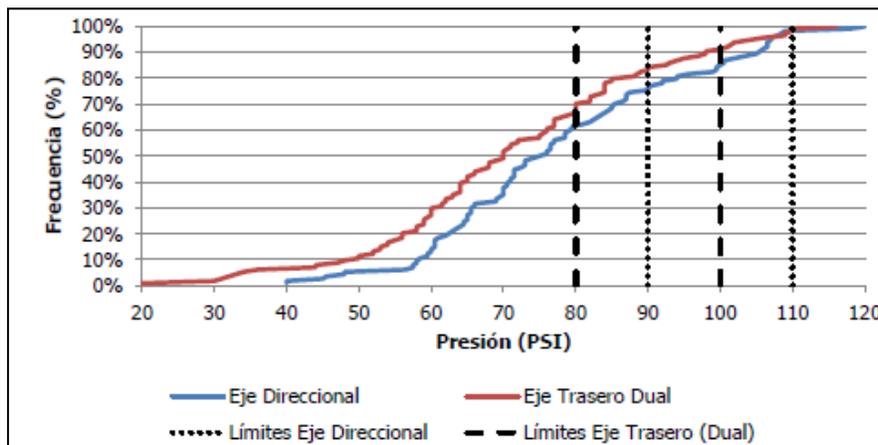


Figura 19. Ochoмого, C2: Función de Distribución Acumulada. Fuente: Sibaja, 2014

### Estación de Pesaje de Esparza

En esta estación los vehículos tipo T3-S2 mostraron un comportamiento adecuado, como se observa en la Figura 20 y la Figura 21 a continuación, ya que los valores máximos de presión y frecuencia se encuentran dentro de los rangos recomendados por el MOPT para cada eje según el peso, para el eje

direccional la presión máxima es de entre 95 y 100 psi mientras que para los eje tándem y tándem intermedio su valor máximo está entre los 85 y 90 psi (Sibaja, 2014).

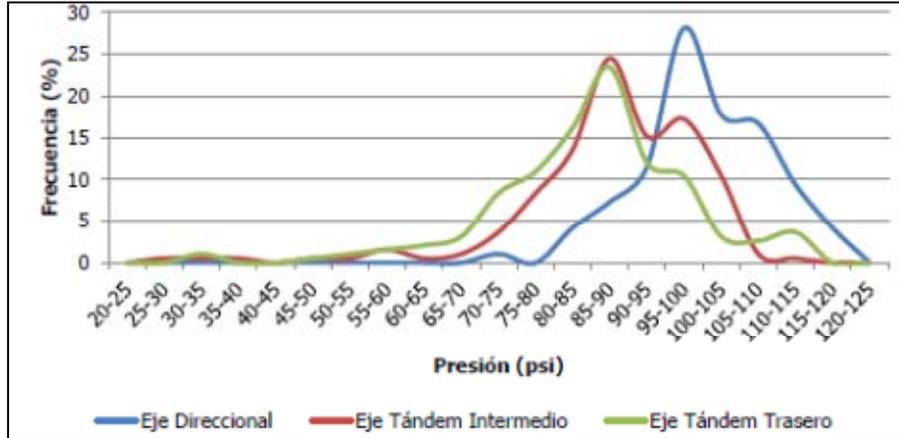


Figura 20. Esparza, T3-S2: Espectro de Presión. Sibaja, 2014

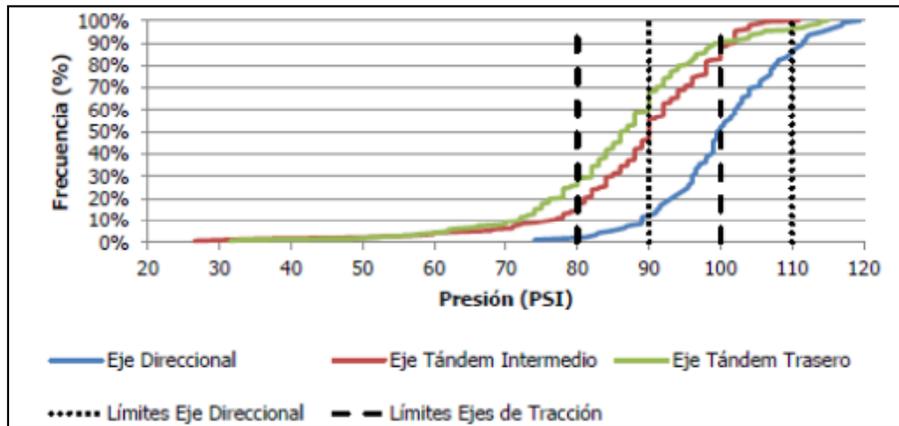


Figura 21. Esparza, T3-S2: Función de Distribución Acumulada. Sibaja, 2014

Sibaja (2014) recalca la repetición en el comportamiento variable mostrado por los vehículos tipo C2 a lo largo de la investigación. Como se observa en la Figura 22 donde cada eje presenta un espectro de presión con varios "picos", el eje direccional presente su valor máximo se encuentra entre un rango de presión de 70-75 psi, aunque el eje trasero tiene "picos" con frecuencias muy similares a diferentes presiones, presenta su máximo entre una presión de 90 y 95 psi.

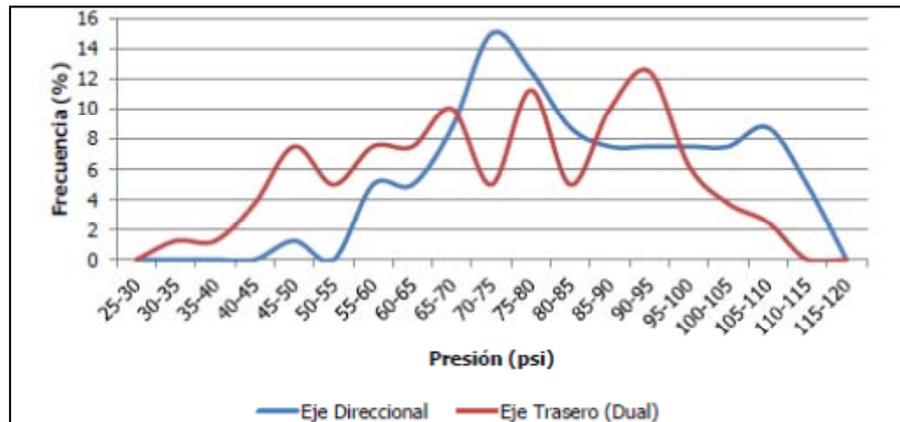


Figura 22. Esparza, C2: Espectro de Presión. Sibaja, 2014

En la Figura 23 se evidencia una vez más que la frecuencia acumulada que se encuentra dentro de las bandas recomendadas es muy baja. Este comportamiento se explica por la variabilidad en modelos de camiones tipo C2 (Sibaja, 2014)

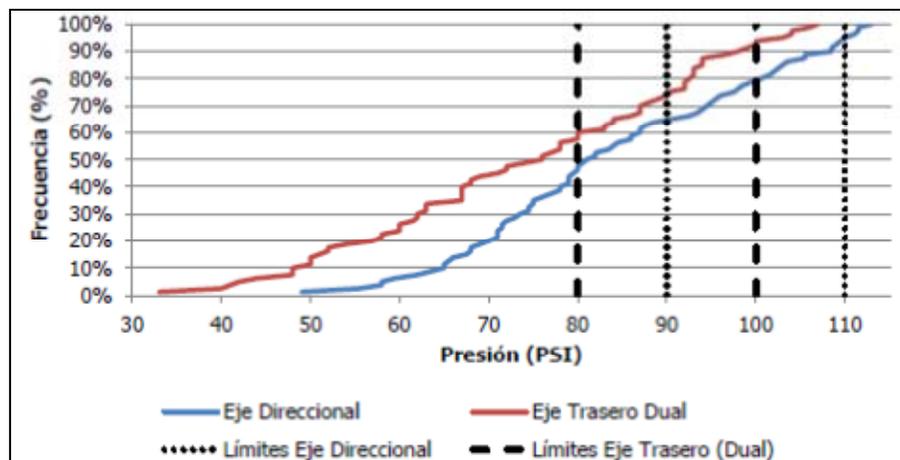


Figura 23. Esparza, C2: Función de Distribución Acumulada. Sibaja, 2014

### Impacto de las características de los vehículos

Durante la investigación Sibaja (2014) realizó un seguimiento a las características de los vehículos que se consideran las principales causantes del deterioro de las carreteras, algunas conclusiones son las siguientes

Porcentaje de Carga: al asignar una clasificación según el porcentaje de carga que llevarán al momento de realizar la muestra por tipo de vehículo, siendo descargado para los vehículos C2 si lleva un máximo del 35% de su peso total permitido (16 toneladas incluyendo su propio peso), para los vehículos tipo T3-S2 si lleva menos del 45% de su peso total permitido (39 toneladas incluyendo su



propio peso) y cargado de presentarse el caso contrario, se obtuvo una notable mayoría de vehículos cargados ya que en ambos casos más del 60% de los vehículos se encontraban cargados.

Tipo y marca de neumático: al realizar un conteo del tipo y marca de cada neumático que utilizaron los vehículos durante el muestreo se obtuvieron 77 marcas en total para los vehículos tipo T3-S2, siendo Aeolus la marca más utilizada con más del 27 % del total. 59 marcas en total para los vehículos tipo C2, siendo la más usada Firestone con un 43 % del total (lo cual se debe a que es la marca más utilizada por la empresa Florida Ice & Farm). Además para ambos tipos de vehículos el tipo de neumático más usado es el 11R22.5, con más del 53% para los vehículos T3-S2 y más del 40% para los C2.

Efecto de la temperatura sobre la presión de inflado: para comprobar si la temperatura posee un efecto directo sobre la presión de inflado de los neumáticos como estipula el análisis bibliográfico se realizó mediciones de las temperaturas y presiones de cada vehículo de la muestra y analizando los coeficientes de correlación de estos para los vehículos tipo T3-S2 y los tipo C2, llegando a la conclusión de que al tener coeficientes de correlación, entre presión y temperatura de los neumáticos, muy bajos la temperatura no tuvo un efecto significativo en la presión de inflado obtenida en la muestra.

Relación entre carga y presión de inflado: además de estudiar el porcentaje de vehículos cargados, se analizó el efecto de la carga sobre la presión de inflado al tomar las mediciones de la presión en los neumáticos y la carga en cada eje, concluyendo que existe una relación entre ambos parámetros para los vehículos tipo T3-S2 y los tipo C2, sin embargo al hacer el análisis estadístico de correlación evidenció que el efecto de un parámetro sobre otro es muy pequeño, llegando inclusive a ser nulo en ocasiones.

### **Análisis de varianza (ANOVA)**

Para determinar si existe una diferencia estadística entre las rutas y datos tomados Sibaja (2014) indica que se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) con una confianza del 95% con el programa estadístico Minitab para aceptar o rechazar la nula de que los juegos de datos fueran iguales. Para esto en primer lugar se le realizó una prueba de normalidad Anderson-Darling a los datos con lo que se confirmó que los datos poseían un comportamiento normal. Luego al hacer las comparaciones se llegaron a diversas conclusiones:

- Las medidas de presión para los vehículos tipo T3-S2, a excepción de dos ocasiones, son iguales para todos los sitios de estudio, el caso de los vehículos tipo C2 las mediciones de presión tomadas



son muy similares entre todos los sitios analizados con excepción de las tomadas en la empresa Florida Ice & Farm.

- El comportamiento entre los meses de estudio y en los sitios muestreados es aleatorio.
- Todas las temperaturas en las llantas entre los sitios de estudio y entre los meses de muestreo fueron distintas.
- Para los ejes direccionales los conductores mantiene la presión de inflado en los neumáticos iguales sin importar si el vehículo se encuentra cargado o descargado, sin embargo para los ejes de tráiler tándem o tándem trasero la presión varía al tener el vehículo cargado o descargado.

### Conclusiones y recomendaciones

Basándose en el análisis de los datos recopilados Sibaja (2014) llega, entre otras, a las siguientes conclusiones:

- Se deben contar con rangos específicos y actualizados de las presiones de inflado que reflejen el tránsito que se moviliza en la Red Vial Nacional.
- Se debe instaurar un método de muestreo capaz de reducir el sesgo estadístico de los datos.
- Las presiones en los vehículos tipo T3-S2 se encuentran en su mayoría dentro del rango aceptable de presión de inflado establecido por el MOPT, de no encontrarse dentro del rango la tendencia es que la presión de inflado sea menor a la recomendada.
- Para los vehículos tipo C2 se daba un comportamiento muy variable, por lo que se considera que no es adecuado clasificar este tipo de vehículo en un solo rango de presión de inflado.
- Los vehículos de carga pesada utilizan presiones de inflado entre 55 y 70 psi mayores a los de carga liviana.
- A pesar de que hay un efecto de la temperatura sobre la presión de inflado, este no es determinante sobre el valor de presión obtenido.
- No hay relación estadística entre el conjunto dato de los vehículos tipo T3-S2 no los tipo C2 al estar cargados o descargados.
- Los rangos de presiones de inflado para los vehículos tipo T3-S2 son similares a los encontrados por estudios análogos internacionales, ya que se también se encontró que en los ejes direccionales las presiones son mayores que en los ejes de tracción de los vehículos, no obstante en Costa Rica se encontró que la presión de los ejes direccionales es de alrededor de 100 psi, mientras que en algunos estudios llegaban hasta los 120 psi.
- Se deben separar en carga liviana y carga pesada los vehículos tipo C2 no solo en la tarjeta de circulación, sino también el peso máximo permitido.



- Se deben construir más estaciones de pesaje e implementar un sistema de control de pesos más riguroso para regular la carga que transportan los vehículos pesados en la Red Vial Nacional.

### **Desviación Lateral de Llanta**

Para desarrollar este factor actualmente se cuenta con el trabajo final de graduación de Morris (2016) para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, la cual, como se menciono anteriormente, se titula: *Medición del desplazamiento lateral de vehículos en estaciones de conteo de Costa Rica*.

Morris (2016) explica que actualmente al diseñar carreteras en el país se considera que los vehículos se distribuyen a lo largo de todos los carriles, transitando en línea recta. Sin embargo es evidente que los vehículos presentan un movimiento lateral en un mismo carril, por lo que el desgaste de la carretera va a diferir del planteado, ya que una carretera donde se dé un desplazamiento lateral mayor va a producir una huella menos profunda y más ancha en el pavimento que si los neumáticos mantuvieran una sola posición.

En Costa Rica se cuenta con poca información con respecto al desplazamiento lateral de los neumáticos y a pesar de que se han realizado investigaciones internacionales sobre el tema, estas podrían no ser representativas, ya que según Stempiphar (2005) los datos obtenidos dependen de factores como el tiempo atmosférico, el tipo y ancho del vehículo, las condiciones del trafico, la superficie de rodamiento, el ancho del carril, la velocidad, entre otros. Es por esto que el objetivo principal propuesto por Morris (2016) del proyecto de graduación es el de determinar un valor promedio o un rango para la distribución lateral representativa para las carreteras del país. El proyecto pretende también determinar un método apropiado para la medición del la desviación lateral en las carreteras costarricenses. Para esto se planea medir el desplazamiento en cinco estaciones de conteo del LanammeUCR, realizar un análisis probabilístico adecuado de los datos y analizar la variación del desplazamiento lateral según el carril y el porcentaje de vehículos que lo transiten.

Para la medición del desplazamiento lateral, el método utilizado dependerá de la tecnología disponible, los cuales pueden ser sensores neumáticos de manguera o cámaras para medición, mientras que para el análisis probabilísticos Morris (2016) indica que debido a que uno de los factores determinantes en el desplazamiento lateral es el conductor del vehículo, los datos poseen una distribución normal donde la mayoría de los vehículos transitan por el mismo punto. Se espera utilizar los resultados obtenidos como un parámetro de entrada más preciso del Simulador de vehículos



pesados (HVS por sus siglas en ingles) del LanammeUCR y de esta manera servir como insumo para la futura Guía de Diseño Estructural de Pavimentos de Costa Rica.

### Tránsito Vehicular

#### Proyecto de Graduación: Determinación de patrones típicos de distribución temporal

Magaña (2014) realizó el proyecto de graduación titulado *Determinación de patrones típicos de distribución temporal de tránsito en Costa Rica* para obtener el grado de licenciatura en ingeniería civil de la Universidad de Costa Rica. A partir del análisis estadístico de datos obtenidos de estaciones de conteo permanentes, se determinaron los patrones temporales, conociendo los días de la semana con patrones típicos de distribución horaria del tráfico, así como los meses con patrones típicos de distribución del tráfico por día de la semana para cada estación estudiada.

La investigación se centró en el análisis de los datos públicos de tránsito vehicular de las estaciones permanentes de conteo, de la Unidad de Gestión de Carreteras de la Dirección de Planificación Sectorial y el Centro de Control de Tránsito de la Dirección General de Ingeniería de Tránsito del MOPT, en los días con datos para las 24 horas del año 2012, se utilizaron además los datos del Consejo Nacional de Concesiones, por medio de la Sociedad Concesionaria de la Ruta Nacional 27, Carretera San José – Caldera, así como los obtenidos en aforos temporales de tránsito realizados por el PITRA-LanammeUCR para validar los patrones obtenidos.

Según Magaña (2014) es necesario conocer como varían los volúmenes de tránsito a lo largo de los días, semanas y meses para la adecuada programación de los aforos vehiculares y relacionar los volúmenes de un tiempo y lugar específicos con otro volumen de otro tiempo y lugar.

La Administración Federal de Carreteras (FHWA por sus siglas en inglés) (2013) indica que los conteos vehiculares resultan el dato de entrada más importante para los análisis relacionados con la ingeniería de tránsito, por lo que deben caracterizarse los volúmenes de tránsito según: el tránsito promedio diario anual (TPDA), el tránsito promedio diario, el máximo de vehículos que pasan por una carretera en 60 minutos (volúmenes de hora pico) y el volumen de tránsito según el tipo de vehículo (clasificación vehicular), para asegurar una adecuada interpretación de los datos analizados.

En cuanto a las variaciones en los volúmenes vehiculares Magaña (2014) aclara que se pueden clasificar por:

Variaciones temporales: las cuales como ya se mencionó antes, se subdividen en variaciones por hora del día y en variaciones estacionales, según la época del año y la ubicación de la ruta. Las variaciones



dependen del tipo de carretera y las actividades que se realicen por día de la semana, dependen de factores como el clima, festividades o factores aleatorios (Weijermars, 2007).

Variaciones espaciales: describen los cambios en los volúmenes vehiculares dependiendo de la posición geográfica de la vía y del tipo de industria que se dé cerca de está.

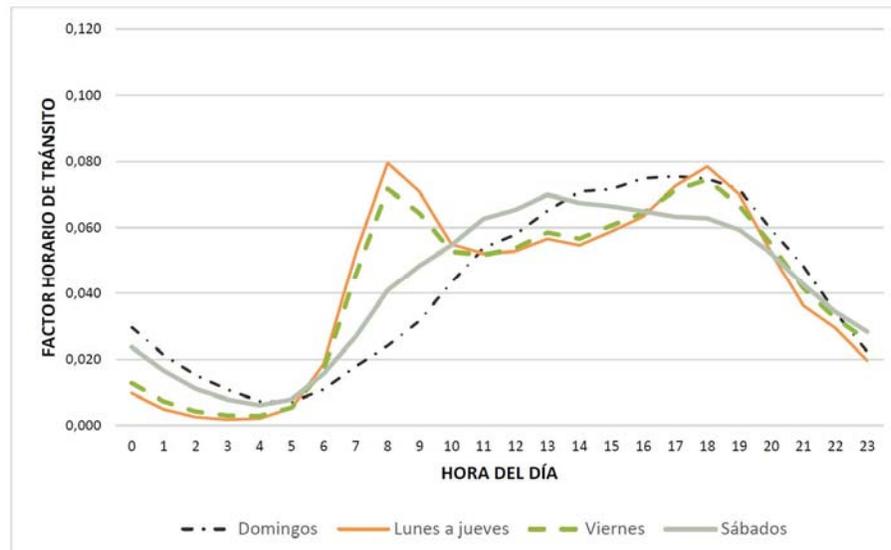
### Factores de Tránsito

Ya que los conteos de corta duración solo muestran las condiciones de tráfico en el momento en el que fueron realizados, se necesita estimar condiciones promedio durante periodos prolongados de tiempo para poder utilizar estos datos, para esto es necesario realizar ajustes para corregir la variabilidad presente el flujo vehicular (FHWA, 2013). Estos factores de resumen a continuación.

- Factores de ajuste por hora del día, para los conteos menores de 12 horas.
- Factores de ajuste por día de la semana, para conteos que no se den en todos los días de la semana.
- Factores de ajuste por mes del año, para considerar las variaciones de periodos mayores a una semana o mensuales.

Las formulas utilizadas para la determinación de los factores se muestran en el Anexo.

En la Figura 24 se ilustra el comportamiento para el total de vehículos en la estación PK+7100 en ella Ruta Nacional 27 obtenido mediante el análisis de conglomerados de grupos. Magaña (2014) aclara que para este caso se tomó como patrón horario el obtenido de lunes a jueves al ser el más repetitivo en la estación, este mismo proceso se realizó en cada una de las estaciones permanentes de conteo y para cada clasificación vehicular, para obtener el vector de comportamiento típico de estas.



**Figura 24. Patrones horarios del total de vehículos, estación PK+7100. Fuente: Magaña, 2014**

### Determinación de días de la semana y meses con patrones típicos

Para agrupar los datos es necesario definir grupo con patrones de variación temporal de tránsito que posean comportamientos similares, para luego determinar el comportamiento medio del grupo que servirá de referencia del comportamiento de los caminos del mismo grupo (FHWA, 2013). Para realizar el agrupamiento en este estudio se utilizó un análisis de conglomerados desarrollado por Ward (1963), el cual es un procedimiento estadístico estándar en el que se utiliza un algoritmo de agrupamiento jerárquico para identificar objetos similares (Regehr, 2011). A partir de los grupos obtenidos se desarrollaron diagramas de decisión para la asignación de sitios de conteo de corta duración, dentro de los grupos de factores determinados, para cada tipo de vehículo. Los datos se segmentaron en cinco grupos, 4 según el tipo de vehículos y el quinto grupo para la suma de todos los vehículos.

Magaña (2014) asigna la siguiente abreviatura a cada grupo.

- Sumatoria para todo tipo de vehículo (SUM). Incluye Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3 y Tipo 4.
- Tipo 1 (T1). Vehículos livianos y de carga liviana
- Tipo 2 (T2). Autobuses
- Tipo 3 (T3). Camiones unitarios: Vehículos de carga de una sola unidad.
- Tipo 4 (T4). Camiones con remolque: Incluirá los vehículos de carga de uno o más remolques con 5 ejes o más.



La Unidad de Gestión de Carreteras de la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT utiliza contadores de manguera en sus estaciones de conteo permanente, las cuales se localizan a lo largo de todo el país como se muestra en la Figura 25.

Nombre	Abreviatura	Ruta No.	Ubicación
Búfalo	BUF	32	500 m antes de la estación de pesaje de Búfalo
Cambronero	CMB	1	**Poblado de Angostura
Cañas	CAN	1	San Miguel de Cañas, inmediaciones del puente sobre el Río Higerón
Desmonte	DES	3	500 m después del poblado de Desmonte, San Mateo
Juan Viñas (Turrialba)	JVI	10	5.5 km antes de la ciudad de Turrialba
Liberia	LIB	21	4.9 km al Oeste de Liberia, frente a Economy Rent a Car
Matapalo - Guápil	MAT	34	*Al frente de la entrada a playa Guápil.
Muelle	MUE	4	Muelle de San Carlos, 3 Km Este del cruce con la Ruta N°35
Paso Canoas	PCA	2	Inmediaciones del mojón del Kilómetro 349, cantón de Corredores
Río Chiquito	RCH	6	Puente sobre el Río Tenorio, cantón de Bagaces.
San Juanillo (Naranjo)	SJU	141	San Juanillo de Naranjo, 6 Km al Norte de Naranjo, Alajuela
Tempisque	TEM	18	Cerca de INTACO, 3.5 km antes del puente sobre el Río Tempisque, Abangares

\*Nota: Esta estación entró a sustituir a la de Matapalo. Entró a operar a partir del 03 agosto 2012. Debido a la ubicación geográfica de esta nueva estación respecto a la anterior, se considera que no varían en sus características del tránsito entre sí.

\*\*Nota: Esta estación se varió su ubicación 2 km más abajo de su ubicación anterior. Antes estaba localizada cerca de Piedras Blancas.

**Figura 25. Estaciones de conteo permanentes de la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT. Fuente: Magaña, 2014**

Magaña (2014) utilizó datos brindados por la Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA-LanammeUCR, la cual emplea contadores neumáticos de manguera en los cerca de 35 aforos vehiculares de al menos una semana de duración realizados en 14 rutas nacionales pavimentadas a lo largo del país. Magaña (2014) indica además que utilizó los datos de tránsito recopilados en las estaciones de conteo permanentes instaladas en la Ruta Nacional 27 por la Sociedad Concesionaria de la Ruta Nacional 27, Carretera San José - Caldera, adscrita al Consejo Nacional de Concesiones, para un periodo de tiempo que va desde junio del 2009 a enero del 2013, y que fueron facilitados por el Departamento de Medios de Transporte del MOPT, para realizar el conteo de vehículos en estas estaciones se utilizan detectores de espiras magnéticas (bucles de inducción). En la Figura 26 se muestra el resumen de las ubicaciones de conteo permanentes instaladas en esta ruta.



Estación	Ubicación
PK 0+500	Costado Sur del Parque Metropolitano La Sabana
PK 2+900	Inmediaciones de intersección Pavas - Anonos
PK 7+100	Inmediaciones de intersección hacia Multiplaza Escazú
PK 10+500	1 km antes de intersección a Santa Ana
PK 22+450	Radial El Coyol
PK 30+620	Puente de Río Grande
PK 31+550	Radial Atenas - 500m antes del Peaje
PK 41+960	550m antes del cruce a Escobal de Atenas
PK 54+950	1,5km después de intersección con Ruta Nacional 3
PK 62+180	1 km después de Intersección con Ruta 34
PK 71+335	Antes del puente del río Jesús María
PK 75+400	Entre Central de Contenedores Caldera y Almacén Fiscal ANFIPAL S.A.

**Figura 26. Ubicación de estaciones de conteo permanente en la R.N. 27. Fuente: Magaña, 2014**

Como se explicó con anterioridad, antes de realizar el análisis de conglomerados, se determinaron los patrones temporales típicos, tanto para los días de la semana con patrones típicos de distribución horaria del tráfico para cada estación y para cada tipo de vehículo, para esta última clasificación se obtuvo que la tendencia en el total de vehículos y para los vehículos livianos Tipo 1 es de martes a jueves, para los autobuses (Tipo 2) y los vehículos pesados (Tipo 3 y Tipo 4) son los días de lunes a viernes, y luego se utilizaron las curvas de factores horarios de los días de la semana con patrones típicos para obtener los patrones típicos de los aforos hechos por el PITRA-LanammeUCR, con los que obtuvieron, para 57 puntos de aforo, las series típicas por hora del día para cada clasificación vehicular (Magaña, 2014).

Se efectuó el mismo procedimiento para determinar los meses con patrones típicos de distribución del tráfico por día de la semana, se encontraron los meses con patrones de distribución atípicos para cada estación y según el tipo de vehículo. En las estaciones de conteo permanente, los meses con patrones atípicos que más se repitieron fueron: enero, abril y diciembre, lo cual coincide con los periodos festivos.

Luego se realizó el análisis de conglomerados para cada sitio de conteo y tipo de vehículo, a partir de los vectores de patrones típicos, para determinar las variaciones temporales de tránsito, tal como se resume a continuación (para mayor detalle ver Anexo).



## Variaciones temporales de tránsito por hora del día y día de la semana

Para el análisis, Magaña (2014) explica que contaron con 42 puntos de aforo de los cuales 12 son estaciones del Consejo Nacional de Concesiones, 11 son estaciones permanentes a cargo de la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT y 19 corresponden a aforos temporales realizador por el PITRA-LanammeUCR, a los cuales les realizó el análisis de conglomerados obteniendo los resultados y conclusiones según el tipo de vehículo que se resumen a continuación.

### I. Sumatoria de todo tipo de vehículos (SUM)

Variaciones de distribución horaria del tráfico: del análisis de conglomerados se obtuvieron cuatro grupos:

- Grupo 1 (SUM-H1): Se constituye de estaciones en zonas alejadas de la Gran Área Metropolitana, en especial de la zona norte: Presentan un rápido crecimiento de las 4:00 a.m. a las 7:00 a.m., alcanzando un 6 % del tránsito diario que se mantiene hasta las 12:00 m.d. y luego creciendo hasta alcanzar un 7 % del tránsito diario hasta las 4:00 p.m.
- Grupo 2 (SUM-H2): Compuesto por estaciones permanentes de la Ruta Nacional 27, Carretera San José-Caldera. Se presentaron dos picos de tránsito a las 8:00 a.m. y a las 6:00 p.m. con valores cerca del 8 % del tránsito diario.
- Grupo 3 (SUM-H3): Conformado por estaciones ubicadas en las zonas rurales de la Ruta Nacional 27, este grupo presenta un comportamiento similar al del Grupo 1 pero con periodos de crecimiento a horas distintas.
- Grupo 4 (SUM-H4): Engloba las estaciones de la Carretera Bernardo Soto, la Carretera Interamericana Sur, La Carretera Cartago-Turrialba y la intercesión entre la Ruta Nacional 32 y la Ruta Nacional 4. Se mostraron dos picos de volumen vehicular a aproximadamente las 6:00 a.m. y a las 4:00 p.m.

### Variaciones del tráfico por día de la semana

- Grupo 1 (SUM-S1): Compuesto por 17 estaciones distribuidas principalmente en la zona norte del país en la Ruta Nacional 1 y la Ruta Nacional 32 entre otras. Se presentó un volumen poco variable entre semanas llegando a un máximo el día viernes con un 14 % más de volumen del TPD mensual y un menor volumen los fines de semana.
- Grupo 2 (SUM-S2): Se conforma de las estaciones permanentes de la Ruta Nacional 27 más cercanas a la zona rural de la capital y la estación de la Radial el Coyol. Se presentaron volúmenes



más bajos los fines de semana y entre semana los valores van aumentando a partir del día lunes hasta alcanzar a su máximo el día viernes con un tránsito diario 15 % mayor al TPD.

- Grupo 3 (SUM-S3): Conformado por estaciones de la Ruta 27 desde Atenas hasta la Carretera Costanera en la Ruta 34. Dado a que se encuentra cerca de las rutas de acceso a playas y zonas turísticas los fines de semana se da un aumento de volumen vehicular ya que suelen ser utilizados por vacacionistas.
- Grupo 4 (SUM-S4): Está compuesto por zonas rurales de uso mixto, ya que también san acceso a zonas turísticas como Puerto Caldera y Puntarenas entre otras, lo que explica un aumento de volumen los fines de semana.

## **II. Vehículos livianos y de carga liviana o Tipo 1 (T1)**

Ya que este tipo de vehículo compone la mayor parte de la flota vehicular del país el comportamiento que presenta es muy similar al presentado por la sumatoria de todos los tipos de vehículos.

### Variaciones de distribución horaria del tráfico

- Grupo 1 (T1-H1): Integra principalmente por sitios de la costa pacífica y la zona de Guanacaste y de dos sitios de aforo en la costa atlántica. Presenta una variación horaria de rápido crecimiento entre las 3.00 a.m. y las 6 a.m. que luego desacelera hasta las 4 p.m. donde se da un periodo de volumen máximo
- Grupo 2 (T1-H2): Se compone de estaciones ubicadas en el área urbana de la Ruta Nacional 27 y dos sitios de aforo en las radiales de Atenas y el Coyol. Este grupo presenta dos horas pico muy marcadas, con un crecimiento más tardío durante el día, teniendo el máximo volumen de la tarde a las 6:00 p.m.
- Grupo 3 (T1-H3): Aglomera las estaciones de las zonas más rurales de la Ruta Nacional 27. Presenta su mayor volumen cerca de las 5:00 p.m. con cerca del 7 % del volumen diario.
- Grupo 4 (T1-H4): Se conforma de las zonas semi-rurales como los sectores de la Ruta Nacional 1 entre los accesos a Grecia y Palmares y las zonas cercanas a la GAM. Se da un comportamiento de dos picos de magnitud menor a la del Grupo 3.
- Grupo 5 (T1-H5): Compuesto por estaciones ubicadas en la zona norte del país como Upala, San Carlos y Sarapiquí, y estaciones permanentes de Naranjo y Liberia. Se da un crecimiento a partir de las 4:00 a.m. hasta alcanzar un pico durante la mañana de 6 % del tránsito diario y un máximo del 8 % del tránsito diario a las 5:00 p.m. de la tarde.



### Variaciones del tráfico por día de la semana

- Grupo 1 (T1-S1): Está constituido por las estaciones de San Carlos, de la Carretera Bernardo Soto y la estación permanente de Búfalo. Se da un comportamiento uniforme entre semana con valores cercanos al TPD de la ruta con los valores máximos los viernes.
- Grupo 2 (T1-S2): Se compone de estaciones ubicadas en zonas urbanas de la Ruta Nacional 27 y la Radial de Coyol, así como la estación permanente de Liberia. Se da un volumen bajo en los fines de semana comparación al resto de los días.
- Grupo 3 (T1-S3): Aglomera estaciones localizadas en rutas de paso a una de las regiones más turísticas del país como lo es Jacó de Puntarenas y sus alrededores, por lo que se da un aumento considerable del volumen vehicular a partir del viernes y hasta el domingo, con valores de hasta 1,4 veces el TPD.
- Grupo 4 (T1-S4): Conformado por gran parte de las estaciones de la zona del Pacífico Central ceca de la playa Dominical, las estaciones de la Ruta Nacional 10 y las estaciones Tempisque y Cañas, además de la estación permanente de Paso Canoas. Se da un ligero aumento del volumen vehicular los fines de semana, lo que refleja zonas con características turísticas.

### **III. Autobuses o Tipo 2 (T2)**

Variaciones de distribución horaria del tráfico: Este tipo de vehículos presentan patrones por hora del día más variables entre ellos, ya que según Magaña (2014), en ciertas regiones hay un volumen reducido de autobuses y pocas rutas, por que se presta el servicio en horas específicas del día.

- Grupo 1 (T2-H1): Este grupo presenta una distribución geográfica muy diversa, entre las zonas que aglomera se encuentran el Muelle de San Carlos, Sarapiquí, Liberia, Puntarenas centro entre otras. Se da un crecimiento del volumen de autobuses a partir de las 3:00 a.m. y un pico al redor de las 6:00 am con un 7,7 % del tránsito diario de autobuses, que disminuye cerca de las 4:00 p.m.
- Grupo 2 (T2-H2): Integra a las estaciones permanentes de la Ruta Nacional 27 en el que se da un crecimiento acelerado de autobuses desde la 5:00 a.m. a las 8:00 a.m. hasta que llega a un 6,5 % del tránsito diario, presenta su máximo volumen vehicular entre la 2:00 p.m. y las 6:00 p.m. aproximadamente.
- Grupo 3 (T2-H3): Compuesto por estaciones de la zona rural de la Ruta Nacional 27, la zona del Pacífico Central, la zona de Cañas y las cercanías del río Tempisque. Se da un crecimiento lento del volumen vehicular en la mañana hasta las 8:00 a.m. luego se da un comportamiento constante hasta las 5:00 p.m. donde comienza a decrecer muy lentamente.



- Grupo 4 (T2-H4): Se conforma de estaciones en la cercanía de Vuelta Kooper y Aguas Zarcas de San Carlos, y en la zona de las Rutas Nacionales 34 y 2 entre Dominical y Río Claro, así como algunas estaciones aisladas de la red vial. El grupo muestra un periodo pico entre las 5:00 a.m. y las 6:00. a.m. a partir del cual comienza a disminuir, mientras que en la tarde se da otro crecimiento hasta alcanzar un valor de 9 % del tránsito diario de autobuses en la tarde.

Variaciones del tráfico por día de la semana: Se presentaron solamente dos conglomerados al haber menos variaciones respecto a los días de la semana.

- Grupo 1 (T2-S1): Este conglomerado concentra la mayoría de las estaciones al tener 26 de 40 de los sitios de aforo analizados en una región geográfica muy amplia. Se presentó un patrón menor en los fines de semana con valores del 50 % del TPD de los autobuses y un 90 % del TPD los sábados, mientras que entre semana los valores rondan los 110 % con el máximo el viernes al alcanzar un 120 % del TPD de autobuses.
- Grupo 2 (T2-S2): Se constituye de estaciones específicas en el sector rural de la Ruta Nacional 27 entre Atenas y Puerto Caldera, la mayor parte de las estaciones del Pacífico central y sur en la Carretera Costanera, la estación permanente de Paso Canoas en la Ruta Nacional 2 entre otros. Este grupo presenta un volumen bajo los domingos y lunes, que incrementa hasta el viernes cuando alcanza su máximo valor de 116 % de TPD de la ruta por lo que se supone una influencia turística en las rutas.

#### **IV. Camiones unitarios o Tipo 3 (T3)**

##### Variaciones de distribución horaria del tráfico

- Grupo 1 (T3-H1): Las estaciones que lo componen se encuentran en áreas rurales del país, en su mayoría de la zona norte, atlántica de Costa Rica y de la Carretera Interamericana. Se observó un patrón de rápido crecimiento a partir de las 3:00 p.m., a las 6:00 a.m. se presenta un comportamiento constante con un 6 % a 7 % del volumen de tránsito diario de camiones unitarios hasta las 5:00 p.m.
- Grupo 2 (T3-H2): Engloba estaciones de la zona urbana de la Ruta Nacional 27. Se presentó un comportamiento de dos picos muy definidos en mañana y en la tarde, siendo el primero mayor con un 8,5% del tránsito diario en comparación al 7,5 % de la tarde.
- Grupo 3 (T3-H3): Concentra las estaciones de los sectores rurales de la Ruta Nacional 27 y las ubicadas en la radial de El Coyol. En este grupo se presenta un crecimiento en el volumen de vehículos a las 3:00 a.m. y las 6:00 a.m. hasta alcanzar un pico a las 8:00 a.m. y 10:00 a.m., a partir



de esa hora comienza a darse un nuevo crecimiento hasta alcanzar el volumen máximo del día entre las 3:00 p.m. y las 5:00 p.m., con aproximadamente 6,5 % del volumen de camiones unitarios diarios

- Grupo 4 (T3-H4): Integra las estaciones cercanas a la zona pacífica de Costa Rica en la Carretera Costanera y Guanacaste, las localizadas en la Ruta Nacional 1 y la Ruta Nacional 10 así como las de la Ruta Nacional 32 entre el cruce de Sarapiquí y la entrada a Siquirres. En este grupo se presentó un patrón de crecimiento vehicular temprano con casi un 6 % del tránsito diario de los camiones unitarios en horas de la mañana para luego decrecer hasta reflejar un crecimiento de un 6,6 % del volumen diario de las 3:00 p.m. a las 4:00 p.m.

#### Variaciones del tráfico por día de la semana

- Grupo 1 (T3-S1): Se conforma principalmente de estaciones localizadas en la región norte del país y las ubicadas tanto en la zona rural y urbana de la Ruta Nacional 32 y la Ruta Nacional 1 en la Carretera Bernardo Soto. Se observaron valores mayores al TPD para los días entre semana llegando al máximo el viernes donde se obtuvo un 123 % del tránsito promedio diario, mientras que para los sábados y domingos se presentó un volumen mucho menor con cerca del 48 % del TPD.
- Grupo 2 (T3-S2): Se compone de las estaciones ubicadas en la región Caribe del país, las estaciones sobre la Carretera Interamericana Norte, la zona de Guanacaste y la estación permanente de Paso Canoas. El comportamiento muestra un bajo volumen de tránsito el domingo, mientras que el sábado se da un volumen de tránsito poco menor al del día viernes, por otro lado entre semana se da aproximadamente 110 % del TPD.

#### **V. Camiones con remolque o Tipo 4 (T4)**

##### Variaciones de distribución horaria del tráfico

- Grupo 1 (T4-H1): Se conforma en su mayoría de zonas rurales, a lo largo de la Carretera Costanera en la Ruta Nacional 34, las cercanías de Paso Canoas en la Ruta Nacional 2, la zona norte y la región de Cañas y Abangares. Este grupo muestra un crecimiento desde las primeras horas del día hasta las 7:00 a.m. donde alcanza un porcentaje de volumen diario cercano al 5 % que se mantiene constante hasta el medio día, donde presenta un crecimiento que lo lleva a alcanzar un 6 % del volumen diario y finalmente comienza a decrecer al ser las 5:00 p.m.
- Grupo 2 (T4-H2): Las estaciones de las que se compone este grupo se ubican en centros urbanos, tanto de la Ruta Nacional 27, de Ciudad Quesada, Liberia, Golfito, San Isidro del General,



Puntarenas y Atenas. Se observan patrones típicos con dos picos importantes en la mañana cerca de las 8:00 a.m. y en la tarde al aproximarse a las 6:00 p.m. con un 7,5 % del tránsito diario de los vehículos Tipo 4.

- Grupo 3 (T4-H3): Agrupa estaciones de la Ruta Nacional 32, específicamente de la estación de conteo permanente de Búfalo y del aforo temporal realizado en El Cairo de Siquirres, de la Ruta Nacional 27 entre Atenas y Puerto Caldera, y de la Carretera Costanera en la Ruta 34. Presenta valores horarios menores a 4 % antes de las 9:00 a.m. que aumenta hasta alcanzar su máximo a las 12:00 p.m. con un volumen de 6 % del tránsito promedio para los camiones con remolque.
- Grupo 4 (T4-H4): Lo componen los sitios de aforo de la Ruta Nacional 10 entre Cartago y Siquirres. Este grupo presenta un pico de volumen de tránsito diario para vehículos Tipo 4 considerablemente más alto que en el resto del día entre las 6:00 a.m. y 8:00 a.m. alcanzando un 9 %, que se reduce rápidamente hasta alcanzar un 4 % a las 10:00 a.m., luego alcanza un 6 % que se mantiene hasta las 6:00 p.m. para decrecer abruptamente una vez más.
- Grupo 5 (T4-H5): Las estaciones de conteo que se agrupan en este grupo se ubican en las Ruta Nacional 1 cerca de las Carretera Bernardo Soto, en la Ruta Nacional 2 en el sector de Casa Mata de la Carretera Interamericana. El grupo presenta un periodo pico de volumen vehicular cerca de las 5:00 a.m., luego presenta una disminución desde las 6:00 a.m. a las 9:00 a.m. y otra en la tarde, entre las 3:00 p.m. y las 7:00 p.m. Estas disminuciones se pueden deber a las restricciones vehiculares implementadas en mayo del 2013 mediante el *Reglamento para la ordenación horaria de la circulación de vehículos pesados*, establecido mediante el Decreto Ejecutivo N° 37727-MOPT del 17 de mayo de 2013.

#### Variaciones del tráfico por día de la semana

- Grupo 1 (T4-S1): Se compone de todas las estaciones de conteo con excepción de los localizados en la Carretera Costanera en la Ruta Nacional 34 y en la estación permanente de Paso Canoas. El grupo mostró valores bajos los fines de semana, teniendo el domingo un 0 % del TPD para camiones con remolque. El volumen de vehículos máximos se dio el día viernes con un 117 % del TPD para este tipo de vehículos, aunque cabe destacar que el día miércoles se da un volumen importante con un 116% del TPD.
- Grupo 2 (T4-S2): El grupo se conforma por estaciones localizadas en el Pacífico Central y en el Pacífico Sur, específicamente en la Carretera Costanera de la Ruta Nacional 34 y en la Carretera Interamericana Sur (Ruta Nacional 2). Se presentó un volumen de tránsito bajo el día lunes,



llegando incluso a ser menor que para el día domingo, sin embargo el resto de los días se dan volúmenes cercanos al del TPD de cada ruta.

### Variaciones de tránsito por mes del año

Magaña (2014) realiza el análisis de variación por mes del año para los grupos determinados por el análisis de conglomerados, estudiando únicamente para estaciones permanentes, como las de la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT y las estaciones permanentes de la Ruta Nacional 27. Los resultados y conclusiones que obtuvo se resumen a continuación.

#### ***I. Sumatoria de todo tipo de vehículo (SUM)***

- Grupo 1 (SUM-M1): Se conforma en su gran mayoría de estaciones rurales (a excepción de la estación fija PK+2900 sobre la Ruta Nacional 27), tales como las estaciones de Guanacaste, las ubicadas en las zonas rurales de la Ruta Nacional 26 y las estaciones de la zona norte (Muelle y Río Chiquito), y la estación Matapalo en la Carretera Costanera. El grupo mostró un TPD diferencialmente mayor en los meses de enero, abril, julio y diciembre; los cuales coinciden con los periodos de vacaciones de fin de año, semana santa y medio periodo; en los cuales se alcanzaron valores de TPD de hasta 20 % mayores.
- Grupo 2 (SUM-M2): Se compone de estaciones ubicadas en el sector urbano de la Ruta Nacional 27 y en estaciones semi-urbanas, como las estaciones de Búfalo, Juan Viñas y San Juanillo. Este grupo no presenta grandes variaciones a lo largo del año, sino únicamente en el mes de diciembre con apenas un 5 % más de TPD y una reducción en abril que coincide con las vacaciones de Semana Santa.

#### ***II. Vehículos livianos y de carga liviana o Tipo 1 (T1)***

- Grupo 1 (T1-M1): Conformado por estaciones de aforo de sectores rurales. Se evidencia nuevamente que las estaciones se ven afectadas por los periodos vacacionales mostrando el máximo tránsito promedio en los meses de diciembre y enero.
- Grupo 2 (T1-M2): Se compone de las estaciones Búfalo, Juan Viñas y San Juanillo, además de las estaciones urbanas en la Ruta Nacional 27. Se presentó un comportamiento similar al del Grupo 2 de la suma de todos los vehículos, con volúmenes vehiculares por mes del año estables y variando únicamente en los meses de abril y diciembre.



### **III. Autobuses o Tipo 2 (T2)**

- Grupo 1 (T2-M1): Se conforma por las estaciones ubicadas en las afueras del área metropolitana (a excepción de las estaciones de Cañas, Juan Viñas y Río Chiquito). Las estaciones presentan un patrón de tránsito con volúmenes vehiculares de autobuses más altos en los meses de enero y febrero (120 % TPD), el cual se reduce hasta el mes de junio, en julio incrementa levemente para decrecer de nuevo en agosto y finalmente mantenerse en 90 % del TPD hasta los meses de noviembre y diciembre llegando a cerca del 100 % del TPD.
- Grupo 2 (T2-M2): Integra las estaciones ubicadas en la región urbana de la Ruta Nacional 27 y las estaciones de Cañas, Río Chiquito y Juan Viñas. Se presentó un patrón de tránsito constante y cercano al 100 % del TPD, sin embargo se presentan dos puntos de volumen elevado en el mes de marzo (105 % TPD) y noviembre (110 % del TPD), mientras que en abril y agosto se da un ligero descenso en el TPD siendo en el mes de abril hasta 10 % menor.

### **IV. Camiones unitarios o Tipo 3 (T3)**

- Grupo 1 (T3-M1): Se compone por estaciones fuera de la GAM, excluyendo la estación fija de Matapalo. El grupo presentó un volumen de más del 5 % del TPD en el primer trimestre del año, que se reduce hasta un 95 % del TPD entre los meses del junio a octubre, desde los cuales comienza a crecer llegando a su máximo en el mes de diciembre con cerca de un 11 % más que el TPD.
- Grupo 1 (T3-M2): El grupo aglomera las estaciones urbanas de la Ruta Nacional 27, la Radial Atenas y la estación fija de Matapalo, en la Carretera Costanera. Se mostró un volumen muy cercano al TPD en los primeros meses del año, que se dio durante los meses de abril y mayo, para regresar a un tránsito promedio cercano al TPD por el resto del año, excluyendo al mes de noviembre que presenta el volumen máximo de camiones unitarios con cerca del 108 % del TPD.

### **V. Grupo 2 (T3-M2): Camiones con remolque o Tipo 4 (T4)**

- Grupo 1 (T4-M1): Se conforma básicamente por sitios de aforo ubicados afuera de la GAM, presenta un tránsito promedio mensual muy similar al TPD, el cual comienza a decrecer a partir del mes de marzo hasta alcanzar su punto menor en el mes de junio con 90 % del TPD. El valor máximo se da en el mes de diciembre con 107,5 % del TPD.
- Grupo 2 (T4-M2): El grupo está formado exclusivamente por estaciones ubicadas en la autopista Próspero Fernández en la Ruta 27 (estaciones PK+ 500, Pk+7100 y Pk+10500). El grupo presenta valores cercanos al TPDA en los primeros tres meses del año, mostrando una pequeña disminución



en los meses de abril y mayo, alcanza sus valores mayores de tránsito en los meses de noviembre y diciembre, con un 110 % y 103 % del TPDA respectivamente.

### Asignación de segmentos a grupos de patrones de tránsito

Magaña (2014) explica que para asignar una sección de carretera específica al estudio de cada grupo de factores de tránsito, ya sea por hora del día, día de la semana o mes del año, se realizaron tablas de resultados con los factores de tránsito para cada clasificación de vehículos, además de diagramas de decisión para asignar los grupos a cada clasificación. Esto con el objetivo de analizar el comportamiento de los aforos temporales en ese tramo a partir de los patrones de tránsito temporales.

El procedimiento empleado por Magaña (2014) para la obtención de los factores de tránsito en un tramo particular, se inicia determinando la aplicación de los factores conforme a los meses y días típicos explicados con anterioridad, buscando que el aforo sea de preferencia en una vía de dos sentidos de circulación, luego se utilizan los diagramas de decisión para determinar los patrones de cada tipo de vehículo (sumatoria de todo tipo de vehículos, vehículos livianos y de carga liviana, autobuses, camiones unitarios o camiones articulados) de acuerdo a las características geográficas y funcionales que posean. Luego a partir de los grupos de factores obtenidos se realiza la expansión de volúmenes para calcular los volúmenes por hora del día, día de la semana y mes del año.

En la Figura 27 se muestra un ejemplo del cuadro de decisión para la suma de vehículos por hora del día, mientras que en la Figura 28 se muestra a modo de ejemplo la tabla de factores según mes del año de acuerdo a los grupos obtenidos para la suma de todos los vehículos.

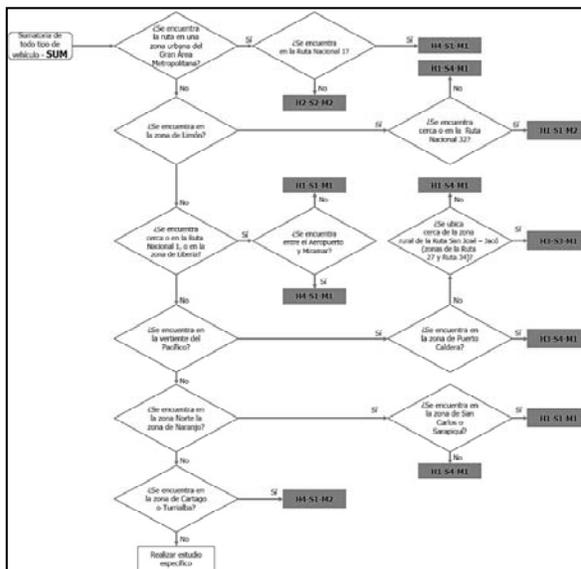


Figura 27. Ejemplo de cuadro de decisión. Fuente: Magaña, 2014

MES DEL AÑO	GRUPOS DE FACTORES	
	M1	M2
ENERO	1,122	0,990
FEBRERO	1,029	1,004
MARZO	1,008	1,029
ABRIL	1,063	0,952
MAYO	0,927	0,967
JUNIO	0,912	0,979
JULIO	1,063	1,003
AGOSTO	0,927	1,003
SEPTIEMBRE	0,907	0,994
OCTUBRE	0,929	0,999
NOVIEMBRE	0,974	0,988
DICIEMBRE	1,179	1,042

Figura 28. Ejemplo de tabla de factores según mes del año Fuente: Magaña, 2014



### Validación de factores de tránsito,

Finalmente para comprobar la exactitud de los factores de tránsito encontrados, y determinar la validez de estos, Magaña (2014) explica que para los factores horarios se realizaron comparaciones a partir de conteos de corta duración para zonas específicas, con el objetivo de comparar los patrones horarios reales del sitio con los encontrados para cada zona, por medio de los diagramas de decisión; mientras que para los factores semanales y mensuales, se realizó la comparación de los grupos encontrados por medio de un análisis híbrido (en donde se considera el análisis estadístico, el conocimiento obtenido mediante la recopilación bibliográfica de la red vial y de patrones de viaje, y el criterio ingenieril) con los factores promedio de los mismos grupos de estaciones de conteo encontrados a partir del TPD por día de la semana suministrados por la Dirección de Planificación Sectorial de MOPT para distintos meses.

### Conclusiones y recomendaciones

Luego del análisis de los resultados obtenidos en la investigación, Magaña (2014) llega a diversas conclusiones, entre las que se destacan las siguientes:

- A partir de un análisis combinado por medio de herramientas estadísticas y la caracterización de cada sitio de aforo, fue posible la determinación de los patrones típicos de variación temporal del tránsito en cinco clasificaciones, estos patrones aumentan la precisión de la estadística de tránsito, lo que podría reducir los gastos económicos e inducir a una mejora de los diseños de estructuras viales y pavimentos.
- El análisis de conglomerados probó ser una herramienta apta para clasificar los datos de tránsito en grupos con comportamientos vehiculares similares. Se puede expandir su aplicación al tránsito costarricense al combinar el análisis de conglomerados con el criterio ingenieril y el conocimiento de las redes viales del país.
- Los volúmenes de tránsito vehicular en las carreteras de Costa Rica presentan variaciones repetitivas para periodos determinados de tiempo, por lo que es posible establecer patrones de comportamiento vehicular típicos.
- Los días martes, miércoles y jueves suelen presentar variaciones típicas en su tránsito vehicular para un día normal entre semana, tanto en el volumen total de la vía como para el caso de los vehículos livianos, mientras que los autobuses y vehículos de carga muestran un comportamiento similar desde el día lunes hasta el viernes.



- Para el caso de los vehículos pesados se presenta una variación de tránsito por día de la semana distinta a la de los vehículos livianos, ya que los primeros suelen presentar volúmenes vehiculares menores los días sábados y domingos que entre semana.
- Hay existencia reducida de estaciones de conteo permanentes en el país, que además tienen una distribución geográfica limitada.
- Es necesario realizar una determinación de estadísticas de tránsito precisas para la toma de decisiones en cuanto a la planificación y gestión de la infraestructura vehicular.
- Es recomendable que la administración destine un mayor porcentaje de recursos al análisis de los datos de tránsito recopilados.

### Informe de Patrones de Velocidad

Actualmente el PITRA-LanammeUCR se encuentra realizando el informe llamado *Patrones de velocidad a partir de datos de estaciones permanentes de monitoreo del tránsito de Costa Rica* preparado por la Unidad de Seguridad Vial y Transporte, el cual tiene como objetivo el sintetizar el conocimiento existente sobre la velocidad y los factores que influyen en la velocidad o se ven influenciados por ella, por medio de patrones de velocidad, de manera que los datos puedan ser utilizados por la Administración para el diseño de pavimentos, mejorar la seguridad del vial y demás aplicaciones de la ingeniería de carretera (Morales & Hernandez, 2016).

Para esto se analizaron los datos de 13 estaciones permanentes de conteo vehicular en: Búfalo, Cambroner, Cañas, Desmonte, Guápil, Juan Viñas, Liberia, Matapalo, Muelle, Paso Canoas, Río Chiquito, San Juanillo y Tempisque. Para cada estación se obtuvo la distribución de velocidades para un período mayor a una semana (con excepción de la estación de Matapalo donde se trabajó con datos de seis días). Se obtuvo la distribución general de la estación y la distribución acumulada por medio de los valores de velocidades; estas distribuciones fueron comparadas con la velocidad provista por el MOPT según la sección de control que fue tomada como referencia (Morales & Hernandez, 2016).

Los datos de velocidad fueron clasificados de acuerdo a la cantidad de ejes de los vehículos (dos, tres, cuatro, cinco o más ejes), Morales & Hernandez (2016) indican que se analizó la distribución de cada tipo y las características específicas para cada estación. En todas las estaciones los vehículos de dos ejes corresponden al mayor porcentaje de vehículos, por lo tanto, se clasificaron según lo recomendado por AASHTO en cincocategorías (motocicleta, automóvil, pick up, camión de dos ejes y autobús). Para cada clasificación se obtuvo la distribución de velocidades y fueron comparados con la velocidad tomada como referencia.



Se separaron los datos de velocidad según día de la semana y hora del día para cada estación, con lo que se obtuvo tanto el día de mayor y menor velocidad, como la hora de mayor y menor velocidad. Se obtuvo la distribución de velocidades según la hora del día para todas las estaciones y por último se compararon los resultados de todas las estaciones y se establecieron comportamientos patrones (Morales & Hernandez, 2016).

Los datos del estudio fueron recopilados por medio de dispositivos neumáticos de conteo de mangueras por la Unidad de Gestión de Carreteras de la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT. Para facilitar el análisis se separaron los vehículos según la cantidad de ejes. Para los vehículos de dos ejes la clasificación se hizo siguiendo el esquema de la FHWA de los Estados Unidos como se muestra a continuación:

- Clase F1: Motocicletas.
- Clase F2: Automóviles o P Pick-up ligera.
- Clase F3: Pick-up.
- Clase F4: Buses.
- Clase F5: Camiones de dos ejes.

Es importante recalcar que el informe pretende realizar únicamente un análisis descriptivo de los datos, por lo que no realiza ninguna modelación o inferencia con los resultados obtenidos del estudio de velocidades máximas permitidas.

- Debido que no se realizó visita de campo a las estaciones, se tomó la velocidad indicada por la Dirección de Planificación Sectorial como referencia y no como límite de velocidad del sitio donde se ubica la estación permanente.
- Esta investigación no toma en cuenta el factor ambiental (como por ejemplo, lluvia) para el análisis de velocidades.

Por lo tanto, los resultados obtenidos por Morales & Hernández (2015) y que se resumen a continuación deben utilizarse únicamente para ilustrar el comportamiento que se da en las estaciones de conteo al no realizarse ninguna comprobación de campo para validarlos. Las distribuciones de velocidad fueron analizadas según los siguientes aspectos:

- Distribución de velocidad y porcentaje de vehículos para toda la estación y comparación con la velocidad de referencia.
- Factor de vehículo, clasificación por número de ejes y según la separación entre ejes para los vehículos de dos ejes.
- Factor temporal, clasificación según día de la semana y hora del día.



## Conclusiones

Del estudio Morales & Hernández (2016) obtuvieron las siguientes conclusiones:

### Vehículos con velocidad promedio mayor y menor según el número de ejes para cada estación analizada

- Según la clasificación por número de ejes, los vehículos de dos ejes poseen las mayores velocidades promedio para todas las estaciones con excepción de la estación de Cañas. Además la velocidad promedio mayor es para los vehículos de dos ejes en la estación de Guápil (85,4 km/h) y la velocidad promedio menor para los vehículos de cinco o más ejes en la estación de Paso Canoas (30,9 km/h).
- Según la clasificación por número de ejes, en la mayoría de las estaciones (seis estaciones) los vehículos de cinco o más ejes son quienes poseen las menores velocidades promedio, seguido por los de cuatro ejes (cinco estaciones) y por último los de tres ejes (dos estaciones).
- En términos generales, la disminución de la velocidad promedio de acuerdo a los números de ejes es clara para todas las estaciones. Es decir, es de esperar que a mayor número de ejes menor velocidad promedio.
- Las velocidades promedio mayores pertenecientes a los vehículos de dos de ejes superan la velocidad tomada como referencia en todas las estaciones con excepción de Búfalo, Liberia y Paso Canoas.

### Vehículos de dos ejes con velocidad promedio mayor y menor según el esquema F de clasificación de FHWA para cada estación analizada

- Para los vehículos de dos ejes, los vehículos *pick up* (F3) son quienes poseen las velocidades promedio mayores para la mayoría de las estaciones (seis estaciones), siguiéndoles las motocicletas (F1, cuatro estaciones), luego los autobuses (F4, dos estaciones) y únicamente para la estación de Muelle, los automóviles (F2) poseen las velocidades
- Las velocidades menores promedio varían entre las motocicletas y los camiones de dos ejes en todas las estaciones: de las 13 estaciones analizadas, seis poseen los camiones de dos ejes como vehículos con velocidades promedio menores (F5) y las restantes a las motocicletas (F1).
- Las velocidades promedio mayores de los vehículos de dos ejes son mayores a la velocidad de referencia para todas las estaciones con excepción de las estaciones de Búfalo, Liberia y Paso Canoas.



#### Día de mayor y menor velocidad promedio para cada estación en estudio.

- Generalmente, el día de mayor velocidad promedio en las estaciones estudiadas es el domingo (seis estaciones) seguido por el sábado (tres estaciones), luego viernes (dos estaciones) y lunes y jueves con una estación cada uno. Puede concluirse que los fines de semana se presentan velocidades promedio mayores que en el resto de la semana en las estaciones.
- No se presenta ningún patrón con respecto al día con menor velocidad promedio en las estaciones. El viernes es el día más repetitivo (cinco estaciones) y puede retribuirse al final de la semana y aumento en la disponibilidad para recreación de los usuarios, por lo tanto aumento de la congestión.
- La velocidad promedio para los días con velocidades promedio mayores y menores supera la velocidad tomada como referencia en todas las estaciones con excepción de Búfalo, Liberia y Paso Canoas.

#### Hora de mayor y menor velocidad promedio para cada estación en estudio

- Para la mayoría de las estaciones (nueve de trece estaciones) las horas de velocidad promedio mayor corresponden a la madrugada.
- Las estaciones de Guápil y Matapalo sin embargo tienen como horas de mayor velocidades las de la mañana (7:00 - 8:00 y 8:00 - 9:00 respectivamente).
- La estación Río Chiquito presenta un cambio en el comportamiento con respecto a las demás debido a que la hora de mayores velocidades se da entre las cinco a seis de la tarde.
- La mayoría de las estaciones tienen como hora de velocidad promedio menor la tarde, generalmente en el momento de finalización de la jornada laboral (entre cinco de la tarde y siete de la noche).
- Otras estaciones poseen como hora de menor velocidades horas de la madrugada o mañana (Desmonte, Río Chiquito, San Juanillo y Tempisque), sin embargo esto son casos aparte al comportamiento mayoritario de las estaciones analizadas.
- La velocidad promedio para la hora de mayor velocidad supera la velocidad tomada como referencia para todas las estaciones con excepción de las estaciones de Búfalo y Paso Canoas.

#### Distribución de velocidades promedio por día de la semana en las estaciones analizadas

- De acuerdo al día de la semana se ven diferentes comportamientos de acuerdo a la estación.
- Cinco estaciones presentan una distribución de velocidades promedio en la cual el día domingo tiene las mayores velocidades. En algunos casos, el sábado también presenta velocidades promedio mayores a los días entre semana (ver Figura 83).



- Las estaciones de Cambronero, Desmonte, Guápil, Río Chiquito, Juan Viñas y San Juanillo presentan patrones de velocidades que no presentan mayores velocidades promedio los días domingo (Figura 84).
- La estación de Canoas presenta grandes variaciones en sus velocidades promedio.
- La mayoría de las estaciones presentan una distribución de velocidades por hora del día similar (Figura 85).
- Las estaciones similares presentan altas velocidades en horas de la madrugada. En algunos casos presenta un pico de velocidad entre las seis y siete de la mañana, y a partir de esta hora comienza a disminuir la velocidad promedio hasta llegar a un punto de inflexión al medio día, posteriormente aumenta de nuevo hasta llegar a un nuevo punto de inflexión entre las cinco de la tarde y ocho de la noche para luego comenzar a aumentar nuevamente (Figura 86).
- Las estaciones de Canoas y Matapalo presentan patrones de velocidades por semana diferentes a las demás estaciones.

### Recomendaciones

- Verificar en campo la velocidad tomada como referencia en cada estación, para determinar el porcentaje de vehículos que superan la velocidad máxima permitida y la velocidad temeraria (20 km/h mayor que la máxima permitida).
- Realizar futuras investigaciones con el fin de evaluar la incidencia de factores ambientales en las estaciones durante los días de medición, para comparar el comportamiento de los usuarios en los diferentes escenarios posibles en Costa Rica (lluvia, neblina, sol, noche, día).
- Separar los datos por sentido para futuras investigaciones, con el fin de comparar el flujo de velocidades en cada sentido en dependencia de la hora del día.
- Continuar realizando mediciones en las estaciones para obtener la evolución del comportamiento de los usuarios a través del tiempo y determinar la causa de algún posible cambio en el mismo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, J. (2013). *Propuesta de línea de investigación: determinación de parámetros de carga para diseño estructural de pavimentos de Costa Rica*. Unidad de Materiales y Pavimentos. Programa de Infraestructura del Transporte Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

Allen, J. (2014). *Recomendaciones técnicas para el diseño estructural de pavimentos flexibles con la incorporación de criterios mecánico-empíricos*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

Allen, J., & Badilla, G. (2011). Determinación de la Carga de Diseño para Pavimentos Flexibles en Costa Rica. *XVI CILA Congreso Iberoamericano del Asfalto*. IBP2134\_11.

Allen, J., & Sibaja, L. (2014). *Presión de inflado de los neumáticos y la forma en que afecta la estructura del pavimento*. San José: LanammeUCR.

Allen, J., Vargas, C., & Sánchez, E. (2015). *Análisis exploratorio de la variación del factor camión mediante el control de sobrepeso en el transporte de carga para el diseño de pavimentos en Costa Rica*. San José: Unidad de Gestión Municipal. Programa de Infraestructura del Transporte Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.: AASHTO.

Espinoza González, J. C. (2013). *Trabajo Final de Graduación: Determinación de factores camión y espectros de carga representativos de autobuses urbanos e interurbanos para diseño de pavimentos flexibles en carreteras de Costa Rica (Tesis inédita de licenciatura)*. San Pedro, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Federal Highway Administration (FHWA). (2013). *Traffic monitoring guide (Updated 2013)*. Washington D.C.: U.S. Department of Transportation.

Fernando, E., Musani, D., Park, D., & Liu, W. (2006). *Evaluation of Effects of Tire Size and Inflation Pressure on Tire Contact Stresses and Pavement Response*. Texas, Estados Unidos: Texas Transportation Institute.



Gillespe, T., Karamihas, S., Cebon, D., Sayers, M., Nasim, M., Hansen, W., y otros. (1993). *Effects of Heavy Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance*. Michigan, Estados Unidos:: Transportation Research Council.

Huang, Y. (2003). *Pavement Analysis and Design: Second Edition*. Estados Unidos: Pearson Prentice Hall.

Kim, D., Salgado, R., & Altschaeffl, A. (2005). *Effects of Supersingle Tire Loadings on Pavements*. Journal of Transportation Engineering, 115(4), 329-350.

Kim, O. K., Bell, C. A., & Wilson, J. E. (1989). *Effect of Increased Truck Tire Pressure on Asphalt Concrete Pavement*. Journal of Transportation Engineering, 115(4), 329-350.

Magaña, J. (2014). *Determinación de patrones típicos de distribución temporal de tránsito en Costa Rica*. San Jose, Costa Rica: Tesis para proporcionar el grado de licenciatura, Universidad de Costa Rica.

Morales, M., & Hernandez, H. (2016). *Patrones de velocidad a partir de datos de estaciones permanentes de monitoreo del tránsito de Costa Rica*. San Jose: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

Morris, V. (2016). *Medición del desplazamiento lateral de vehículos en estaciones de conteo de Costa Rica (Trabajo Final de Graduación)*. San Pedro, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Owende, P., Hartman, A., Ward, S., Gilchrist, M., & O'Mahony, M. (2001). *Minimizing Distress on Flexible Pavements Using Variable Tire Pressure*. Journal of Transportation Engineering, 254-262.

Regehr, J. (2011). *Understanding and anticipating truck fleet mix characteristics for mechanical-empirical pavement design*. Washington D.C.: Transportation Research Board 2011 Annual Meeting.

Said, S., & Hakim, H. (2012). *Influence of Traffic Variables on Rut Formation In Asphalt Concrete Layers*. Stockholm, Suecia: International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology - HVTT12.

Sibaja, L. M. (2014). *Trabajo Final de Graduación: Determinación de presión de neumáticos de vehículos de carga típicos de Costa Rica. (Tesis inédita de licenciatura)*. Universidad de Costa Rica. San Pedro.



Stempihar, J., Williams, R. C., & Drummer, T. (2005). *Quantifying the lateral displacement of trucks for use in pavement design*. Michigan : Michigan Technological University.

Ulloa, A., Allen, J., Badilla, G., & Sibaja, D. (2008). *Determinación de factores camión en pavimentos en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Infraestructura Vial, 10 (19), 28-37.

Wang, F. (2005). *Mechanistic-Empirical Study of Effects of Truck Tire Pressure on Asphalt Pavement Performance*. Texas, Estados Unidos: University of Texas at Austin.

Wang, F., & Machemehl, R. (2003). *The Current Status and Variability of In-Service Truck Tire Pressures in Texas*. Washington D.C, Estados Unidos: 82nd Transportation Research Board Meeting.

Ward, J. H. (1963). *Hierarchical grouping to optimize an objective function*. Journal of the American Statistical Association, 58(301), 236-244.

Weijermars, W. (2007). *Analysis of urban traffic patterns using clustering*. Enschede, Holanda: Tesis para proporcionar el grado de doctorado, Universidad de Twente.



ANEXOS:

PARÁMETROS DE CARGA

Ejemplificación de los aforos utilizados para la recopilación de datos para elaborar los parámetros de carga.

Número de aforo	Ubicación	Ruta Nacional
USVT - 009	Río Rosales	1
USVT - 010	Río Colorado	1
USVT - 011	Río Grande	1
USVT - 012	Tramo Aguas Zarcas-Los Chiles Aguas Zarcas 100 metros Norte de la Escuela Frente Cabinas Terrabella	250
USVT - 013	100m Norte Cementerio El Ángel Carretera Pital	250
USVT - 014	Muelle Vuelta Kooper Súper Alvarado 14 km al este de Muelle	4
USVT - 015	Tramo Venecia-Río Cuarto frente Tapicería Warren González	140
USVT - 017	Tramo Chilamate-Bajos Chilamate 200m inicio proyecto	4
USVT - 018	Tramo Muelle Cooper 1 KM este intersección Ruta 35	4
USVT - 019	Tramo Muelle Los Chiles 4 Km Norte Intersección Ruta 4	35
USVT - 020	Tramo Muelle Upala 6KM Oeste Intersección Ruta 35	4
USVT - 021	Tramo Muelle Platanares 1 Km Norte Cámara de Ganadería	35
USVT - 022	Puente Río Chirripó Frente Puesto MSP Chirripó	4
USVT - 023	100m Norte Intersección Ruta 4	32
USVT - 024	Guacimal 100m Este Intersección Ruta 605	606
USVT - 025	Monteverde 100m Oeste Intersección Ruta 620	606
USVT - 026	Casa Mata 500m Sureste Escuela Casamata Antigua Soda El Boyero	2
USVT - 027	200m Este del puente sobre Río Peje o 100m Oeste del Súper Weber	2
USVT - 028	Km159	34
USVT - 029	Costado Oeste Bomba El Ceibo tramo Quepos-Dominical	34
USVT - 030	11Km al Sureste de Parrita tramo Damas-Parrita (2km sureste Finca Pocares Río Damas)	34
USVT - 031	6Km al Noroeste de Bejuco 200m este entrada Templo de La 45 tramo Jacó-Parrita	34
USVT - 032	3Km al Este Intersección Ruta 27 entre restaurante El Jardín-Gasolinera Puesta del Sol	34
USVT - 034	1Km Oeste RECOPE tramo Miramar Barranca	1
USVT - 035	La Angostura	17
USVT - 036	El Cairo Siquirres	32
USVT - 037	Cervantes a 2km de la Iglesia Tramo Cervantes Paraíso Cartago	10
USVT - 038	Turrialba Frente a segundo acceso CATIE	10
USVT - 039	Guayacán Siquirres	10
USVT - 041	Tramo Limón-Puerto Viejo frente Hotel Colón Caribe	36
USVT - 042	Tramo Paso Canoas-Ciudad Neilly a 13 km del Hospital Ciudad Neilly frente a Cabinas Villa Aguirre	2
USVT - 043	Tramo Río Claro-Ciudad Neilly a 8 km al Oeste del Hospital Ciudad Neilly frente a Restaurante La Corronga	2
USVT - 044	Tramo Río Claro-Golfito 3Km Sur del Cruce Río Claro Sector Bambel 2	14
USVT - 045	Tramo Río Claro-Palmar a 33 km al Oeste del cruce Río Claro 300m antes Río Salama Nuevo	2
USVT - 046	Tramo Paso Real-Palmar a 3 km al Norte del cruce Palmar Norte	2

Figura 29. Aforos efectuados por la USVT hasta el 30 de octubre de 2013. Fuente: Magaña, 2014

GRUPOS DE PATRONES PARA:

Total de Vehículos

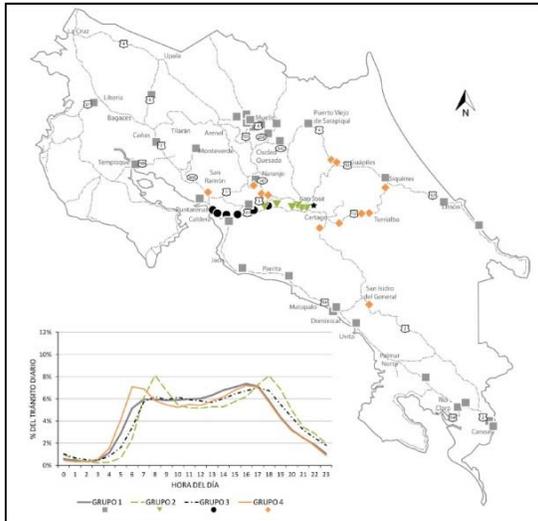


Figura 30. Grupos de patrones de factores por día de la semana. Fuente: Magaña, 2014

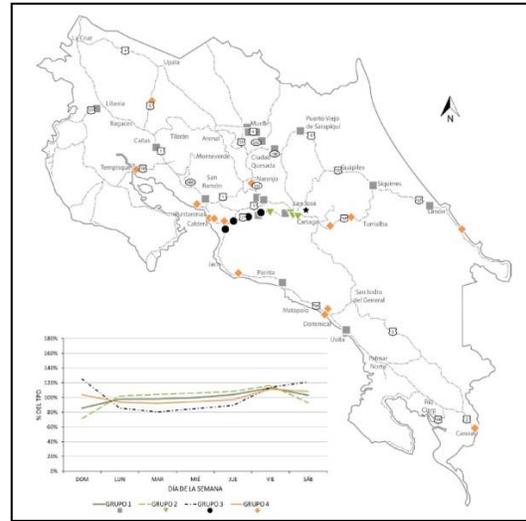


Figura 31. Grupos de patrones de factores por día de la semana. Fuente: Magaña, 2014

Tipo 1: Vehículos livianos y de carga liviana

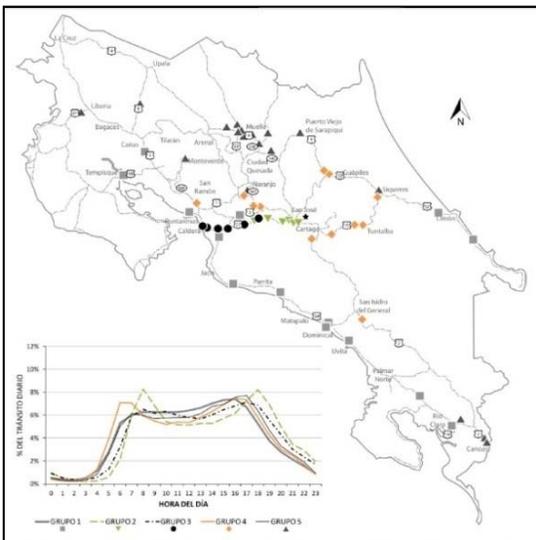


Figura 32. Grupos de patrones de factores por hora del día. Fuente: Magaña, 2014

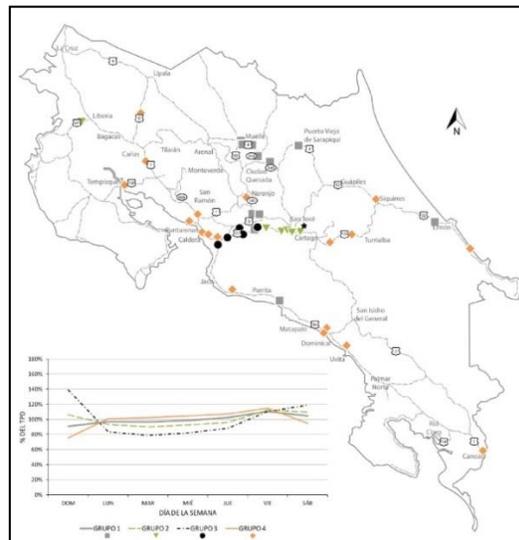


Figura 33. Grupos de patrones de factores por día de la semana. Fuente: Magaña, 2014

### Tipo 2. Autobuses

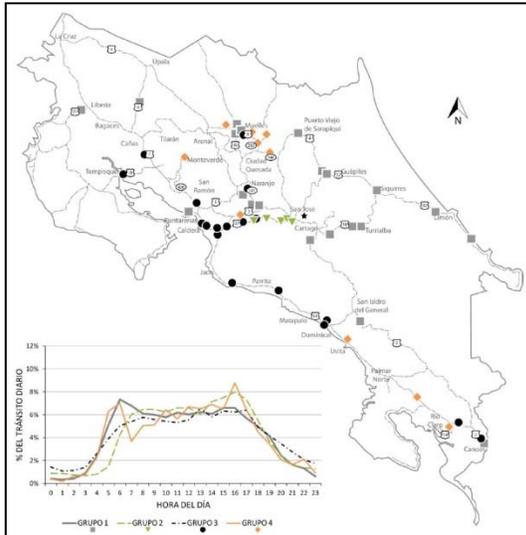


Figura 34. Grupos de patrones de factores por hora del día. Fuente: Magaña, 2014

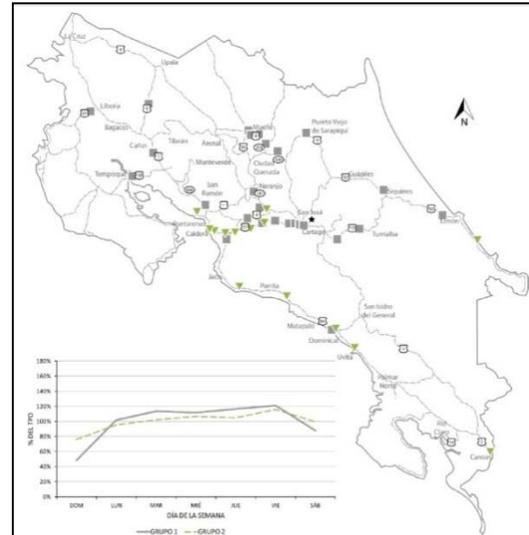


Figura 35. Grupos de patrones de factores por día de la semana. Fuente: Magaña, 2014

### Tipo 3: Camiones Unitarios

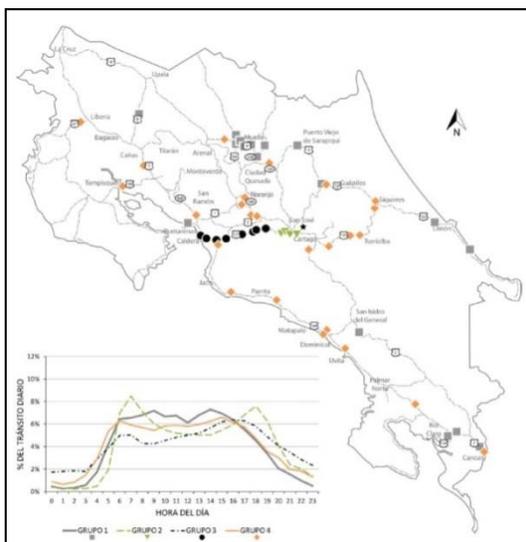


Figura 36. Grupos de patrones de factores por hora del día. Fuente: Magaña, 2014

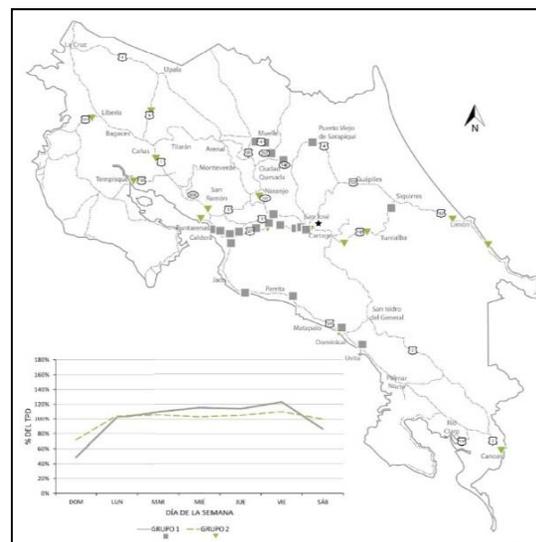
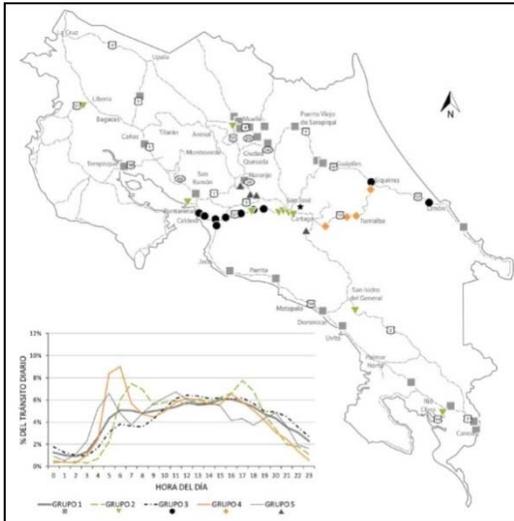
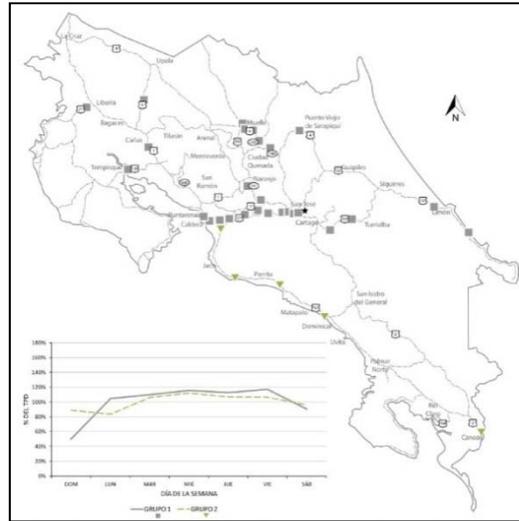


Figura 37. Grupos de patrones de factores por día de la semana. Fuente: Magaña, 2014

**Tipo 4: Camiones con Remolque**

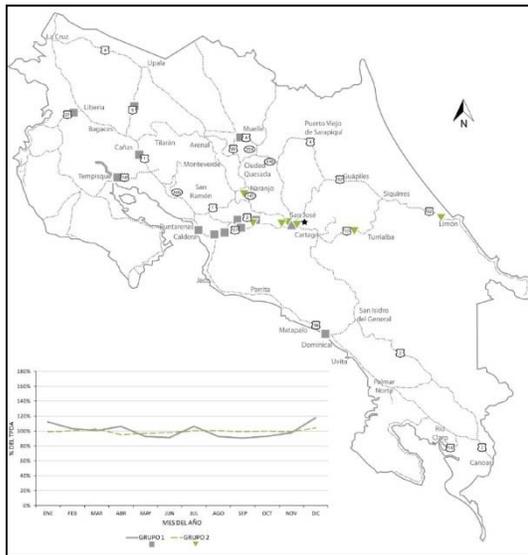


**Figura 38. Grupos de patrones de factores por hora del día. Fuente: Magaña, 2014**

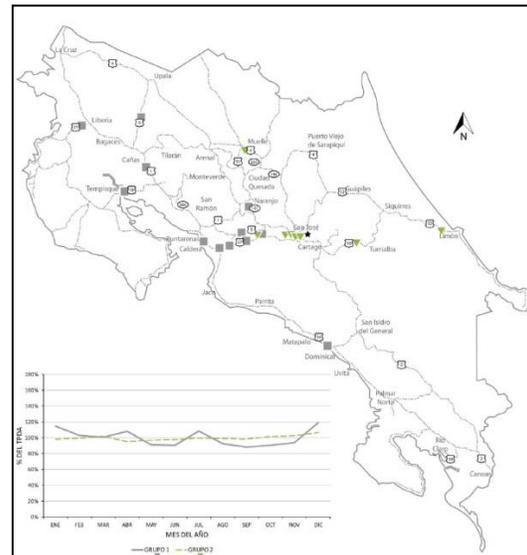


**Figura 39. Grupos de patrones de factores por día de la semana. Fuente: Magaña, 2014**

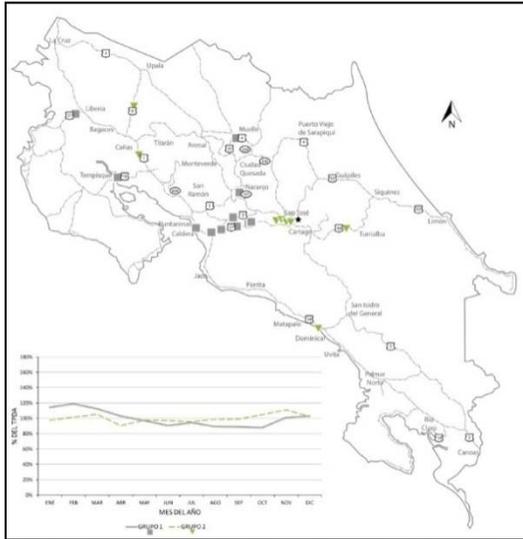
**A. GRUPOS DE PATRONES POR MES DEL AÑO PARA CADA CATEGORIA:**



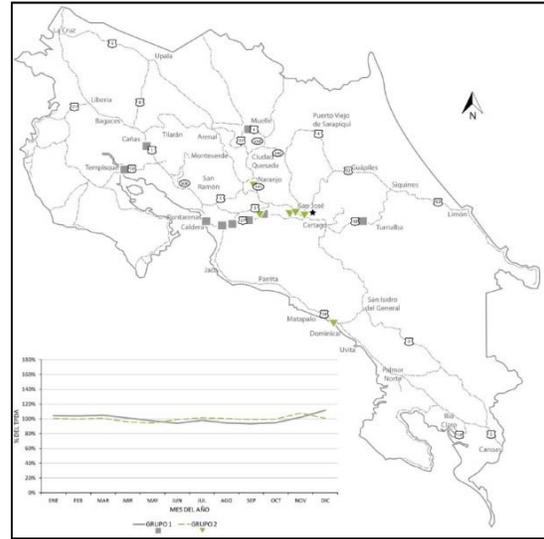
**Figura 40. Grupos de patrones para el total de vehículos. Fuente: Magaña, 2014**



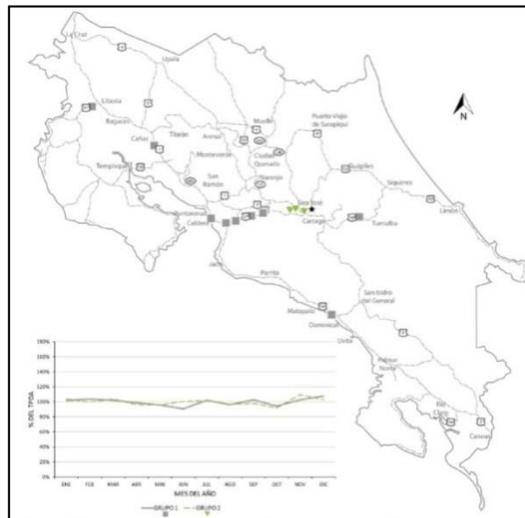
**Figura 41. Grupos de patrones para los vehículos Tipo 1. Fuente: Magaña, 2014**



**Figura 42. Grupos de patrones para los vehículos Tipo 2. Fuente: Magaña, 2014**



**Figura 43. Grupos de patrones para los vehículos Tipo 3. Fuente: Magaña, 2014**



**Figura 44. Grupos de patrones para los vehículos Tipo 3. Fuente: Magaña, 2014**



## GRUPOS DE PATRONES PARA:

### Factor camión

El factor camión se determina según lo establecido en la Guía de diseño de estructuras de pavimento AASHTO 1993, la cual se basa en los factores de equivalencia de carga (LEF por sus siglas en inglés)

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

Para determinar el factor camión se utiliza la ecuación \_ el cual es la suma de los factores de equivalencia de carga de cada vehículo, y equivale al daño aproximado que produce cada vehículo en términos de deterioro

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

El factor camión se utiliza para calcular los ejes equivalentes de cargas simples (ESALs), estos permiten determinar el daño relativo de un tipo de eje y de cualquier carga en relación al daño producido por un eje simple estándar (Badilla& Molina, 2009). El eje estándar usado en Costa Rica es de 80 KN y equivale a 1 ESAL, para calcular el daño estructural en función de la cantidad de veces que los ejes estándar atraviesan una sección de la carretera se utiliza la siguiente ecuación:

$$ESALS_{por\ vehículo} = \sum TPDA * \%Distribución\ por\ vehículo * FC_{pot\ vehículo} \quad 4)$$

### Determinación y uso de factores de tránsito

El recuento de unas horas se convierte en una estimación del TPDA estimado por la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{temporal}}{TPDA_{temporal}} = \frac{V_{permanente}}{TPDA_{permanente}} \quad 5)$$

Donde:

- $V_{temporal}$  = Volumen registrado en la estación de recuento temporal
- $V_{permanente}$  = Volumen registrado en el mismo período de tiempo que la estación de conteo permanente
- $TPDA_{temporal}$  = TPDA estimado en la estación temporal donde se hizo el recuento
- $TPDA_{permanente}$  = TPDA calculado en la estación permanente de conteo continuo o permanente



### Determinación de factores por hora del día

Los factores de volúmenes por hora del día se pueden expresar como una proporción de los volúmenes diarios, de la siguiente manera:

$$FH_i = \frac{(VH_i)_P}{(VD)_P} \quad 6)$$

Donde:

- $FH_i$  = Factor horario, representado por la proporción entre el volumen de tránsito de la hora “i” con respecto al volumen de tránsito diario en la estación permanente “P”
- $(VH_i)_{CD}$  = Volumen Horario de tránsito de la hora “i” en la estación permanente “P”
- $(VD)_p$  = Volumen de Tránsito Diario en la estación permanente “P”

Para calcular el volumen de tráfico diario de un conteo de corta duración, en el caso de poseer únicamente un conteo de una hora de duración, se utiliza la siguiente fórmula:

$$(VD)_{CD} = (VH_i)_{CD} \times FH_i \quad 7)$$

Donde:

- $(VD)_{CD}$  = Volumen de tránsito diario para el conteo de corta duración
- $(VH_i)_{CD}$  = Volumen horario de tránsito de la hora “i” para el conteo de corta duración
- $FH_i$  = Factor horario, representado por la proporción entre el volumen de tránsito diario en la estación permanente con respecto al volumen de tránsito de la hora “i”

En el caso de poseer un aforo de más de una hora de duración, la ecuación 2.3 se puede expresar de la siguiente forma para determinar el volumen diario:

$$(VD)_{CD} = \sum_{n=i}^j (VH_i)_{CD} \times \quad 8)$$

Donde:

- $(VH_i)_{CD}$  = Volumen de tránsito diario para el conteo de corta duración
- $\sum_{n=i}^j (VH_i)_{CD}$  = Sumatoria de volumen horario de tránsito desde la hora “i” hasta la hora “j” para el conteo de corta duración
- $\sum_{n=i}^j FH_i$  = Sumatoria de los factores horarios de tránsito, desde la hora “i” hasta la hora “j”

### Determinación de factores por día de la semana

Para obtener el factor por día de la semana, primeramente se deben calcular el valor del tránsito promedio diario para cada día de la semana (TPDS) en la estación de conteo permanente. El factor diario para cada día de la semana sería determinado por la división del TPDA entre el TPDS de cada día, como se resume en la Ecuación 2.5:

Informe LM-PI-USVT-003-16	Fecha de emisión: Febrero 2016	Página 74 de 75
---------------------------	--------------------------------	-----------------



$$FD_{n,m} = \frac{(TPDS_n)_{m,P}}{TPDM_{m,P}} \quad 9)$$

Donde:

- $FD_{n,m}$  = Factor diario de tránsito para el día “n” de la semana, en el mes “m”
- $(TPDS_n)_{m,P}$  = Volumen de tránsito promedio diario para el día “n” de la semana, en el mes “m” en la estación permanente “P”
- $TPDM_{m,P}$  = Volumen de tránsito promedio diario semanal para el mes “m” en la estación permanente “P”

De esta forma, de manera similar al cálculo de volúmenes horarios, se utilizará la siguiente fórmula:

$$TPDS_{CD} = (TPDS_n)_{CD} \times FD_n \quad 10)$$

Donde:

- $TPDS_{CD}$  = Tránsito promedio diario mensual en el sitio de conteo de corta duración.
- $(TPDS_n)_{CD}$  = Tránsito promedio diario del día “i” para el conteo de corta duración.
- $FD_n$  = Factor diario de tránsito para el día “i” de la semana