



# **DESAFÍOS EN INGENIERÍA: INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y DESARROLLO**

2018 - Cartagena, Colombia - ISBN: 978-958-59242-7-7

Luis Alejandro Rojas Martínez  
Yesid Tarriba Lezama



**EXPOTECHNOLOGÍA 2018**

**EXPOTECNOLOGIA 2018**

**Cartagena - Colombia**

**DESAFIOS EN INGENIERÍA: INVESTIGACIÓN,  
INNOVACIÓN Y DESARROLLO**



**ISBN: 978-958-59242-7-7**





Con el lema “DESAFIOS EN INGENIERÍA: INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y DESARROLLO”, Expotecnología 2018 tuvo como finalidad, fomentar espacios para la integración, y actualización de los comunidad educativa y profesionales de todas las áreas de la ingeniería en Colombia.

Expotecnología es un evento académico con dieciséis años de trayectoria, que surgió desde la Facultad de Diseño e Ingeniería de Fundación Tecnológica Antonio de Arévalo, con la idea de brindar un espacio diferente, donde los estudiantes de la facultad pudieran interactuar con la comunidad académica afín.



### Patrocinan:



## Comité Editorial

*Rojas Martinez Luis Alejandro*

*Tarriba Lezama Yesid*

*Castro Suarez John Ricardo*

*Vásquez Osorio Mayerlis*

*Ahumada Torres Luz Karime*

*Valdez Cervantes Libis*

*Castellón Arenas Alex*

***Facultad de Diseño e Ingeniería***

***Fundación Tecnológica Antonio de Arévalo – Tecnar, Colombia***



**Rector**

*Dionisio Vélez White*

**Vicerrector General**

*Dionisio Vélez Trujillo*

**Vicerrectoría Académica**

*Clara Sagre Hernández*

**Vicerrectoría Administrativa y  
Financiera**

*Libia Martínez Severiche*

**Vicerrectoría de Calidad**

*Carlos Granadillo Vásquez*

**Vicerrectoría de Desarrollo  
Institucional**

*Alejandro Jaramillo Vélez*

**Dirección de Planeación**

*Olga Guerra Medina*

**Secretaría general y Jurídica**

*María Villalba Porto*

**Decanaturas****Facultad de Ingeniería**

*Libis Valdez Cervantes*

**Facultad de Ciencias Económicas**

*Amaury Muñoz Vergara*

**Facultad de Ciencias Sociales**

*José Osorio Galvis*

**Centros****Centro de Investigaciones  
Científicas y Tecnológicas**

*Johon Gutiérrez Jaraba*

**Centro de Proyección Social**

*Mari Calderón Niño*





# DESAFIOS EN INGENIERÍA: INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y DESARROLLO



ISBN 978-958-59242-7-7

Desafíos en Ingeniería: Investigación, Innovación y Desarrollo

Autor: Tarriba, Yesid

Editorial: Fundación Tecnológica Antonio Arévalo

Materia: Educación superior

Público objetivo: General

Publicado: 2018-12-18

Número de edición: 1

Número de páginas: 120

Tamaño: 18x23cm.

Encuadernación: Tapa blanda o bolsillo

Soporte: Impreso

Idioma: Español

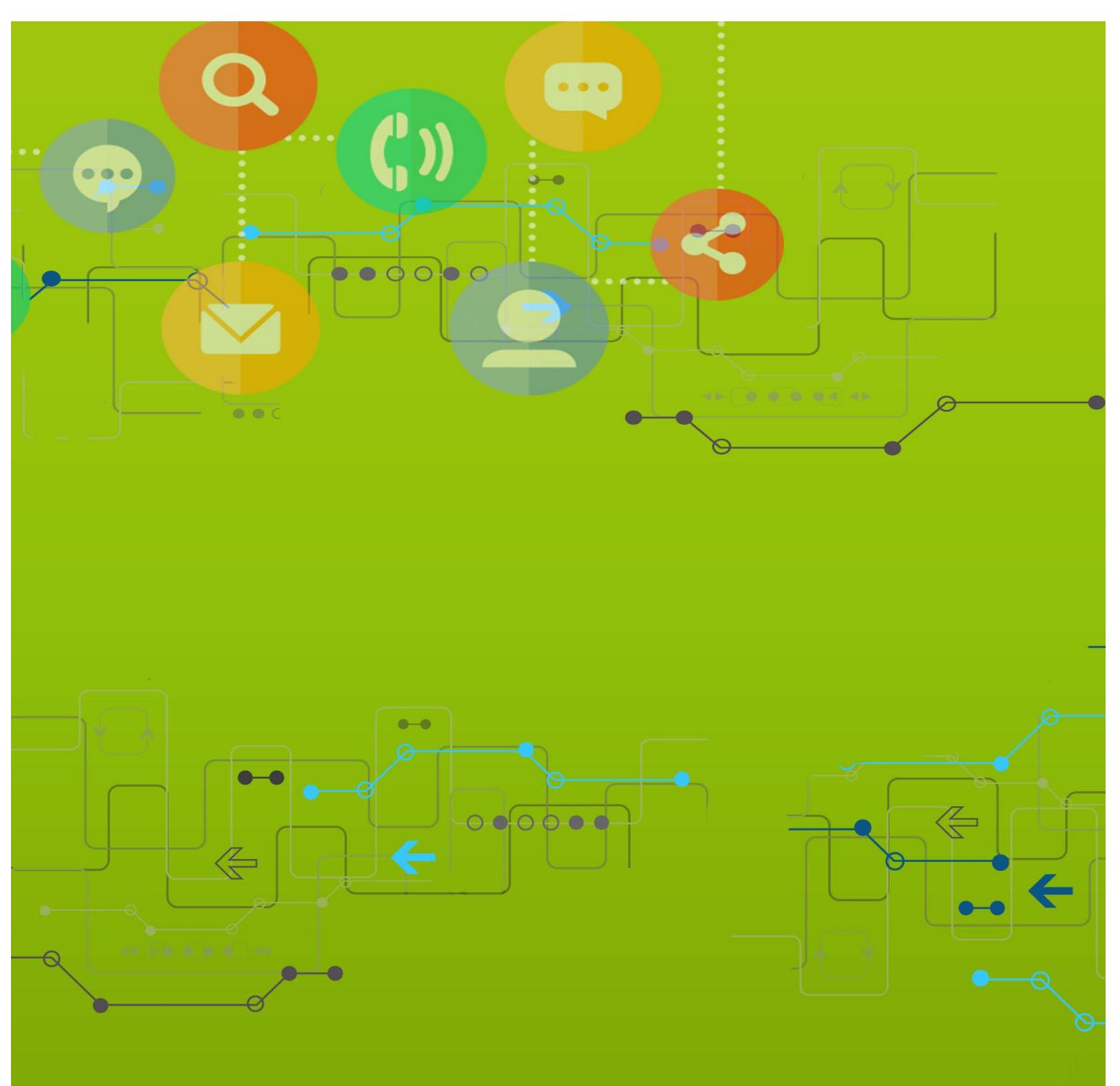


## Tabla de contenido

Capítulo 1	Diseño de la red de comunicaciones de la E.S.E. Hospital la Divina Misericordia de Magangue (Bolívar).	Página	1-20
Capítulo 2	Automatización de prototipo de secador por microondas y lecho fluidizado del centro de investigación para el desarrollo del centro de investigación para el desarrollo de la ingeniería de la Universidad Popular del Cesar.	Página	21-38
Capítulo 3	Análisis del entorno para la creación de una empresa de asesoría en el sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo.	Página	39-53
Capítulo 4	Estandarización del proceso de Rotomoldeo en la producción de tanques plásticos en Eternit Colombiana S.A. Planta la Muña.	Página	54-67
Capítulo 5	Modelo de gestión inteligente del agua para la revolución de la industria agrícola en Colombia basado en Internet de las Cosas.	Página	68-87
Capítulo 6	Controlador clásico multivariable para la planta CE105MV de la universidad Surcolombiana.	Página	88-107
Capítulo 7	Nueva Biotecnología para el tratamiento de residuos líquidos orgánicos mediante filtros anaerobios de flujo ascendente separados en tres fases (TRI-FAFS).	Página	108-140
Capítulo 8	Externalidades ambientales, en seguridad vial y en infraestructura del transporte de carga ferroviaria en la zona atlántica costarricense.	Página	141-164
Capítulo 9	Estimación del factor de impacto ambiental de humedales en zonas de montaña: Caso de estudio humedal Córdoba, Colombia.	Página	165-186
Capítulo 10	Integración de herramientas de la metodología Lean Six Sigma y sistemas de gestión normalizados para la eficiencia energética	Página	187-205
Capítulo 11	Captura de movimiento de miembro superior en sistemas de seguridad para robótica colaborativa basado en ISO/TS 15066:2016.	Página	206-219

Capítulo 12	Implementación de un controlador difuso inverso interpretable en un microcontrolador.	Página	220-229
Capítulo 13	Estudio biomecánico de los movimientos falángicos para diseño de una prótesis de mano.	Página	230-244
Capítulo 14	Diseño e implementación de un robot antropomórfico de bajo costo para el análisis cinemático con propósitos educativos.	Página	245-262
Capítulo 15	Desarrollo de un sistema de control digital de bajo costo para el accionamiento de motores de corriente alterna monofásica implementados en camas eléctricas hospitalarias.	Página	263-280
Capítulo 16	Diseño de una instalación solar fotovoltaica autónoma para unidades móviles de salud especializadas en ginecología para la región de los llanos orientales de Colombia.	Página	281-300
Capítulo 17	Simulación de desempeño LTE y WRAN para uso en zonas rurales del departamento del Choco y su posible aplicación a territorios inteligentes.	Página	301-317
Capítulo 18	Simulador de perfiles fotovoltaicos utilizando el modelo de Mainel Meinel.	Página	318-338
Capítulo 19	Diseño de un módulo didáctico para sistemas embebidos.	Página	339-349
Capítulo 20	Diseño de una aplicación para la descarga de contenidos embebidos en la señal de televisión digital terrestre.	Página	350-387
Capítulo 21	Avance en la caracterización de una picocentral hidroeléctrica con fines de abastecimiento energético regulado.	Página	388-406
Capítulo 22	Aproximación a la correlación empírica entre peso y resistencia a la compresión de cilindros de concreto obtenidos de obras viales de Cartagena	Página	407-424
Capítulo 23	Aplicativo web que gestiona el proceso que se lleva a cabo en los proyectos de aula en TECNAR.	Página	425-438

Capítulo 24	Proceso De modernización de las protecciones mecánicas de las turbinas de las unidades de generación 1 y 2 de la central térmica EMGESA - Cartagena.	Página 439-457
Capítulo 25	Bastón Inteligente para persona invidente.	Página 458-488
Capítulo 26	Ova con tecnología de realidad aumentada para facilitar los conceptos de mantenimiento de computadores y periféricos.	Página 489-513



**Cartagena:** Av. Pedro de Heredia,  
Calle 49A #31-45 Sector - Tesca  
Cel: 313 540 5791 e-mail: [admisiones@tecnar.edu.co](mailto:admisiones@tecnar.edu.co)

**Barranquilla:** Cra. 54 #64-73  
Tels: (5) 369 4469 - 311 2853  
e-mail: [admisionesbarranquilla@tecnar.edu.co](mailto:admisionesbarranquilla@tecnar.edu.co)

**Montería:** Calle 29 #3-55 Edificio Imperial,  
Local 02 Admisiones Tels: 782 4353  
e-mail: [admisionesmonteria@tecnar.edu.co](mailto:admisionesmonteria@tecnar.edu.co)

**Sincelejo:** Cra 21 No. 25-59 Barrio La María  
Teléfonos: 281 0315 - 281 2282  
e-mail: [admisiones@corposucre.edu.co](mailto:admisiones@corposucre.edu.co)

[www.tecnar.edu.co](http://www.tecnar.edu.co)

 /tecnar.edu.co  @tecnareduco  tecnar

# **Externalidades ambientales, en seguridad vial y en infraestructura del transporte de carga ferroviaria en la zona atlántica costarricense**

Nicolás Mata Díaz, Henry Hernández Vega

## **1. Resumen**

El objetivo general del proyecto fue analizar el impacto en emisiones de CO<sub>2</sub>, cantidad de choques esperados y deterioro del pavimento en la Ruta Nacional 32 (RN32) generado por el cambio de modo de transporte de carga.

Para el cálculo del deterioro se utilizó las ecuaciones recomendadas por la guía mecánica empírica de pavimentos con relación al agrietamiento de pavimentos con bases estabilizadas con cemento. En el caso de los choques esperados en la ruta se utilizó la función de desempeño en seguridad vial específica para la RN32 en conjunto con otra función desarrollada en España que considera el cambio en vehículos pesados. Por último, para calcular la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido se utilizó factores de emisión recomendados por diferentes autores. Los casos de estudio se basaron en estudios de potencial de mercado.

A partir de la conclusión se concluyó que el transporte de carga por carretera emite 1.3 veces más CO<sub>2</sub> que hacerlo por tren y se puede reducir el CO<sub>2</sub> emitido por transporte de carga en la RN32 en más de 4 mil toneladas anuales. Se puede disminuir hasta en 10 % la cantidad de choques en la RN32 al cambiar de modo la carga transportada. Se puede reducir el agrietamiento en el pavimento en más de 20 %. N.M.D.

### **Palabras Clave**

Transporte ferroviario; emisiones vehiculares; choques viales; deterioro de pavimento.

## **Introducción**

En la segunda mitad del siglo XIX, después de la consolidación de la República de Costa Rica, se inicia el proceso de desarrollo agrario en el país de la mano de la exportación de tabaco y café.

Ante la necesidad de medios de comunicación del valle central del país, donde se históricamente se ha concentrado el desarrollo económico, político y social, con los puertos del Caribe y del Pacífico se inicia el planteamiento rutas de comunicación hacia ambos puertos.

En el año 1879 se firma el acuerdo definitivo entre el gobierno de Costa Rica y Minor Cooper Keith para la construcción del sistema ferroviario que conecta el valle central del país con el puerto de Limón, ubicado en la costa caribeña costarricense, el cual se convertiría en el principal puerto de exportación e importación nacional.

Al habilitarse el acceso a las zonas bajas del atlántico costarricense, se inició el cultivo de banano en esa zona, el cual a su vez se convirtió en el principal producto transportado por el ferrocarril hasta el día de hoy en esa zona.

Al inicio de la década de 1980 el sistema ferroviario nacional recibió su última gran inversión. Se reconstruyó toda la línea entre el puerto de Limón y Guápiles, se electrificó la línea y se compraron locomotoras diésel eléctricas con capacidades de 700 y 1100 HP. A partir de este momento el sistema inició un proceso de decaída que terminó en un cierre técnico en 1995, con infraestructura muy deteriorada por el terremoto de 1991 y un gran impacto en la demanda producto de la apertura de la ruta nacional 32 que conecta el centro del país con el puerto de Limón, que ofrecía una confiabilidad mucho mayor y tiempos de viaje menores. El servicio de carga ferroviaria se reanudó en el año 1998 transportando banano y acero.

En la actualidad el complejo de puertos Limón-Moín se ubica en el puesto 12 del ranking de movimiento portuario de contenedores de CEPAL (CEPAL,2018). Este complejo de puertos es alimentado principalmente mediante transporte terrestre siguiendo la ruta nacional 32 (RN32), que conecta la capital San José con la ciudad de Limón, pasando por el poblado de Río Frió, considerado estratégico por ser un punto de conexión entre varias regiones del país.

Incofer, institución costarricense encargada del servicio ferroviario, reporta que durante el año 2015 se transportó 3.9 millones de cajas de banano, equivalentes a 70.8 mil toneladas entre los centros de producción en el Atlántico y los puertos de Limón. Durante ese mismo el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) reportó que se habían exportado por los puertos de Limón un total de 2.2 millones de toneladas de banano, esto implica que únicamente el 3% del banano que se produce en la zona atlántica del país se transporta utilizando el tren.

En cuanto al acero, durante el año 2015 la Junta de Administración Portuaria y de Desarrollo Económico de la Vertiente Atlántica (JAPDEVA) reportó que se descargó un total de 144 mil toneladas de acero en sus puertos. De esa cantidad 66 mil toneladas fueron transportadas por el ferrocarril, equivalente al 46% del total importado.

Según los datos de Incofer (2017a) la cantidad de carga se mantiene estable durante el tiempo, esto debido a la incapacidad que tiene Incofer de crecer y aumentar sus servicios por falta de equipo rodante y espacio físico para maniobras y almacenamiento.

### **Descripción metodológica**

La metodología seguida para alcanzar los resultados que se presentan se basó en investigaciones previas en materia de seguridad vial, emisiones de gases de efecto invernadero y la teoría elástica de materiales aplicada la guía mecanística empírica de diseño de pavimentos (MEPDG).

Para estimar la cantidad de choques esperada se utilizó la función de desempeño en seguridad vial desarrollada por Mata (2018), la cual se basa en una función ya existente para la ruta nacional 32, principal vía de acceso al complejo de puertos de Moín-Limón desarrollada por Castro (2013), con el inconveniente de que no considera la proporción de vehículos pesados, por lo que fue necesario modificarla utilizando la función desarrollada por Arenas (2008) para carreteras españolas que sí considera la proporción de vehículos pesados, la cuál es la variable crítica en este estudio.

La función modificada por Mata (2018) se muestra en ecuación (1).

$$\widehat{\lambda}_{AV_j} = k_1 k_2 0.4368 (TPDA_i)^{-0.1111} (\%pesados)^{0.0103} \quad (3)$$

Donde:

$\widehat{\lambda}_{AV_j}$  es la tasa de choques con heridos esperada por cada  $10^6$  kilómetros para la sección j

$$k_1 = 3.727$$

$$k_2 = 0.401$$

La cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se hizo basada en factores de emisiones vehiculares (FEV) nacionales e internacionales para transporte terrestre y ferroviario.

El transporte terrestre se calculó utilizando los factores desarrollados por Vega (2013), los cuales dependen de la velocidad a la que opera el vehículo y la distancia recorrida. Este factor tiene una precisión mucho mayor debido a que se calibró específicamente para las condiciones del país.

Para el transporte ferroviario fue necesario recurrir a dos tipos de FEV diferentes para poder comparar los resultados obtenidos y decidir cuál se ajusta de mejor manera a las condiciones de operación. Se utilizó FEV que dependen de la cantidad de combustible que se consume y se relacionan directamente con la cantidad de carbono en el combustible y se utilizó FEV que dependen de la cantidad de carga transportada, por lo que permiten un ajuste considerando eficiencia. Se proponen tres fuentes diferentes de FEV, con diferentes contextos de operación y eficiencia. Por último, para estimar el deterioro en la estructura de pavimento, se plantea revisar el impacto en tres secciones representativas de la RN32, las cuales tienen un diseño de pavimento nuevo próximo a construirse. Esta consideración se hace para poder contar con escenarios donde toda la estructura sea uniforme y verificar el deterioro calculado contra la vida de diseño.

El gobierno de Costa Rica solicitó al diseñador que las estructuras fueran diseñadas con una vida de diseño de 10 años, por lo que los deterioros se compararán contra esta condición de diseño.

El cálculo del deterioro se hace utilizando las ecuaciones de la MEPDG, las cuales dependen de las deformaciones elásticas a las que se ve sometido el pavimento producto del paso de un eje de un camión estándar, definido en 80 kN.

Conociendo estas deformaciones, en conjunto con otras características mecánicas de los materiales con los que está construido el pavimento, se puede predecir cuál será el nivel de agrietamiento y deformación de este. Al compararse las deformaciones en la condición base contra los escenarios de incremento o disminución de carga se puede entonces calcular el cambio en la vida útil.

## **Cuantificación de externalidades**

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del análisis del escenario actual de operación del tren y para tres diferentes escenarios de análisis propuestos.

La sección se divide de la siguiente manera:

2.1 Escenario base

2.2 Escenario sin tren

2.3 Casos de estudio: incremento de carga

2.4 Resumen general de resultados

2.5 Externalidades no cuantificadas por el estudio

Para cada escenario se evaluaron las siguientes externalidades de los sistemas de transporte de carga:

1. Emisiones
2. Choques viales
3. Deterioros

Previo al análisis de cada caso, se determinó la cantidad de vehículos pesados a los que equivale la operación de carga ferroviaria, utilizando los factores de conversión entre carga terrestre y ferroviaria basados en la operación típica del país.

Se determinó que en promedio la operación del ferrocarril equivale a 24 vehículos pesados diarios o 8 819 vehículos pesados anuales.

A partir de las distancias de recorrido y la cantidad de vehículos equivalentes, se calculó la cantidad de kilómetros que recorrerían los pesados. La operación del tren

entre el 2010 y el 2016 significó una reducción de un recorrido de 540 000 kilómetros-camión equivalente.

También se calculó la cantidad total de carga transportada, expresada en millón de ton-km, considerando la distancia total recorrida en km-vehículo y que cada contenedor de banano transporta 18 ton; además supone que cada vehículo que transporta acero y cartón carga 20 ton. A partir de estas suposiciones se determina que la carga transportada equivale en promedio a 11.52 ton-km/10<sup>6</sup> (tonelada-kilómetro por millón de km recorridos).

## Escenario base

### Emisiones producto del transporte de carga por ferrocarril

Se presenta primero los resultados obtenidos utilizando los factores de emisión vehicular (FEV) dependientes de la cantidad de ton-km.

**Cuadro 1. Emisiones de CO<sub>2</sub> transporte por ferrocarril usando km-ton**

Fuente	Factor (kg CO <sub>2</sub> /ton-km)	Emisiones CO <sub>2</sub> tren (kg)
<b>PNUMA (2000)</b>	0.04700	531 941
<b>EPA (2014)</b>	0.03529	182 848
<b>Ecotransit (2016)</b>	0.01616	374 198

Los resultados que se obtuvieron utilizando los FEV considerando km-ton difieren entre sí, esto puede ser debido a la manera en que se considera la eficiencia de los motores para cada fuente.

La cantidad de diésel consumida por el tren se calculó con el factor de consumo de diésel por ton-km transportada, según los datos reportador por Incofer (2017b).

A partir de los datos reportados por Incofer (2017b) se determinó que el factor de consumo de diésel de las locomotoras de Incofer es de 0.0182 litros por cada tonelada-kilómetro. Este valor se utilizó para calcular las emisiones a partir de consumo de combustible.

**Cuadro 2. Emisiones de CO<sub>2</sub> del tren usando factores de kg CO<sub>2</sub>/l diésel**

Fuente	Factor (kg CO <sub>2</sub> /l)	Emisiones CO <sub>2</sub> tren (kg)
<b>EPA (2014)</b>	2.697	520 340
<b>IMN (2017)</b>	2.613	504 096
<b>PNUMA (2000)</b>	2.68	517 022

La estimación de emisiones hecha con los factores que dependen del consumo de combustible son muy similares a las obtenidas con factor recomendado por PNUMA en kg CO<sub>2</sub>/ton-km. Por esta razón se decidió que para los siguientes análisis de escenarios utilizar este factor.

Según los datos reportados en 2012 por el IMN, el transporte por ferrocarril (carga y pasajeros) emitió en total 4.3 Gg de CO<sub>2</sub>, mientras que el promedio de los valores calculados es de 0.5 Gg, es decir el transporte de carga por carretera representa alrededor del 12 % de las emisiones producto de la operación nacional del ferrocarril.

#### Impacto en seguridad vial

Se usó el modelo modificado de Arenas (2008) para calcular el impacto de la operación del tren en la cantidad de choques observados.

Utilizando los datos de volumen para sección de control y la función de desempeño vial modificada por Mata (2018) se calculó la cantidad total de choques esperados para cada tramo.

La sumatoria de choques en cada sección de control fue de 174 choques totales por año. Este dato incluye choques menores, choques con heridos y choques mortales. Conociendo que según (Castro Estrada, 2013), el 27 % de los choques observados corresponden a choques con heridos o mortales, se determina que 47 de esos choques se espera que resulten en colisiones con personas heridas o fallecidas.

#### Choques del tren

Según las estadísticas disponibles en el Incofer, durante el año 2016 ocurrieron 6 colisiones entre el tren y vehículos. De esos seis choques, cuatro ocurrieron en Siquirres, los dos restantes ocurrieron en Matina y Bataan y la totalidad fue en cruces a nivel.

Cinco de los choques reportados tuvieron como consecuencia únicamente daños materiales y en un caso, tuvo como consecuencia la muerte de una persona.

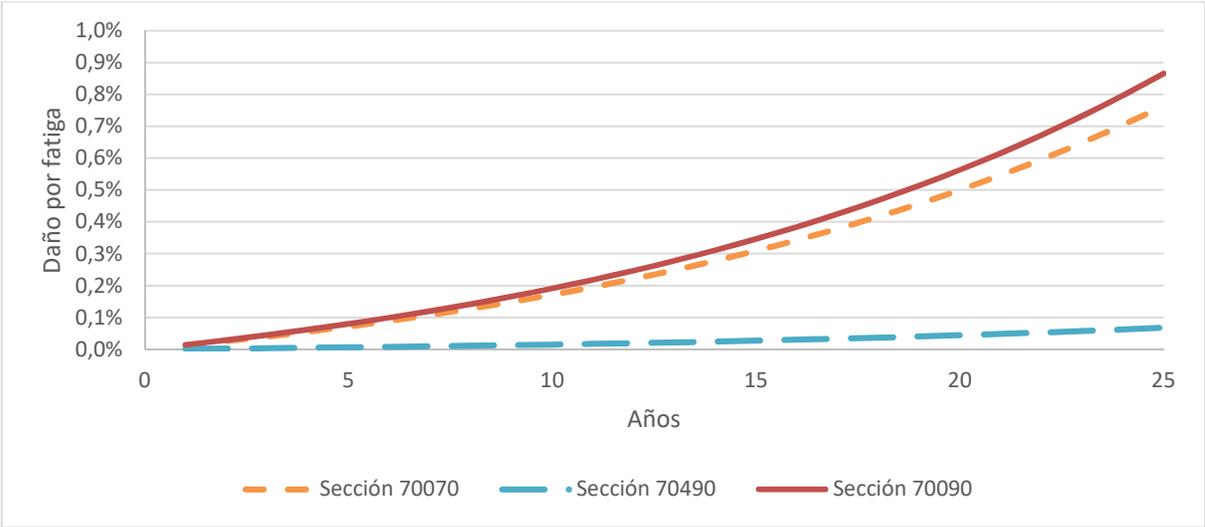
Para el periodo comprendido entre enero y agosto de 2017 Incofer (2017b) reporta 4 choques, tres de ellos ocurrieron en Siquirres y todos tuvieron como consecuencia únicamente daños materiales.

A partir de los datos reportados se determinó que la cantidad de choques totales promedio donde el tren estuvo involucrado es de 5 choques anuales.

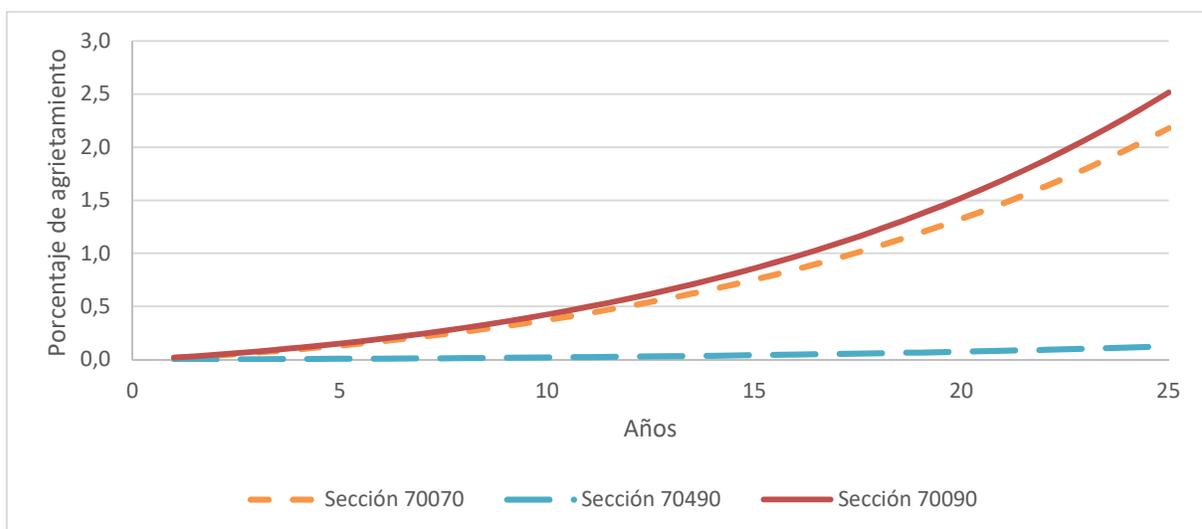
Impacto en la estructura de pavimento

El impacto en la estructura de pavimento se calculó utilizando un análisis de multicapa elástica del paquete estructural que se propone construir para ampliar la carretera en conjunto con las ecuaciones de deterioro propuestas por la guía mecánica empírica de diseño de pavimentos (MEPDG por sus siglas en inglés).

A partir de los datos de salida de los análisis mencionados se generaron las curvas daño por fatiga y agrietamiento para cada sección de control seleccionada. En este documento se muestra la curva típica para el escenario base.



**Figura 32. Daño por fatiga en escenario base**



**Figura 33. Porcentaje de agrietamiento por carril**

Las tres estructuras analizadas cumplen con los requisitos de aceptación, ya que ninguna excede el 20% de área agrietada por carril, valor máximo de agrietamiento según el LanammeUCR, entidad costarricense dedicada al estudio y generación de normativa nacional en cuanto a diseño de pavimentos.

### Escenario sin tren

En este escenario se consideró que toda la carga que actualmente se transporta por ferrocarril se transporta por carretera utilizando vehículos articulados de cinco ejes.

### Emisiones de GEI

Para este cálculo se usó los FEV recomendados por Vega (2013) y la distribución de velocidad típica que se espera en la carretera. Seguidamente se presentan los resultados obtenidos para el caso en que no estuviera funcionando el tren de carga.

**Cuadro 3. CO<sub>2</sub> emitido por transporte equivalente por carretera**

	Acero	Banano	Cartón
	CO <sub>2</sub> (kg)	CO <sub>2</sub> (kg)	CO <sub>2</sub> (kg)
CO <sub>2</sub> por producto	427 735	191 964	42 692
<b>Total general</b>		<b>662 391</b>	

En el caso que no existiese el tren y toda la carga se transportara por carretera, se emitirían a la atmósfera 0.662 Gg más de CO<sub>2</sub>, mientras que la operación base del tren emite 0.498 Gg de CO<sub>2</sub> utilizando el factor de cálculo más conservador. La

diferencia entre las emisiones producto de la operación del tren y el transporte equivalente por carretera es de 0.164 Gg anuales.

La cantidad de CO<sub>2</sub> que se evita emitir equivale al 0.02% del total de la estimación de las emisiones generadas por el transporte de carga pesada en el país durante el año 2012 (Chacón Araya, Jiménez Valverde, Montenegro Ballesteros, Sasa Marín, & Blanco Salas, 2012).

Comparando los resultados obtenidos para el transporte de carretera contra los valores calculados para el transporte por ferrocarril se observa que al transportar carga por carretera se emite entre 1.27 y 3.87 veces más CO<sub>2</sub> que cuando se utiliza el tren. El Cuadro 4 presenta la relación de emisiones para cada uno de los factores de emisión utilizados.

**Cuadro 4. Relación de emisiones entre carretera y tren**

<b>Fuente FEV</b>	<b>CO<sub>2</sub> camión (kg)</b>	<b>CO<sub>2</sub> tren (kg)</b>	<b>Relación carretera/tren</b>
<b>Diésel EPA (2014)</b>	662 391	520 340	1.27
<b>Diésel IMN (2017)</b>		504 096	1.31
<b>Diésel PNUMA (2000)</b>		517 022	1.28
<b>ton-km PNUMA (2000)</b>		498 365	1.33
<b>ton-km Ecotransit</b>		374 198	1.77
<b>ton-km EPA</b>		171 307	3.87

Según datos de Dole y Musmanni (2014) el consumo de diésel al transportar banano por carretera es 1.5 veces mayor que hacerlo por ferrocarril. Considerando que esta relación se mantiene para toda la operación del tren de carga, se confirma que el factor de emisión recomendado por EPA sobreestima la eficiencia de los motores de las locomotoras. Este resultado es esperable ya que las locomotoras que se utilizan en la zona están próximas a cumplir 40 años de servicio y algunas están cercanas a los 50 años.

#### Impacto en cantidad de choques producto de la operación del tren

Utilizando la ecuación de desempeño vial modificada de Arenas, se calculó la cantidad de choques considerando la salida de operación del tren. La modificación en el TPDA es de +24 vehículos pesados y el cambio absoluto en la proporción de pesados varía entre 0.35% y 0.94%. Para la totalidad de la sección en estudio el cambio promedio en vehículos pesados es de 0.46%.

Considerando la variación mencionada en la cantidad de vehículos pesados, la cantidad de choques esperados incrementa de 174.1 a 175.6, lo que representa un incremento de 0.84%.

#### Impacto en la estructura de pavimento

El cambio en la cantidad de ejes equivalentes que debe soportar la estructura de pavimento es dos órdenes de magnitud menor que la cantidad de ejes de diseño para cualquiera de las tres secciones de estudio. Debido a esto, el impacto en el deterioro del pavimento es mínimo, por lo que al igual que el caso de choques esperados, la salida de operación del tren de carga tendría un impacto muy bajo en la vida útil del pavimento.

#### **Casos de estudio: incremento de carga**

Se analizaron los tres casos de incremento de carga propuestos. Se presentan los resultados para los tres casos juntos. Los casos analizados son los siguientes:

- Caso 1: el 5 % de la carga que tiene como origen o destino el puerto de Moín se transporta en tren en el tramo entre Río Frío y Moín.
- Caso 2: el 10 % de la carga que tiene como origen o destino el puerto de Moín se transporta en tren en el tramo entre Río Frío y Moín.
- Caso 3: el 15 % de la carga que tiene como origen o destino el puerto de Moín se transporta en tren en el tramo entre Río Frío y Moín.

Para cada caso se analizó el impacto en emisiones de CO<sub>2</sub>, seguridad vial e impacto en vida útil del pavimento

#### Impacto en emisiones de CO<sub>2</sub>

El cálculo de emisiones de GEI se hizo considerando un escenario donde la carga transportada por tren tiene como origen el puerto de Moín y como destino un patio intermodal ubicado a 110 km de distancia y se consideró que la velocidad de operación será la misma que la que se consideró para el análisis del escenario base.

Para el cálculo de las emisiones producto de la operación del tren, se utilizó el factor recomendado por el IMN, debido a que son los valores avalados para los inventarios

en el país. Para el cálculo de las emisiones que generaría el transporte de la misma carga por carretera, se utilizó los valores calibrados por Vega (2013).

**Cuadro 5. Emisiones de CO<sub>2</sub> en Gg para diferentes casos de carga**

	<b>Caso base</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>
<b>CO<sub>2</sub> carretera</b>	171.5	164	155	147
<b>CO<sub>2</sub> tren</b>	0.50	7.25	14.0	20.8
<b>Emisiones totales</b>	172	171	169	168
<b>Emisiones netas</b>	-	-1.68	-3.20	-4.72
<b>Disminución de CO<sub>2</sub> con respecto a total de emisiones del caso base*</b>	-	0.23%	0.43%	0.64%

\*Comparación con datos de 2012

Se observa que conforme se incrementa la proporción de carga que se transporta por tren, la reducción en emisiones de CO<sub>2</sub> incrementa. Con solo implementar el servicio de carga hasta Río Frío transportando el 5 % de la carga total, la disminución porcentual en emisiones de CO<sub>2</sub> incrementa 10 veces.

#### Impacto en choques viales

Para cada uno de los casos de análisis, se evaluó la ecuación de desempeño vial modificando la cantidad de vehículos diarios y la proporción de pesados que circula por la ruta.

**Cuadro 6. Choques esperados para diferentes escenarios de carga**

	<b>Escenario base</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>
<b>Sección en estudio</b>	174	168.6	162.1	155.4
<b>Diferencia porcentual</b>	-	- 3 %	- 7 %	- 11 %

Los datos del Cuadro 6 muestran los resultados obtenidos. Se observa que para un incremento en la carga del tren de 10 %, la reducción en la cantidad de choques empieza a ser representativa.

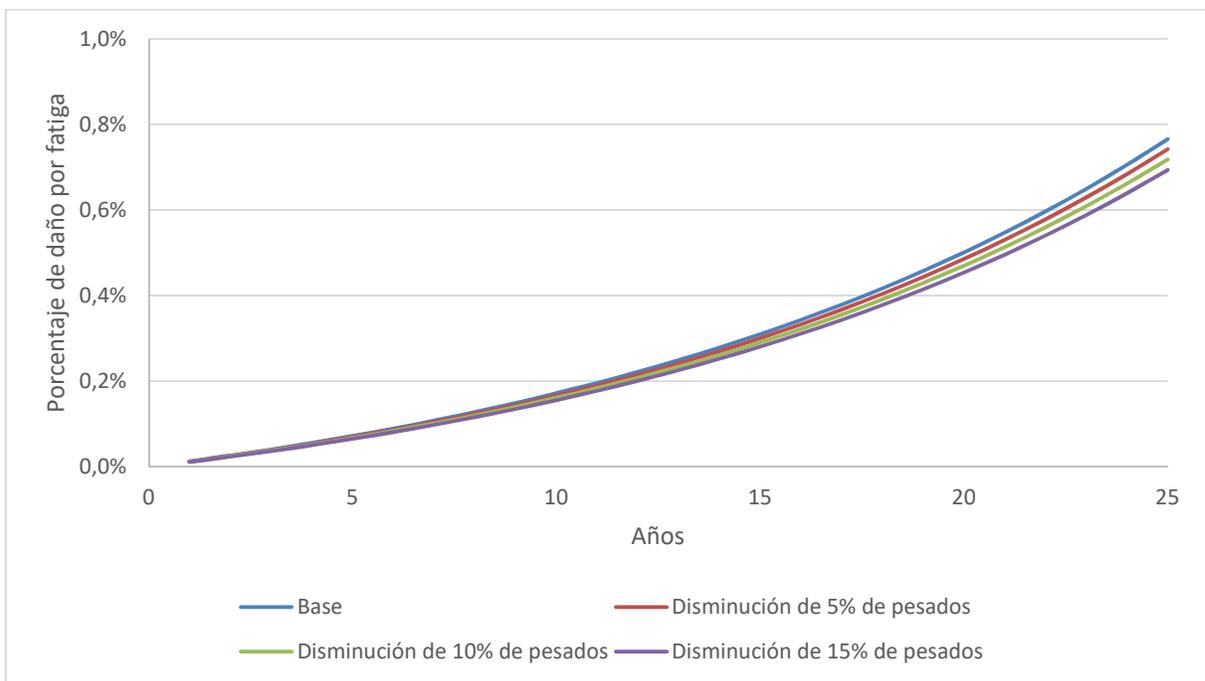
Se recuerda al lector que el impacto en la cantidad de choques esperados que se presentó anteriormente se limita únicamente a la ruta 32, no se incluye dentro del análisis la variación en la cantidad de choques en los cruces a nivel del tren.

### Impacto en la estructura de pavimento

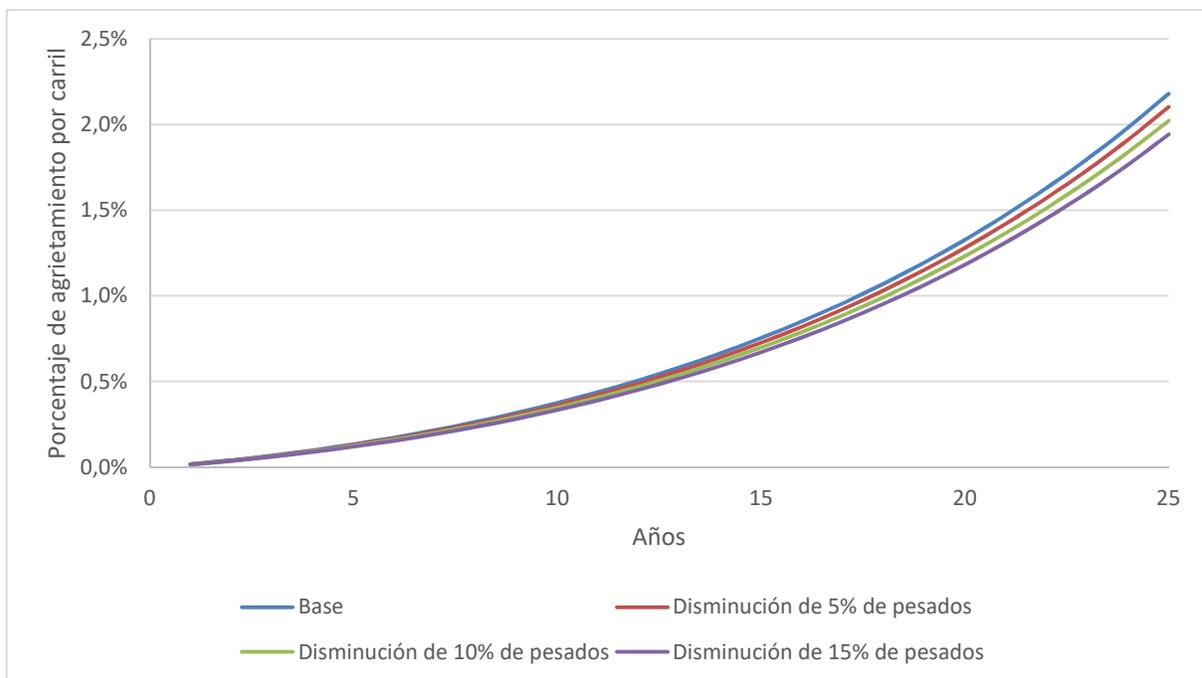
Para cada uno de los paquetes estructurales en estudio se calculó el deterioro generado por cada escenario de carga y se calculó el impacto en la vida útil del pavimento. Seguidamente se presenta el resumen del análisis hecho para una de las secciones en estudio

#### *Sección de control 70070*

Las curvas de daño por fatiga y porcentaje de carril agrietado para la estructura que se plantea colocar en la sección 70070 se presentan en la Figura 34 y la Figura 35.



**Figura 34. Porcentaje de daño por fatiga para sección 70070**



**Figura 35. Porcentaje de agrietamiento por carril para sección 70070**

El ahorro en vida útil para cada escenario de carga se presenta en el Cuadro 7.

**Cuadro 7. Impacto en vida útil de pavimento en la sección 70070**

Caso	Cambio en daño	Cambio en agrietamiento	Vida útil (meses)
<b>Caso 1</b>	3.1 %	3.6 %	123
<b>Caso 2</b>	6.2 %	7.3 %	126
<b>Caso 3</b>	9.4 %	11.1 %	128

El porcentaje de área agrietada por carril no debe ser mayor a 20% al alcanzarse la vida de diseño. Se recuerda que actualmente no existe un modelo calibrado específicamente para las bases estabilizadas costarricenses. Por esta razón la magnitud del área agrietada no se debe considerar representativa, sino el cambio relativo entre el escenario base y los casos de reducción de carga en la carretera.

Para la estructura que se propone construir en la sección 70070, se espera que el agrietamiento se reduzca hasta en 11% y un incremento en la vida útil de 8 meses.

### Impacto en la vida útil

En general, la vida útil del pavimento se espera que varíe entre 3 y 18 meses. Comparado con la vida de diseño, con la expansión del servicio de carga ferroviaria se espera que la vida de diseño aumente entre 2.5 % y 15 %.

### **Resumen general de resultados**

La operación actual del tren de carga tiene impacto mínimo en la vida útil de la estructura de pavimento (considerando como referencia la estructura nueva a construir entre 2018 y 2019 en la ampliación de la ruta nacional 32). El incremento de carga transportada por tren desde Moín hasta Río Frío tendría un impacto en la vida útil del pavimento de apenas algunos meses, contra los 10 años de vida de diseño.

En cuanto a seguridad vial, la operación actual tiene un impacto muy pequeño en la cantidad de choques esperados en la ruta 32, sin embargo sí se reportan colisiones donde el tren estuvo involucrado, especialmente en los alrededores del patio de Siquirres.

Se espera un incremento en la cantidad de choques donde el tren está involucrado, pero no se cuenta con los datos necesarios para hacer el cálculo.

Al incrementar la carga transportada por el tren sí se espera una reducción de hasta 11% en la cantidad de choques esperados en la ruta 32.

Por el incremento en el TPD del tren es esperable un aumento en la cantidad de choques donde el tren esté involucrado en las intersecciones a nivel, pero no se cuenta con los datos suficientes para cuantificar el aumento.

En cuanto a las emisiones generadas por la operación del tren, se calculó que el transporte por carretera generara 1.3 veces más CO<sub>2</sub> que el transporte por tren, para el caso más conservador.

Cuadro 8. Resumen de resultados obtenidos

Externalidad	Emisiones de CO <sub>2</sub> evitadas (Gg)	Choques viales	Cambio en vida útil (meses)		
			Estructura 70070	Estructura 70490	Estructura 70090
Caso base	-	174	-	-	-
Salida de operación	-0.164	176	-	-	-
Caso 1	1.68	169	3	6	4
Caso 2	3.204	162	6	12	9
Caso 3	4.72	155	8	18	14

Cuadro 9. Resumen de impacto de los casos de estudio en externalidades

	Salida de operación	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Emisiones				
Choques				
Deterioro				

**Simbología**

 Impacto negativo       Impacto neutro       Impacto positivo

El Cuadro 8 y el Cuadro 9 presentan un resumen de los resultados obtenidos para cada variable estudiada y por cada caso de estudio.

### Externalidades no cuantificadas por el estudio

Al reducirse la cantidad de vehículos pesados que transitan por la ruta, se reduce la cantidad de motores necesarios para transportar la misma cantidad de carga y la eficiencia de uso del combustible aumenta. Por esta razón, se disminuye la cantidad de gases de vida corta emitidos, que en consecuencia reducen el impacto de los procesos de lluvia y acidificación de suelos, además de reducir la cantidad de partículas suspendidas en el aire que afectan negativamente la salud de las poblaciones cercanas a la carretera.

También debido a la reducción de pesados en la ruta 32 es posible que la velocidad media de operación aumente, que en conjunto con las obras de ampliación permitan que la eficiencia de los vehículos aumente al aumentar la velocidad de operación.

## Conclusiones

Con este proyecto se logró cuantificar el impacto, en términos de choques viales, emisiones y desempeño de la estructura de pavimento de la Ruta Nacional 32, de la operación del tren de carga en la zona atlántica del país; de manera en que se pudo comparar los impactos de la operación del tren contra el caso en que no operase el tren.

La operación actual se caracteriza por ser de pequeña escala, con un volumen diario de 24 vehículos pesados equivalentes. El sistema ferroviario transporta en promedio 81 000 toneladas de acero, 845 00 toneladas de banano y 9800 toneladas de cartón anualmente.

El pequeño tamaño de la operación se refleja en el impacto en la cantidad de choques esperados sobre la ruta 32. En caso de salir de operación el tren, el incremento en la cantidad de pesados sobre la ruta generaría un aumento de dos choques anualmente, en donde se espera una cantidad de 174 choques al año en el sector analizado. Este incremento representa un cambio menor al 1 %. Este cambio en el valor esperado de choques no tiene ningún impacto significativo, más aún cuando se considera que Incofer reportó en sus estadísticas que durante 20 meses el tren se vio involucrado en 10 choques, la mayoría con consecuencias materiales únicamente en las cercanías del patio de Siquirres.

En cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub>, el impacto relativo de la operación del tren de carga sí es importante. En el caso más conservador se determinó que transportar carga por carretera emite 1.33 veces más CO<sub>2</sub> que si se hace por tren. En términos reales, debido a la pequeña escala de la operación, la cantidad de CO<sub>2</sub> mitigada es muy pequeña, del orden de 0.02 % del total de las emisiones generadas por el sector de carga pesada.

El bajo impacto en los indicadores de estudio se ve también reflejado en el impacto en la vida útil del pavimento. La variación en la cantidad de vehículos implica que el deterioro será prácticamente el mismo en caso de que saliera de operación el tren.

A pesar de que se contó con estudios de mercado para estimar la demanda de transporte de carga, los datos son muy variables en el tiempo. Por esta razón no se

analizaron casos con diferentes puntos de origen y destino. Se generaron tres casos de estudio diferentes, basados en un estudio de mercado contratado por Incofer, donde se cambia el 5%, 10% y 15% de la carga que tiene como origen o destino el puerto de Moín y que se transporta actualmente por carretera al tren. Para el caso 1, donde se cambia el modo de transporte del 5 % de la carga, se espera una reducción de 3 % de choques. Para el caso 2, la reducción aumenta a 7 % y por último en el caso 3 la reducción es de 11 %.

Con estos casos, se determinó que la reducción en los choques esperados en la ruta 32 es significativa a partir del caso en que se cambia de modo del 10 % de la carga. Considerando que la sección de carretera en estudio será ampliada entre 2018 y 2019, el cambio en la cantidad de choques esperados podría cambiar producto del cambio en las condiciones geométricas de la vía.

El impacto neto en choques viales no es posible determinarlo, producto de las limitaciones que se tienen. Existe una metodología en el país para estimar los choques viales donde el tren esté involucrado en cruces a nivel, pero la cantidad de datos necesaria para realizar este análisis se encuentra fuera del alcance de este proyecto.

Como no se pudo determinar el impacto neto en seguridad vial, no se deben tomar los resultados aquí expuestos como definitivos, sino únicamente como un indicador del potencial de mejora en seguridad vial sobre la Ruta Nacional 32.

En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero se calculó la cantidad emitida por cada modo de transporte en cada caso de estudio. Se reitera que el cálculo hecho considera únicamente las emisiones de CO<sub>2</sub>, no se calculó la cantidad de metano y óxido nitroso que componen los gases de efecto invernadero (GEI).

Se concluye que para cualquiera de los tres casos analizados, el impacto en emisiones en las condiciones más conservadoras, las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen conforme aumenta la cantidad de carga que se cambia de modo de transporte. Las emisiones netas se calcularon en 1.68 Gg, 3.20 Gg y 4.72 Gg de CO<sub>2</sub> anualmente para el caso 1, 2 y 3 respectivamente.

La disminución de CO<sub>2</sub> emitido se estima en 0.23 %, 0.43 % y 0.64 %, para el caso 1, 2 y 3 respectivamente, del total de CO<sub>2</sub> emitido anualmente por el transporte de carga pesada.

Es importante recordar que la simulación se hizo considerando que se opera con el mismo equipo con el que cuenta Incofer actualmente. En caso de que se modernice la flota a locomotoras diésel modernas, o incluso se restaure el sistema electrificado, el impacto en la estimación de emisiones se afectaría drásticamente al esperarse una disminución en el consumo de diésel.

En cuanto al deterioro en la estructura de pavimento, se concluye que no es posible determinar el impacto real en los deterioros y la vida útil del pavimento por no existir un modelo calibrado para las condiciones nacionales y datos detallados para la ruta.

Se midió de manera relativa el deterioro de la estructura de pavimento y para los escenarios propuestos se calculó que, para las tres estructuras de pavimento analizadas, se espera un incremento en la vida útil del pavimento de entre tres y seis meses para el caso 1, entre 6 y 12 meses para el caso 2 y para el caso 3; con la máxima cantidad de carga moviéndose por tren, se espera un aumento en la vida útil entre 8 y 18 meses.

El incremento en la vida útil del pavimento no debe considerarse como una justificación para desprestigiar el mantenimiento preventivo de la carretera. Tal como lo menciona Sanabria (2017), el costo anual por mantenimiento se duplica cuando en una ruta es necesario recuperar la condición de IRI, debido a deformación, comparado al caso de mantenimiento preventivo con sello de grietas.

El incremento en la vida útil lo que permite es que, en conjunto con mantenimiento preventivo, el nivel de inversión se mantenga cercano a los 25 millones de colones anuales por kilómetro según indica Sanabria (2017).

En el ámbito operativo, para que el Incofer pueda incrementar la capacidad de carga, se requiere de inversión en equipo rodante y locomotoras, debido a que actualmente operan a capacidad máxima, limitados por la disponibilidad de las locomotoras y el estado de las vías (Palma, 2017)

Los clientes del Incofer prefieren utilizar el servicio debido a la posición estratégica de los puntos de origen o destino. Además, según Palma (2017), los productores de Banano prefieren el servicio del tren porque se daña menos el producto, pero piden que sea más confiable en términos de tiempo operativo.

## **Recomendaciones**

A partir de las conclusiones obtenidas en este trabajo se recomienda que se continúe con la operación del ferrocarril de carga. Es una opción de transporte de carga viable en la zona, que conforme aumente su magnitud sus beneficios aumentan, especialmente en términos de ahorro de combustible, tiempo y disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En cuanto al impacto en seguridad vial, es importante señalar y controlar los cruces a nivel, especialmente en zonas urbanas, para que los beneficios obtenidos por la disminución en la exposición de los usuarios de la ruta 32 no sea opacada por un incremento en los choques viales ocurridos fuera de la ruta.

Se recomienda estudiar los cruces viales a nivel a lo largo de la ruta para calcular la cantidad de choques esperados, utilizando la metodología propuesta por Guadamuz-Flores (2017).

Se concluyó que la reducción de carga transportada por carretera tiene impacto positivo sobre la vida útil del pavimento, pero a la fecha no es posible cuantificarlo de manera adecuada. Se recomienda retomar el análisis una vez se hayan publicado los resultados de la investigación de la ingeniera Ana Elena Hidalgo sobre modelos de fatiga de bases estabilizadas con cementos en Costa Rica, debido a que el diseño propuesto para la ampliación de la ruta 32 propone este tipo de bases para la estructura de pavimento.

Para el cálculo de las emisiones de GEI se utilizaron datos y factores generales, calculados con dos métodos diferentes. Se recomienda buscar información directa con los transportistas sobre el consumo de diésel y la velocidad real de operación para validar completamente los resultados obtenidos.

Se recomienda a Incofer realizar una campaña de medición detallada de consumo de combustible, cantidad de carga transportada y distancia recorrida para cada tipo de locomotora con el fin de generar indicadores y factores de consumo que reflejen la eficiencia del equipo.

El análisis presentado en este trabajo se puede retomar en otras zonas del país, con la consideración que el análisis de seguridad vial debe ser ajustado para que refleje las condiciones del sitio. Para emisiones y deterioro de pavimento solo se requiere contar con los datos de volumen de tránsito y estructura de pavimento.

### **Agradecimientos**

Se extiende un muy sincero agradecimiento al LanammeUCR, en especial a los ingenieros Henry Hernández y Diana Jiménez, quienes con sus oportunos aportes y contactos hicieron posible el desarrollo de esta investigación. Así mismo al ingeniero Jonathan Agüero y al químico Sergio Musmanni por sus aportes y guía durante la investigación.

### **Referencias bibliográficas**

- Arenas Ramírez, B., Aparicio Izquierdo, F., González Fernández, C., & Gómez Méndez, A. (2008). The influence of heavy goods vehicle traffic on accidents on different types of Spanish interurban roads. *Accident Analysis & Prevention*.
- Castro Estrada, E. (2013). *Análisis de tramos de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 32, utilizando el Método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico*. San José.
- CEPAL. (28 de Mayo de 2018). *Ranking de movimiento portuario de contenedores 2017*. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/notas/ranking-movimiento-portuario-contenedores-2017>
- Chacón Araya, A., Jiménez Valverde, G., Montenegro Ballesteros, J., Sasa Marín, J., & Blanco Salas, K. (2012). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono, 2012*. San José: Instituto Meteorológico Nacional.

- EPA. (2014). *Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories*. Obtenido de [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors\\_2014.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors_2014.pdf)
- Guadamuz-Flores, R., & Aguero-Valverde, J. (2017). Bayesian Spatial Models of Crash Frequency at Highway–Railway Crossings. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 27-35.
- ifeu Heidelberg; INFRAS Berne; IVE Hannover. (2016). *Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports Methodology and Data Update*. Berne – Hannover – Heidelberg.
- IMN. (2017). *Factores de emisión de gases de efecto invernadero*. Obtenido de <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/factores-de-emision-gei-setima-edicion-2017/>
- Incofer. (2017a). Estadísticas de carga 2010 - 2016.
- Incofer. (2017b). Estadísticas sector atlántico I semestre 2017.
- Mata Díaz, N. (2018). *Externalidades ambientales, en seguridad vial y en infraestructura del transporte de carga ferroviaria en la zona atlántica costarricense*.
- Mopt. (2017). Datos históricos de TPDA en RN32. Secretaría de planificación sectorial.
- Musmanni Sobrado, S. (2014). *Movilidad Urbana Sostenible: Modelo de Aplicación y Ejemplos*.
- Palma, J. (Febrero de 2017). Visita a INCOFER Limón. (N. Mata, Entrevistador)
- PNUMA. (2000). *The GHG Indicator: UNEP Guidelines for Calculating Greenhouse Gas Emissions for Businesses and NonCommercial Organisations*.
- Sanabria, J. (2017). *INFORME DE EVALUACIÓN DE LA RED VIAL NACIONAL PAVIMENTADA DE COSTA RICA AÑOS 2016 - 2017*. LanammeUCR, Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional. Recuperado el 23 de

Setiembre de 2017, de  
[http://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/noticias/fotos/ERVN2016-2017\\_Firmado.pdf](http://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/noticias/fotos/ERVN2016-2017_Firmado.pdf)

Vega, A. (2013). *Análisis de Emisiones de Gases en el Área Metropolitana de San José y sus alrededores.*

## Perfil de los autores



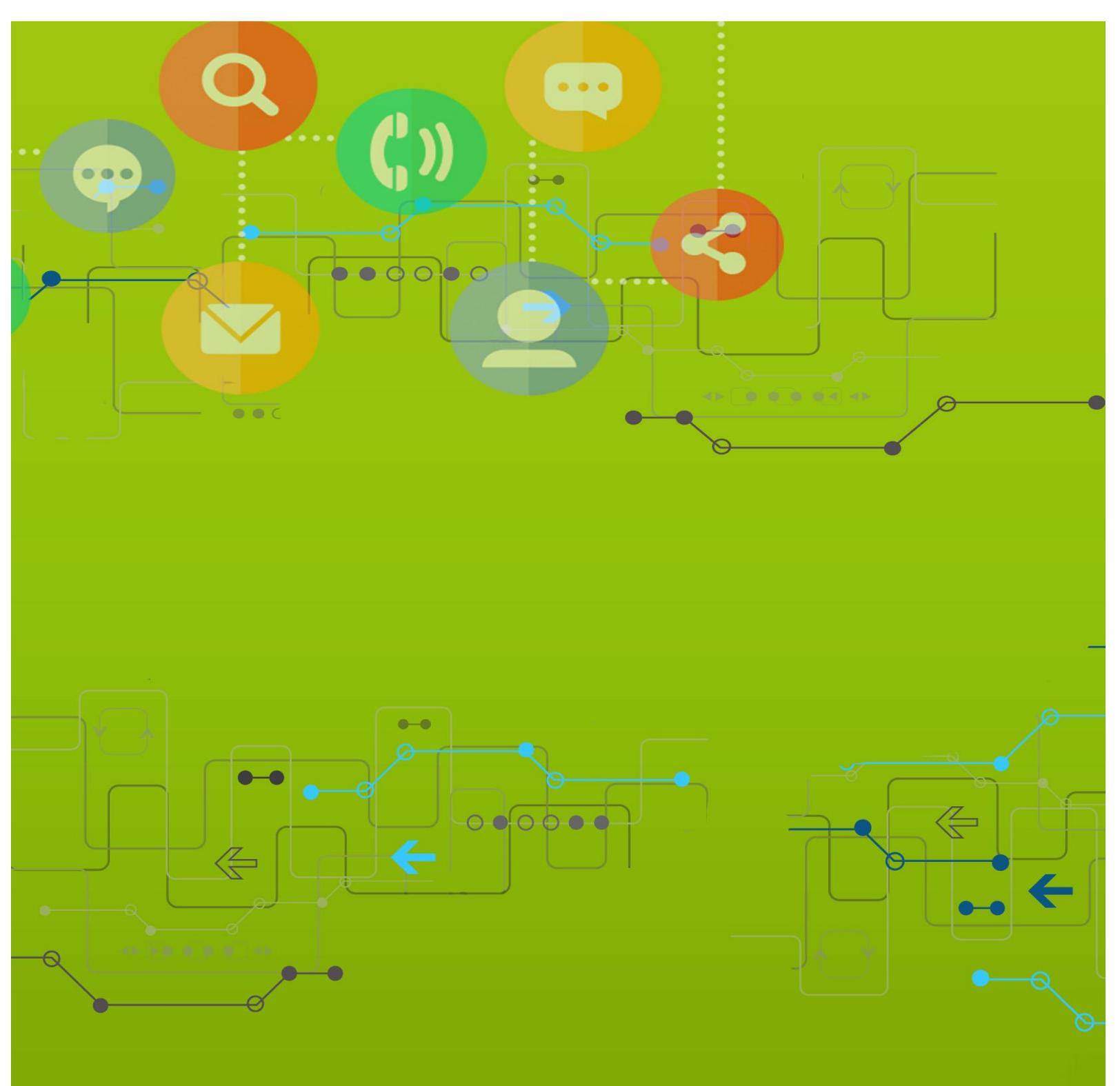
### **NICOLÁS MATA DÍAZ**

Ingeniero civil graduado de la Universidad de Costa Rica, con énfasis en ingeniería de transporte, hidráulica e hidrología y en construcción.

Actualmente labora como ingeniero de proyectos en la empresa PhC Ingenieros Consultores, diseñando e inspeccionando infraestructura civil. Ha laborado también en el LanammeUCR como asistente en la unidad de Auditoría Técnica dando seguimiento al diseño, construcción y calidad de materiales utilizados en obras de infraestructural vial de Costa Rica.

Trabajó con la empresa Sol Dos Mil Centroamérica, apoyando en el desarrollo de estudios de impacto ambiental, de factibilidad y en el manejo de proyectos hidroeléctricos privados en Costa Rica.

Asociado al Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica



**Cartagena:** Av. Pedro de Heredia,  
Calle 49A #31-45 Sector - Tesca  
Cel: 313 540 5791 e-mail: [admisiones@tecnar.edu.co](mailto:admisiones@tecnar.edu.co)

**Barranquilla:** Cra. 54 #64-73  
Tels: (5) 369 4469 - 311 2853  
e-mail: [admisionesbarranquilla@tecnar.edu.co](mailto:admisionesbarranquilla@tecnar.edu.co)

**Montería:** Calle 29 #3-55 Edificio Imperial,  
Local 02 Admisiones Tels: 782 4353  
e-mail: [admisionesmonteria@tecnar.edu.co](mailto:admisionesmonteria@tecnar.edu.co)

**Sincelejo:** Cra 21 No. 25-59 Barrio La María  
Teléfonos: 281 0315 - 281 2282  
e-mail: [admisiones@corposucre.edu.co](mailto:admisiones@corposucre.edu.co)

[www.tecnar.edu.co](http://www.tecnar.edu.co)

 /tecnar.edu.co  @tecnareduco  tecnar