



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Caracterización de espectros de carga en la red carretera mexicana

Federico Castro Mondragón
Alfonso Pérez Salazar
Paul Garnica Anguas
Roberto Israel Hernández Domínguez

Publicación Técnica No. 624
Sanfandila, Qro.
2021

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres del Instituto Mexicano del Transporte, por el Ing. Federico Castro Mondragón, el Ing. Alfonso Pérez Salazar, el Dr. Paul Garnica Anguas y el M.I. Roberto Israel Hernández Domínguez.

Este trabajo es el producto final del proyecto de investigación interna II-02/18 "Caracterización de espectros de carga en la red carretera mexicana".

Se agradece la colaboración del asistente de investigación Miguel Silva Avendaño para el desarrollo del presente trabajo. Éste formó parte de su residencia profesional para obtener el grado de Ingeniero por el Instituto Tecnológico de Tlaxiaco.

Contenido

	Página
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
Sinopsis.....	ix
Abstract	xi
Resumen ejecutivo.....	xiii
Introducción.....	1
1. Metodologías de diseño y espectros de carga	3
1.1 Métodos de diseño empírico-mecanicistas	5
1.2 Tipo de ejes vehiculares.....	6
2. Espectros de carga en México	9
2.1 Estudio de pesos y dimensiones.....	9
2.2 Espectro de carga	11
2.3 Factor de Espectro de Carga (LSF)	13
3. Herramienta para el cálculo de espectros de carga	15
3.1 Normalización de la información	16
3.2 Procesamiento de datos.....	16
3.2.1 Obtención de espectros de carga	17
3.2.2 Combinación de espectros de carga	20
3.2.3 Porcentaje de sobrecarga por tipo de eje	21
3.2.4 Localización geográfica	22
3.2.5 Administrar estaciones de pesaje y corredores carreteros.	23
3.2.6 Datos para el IMT-PAVE 3.0	26

3.2.7	Cálculo del Factor de Espectro de Carga (LSF)	27
4.	Análisis de resultados	29
4.1	Análisis por tipo de eje	35
4.1.1	Parámetros de ajuste.....	36
4.1.2	Comportamiento del eje sencillo.....	39
4.1.3	Comportamiento del eje dual.....	41
4.1.4	Comportamiento del eje tándem.....	43
4.1.5	Comportamiento del eje trídem.....	45
5.	Conclusiones.....	47
	Bibliografía	49

Índice de figuras

Figura 1.1. Sección de pavimento típico	3
Figura 1.2 Sección de pavimento flexible	4
Figura 1.3 Sección de pavimento Rígido.....	4
Figura 1.4 Tipos de Vehículos.....	7
Figura 1.5 Tipo de configuraciones de ejes vehiculares.....	8
Figura 2.1 Espectro de carga característico de un eje tándem	12
Figura 2.2 Estaciones de pesaje en la red nacional de carreteras	12
Figura 3.1 Herramienta informática para la obtención y gestión de espectros de carga	15
Figura 3.2 Acceso en la herramienta para el análisis de datos de una estación de pesaje.....	17
Figura 3.3 Selección para importar los datos	17
Figura 3.4 Mensaje de validación y finalización del procesamiento de información	18
Figura 3.5 Resultados del análisis de información	19
Figura 3.6. Ejemplo de histograma resultante (eje tándem).....	19
Figura 3.7 Guarda información resultado del análisis	20
Figura 3.8 Interfaz de usuario para la combinación de espectros	20
Figura 3.9 Guardar combinación de espectros.....	21
Figura 3.10 Porcentaje de vehículos con sobrecarga	22
Figura 3.11. Localización geográfica de las estaciones	22
Figura 3.12. Ejemplo de información de la estación.....	23
Figura 3.13 Administrador de estaciones de pesaje.....	23
Figura 3.14 Datos solicitados para agregar una estación	24
Figura 3.15 Información para agregar un nuevo corredor carretero.....	25
Figura 3.16 Administrador de estaciones y combinación de espectros.....	25
Figura 3.17 Calculo de parámetros para IMT-PAVE 3.0	27
Figura 3.18 Proporciones, Medias, Desviaciones y LSF	28
Figura 4.1 Quince corredores principales de la red nacional de carreteras	29
Figura 4.2 Espectro de carga y límite legal para el eje sencillo de la estación E23	31
Figura 4.3 Espectro de carga y límite legal para el eje sencillo de la estación E65	31
Figura 4.4 Espectro de carga y límite legal para el eje dual de la estación E23 ...	32
Figura 4.5 Espectro de carga y límite legal para el eje dual de la estación E65 ...	32
Figura 4.6 Espectro de carga y límite legal de carga para el eje tándem de la estación E23.....	33
Figura 4.7 Espectro de carga y límite legal de carga para el eje tándem de la estación E65.....	33

Figura 4.8 Espectro de carga y límite legal para el eje tándem de la estación E23	34
Figura 4.9 Espectro de carga y límite legal para el eje tándem de la estación E65	34
Figura 4.10 Factor de espectro de carga por año para el eje sencillo.....	39
Figura 4.11 Factor de espectro de carga por estado para el eje sencillo	40
Figura 4.12 Factor de espectro de carga por región económica para el eje sencillo	40
Figura 4.13 Factor de espectro de carga por corredor carretero para el eje sencillo	40
Figura 4.14 Factor de espectro de carga por año para el eje dual.....	41
Figura 4.15 Factor de espectro de carga por estado para el eje dual	41
Figura 4.16 Factor de espectro de carga por región económica para el eje dual..	42
Figura 4.17 Factor de Espectro de carga por corredor carretero para el eje dual .	42
Figura 4.18 Factor de espectro de carga por año para el eje tándem.....	43
Figura 4.19 Factor de espectro de carga por estado para el eje tándem	43
Figura 4.20 Factor de espectro de carga por región económica para el eje tándem	44
Figura 4.21 Factor de espectro de carga por corredor carretero para el eje tándem	44
Figura 4.22 Factor de espectro de carga por año para el eje trídem.....	45
Figura 4.23 Factor de espectro de carga por estado para el eje trídem.....	45
Figura 4.24 Factor de espectro de carga por región económica para el eje trídem	46
Figura 4.25 Factor de espectro de carga por corredor carretero para el eje trídem	46

Índice de tablas

Tabla 1.1. Tipos de Vehículos	6
Tabla 2.1. Información de peso por eje obtenida de las estaciones de pesaje	10
Tabla 3.1 Formato requerido en la información para la obtención de los espectros de carga	16
Tabla 4.1 Límites legales de ejes vehiculares	35
Tabla 4.2 Corredores carreteros	35
Tabla 4.3 Regiones Geoeconómicas de México	36
Tabla 4.4 Estados de la República Mexicana.....	36
Tabla 4.5 Parámetros de ajuste y LSF para el eje sencillo agrupado por región económica.....	37
Tabla 4.6 Parámetros de ajuste y LSF para el eje dual agrupado por región económica.....	37
Tabla 4.7 Parámetros de ajuste y LSF para el eje tándem agrupado por región económica.....	37
Tabla 4.8 Parámetros de ajuste y LSF para el eje trídem agrupado por región económica.....	37
Tabla 4.9 Parámetros de ajuste y LSF para el eje sencillo agrupado por corredor carretero.....	38
Tabla 4.10 Parámetros de ajuste y LSF para el eje dual agrupado por corredor carretero.....	38
Tabla 4.11 Parámetros de ajuste y LSF para el eje tándem agrupado por corredor carretero.....	38
Tabla 4.12 Parámetros de ajuste y LSF para el eje trídem agrupado por corredor carretero.....	39

Sinopsis

Las metodologías y herramientas actuales para el diseño de pavimentos, consideran como variable principal el tránsito que circula por la red carretera, de ahí la importancia de desarrollar una herramienta informática, para procesar los datos de las diferentes estaciones de pesaje dinámico que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) instaló entre 2005 y 2017, y obtener los espectros de carga a partir de dicha información. Con el desarrollo de la herramienta, se cuenta con una forma automática para procesar la información de las estaciones y también con la posibilidad de seguir ampliando la base de datos con nuevas estaciones de pesaje y generar de manera automática los espectros de carga, la ubicación geográfica de los sitios de recolección de información, obtener el porcentaje de vehículos con sobrecarga y generar diferentes escenarios de análisis para obtener información que sirva como insumo para la herramienta de diseño de pavimentos IMT-PAVE 3.0

Palabras clave: Espectros de carga, herramienta informática, diseño de pavimentos, pesaje dinámico, sobrecarga.

Abstract

The current methodologies and tools for the design of pavements, consider as a main variable the traffic that circulates through the road network, hence the importance of developing a computer tool to process the data from the different dynamic weighing stations, which the Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) has installed from 2005 to 2017, and to obtain the load spectra from that information. With the development of the tool, there is an automatic way to process the information from the stations, and also with the possibility of continuing to expand the database with new stations and automatically generate the loading spectra, the geographical location of the data collection sites, obtain the percentage of vehicles with overload, generate different analysis scenarios to obtain information that serves as input for the pavement design tool IMT-PAVE 3.0.

Keywords: Load spectra, software, pavement design, weigh in motion, overload.

Resumen ejecutivo

En este documento se presenta información sobre el análisis de los datos provenientes de estaciones de pesaje dinámico, con la finalidad de obtener los espectros de carga. Las estaciones de pesaje analizadas fueron instaladas en diferentes puntos de red carretera nacional entre 2005 y 2017.

Con el análisis de la información recolectada, se desarrolló una herramienta informática que facilita la gestión de la información; la herramienta permite administrar las estaciones de pesaje y corredores carreteros (agregar o eliminar estaciones o corredores a la base de datos), obtener automáticamente los espectros de carga, realizar combinación de las estaciones de pesaje (por año, por corredor carretero, por estado, por zona económica, etc.) y obtener los parámetros de ajuste con el formato requerido por la herramienta de diseño de pavimentos IMT-PAVE 3.0

En el primer capítulo se muestran generalidades de las metodologías de diseño para pavimentos, haciendo énfasis en las metodologías empírico-mecanicistas en las cuales el objetivo es proporcionar diseños apropiados y con mayor apego a la realidad, así como una mayor certidumbre en el control de los deterioros.

En el segundo capítulo se aborda el tema de los espectros de carga, los estudios de pesos y dimensiones que se han realizado en la red carretera del país y el Factor de espectro de carga (LSF), el cual se obtiene de los espectros de carga para cada estación estudiada.

En el tercer capítulo se aborda el tema de la herramienta para la obtención y gestión de los espectros de carga, estaciones de pesaje dinámico y corredores carreteros; se describe la normalización de la información registrada de las estaciones de pesaje, los diferentes algoritmos que la integran y los escenarios de análisis que permiten desarrollar la herramienta para generar información y parámetros requeridos por la herramienta IMT-PAVE 3.0.

En el cuarto capítulo se presentan algunos de los resultados obtenidos a partir del procesamiento de la información de los estudios de pesos y dimensiones realizados por la SCT, en los cuales se muestran resultados para usarse en el IMT-PAVE, así como el LSF. Estos agrupados por región económica, por estado, por corredor carretero y por año de estudio.

Al final del documento se presentan las conclusiones del estudio realizado

Introducción

Predecir la durabilidad de los pavimentos es una tarea complicada. El tránsito vehicular constituye uno de los elementos más importantes y difíciles de caracterizar cuando se realiza un diseño de pavimentos. Cuantificar el efecto del tránsito en los pavimentos es complejo, debido a la diversidad de cargas, tipos de vehículos y velocidades de operación.

Una caracterización adecuada del tránsito vehicular es fundamental para predecir con mayor confiabilidad el deterioro del pavimento y garantizar un buen desempeño durante la vida útil del mismo.

Por otro lado, es un hecho que varios de los métodos de diseño de pavimentos utilizados en la actualidad, están basados en relaciones empíricas determinadas hace aproximadamente de 60 años. Ejemplo de ello lo constituyen la guía de diseño de pavimentos AASHTO que está basada en las pruebas llevadas a cabo en el tramo de prueba AAHSO, que inició a finales de la década de los años 50.

El problema del uso de la metodología AASHTO estriba en que las relaciones de esta prueba han sido extrapoladas a condiciones no incluidas en la prueba original, por lo que el diseño de pavimentos en la actualidad está apoyado en extrapolaciones y que en sentido estricto son especulaciones del comportamiento del pavimento bajo cierto número de repeticiones de carga.

La tendencia actual de las metodologías de diseño de pavimentos es incorporar conceptos mecanicistas en vez de la fundamentación empírica de los procedimientos anteriores, lo cual lleva a la tarea de caracterizar de manera más precisa los requerimientos del tránsito usado en el análisis y diseño.

La guía de diseño AASHTOWare Pavement ME Design, propone desde su origen, a principio de la década pasada, el uso de espectros de carga para la caracterización del tránsito en sustitución de los Ejes Equivalentes Estándares o mejor conocidos como ESAL's.

En México, a partir del año 1990, se comenzó a formar una base de datos de mediciones de pasaje dinámico en diferentes estaciones, con el fin de tener una base estadística de información, así como un apoyo en materia de reglamentación de pesos en las carreteras federales.

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de una mejor caracterización del tránsito vehicular de carga en las carreteras federales mexicanas, por medio de la obtención de los espectros de carga, a la par con el auge de nuevas metodologías de análisis y diseño de pavimentos.

En México, existe el Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional, realizado por la Dirección General de Servicios Técnicos, el cual desde 1990, recopila información de las cargas por eje de los principales vehículos de carga que circulan por la red federal libre de peaje. Desafortunadamente las estaciones no son instaladas de manera permanente en el mismo sitio, ni se cuenta con gran número de ellas, es por ello que para este trabajo, y en función de la consistencia de la calidad de la información, así como la diversidad de ubicaciones, se toman las bases de datos de los años 2005 a 2017 para la obtención de los espectros de carga.

1. Metodologías de diseño y espectros de carga

La superficie terrestre o terreno formado de manera natural, no presenta las características apropiadas para que los vehículos automotores actuales puedan ser conducidos con comodidad y seguridad a grandes distancias y a las velocidades que son capaces de alcanzar. Para ello se requiere de una superficie con un diseño geométrico adecuado en el cual las curvas horizontales y verticales, pendientes ascendentes y descendentes sean controladas, con la finalidad de mantener en todo momento la distancia de visibilidad necesaria, permitir maniobras de rebase o frenado con seguridad en condiciones adversas. La superficie de rodadura debe tener las condiciones superficiales adecuadas (fricción, textura, color, señalamiento, etc.) con la finalidad de brindar seguridad y confort al circular sobre ella.

Un pavimento puede definirse como un conjunto de capas, construidas con materiales especialmente seleccionados para actuar en conjunto, formando una estructura que va desde la parte superior de las terracerías hasta la superficie de rodamiento (Figura 1.1).

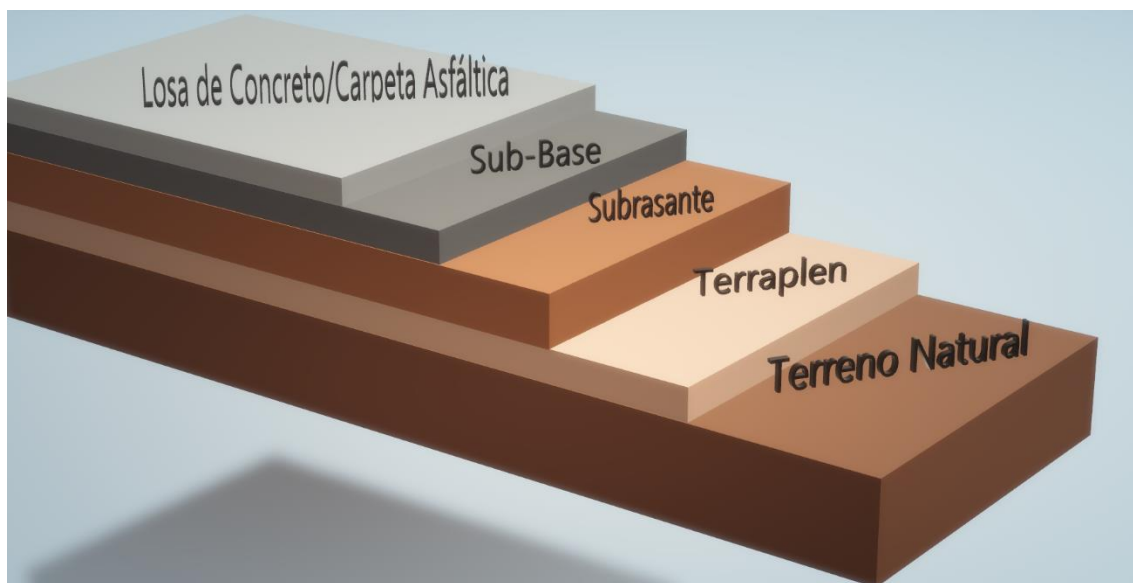


Figura 1.1. Sección de pavimento típico

Como premisa básica, considerando que la sollicitación principal del diseño estructural de un pavimento es el tránsito, éste se diseña para funcionar en un período, o vida de proyecto, que es función del número de repeticiones de cargas,

para un comportamiento previsto por el mismo diseño; es decir, al final del tiempo de vida del proyecto o cuando las repeticiones de carga se cumplan, deberá presentar un estado de fallas que el mismo diseño consideró.

El tipo clásico de pavimento flexible consiste en capas de materiales granulares por bajo de una capa delgada de material asfáltico de alta calidad (Figura 1.2). Típicamente los materiales de mejor calidad están cerca de la superficie. Los pavimentos flexibles son estructuras que mantienen un estrecho contacto entre sus elementos, distribuyen la carga de la superficie a la terracería y dependen en gran medida de la granulometría, cohesión y fricción entre las partículas de los materiales que lo componen.

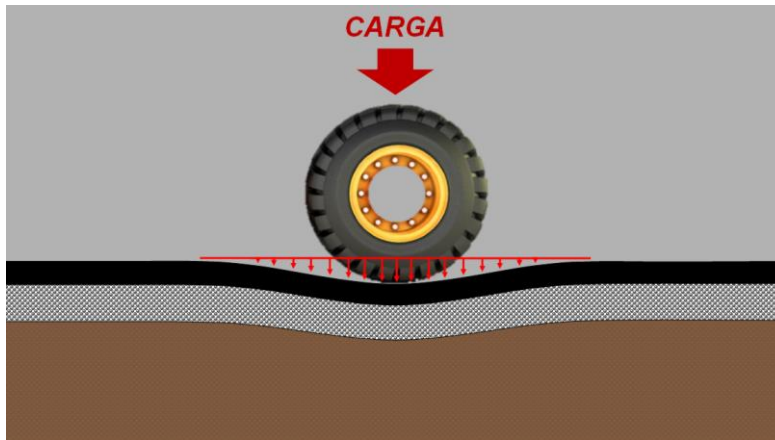


Figura 1.2 Sección de pavimento flexible

Un pavimento de concreto hidráulico se considera que posee resistencia a la flexión que le permite actuar como una viga (Figura 1.3) y transmite los esfuerzos sobre los puntos donde se apoya. Por lo tanto, irregularidades menores y deflexiones en las capas de soporte probablemente no se verán reflejadas en gran medida en el comportamiento o desempeño de la superficie.

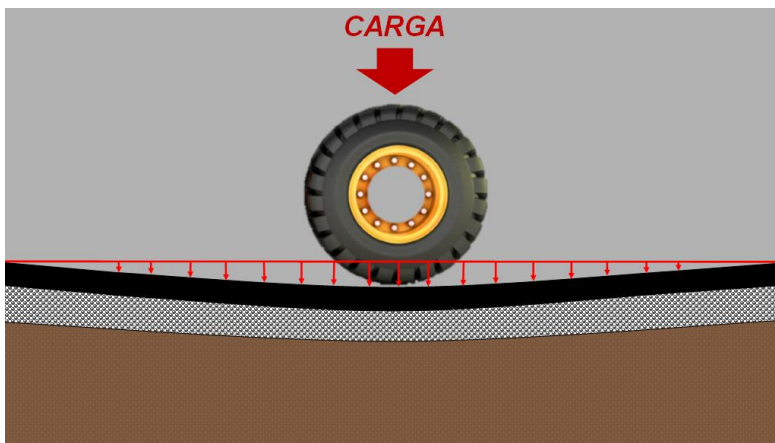


Figura 1.3 Sección de pavimento Rígido

1.1 Métodos de diseño empírico-mecanicistas

Los métodos para diseño desarrollados de manera empírica, no necesariamente son inexactos, siempre que los factores de diseño sean usados dentro de los rangos utilizados para su calibración. En la actualidad, el diseño de pavimentos sigue transformándose de manera importante, migrando desde las metodologías de diseño empíricas hacia las metodologías de diseño mecanicistas, en donde se pretenden utilizar, de manera directa, los principios de la mecánica de materiales.

El componente mecanicista en las metodologías de diseño de pavimentos, es la determinación de las respuestas del pavimento tales como esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones debido a las cargas del tránsito, lo cual se logra con el uso de modelos matemáticos y la teoría elástica multicapa. Por su parte, la porción empírica, relaciona estas respuestas con el desempeño de la estructura del pavimento por medio de funciones de transferencia, que son calibradas con resultados de estudios en pistas de ensayo acelerado o con monitoreo de pavimentos a largo plazo.

Los métodos de Diseño empírico mecanicista (E-M) aun cuando llevan ya tiempo de haberse desarrollado, no han logrado implementarse completamente. Se han desarrollado varios métodos empírico-mecanicistas, uno de los más importantes es el Procedimiento del Instituto del Asfalto para pavimentos flexibles (Shook et al., 1982); la guía suplementaria de la AASHTO (1998) para pavimentos rígidos, y los procedimientos del NCHRP 1-26 (TRB, 1990) para pavimentos rígidos.

La NCHRP produjo la última guía de diseño de pavimentos con la finalidad de ampliar el objetivo de la investigación teórica, más allá de la etapa de validación y verificación, hacia un procedimiento de diseño más completo bajo el proyecto NCHRP 1-37A, y en este momento conocida como la guía AASHTO Ware Pavement ME Design.

Debido a la naturaleza del problema, no existe un método mecanicista en su totalidad. Las relaciones empíricas siguen siendo requeridas para relacionar la teoría con el desempeño del pavimento, y esa parte aún tiene un gran componente de empirismo.

En el acercamiento empírico-mecanicista, las respuestas del pavimento tales como esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones son calculadas a través del análisis mecanicista, ya sea por la teoría elástica multicapas o el método de elemento finito. Estas respuestas son usadas para relacionarlas con el desempeño del pavimento, a través de análisis empírico (Huang, 2003).

Para cuantificar la distribución de la carga en una estructura de pavimento, ciertas propiedades mecánicas de los materiales se deben conocer, tales como el módulo elástico y la relación de Poisson. Las propiedades físicas de un material son aquellas que nos indican el comportamiento del material según las condiciones en

las que se encuentre, mientras que las propiedades mecánicas hacen alusión a las propiedades intrínsecas de los materiales.

En la metodología empírica, el hacer uso de las propiedades físicas implica un grado de incertidumbre, al suponer que los materiales que se están ensayando en el laboratorio se comportarán de igual manera en el campo.

El acercamiento empírico-mecanicista, está basado en el hecho de que la respuesta de los materiales de la capa de pavimento, dadas ciertas condiciones ambientales y de tránsito, pueden ser predichas con exactitud, el desempeño del pavimento puede ser modelado sin tener que construir la estructura.

Esta metodología facilita la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los deterioros que se puedan presentar y, por ende, aumentar en gran manera la confiabilidad de los diseños.

Las ventajas de aplicar la metodología empírico-mecanicista, radica en que la tendencia es contar con diseños apropiados y con mayor apego a la realidad, así como una mayor certidumbre en el control de los deterioros, para prever fallas y minimizar los deterioros.

Dentro de las consideraciones de este tipo de metodologías se encuentran:

- Los tipos de ejes, llantas, presiones, pesos por eje y los diferentes tipos de cargas.
- Los efectos climáticos y las variaciones modulares de todas las capas.
- Cálculo de las respuestas estructurales combinando el crecimiento del tránsito y las variaciones modulares.

1.2 Tipo de ejes vehiculares

La normativa de pesos y dimensiones de México, Norma NOM-012-SCT-2-2017 considera 26 tipos de vehículos, siendo varios de ellos, combinaciones de los tipos de vehículos de carga que se muestran en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1. Tipos de Vehículos

Clase: Vehículo o Configuración	Nomenclatura
Autobús	B
Camión unitario	C
Camión remolque	C-R
Tractocamión articulado	T-S
Tractocamión doblemente articulado	T-S-R y T-S-S

Para este trabajo se consideraron 8 tipos de vehículos, los cuales son los que anualmente se reportan en la edición anual de Datos Viales de la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, y son los

que aparecen con mayor frecuencia en las carreteras federales: C2, C3, T2-S2, T3-S2, T3-S3, T3-S2-S2, T3-S2-R3 Y T3-S2-R4 (Figura 1.4).

- C2: Camión - 2 ejes.
- C3: Camión - 3 ejes.
- T2-S2: Tractor con Semirremolque - 4 ejes.
- T3-S2: Tractor con Semirremolque - 5 ejes.
- T3-S3: Tractor con Semirremolque - 6 ejes.
- T3-S2-S2: Tractor con Semirremolque y Semiremolque - 7 ejes.
- T3-S2-R3: Tractor con Semirremolque y Remolque - 8 ejes.
- T3-S2-R4: Tractor con Semirremolque y Remolque - 9 ejes

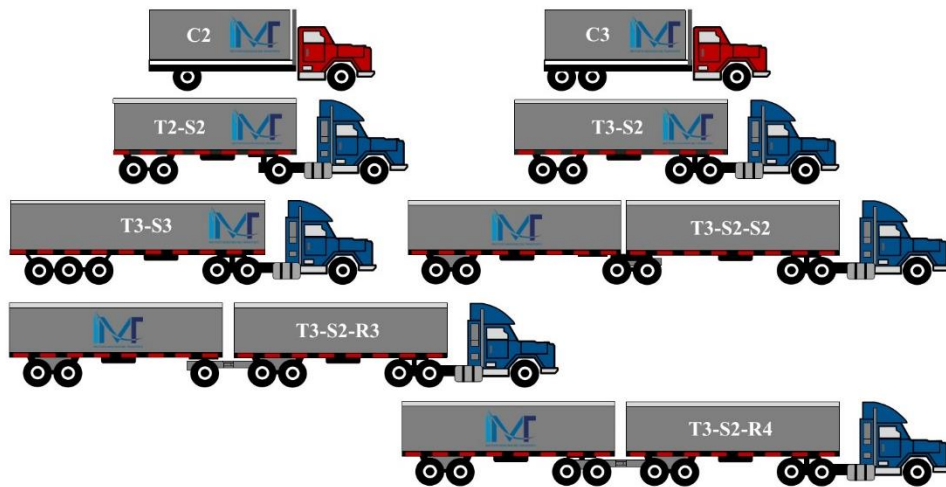


Figura 1.4 Tipos de Vehículos

En la Figura 1.5 se muestran las cuatro configuraciones de ejes consideradas para este trabajo: sencillo, dual, tándem y trídem.

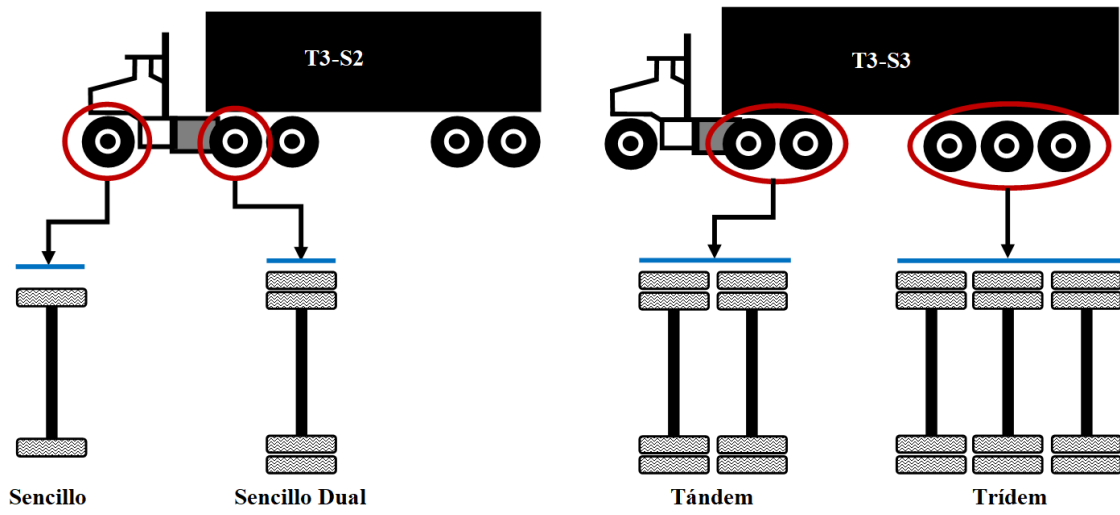


Figura 1.5 Tipo de configuraciones de ejes vehiculares

2. Espectros de carga en México

La confiabilidad de la información de tránsito en el diseño empírico-mecanicista de pavimentos, ha promovido la utilización de la clasificación vehicular y los pesos por eje de carga; en ese sentido, la tecnología de pesadoras dinámicas (WIM) es capaz de proveer ambos tipos de información.

En países como en los Estados Unidos, las pesadoras dinámicas se han utilizado con mayor frecuencia en las últimas décadas, lo anterior debido a la necesidad que existe de un monitoreo efectivo del peso bruto vehicular y los pesos por eje. Existen diversos tipos de estaciones de pesaje en movimiento. En función del elemento de registro de los pesos por eje:

Sensor piezoeléctrico: Consiste en un cable de material piezoeléctrico que está cubierto por una capa de cobre. El sensor está inmerso o colocado sobre la superficie del pavimento, generando una señal eléctrica proporcional a la carga aplicada por las llantas de los vehículos que circulan sobre la superficie del pavimento.

Placa flexible: Consiste en dos plataformas de acero, que se colocan de manera adyacente para cubrir una línea de aproximadamente 3.7 m. Las placas son instrumentadas con medidores de esfuerzo que determinan el peso de los vehículos.

Celda de carga sencilla: Este dispositivo está conformado por dos plataformas adyacentes a lo largo de un carril monitoreado con longitud de aproximadamente 3.7 m. Un sensor de presión hidráulica se instala al centro de cada plataforma para medir la fuerza que las llantas transmiten al pavimento.

2.1 Estudio de pesos y dimensiones

A partir de 1990, la SCT realiza el Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional con la finalidad de tener datos de diferentes rubros del autotransporte de carga, como tipo de vehículo, dimensiones, distancia recorrida, año del vehículo, origen, destino y peso transportado; parte de este estudio consistió en implementar una serie de estaciones para la medición de pesos y dimensiones de los vehículos de carga, sobre las carreteras federales más importantes del país.

Los aforos se realizaron en tramos de carreteras principales de la República Mexicana; las áreas de pesaje se seleccionaron próximas a carreteras con alto nivel de circulación de camiones; se controló el acceso de vehículos seleccionados para pesaje y su posterior regreso al flujo de vehicular.

Los vehículos de carga fueron detenidos a unos 50 metros de una pesadora dinámica. Las brigadas correspondientes se encargaron de medir las dimensiones de los vehículos (ancho, ancho excedente, largo, largo excedente, altura y altura excedente), así como encuestar al conductor respecto a las características del vehículo y la carga transportada (placas, tipo, marca y modelo del vehículo, combustible que utiliza, tipo de producto que transporta y el origen-destino de las mercancías).

Por último, los vehículos de carga circularon sobre la pesadora dinámica, en donde se registraron el peso bruto vehicular (PBV), los pesos por eje y las distancias entre ejes.

En la Tabla 2.1 se muestra un ejemplo de la información obtenida de las estaciones de aforo, donde se presentan los pesos por eje y el peso bruto vehicular de los vehículos encuestados.

Tabla 2.1. Información de peso por eje obtenida de las estaciones de pesaje

<i>Tipo de Vehículo</i>	<i>Peso Total (kg)</i>	<i>Peso Eje 1 (kg)</i>	<i>Peso Eje 2 (kg)</i>	<i>Peso Eje 3 (kg)</i>	<i>Peso Eje 4 (kg)</i>	<i>Peso Eje 5 (kg)</i>	<i>Peso Eje 6 (kg)</i>	<i>Peso Eje 7 (kg)</i>	<i>Peso Eje 8 (kg)</i>	<i>Peso Eje 9 (kg)</i>
T3-S3	37283	4801	7487	8037	5297	6148	5513			
T3-S2-R4	63527	4998	8479	8630	6236	7118	7911	7004	6385	6766
T3-S3	46692	3888	8791	8358	9054	7903	8698			
T3-S2	39438	4818	9447	9074	8255	7844				
T3-S2-R4	81393	3500	9572	10026	9445	9839	10468	8792	10336	9415
T3-S3	28721	4236	4693	5582	4829	4814	4567			
T3-S2-R4	91485	6950	9301	9652	10291	10956	13446	9298	10638	10953
T3-S2-R4	28437	3537	4033	4283	3390	3592	3212	2712	1950	1728
T3-S2-R4	28801	3625	3593	4176	2913	2531	3008	2075	3496	3384
T3-S3	49417	3817	10286	9741	7557	8143	9873			
T3-S2	52014	6618	10678	12371	10735	11612				
T3-S2-R4	40009	3279	4556	3811	5906	5147	4333	4155	4479	4343
T3-S2	14301	2604	3838	2832	2425	2602				
T3-S2-R4	46464	3635	6594	7065	3777	4197	5398	5206	5195	5397
T3-S2	39091	6441	9154	10533	6149	6814				
T3-S3	52384	4414	9913	10741	10074	8435	8807			
T3-S2	44243	4379	8511	7580	10940	12833				
T3-S3	50581	4257	10535	9432	8703	8179	9475			
T3-S2	29444	3997	7075	7080	4939	6353				
T3-S3	49610	4558	9122	9314	9455	9652	7509			
T3-S2-R4	63339	4411	8715	7338	6025	7808	7600	6782	7134	7526

2.2 Espectro de carga

El método de diseño de pavimentos rígidos de la Asociación de Cemento Portland, PCA, reconoció la necesidad de contar con información detallada de los ejes de carga, y ha usado el espectro de carga desde 1966.

Los sistemas de pesadoras dinámicas WIM pueden definir las cargas por ejes de manera continua y almacenar esta información para cada vehículo, tabla 2.1. Con dicha información, es posible obtener la distribución de la carga por tipo de eje y por tipo de vehículo.

La creciente evolución de los modelos de deterioro de pavimentos usado en los diseños de pavimentos mecanicistas, requiere información detallada de los ejes de carga del tránsito vehicular pesado, de tal forma que se pueda aprovechar en su totalidad su capacidad de predicción, bajo la suposición de que se trata de una carga realista, aplicada al sistema estructural multicapa de cualquier pavimento.

La ventaja del uso del espectro de carga, primordialmente, es que utiliza la información del tránsito directamente, sin convertir el flujo de tránsito mixto a un número que depende del deterioro, tipo de pavimento y espesor. Los espectros de carga, proporcionan información real de los ejes de carga que transitan por una carretera.

El espectro de carga se define como:

“La distribución normalizada de la carga de una configuración de eje dado (sencillo, dual, tándem, trídem), de un cierto tipo de vehículo o de un conjunto de ellos durante un periodo de tiempo establecido”.

El uso de los espectros permite estimar los efectos del tránsito actual sobre el pavimento, y utilizarlos de manera directa en el análisis de esfuerzos y deformaciones unitarias. La Figura 2.1 es un ejemplo de un espectro de carga de un eje tándem obtenido de una de las estaciones de pesaje.

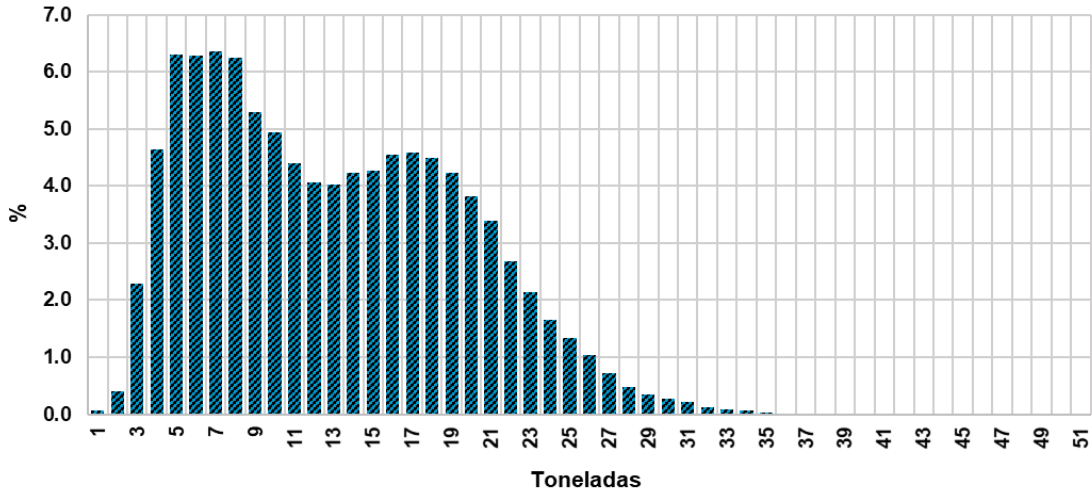


Figura 2.1 Espectro de carga característico de un eje tándem

La Figura 2.2 muestra un mapa de la república mexicana con las ubicaciones de las estaciones de pesaje, entre los años 2005 y 2017. La información previa al año 2005 no se considera ya que, no era consistente y continua como estos últimos 13 años. Este periodo analizado considera 200 estaciones de pesaje instaladas en diferentes ubicaciones de la red nacional de carreteras.



Figura 2.2 Estaciones de pesaje en la red nacional de carreteras

2.3 Factor de Espectro de Carga (LSF)

El daño que sufre un pavimento durante su uso, es un proceso acumulativo relacionado directamente con la intensidad y frecuencia de las cargas del tránsito. La intensidad se refiere a la magnitud de la carga que se aplica a través de las llantas, y la frecuencia al número de repeticiones de esa carga sobre una misma zona del pavimento.

En la metodología tradicional, ambos se incluyen en un solo término ESAL's. Al obtener los espectros de carga, es posible considerar estos dos aspectos de manera independiente.

La comparación entre diferentes distribuciones de ejes de carga es importante porque muchos proyectos no cuentan con información in situ de WIM y tal vez necesiten hacer uso de espectros de carga de sitios adyacentes. En tales condiciones solo aquellos espectros de carga que producen un daño cercano o igual a la estructura del pavimento deberán ser adoptados.

Para extraer solo las contribuciones relacionadas con la carga de un espectro de carga, la ecuación 2.1 que representa el cálculo de los ESAL's puede ser reducida a un factor de espectro de carga (LSF) si el número total de repeticiones (N) de ejes es reducido a la unidad (Ecuación 2.2)

$$ESAL's = \left(\frac{N}{L_s^4}\right) \sum (Xr)^4 (Qr_i) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$LSF = \left(\frac{1}{L_s^4}\right) \sum (Xr)^4 (Qr_i) t \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

N= Número total de ejes

Ls = Carga estándar (sencillo =8.2 ton, tándem = 15 ton y trídem = 23 ton)

Xr = Carga dada (Cualquiera)

Qr = Contribución del espectro de carga correspondiente a Xr

t = Ancho de clase

Los ESAL's son una combinación de las repeticiones de ejes y las características de carga, mientras que LSF extrae únicamente la información relacionada con la carga. Tanto los ESAL's como el LSF pueden obtenerse a partir del espectro de carga. La implicación de esta diferencia es muy útil dado que es posible investigar las características de carga por separado de un espectro de carga. Lo anterior se puede observar si se considera el número de repeticiones como una variable que depende del número de datos encuestados o registrados en las pesadoras dinámicas, mientras que al normalizar el número de repeticiones a 1 se cuenta con

el daño efectuado por la carga. Si el espectro de carga no varía sustancialmente durante los meses del año o inclusive durante varios años, el considerar su daño potencial en relación a la carga y no a las repeticiones resulta muy práctico.

A fin de analizar de manera rápida, combinar todas las estaciones de pesaje, así como obtener sus potenciales de daño y los valores representativos de los espectros de carga, se propuso una herramienta de análisis que se describe en el Capítulo 3.

3. Herramienta para el cálculo de espectros de carga

Con la finalidad de procesar información de manera rápida proveniente de las estaciones de pesaje dinámico, se desarrolló una herramienta informática con algoritmos diseñados para concentrar la información recabada de las estaciones de pesaje, que han sido y serán instaladas en diferentes localizaciones geográficas del territorio nacional, además de contar con una serie de algoritmos que permiten al usuario, calcular de manera automática los espectros de carga, localización geográfica de las estaciones instaladas, obtener el porcentaje de vehículos con sobrecarga, agregar y/o eliminar estaciones de la base de datos, generar espectros de carga con diferentes escenarios de análisis, cuantificar el potencial de daño conocido como “Factor de Espectro de Carga” y el más importante, generar datos e información que servirán como insumo para la herramienta de diseño de pavimentos conocida como IMT-PAVE 3.0.



Figura 3.1 Herramienta informática para la obtención y gestión de espectros de carga

3.1 Normalización de la información

Dada la experiencia en el manejo de la información contenida en las bases de datos analizadas, es necesario estandarizar la recolección y el orden de la información para facilitar su procesamiento; puesto que dicha información puede ser reportada con una estructura diferente o en diferentes tipos de archivo, es necesario normalizar la información con el objetivo de facilitar el procesamiento de los datos contenidos, y que la herramienta logre procesar e interpretar los datos de manera adecuada, por tal motivo, se debe asegurar que la información recolectada tenga el formato, estructura y tipo de archivo estandarizados.

El origen de los datos puede ser entregado en cualquier tipo de archivo Excel(*.xls), Access(*.mdb), separado por comas(*.csv), etc. sin embargo, para la herramienta de análisis los datos deben estar en formato de Texto Plano Delimitado por tabulaciones (*.txt)

Tabla 3.1 Formato requerido en la información para la obtención de los espectros de carga

Número de Estación	Tipo de Vehículo	Peso Total	E01	E02	E03	E04	E05	E06	E07	E08	E09
E001	C2	5348	3175	2173							
E001	C3	3999	1536	1267	1196						
E001	B2										
E001	T3-S2	42067	4838	6976	6354	11426	12473				
E001	T3-S3	12032	2322	2568	3038	1548	1349	1207			
E001	T3-S2-R4	17663	1472	1882	1976	1708	1764	2631	2598	1743	1889
E001	T3-S3	13053	2473	2580	2747	1772	1764	1717			
E001	T3-S2-R4	16344	1347	2324	2507	1949	1718	1551	1202	2185	1561
E001	C3	14520	4885	4825	4810						

Nota 1. El archivo deberá contener exactamente el número de columnas especificado en la Tabla 3.1.

Nota 2. El peso deberá estar expresado en kgf (kilogramos-fuerza).

En la Tabla 3.1 se muestra el orden y formato que deben tener los datos antes del análisis en donde:

Número de estación: Identificador de la estación

Tipo de Vehículo: Clasificación de vehículo (NOM-012-SCT-2-2017)

Peso total: Suma de E01+E02+E03+E04+E05+E06+E07+E08+E09 (kgf)

E01= Eje 1(Peso en kgf)

E02= Eje 2(Peso en kgf)

.....

E09= Eje 9(Peso en kgf)

3.2 Procesamiento de datos

La herramienta cuenta con una serie de procedimientos y algoritmos que permiten usar, administrar, procesar y realizar diferentes operaciones, así como, tratar la información de acuerdo a las necesidades requeridas. En los siguientes apartados se describen de manera particular las funciones de la herramienta.

3.2.1 Obtención de espectros de carga

La herramienta cuenta con un algoritmo diseñado para la obtención de espectros de carga, que permite realizar el análisis de información de manera automatizada y generar los espectros de carga, para los cuatro tipos de ejes usados para este trabajo (sencillo, sencillo Dual, tándem y trídem).



Figura 3.2 Acceso en la herramienta para el análisis de datos de una estación de pesaje

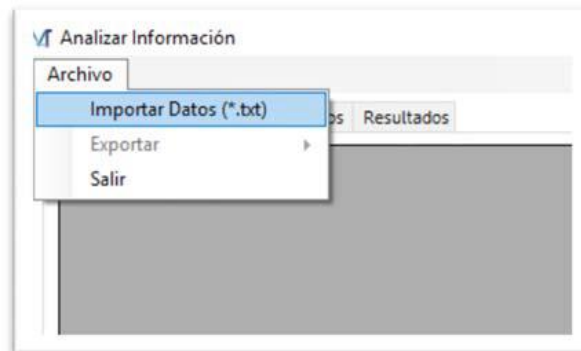


Figura 3.3 Selección para importar los datos

Al cargar la información es importante asegurar que los datos cumplan con el formato especificado para realizar el análisis (Tabla 3.1).

Al momento de seleccionar la ruta del archivo que contiene la información, de manera automática el software ejecuta el procedimiento de depuración de datos. El algoritmo desarrollado identifica y elimina aquellas filas que no contengan información, elimina la fila en el caso de que alguno de los valores asignados al peso de ejes contenga un valor negativo y realiza una reclasificación de vehículos de la siguiente manera:

Caso 1: Si la base de datos contiene la clasificación vehicular de acuerdo a la normativa vigente para pesos y dimensiones (NOM-012-2017-2), el algoritmo

obtendrá de manera automática el espectro de carga con dichas configuraciones establecidas.

Caso 2: La base de datos no contiene una clasificación vehicular o la clasificación vehicular no está realizada en base a la normativa (NOM-012-2017-2), el algoritmo le asignará una clasificación vehicular según el número de ejes de dicho vehículo siguiendo los parámetros siguientes:

- ⊕ “Sin Clasificar”: los vehículos cuyos valores de ejes E01 a E09 son ceros o nulos o cuando E01 contiene valor mayor a cero y E02 a E09 son 0 o vacío.
- ⊕ “C2”: vehículos con valores mayores a cero en los ejes E01 y E02.
- ⊕ “C3”: vehículos con valores mayores a cero en los ejes E01 al E03
- ⊕ “T2-S2”: vehículos con valores mayores a cero en los ejes E01 al E04
- ⊕ “T3-S2”: vehículos con valores mayores a cero en los ejes E01 al E05
- ⊕ “T3-S3”: vehículos con valores mayores a cero en los ejes E01 al E06
- ⊕ “T3-S2-S2”: vehículos con valores mayores a cero en los ejes E01 al E07
- ⊕ “T3-S2-R3”: vehículos con valores mayores a cero en los ejes E01 al E08
- ⊕ “T3-S2-R4”: vehículos con valores mayores a cero en los ejes E01 al E09

Al finalizar el procesamiento y análisis de la información la herramienta mostrará un mensaje como el de la Figura 3.4. El cual muestra el número total de datos cargados del archivo, el número de datos filtrados y adecuados para el análisis, así como el número de datos con valores negativos que pudieron haberse encontrado durante el procesamiento.



Figura 3.4 Mensaje de validación y finalización del procesamiento de información

Al finalizar el procesamiento de la información los resultados serán los siguientes:

Datos originales: Tabla donde se muestran en su totalidad los datos del archivo seleccionado.

Datos procesados: Tabla donde se muestran los datos filtrados, clasificados adecuados para el cálculo de espectro de carga.

Resultados: Contiene una tabla donde se muestra información de los intervalos de carga, marca de clase, el número de muestras encontradas dentro del intervalo para cada tipo de eje considerado en este trabajo (sencillo, sencillo dual, tándem y

trídem), el porcentaje que representa dicha muestra y cuatro histogramas que representa el espectro de carga por cada tipo de eje, ver Figura 3.5 y Figura 3.6.

Análisis de Información

Archivo

Datos Originales Datos Procesados Resultados Directorio:C:\Users\Federico Castro\Desktop\Ejemplo - co

Resultados de Espectro Gráfica Sencillo Gráfica Dual Gráfica Tandem Gráfica Tridem

	Límite inferior	Marca de clase	Límite superior	Sencillo	Dual	Tándem	Tridem	% Sencillo	% Dual	% Tándem	% Tridem
▶	0	0.5	1	3	3	0	0	0.2510	0.4267	0.0000	0.0000
	1	1.5	2	308	137	2	0	25.7741	19.4879	0.2837	0.0000
	2	2.5	3	409	265	39	0	34.2259	37.6956	5.5319	0.0000
	3	3.5	4	138	77	127	0	11.5481	10.9531	18.0142	0.0000
	4	4.5	5	128	57	60	1	10.7113	8.1081	8.5106	2.2222
	5	5.5	6	83	46	65	0	6.9456	6.5424	9.7199	20.0000

Figura 3.5 Resultados del análisis de información

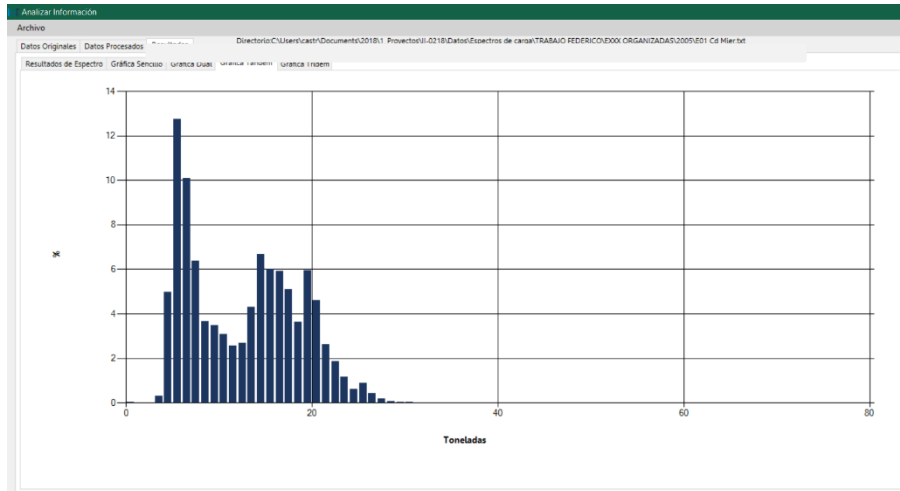


Figura 3.6. Ejemplo de histograma resultante (eje tándem)

Además de visualizar los espectros de los datos analizados, el usuario tiene la opción de guardar los resultados del análisis para futuras consultas o realizar diferentes análisis dentro de la misma herramienta tales como: combinar el espectro resultante con el de otras estaciones, calcular el % de vehículos con sobre carga o calcular parámetros para ser usados en la herramienta de diseño IMT-PAVE 3.0, etc.

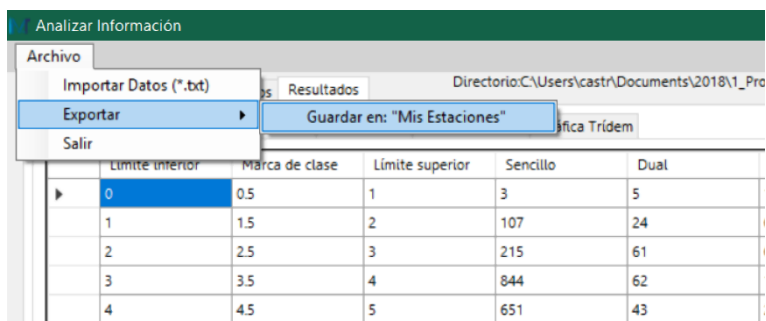


Figura 3.7 Guarda información resultado del análisis

3.2.2 Combinación de espectros de carga

Uno de los algoritmos integrados a la herramienta, es la posibilidad de combinar espectros de carga y la posibilidad de analizar información para diferentes escenarios; Los espectros pueden ser agrupados por corredor carretero, año, estado, todas las estaciones y de modo libre. Esto permite que la información pueda ser usada de manera particular, es decir, se pueden generar espectros de una zona, un año o un corredor en particular de manera rápida.

En la Figura 3.8 se muestra la herramienta desarrollada para la combinación de los espectros (filtrado por corredor carretero y tabla que contiene los resultados de la combinación).

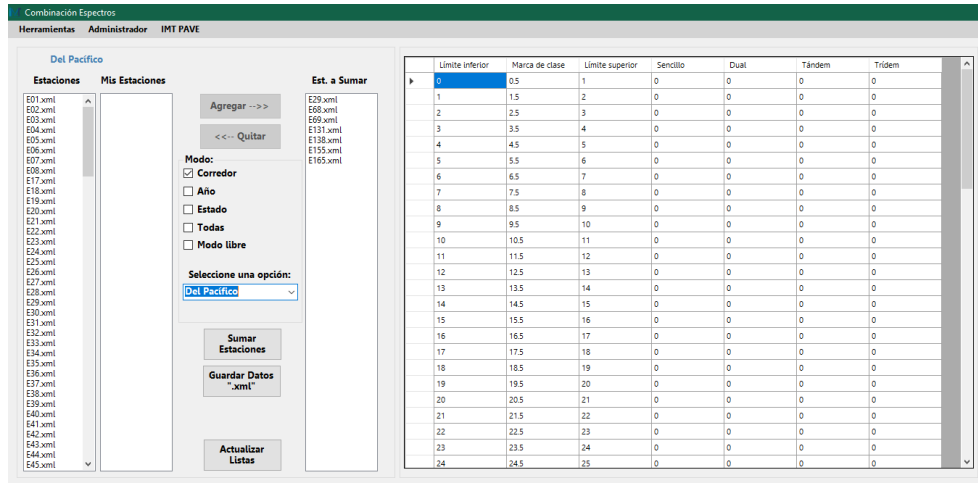


Figura 3.8 Interfaz de usuario para la combinación de espectros

Al igual que el apartado para el análisis de datos, este apartado integra la opción de guardar el resultado con fines de análisis con los diferentes algoritmos integrados a la herramienta. (Figura 3.9).

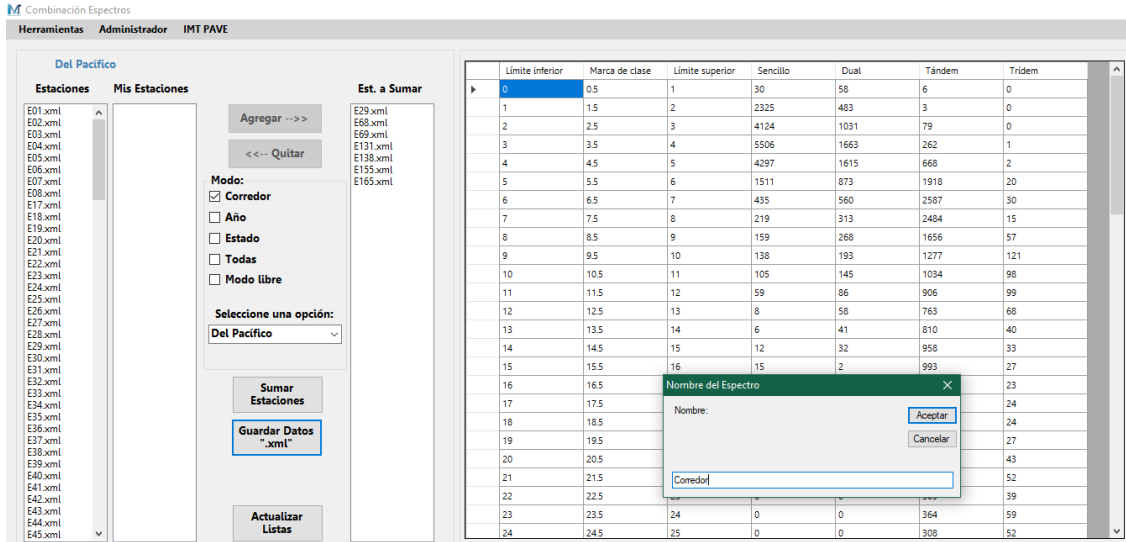


Figura 3.9 Guardar combinación de espectros

3.2.3 Porcentaje de sobrecarga por tipo de eje

Al analizar la información de espectros de carga y de las estaciones de pesaje instaladas, es de particular interés conocer el porcentaje de vehículos que superan un límite de carga (carga legal), para ello se integró a la herramienta un algoritmo que permite al usuario establecer un límite de carga para cada tipo de eje, y obtener de manera automática el porcentaje de vehículos que superan dicho límite. Para realizar este tipo de análisis el espectro deberá estar guardado en la herramienta, de lo contrario deberemos analizar los datos y guardar los resultados para posteriormente poder calcular el porcentaje de vehículos que exceden el límite de carga establecido (Figura 3.10).

Para ejecutar el análisis basta con seleccionar el espectro deseado y establecer el límite de carga permitido para cada tipo de eje, de inicio la herramienta establece un límite de 6 toneladas para el eje sencillo, 12 toneladas para el eje dual, 21 toneladas para el eje tándem y 26 toneladas para el eje tridem, sin embargo, este límite puede ser modificado por el usuario de acuerdo al escenario bajo el cual se esté analizando la información.

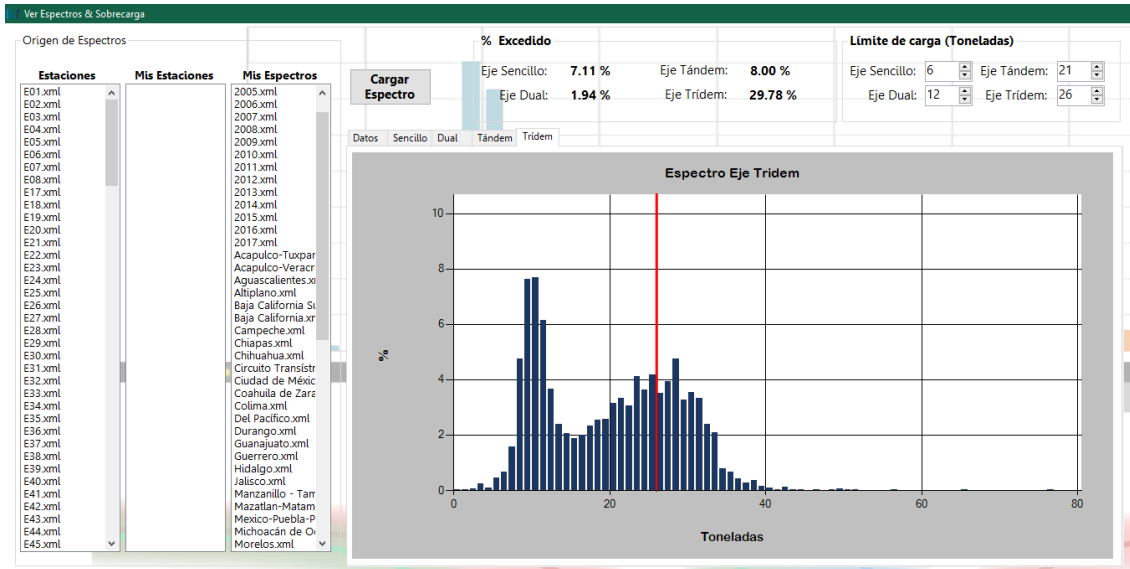


Figura 3.10 Porcentaje de vehículos con sobrecarga

3.2.4 Localización geográfica

Una parte importante al trabajar con la información de las estaciones de pesaje, es ubicar y obtener de manera rápida la localización geográfica del sitio en estudio, para ello la herramienta cuenta con un mapa, en el cual se puede localizar de manera rápida la estación de interés, así como filtrar las estaciones por corredor carretero, año de estudio, número de estación, estado o mostrar la localización de todas las estaciones en la base de datos (Figura 3.11).



Figura 3.11. Localización geográfica de las estaciones

El mapa digital nos permite obtener la ubicación geográfica de las estaciones; de esta manera se asegura que el usuario pueda localizar de manera rápida las estaciones de interés, además al colocar el cursor sobre la estación de interés, se muestran datos como el nombre, número, estado, carretera, corredor, tramo carretero, disponibilidad de datos y coordenadas geográficas (Figura 3.12).



Figura 3.12. Ejemplo de información de la estación

3.2.5 Administrar estaciones de pesaje y corredores carreteros.

Debido a que, en un futuro, con toda seguridad, se realizarán nuevos estudios de pesaje y se contará con datos de nuevas estaciones instaladas en la red nacional de carreteras, es importante que la herramienta permita agregar nuevas estaciones a la base de datos, por ello la herramienta integra un algoritmo de gestión con el cual permite administrar los corredores carreteros y las nuevas estaciones de pesaje.

El algoritmo de gestión permite agregar nuevas estaciones con la información importante de cada una de ellas, o bien eliminar estaciones y su información (Figura 3.13).

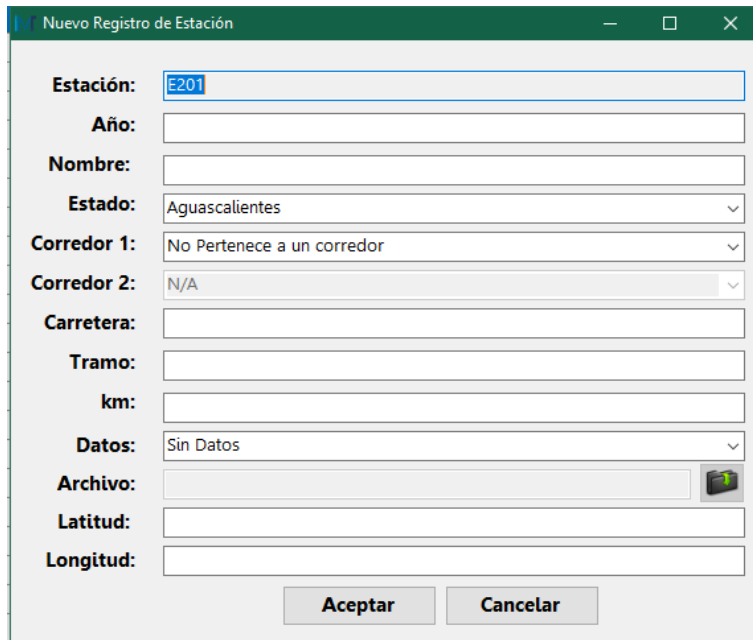
Lista de Estaciones Registradas						
Archivo						
Estación		Agregar registro		Estado	NumCorredor	Num2Corredor
Salir		Borrar registro seleccionado				Corredor
E02	2005	Herradura	28	Tamaulipas	0	N/A
E03	2005	Naval	28	Tamaulipas	4	N/A
E04	2005	La colorada	7	Coahuila de Zaragoza	0	N/A

Figura 3.13 Administrador de estaciones de pesaje

Al agregar una nueva estación, se le solicitará la siguiente información: Año de estudio, nombre de la estación, estado donde se realizó el estudio, si pertenece a alguno de los corredores carreteros, carretera donde se instaló, tramo, cadenamamiento, si se cuenta con dato para el análisis y coordenadas geográficas.

El administrador nos permite dar de alta estaciones, incluso cuando no se cuenta con información para generar los espectros de carga; para ello se tiene una opción en la cual es posible indicar si se cuenta o no con dicha información. En caso de contar con los datos para generar los espectros, se debe seleccionar el archivo que contiene la información con el formato y tipo de archivo especificado en el apartado 3.1.

Al aceptar dar de alta la nueva estación, automáticamente se carga toda la información a la base de datos y estará disponible para analizar dicha información con los diferentes algoritmos integrados a la herramienta (Figura 3.14).



The image shows a software dialog box titled "Nuevo Registro de Estación". It contains several input fields and dropdown menus. The "Estación" field is filled with "E201". The "Estado" dropdown is set to "Aguascalientes". The "Corredor 1" dropdown is set to "No Pertenece a un corredor". The "Corredor 2" dropdown is set to "N/A". The "Datos" dropdown is set to "Sin Datos". There are "Aceptar" and "Cancelar" buttons at the bottom of the dialog.

Figura 3.14 Datos solicitados para agregar una estación

Al igual que las estaciones los corredores carreteros también podemos administrarlos, es decir es posible agregar o quitar elementos de la base de datos.

Si se desea agregar un nuevo corredor se solicitará el nombre del corredor y un archivo con extensión "*.gpx" el cual deberá contener las coordenadas de la ruta del corredor a dar de alta (Figura 3.15).

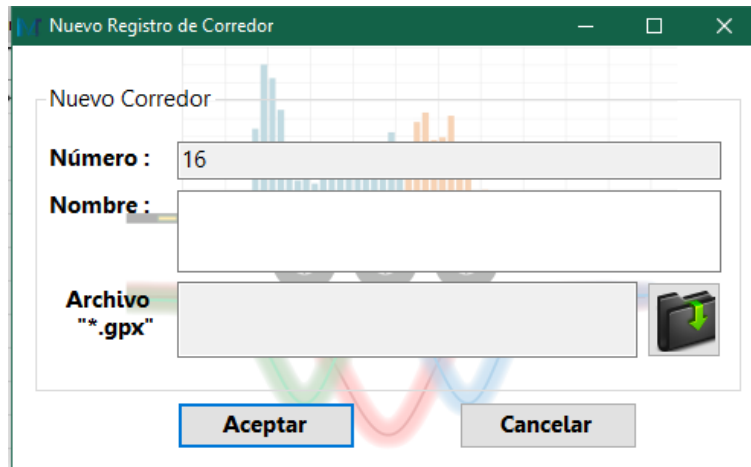


Figura 3.15 Información para agregar un nuevo corredor carretero

Para el caso de los espectros que fueron resultado de la combinación de varios espectros, pueden ser administrados, mantenerse en la herramienta o ser eliminados cuando ya no sean de utilidad (Figura 3.16).



Figura 3.16 Administrador de estaciones y combinación de espectros

3.2.6 Datos para el IMT-PAVE 3.0

El IMT-PAVE es una herramienta de diseño de pavimentos que utiliza una metodología empírico-mecanicista que pone énfasis en el concepto de *Espectro de Carga* para relacionarlo con el de *Espectro de Daño*, a través del análisis de esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimento y su correlación con los principales tipos de deterioros.

En la herramienta de Espectros de Carga, se integra un algoritmo de cálculo para la obtención de parámetros que sirven como insumo para la herramienta de diseño IMT-PAVE 3.0, ya que éste se alimenta de datos de estaciones de pesaje y una de las principales razones de ello es mejorar en el afán de representar la realidad de las cargas que circulan por el país, de ahí uno de sus pilares principales.

El IMT-PAVE 3.0 requiere parámetros para diseño que se obtienen bajo diferentes escenarios de análisis según el interés particular de usuario; lo anterior debido a que pueden estar referidos a un año en particular, alguna zona geográfica, corredor carretero o puntos específicos de análisis.

El software de diseño IMT-PAVE emplea a los espectros de carga como insumo para el diseño, sin embargo, es laborioso y complicado manejar tantos valores como intervalos de carga que se estén utilizando; por ello, se utiliza una expresión matemática que describa el comportamiento del espectro.

Para simplificar la forma de describir el comportamiento de un espectro, se utiliza una distribución logarítmica normalizada, basada en un método de caracterización del tránsito desarrollado en la Universidad de Texas en Austin, y cuya función matemática es:

$$f(x, m, \sigma, W) = \sum_{k=1}^k \frac{W_k}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-m_k}{\sigma_k}\right)^2\right)} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Sin embargo, para describir el comportamiento de algunos espectros no es suficiente con una función logarítmica normalizada, se requiere de una función logarítmica normalizada multimodal, para este caso se implementó una función logarítmica normalizada trimodal, cuya expresión es la siguiente:

$$f(x) = \frac{W_1}{x\sigma_1\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} + \frac{W_2}{x\sigma_2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2} + \frac{W_3}{x\sigma_3\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu_3}{\sigma_3}\right)^2}$$

(Ecuación 3.2)

Aplicando la función trimodal se puede describir un espectro con 9 valores, 3 proporciones (W), 3 desviaciones (σ) y 3 medias (μ). Por lo tanto, considerando que se tiene que expresar un espectro por cada tipo de eje, se requieren 36 valores para describir en su totalidad el comportamiento de los espectros.

Es necesario encontrar los valores de las proporciones, medias y desviaciones que describan el espectro de interés de manera precisa para que dicho espectro pueda ser usado en el diseño de pavimentos con el IMT-PAVE 3.0.

Para encontrar tales valores, se integró a la herramienta un algoritmo automatizado que permite obtener los parámetros que describen el espectro de carga; para ello se deben establecer condiciones iniciales mediante el uso de controles, botones y barras deslizantes. Una vez establecidas las condiciones iniciales, el algoritmo se encarga de obtener de manera automática los valores de la función trimodal, asegurando que sea lo más parecido al espectro real, ver Figura 3.17.

Una vez calculados los parámetros, el usuario puede guardar los resultados en un archivo de Texto (*.txt) el cual encontrara los valores que describen el espectro de cada tipo de eje.

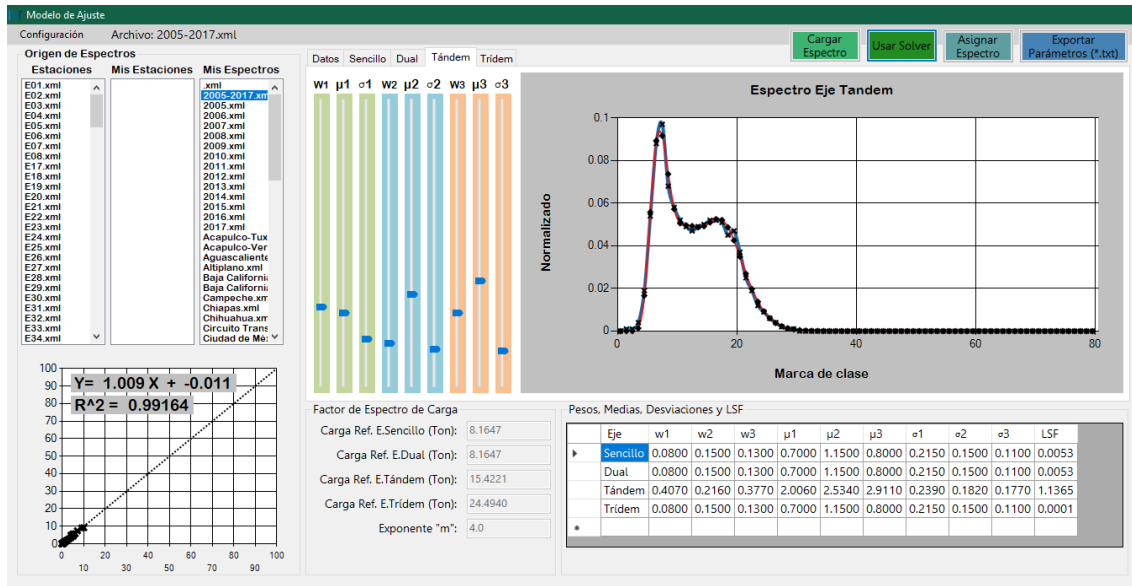


Figura 3.17 Cálculo de parámetros para IMT-PAVE 3.0

3.2.7 Cálculo del Factor de Espectro de Carga (LSF)

El Factor de Espectro de Carga conocido como LSF es un parámetro que cuantifica el potencial de daño de un espectro, como se mencionó en el capítulo anterior. Este espectro se calcula bajo la siguiente expresión matemática:

$$LSF = \sum_{i=1}^n f_i * \left(\frac{x_i}{L_s}\right)^m \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Donde: LSF= Factor de Espectro de Carga

I = Número total de intervalos del espectro

- i = Numero de intervalo
- x_i = Marca de clase
- L_s = Carga estándar para el tipo de eje.
- m = Orden
- f_i = Frecuencia normalizada

El cálculo del LSF se realiza de manera automática al modificar la forma del espectro, usando como parámetros $m=4$, carga estándar eje sencillo= 8.1647 Toneladas, carga estándar eje dual= 8.1647 Toneladas, carga estándar eje tándem 15.4221 toneladas y carga estándar para el eje trídem = 24.4940 ton.

Los parámetros con los cuales se realiza el cálculo pueden ser modificados por el usuario según el escenario de análisis (Figura 3.18).

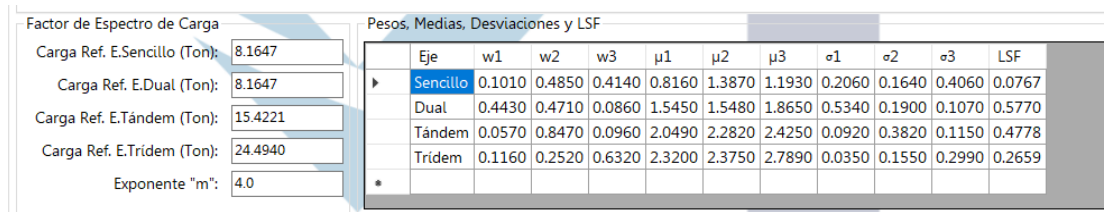


Figura 3.18 Proporciones, Medias, Desviaciones y LSF

Al igual que los pesos o proporciones, medias y desviaciones el LSF se presenta de manera visible en todo momento en una tabla. Al guardar los datos para el uso en el IMT-PAVE, también se incluye el LSF, con lo cual el usuario tiene en un solo archivo los parámetros necesarios para ser usados en el IMT-PAVE.

Esta simplificación resulta muy conveniente, ya que de una muestra de miles de datos que pueden generar un espectro de carga, toda la información relacionada con su forma y sus cargas se representan en 36 valores, dicho de otra forma, todo el expediente del tránsito de un punto medido, puede simplificarse a estos valores.

4. Análisis de resultados

Al poder analizar la información combinando las cargas del autotransporte bajo el criterio que se desee analizar, abre la posibilidad de contar con diferentes casos de análisis. Para este proyecto, se muestran a continuación los análisis realizados bajo cuatro criterios distintos, por corredor carretero, por año, por estado y por regiones geo-económicas, cabe destacar que las opciones de combinación son mucho mayores.

La distribución de los ejes carreteros del país se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Quince corredores principales de la red nacional de carreteras

Los espectros de carga, como ya se ha mencionado, son el resultado de procesar los pesos por eje, a partir de la información recolectada por las estaciones de pesaje instaladas en diferentes ubicaciones del país. Dichos espectros tienen la finalidad de ser utilizados como insumo a la herramienta de diseño IMT PAVE 3.0. El conocer qué espectro utilizar y bajo qué condiciones, es una cuestión que depende principalmente del tipo de diseño que se va a utilizar, de si se parece a la ubicación geográfica de la estación de pesaje, del tipo de pavimento que se va a diseñar y de las condiciones de carga consideradas.

Una vez procesados los espectros de carga para aquellas estaciones que presentan cierta calidad en la información, se ha observado que existe una gran variabilidad en las formas, cargas máximas y diferencias respecto a las cargas máximas establecidas en el reglamento federal de pesos y dimensiones, es decir, se aprecian diferentes escenarios de carga que deben ser comparados entre sí; sin embargo utilizar el Factor del Espectro de Carga (LSF) como un valor que nos ayude a identificar aquellos espectros que tiene un alto nivel de carga y que son potencialmente dañinos para el pavimento, permite comparar de manera sencilla y rápida los distintos escenarios. Una ventaja importante del uso del espectro de carga es observar qué porcentaje de la carga excede el límite legal propuesto por las autoridades, y qué valores del LSF se asocian tanto a los espectros de carga que cumplen y como a los que no cumplen con el límite legal.

En el presente estudio se tomaron en cuenta las cargas legales para los cuatro tipos de ejes principales (sencillo, dual, tándem, trídem) es necesario mencionar que los límites legales dependen del tipo de vehículo y del tipo de camino, pero para fines prácticos se tomó un valor único, como se describirá posteriormente.

Se consideraron todos los espectros de carga agrupados en año de estudio, estado, corredor carretero al que pertenecen y zona económica del país; se obtuvieron parámetros de ajuste de los espectros de carga, así como valores del LSF con una potencia de cuatro. Se decidió tomar el valor de la cuarta potencia en cierto sentido histórico por la relación que existe entre el daño al pavimento cuantificado con el daño unitario contra una carga de referencia.

Como se ha definido, el espectro de carga es la distribución normalizada de la carga de un cierto tipo de eje (sencillo, dual, tándem, trídem). Lo anterior implica que la suma total de cada contribución del espectro de carga debe ser equivalente al 100 %. De la Figura 4.2 a la Figura 4.9 se muestran los espectros de carga para el eje sencillo, eje dual, eje tándem y eje trídem, para ejemplificar dos estaciones del país. La línea vertical representa el límite de carga por tipo de eje en toneladas.

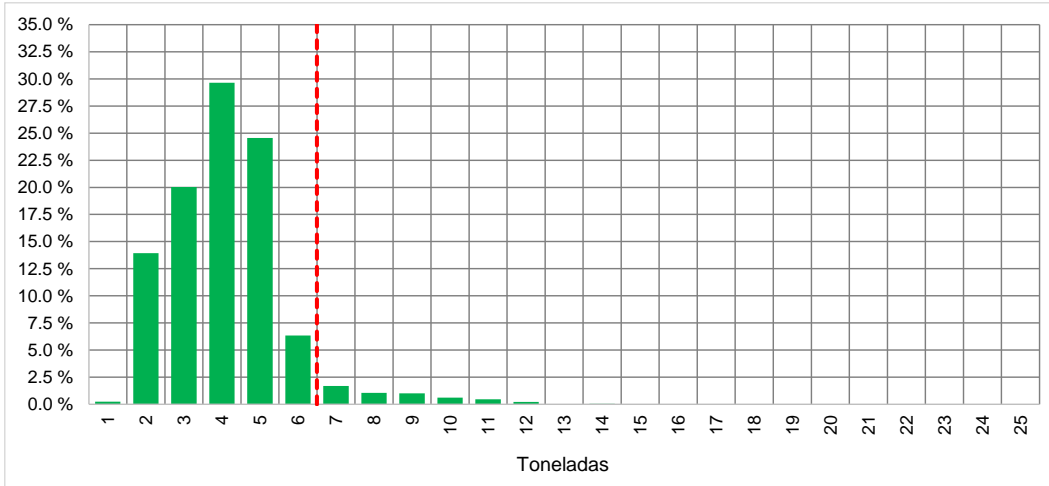


Figura 4.2 Espectro de carga y límite legal para el eje sencillo de la estación E23

Fuente: Elaboración propia.

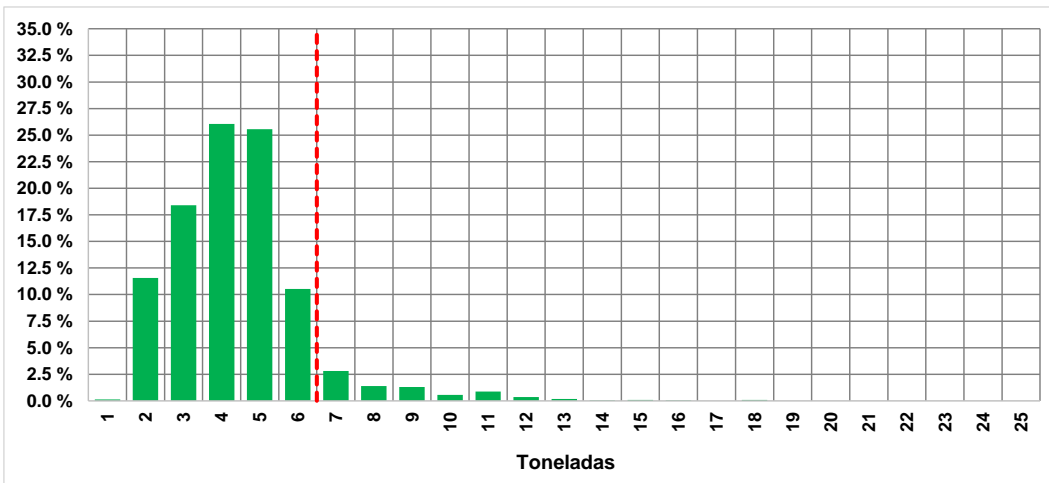


Figura 4.3 Espectro de carga y límite legal para el eje sencillo de la estación E65

Fuente: Elaboración propia.

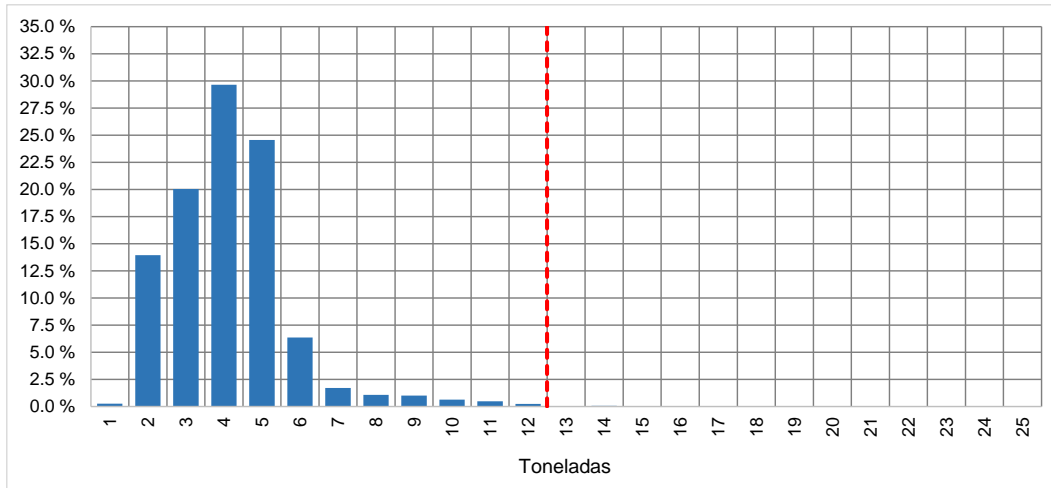


Figura 4.4 Espectro de carga y límite legal para el eje dual de la estación E23

Fuente: Elaboración propia.

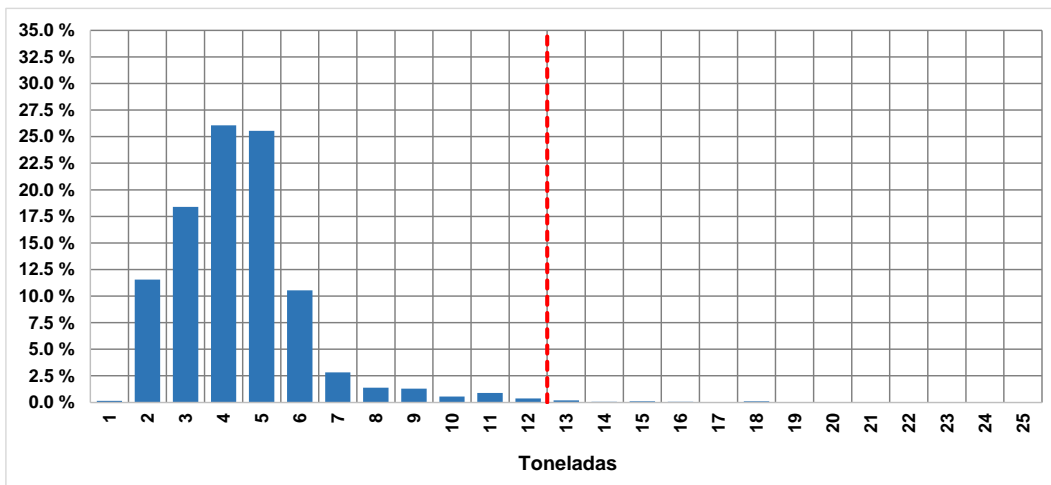


Figura 4.5 Espectro de carga y límite legal para el eje dual de la estación E65

Fuente: Elaboración propia.

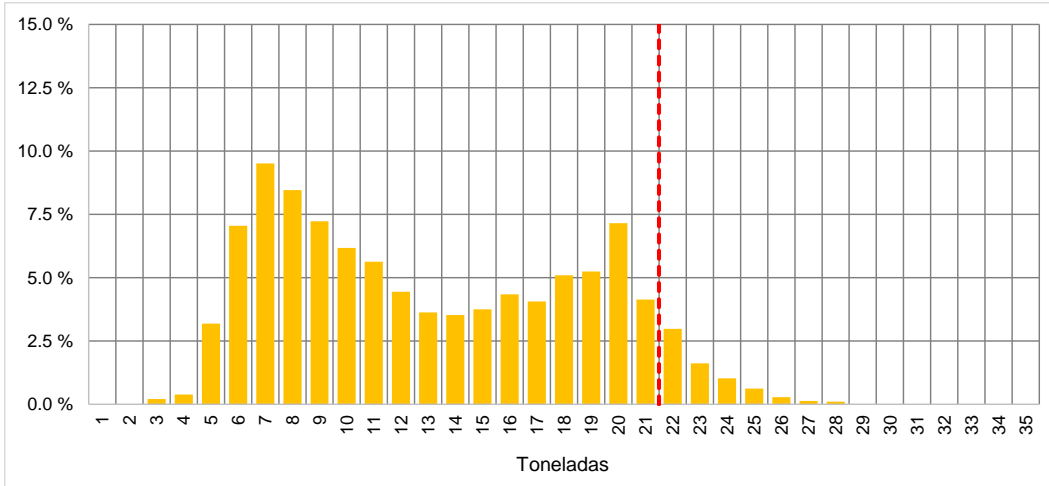


Figura 4.6 Espectro de carga y límite legal de carga para el eje tándem de la estación E23

Fuente: Elaboración propia.

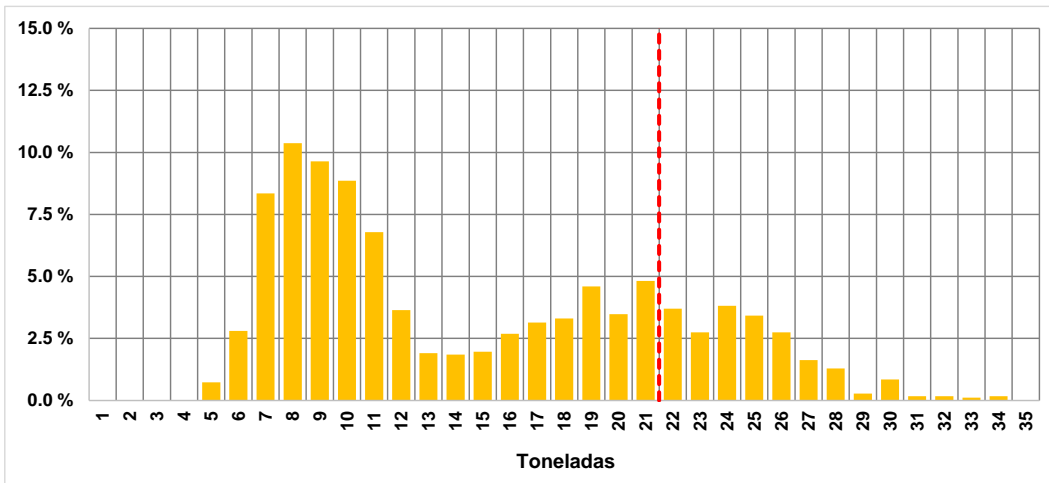


Figura 4.7 Espectro de carga y límite legal de carga para el eje tándem de la estación E65

Fuente: Elaboración propia.

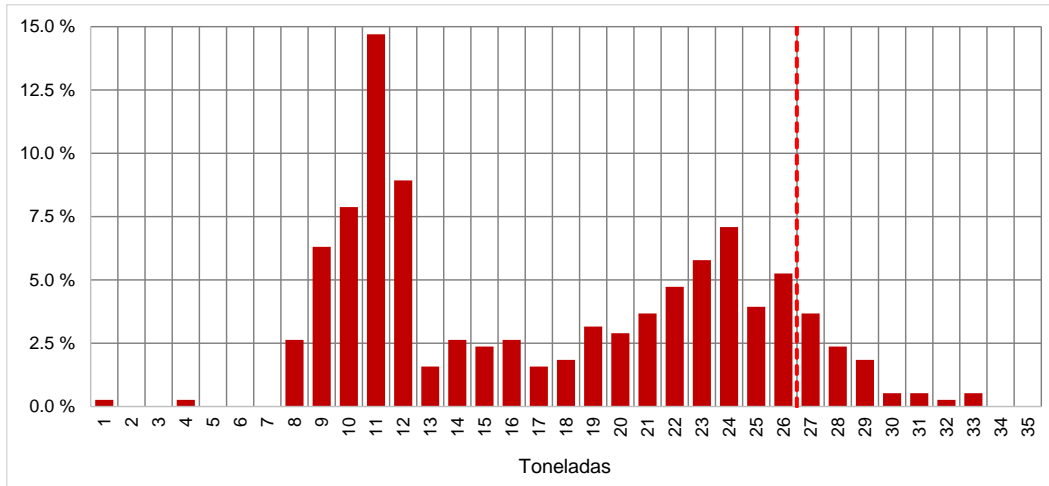


Figura 4.8 Espectro de carga y límite legal para el eje tándem de la estación E23

Fuente: Elaboración propia.

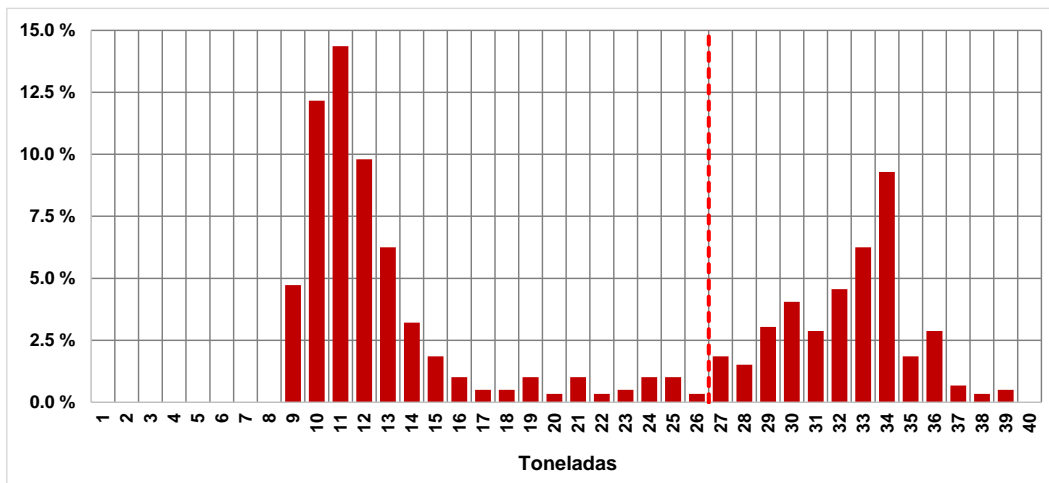


Figura 4.9 Espectro de carga y límite legal para el eje tándem de la estación E65

Fuente: Elaboración propia.

Los límites máximos de carga permitidos por la normativa mexicana, se establecen según el tipo de camino a transitar; debido a estas consideraciones, para este trabajo y con la finalidad de análisis, se consideraron los límites máximos que se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Límites legales de ejes vehiculares

Tipo de eje	Peso límite legal (Ton)
Sencillo	6
Sencillo dual	12
Tándem	21
Trídem	26

Fuente: Pesos y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal, (2017).

4.1 Análisis por tipo de eje

Como se mencionó anteriormente, se analizaron los cuatro tipos de ejes: sencillo, sencillo dual, tándem, trídem, sin considerar el tipo de vehículo, es decir se unieron en el análisis todos los ejes sencillos y todos los ejes tándem. Por ejemplo, al usar los espectros de carga del eje sencillo, estos representan la suma de los ejes sencillos de los 8 tipos de vehículos analizados: C2, C3, T2-S2, T3-S2, T3-S3, T3-S2-S2, T3-S2-R3 Y T3-S2-R4.

En el estudio se obtuvo el Factor de Espectro de Carga para los cuatro tipos de ejes (sencillo, dual, tándem, trídem), considerando los 200 puntos de estudio o estaciones de pesaje entre el año 2005 y 2017 que fueron instalados en todo el país. El análisis de la información recolectada fue analizado teniendo en cuenta, los corredores carreteros, Tabla 4.2, las regiones económicas, Tabla 4.3 y los estados que integran el País, Tabla 4.4.

Tabla 4.2 Corredores carreteros

1	México - Nogales, con ramal a Tijuana
2	México - Nuevo Laredo, con ramal a Piedras Negras
3	Querétaro - Ciudad Juárez
4	Veracruz - Monterrey, con ramal a Matamoros
5	México - Puebla - Progreso
6	Mazatlán - Matamoros
7	Puebla - Oaxaca - Ciudad Hidalgo
8	Manzanillo - Tampico, con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo
9	Circuito Transístmico
10	Acapulco-Tuxpan
11	Acapulco-Veracruz
12	Altiplano
13	Transpeninsular de Baja California
14	Peninsular de Yucatán
15	Del Pacífico

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3 Regiones Geoeconómicas de México

1	Norte
2	Noroeste
3	Noreste
4	Centro Occidente
5	Centro Sur
6	Golfo de México
7	Pacífico Sur
8	Península de Yucatán

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4 Estados de la República Mexicana

1	Aguascalientes	17	Morelos
2	Baja California	18	Nayarit
3	Baja California Sur	19	Nuevo León
4	Campeche	20	Oaxaca
5	Chiapas	21	Puebla
6	Chihuahua	22	Querétaro
7	Coahuila de Zaragoza	23	Quintana Roo
8	Colima	24	San Luis Potosí
9	Ciudad de México	25	Sinaloa
10	Durango	26	Sonora
11	Guanajuato	27	Tabasco
12	Guerrero	28	Tamaulipas
13	Hidalgo	29	Tlaxcala
14	Jalisco	30	Veracruz de Ignacio de la Llave
15	México	31	Yucatán
16	Michoacán de Ocampo	32	Zacatecas

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Parámetros de ajuste

Se obtuvieron los parámetros de ajuste para los espectros de carga agrupados por, año, estado, corredor carretero y región económica. De la Tabla 3.5 a la Tabla 3.12 se muestran los parámetros de ajuste obtenidos para las regiones económicas y corredores carteros agrupados por tipo de eje.

Tabla 4.5 Parámetros de ajuste y LSF para el eje sencillo agrupado por región económica

		Parámetros de Ajuste Eje Sencillo									
		W_1	W_2	W_3	μ_1	μ_2	μ_3	σ_1	σ_2	σ_3	LSF
Región Económica	1-Norte	0.000	0.198	0.802	0.000	0.715	1.435	0.027	0.153	0.216	0.082
	2-Noroeste	0.000	0.210	0.790	0.000	0.727	1.419	0.027	0.170	0.207	0.074
	3-Noreste	0.000	0.271	0.729	0.177	0.686	1.383	0.071	0.777	0.234	0.177
	4-Centro Occidente	0.289	0.660	0.051	0.857	1.405	2.121	0.290	0.197	0.257	0.154
	5-Centro Sur	0.239	0.700	0.061	0.783	1.412	2.111	0.263	0.194	0.263	0.174
	6-Golfo de México	0.295	0.657	0.048	0.750	1.388	2.182	0.259	0.202	0.246	0.163
	7-Pacífico Sur	0.373	0.560	0.066	0.737	1.396	2.062	0.242	0.216	0.271	0.153
	8-Península de Yucatán	0.264	0.683	0.054	0.758	1.387	2.048	0.260	0.194	0.307	0.149

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.6 Parámetros de ajuste y LSF para el eje dual agrupado por región económica

		Parámetros de Ajuste Eje Dual									
		W_1	W_2	W_3	μ_1	μ_2	μ_3	σ_1	σ_2	σ_3	LSF
Región Económica	1-Norte	0.080	0.790	0.130	0.117	1.572	2.271	0.466	0.362	0.239	0.680
	2-Noroeste	0.076	0.762	0.162	0.981	1.446	2.195	0.698	0.322	0.268	0.591
	3-Noreste	0.406	0.540	0.054	0.461	1.505	2.313	0.885	0.377	0.182	0.568
	4-Centro Occidente	0.088	0.629	0.283	0.570	1.455	2.038	0.530	0.300	0.309	0.574
	5-Centro Sur	0.109	0.761	0.130	0.353	1.538	2.241	0.459	0.375	0.202	0.565
	6-Golfo de México	0.168	0.630	0.202	1.036	1.432	2.155	0.661	0.299	0.266	0.611
	7-Pacífico Sur	0.269	0.594	0.136	0.879	1.541	2.278	0.553	0.366	0.185	0.574
	8-Península de Yucatán	0.116	0.706	0.178	0.892	1.471	2.204	0.674	0.353	0.259	0.651

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.7 Parámetros de ajuste y LSF para el eje tándem agrupado por región económica

		Parámetros de Ajuste Eje Tándem									
		W_1	W_2	W_3	μ_1	μ_2	μ_3	σ_1	σ_2	σ_3	LSF
Región Económica	1-Norte	0.307	0.298	0.395	2.025	2.548	2.915	0.238	0.208	0.180	1.275
	2-Noroeste	0.386	0.370	0.245	2.024	2.577	2.941	0.245	0.242	0.161	1.034
	3-Noreste	0.464	0.052	0.484	1.974	2.354	2.726	0.273	0.117	0.253	0.829
	4-Centro Occidente	0.413	0.293	0.294	1.958	2.571	2.939	0.227	0.238	0.167	1.095
	5-Centro Sur	0.395	0.276	0.329	2.020	2.581	2.937	0.219	0.192	0.163	1.143
	6-Golfo de México	0.442	0.182	0.377	1.978	2.491	2.929	0.195	0.182	0.163	1.128
	7-Pacífico Sur	0.515	0.081	0.404	2.022	1.960	2.909	0.446	0.077	0.183	1.205
	8-Península de Yucatán	0.441	0.195	0.364	2.365	1.929	2.904	0.432	0.162	0.167	1.346

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.8 Parámetros de ajuste y LSF para el eje trídem agrupado por región económica

		Parámetros de Ajuste Eje Trídem									
		W_1	W_2	W_3	μ_1	μ_2	μ_3	σ_1	σ_2	σ_3	LSF
Región Económica	1-Norte	0.290	0.521	0.188	2.357	3.133	3.389	0.192	0.247	0.102	1.105
	2-Noroeste	0.368	0.402	0.230	2.364	3.060	3.379	0.191	0.258	0.123	0.946
	3-Noreste	0.481	0.075	0.445	2.373	2.886	3.179	0.202	0.125	0.208	0.631
	4-Centro Occidente	0.438	0.352	0.210	3.161	2.326	3.395	0.235	0.180	0.093	1.095
	5-Centro Sur	0.393	0.308	0.299	3.128	2.329	3.375	0.252	0.146	0.116	1.179
	6-Golfo de México	0.285	0.443	0.272	3.067	2.333	3.357	0.255	0.150	0.141	0.901
	7-Pacífico Sur	0.070	0.315	0.616	1.793	2.318	3.256	0.066	0.174	0.215	1.135
	8-Península de Yucatán	0.378	0.200	0.422	2.327	2.978	3.309	0.146	0.261	0.170	0.984

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.9 Parámetros de ajuste y LSF para el eje sencillo agrupado por corredor carretero

	Parametros de Ajuste Eje Sencillo										
	W ₁	W ₂	W ₃	μ ₁	μ ₂	μ ₃	σ ₁	σ ₂	σ ₃	LSF	
Corredores carreteros	1-México - Nogales, con ramal a Tijuana	0.000	0.521	0.479	0.700	1.424	1.328	0.337	0.169	0.482	0.184
	2-México - Nuevo Laredo, con ramal a Piedras Negras	0.180	0.693	0.127	0.916	1.436	1.985	0.290	0.203	0.256	0.206
	3-Querétaro - Ciudad Juárez	0.572	0.160	0.268	1.421	1.556	1.334	0.485	0.111	0.163	0.284
	4-Veracruz - Monterrey, con ramal a Matamoros	0.012	0.465	0.523	0.444	1.022	1.375	0.011	0.499	0.171	0.082
	5-México - Puebla - Progreso	0.007	0.467	0.526	0.447	1.122	1.404	0.002	0.547	0.170	0.143
	6-Mazatlán - Matamoros	0.013	0.316	0.671	0.447	1.328	1.426	0.002	0.495	0.182	0.161
	7-Puebla - Oaxaca - Ciudad Hidalgo	0.013	0.563	0.424	0.447	1.167	1.409	0.002	0.503	0.165	0.135
	8-Manzanillo - Tampico, con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo	0.019	0.511	0.470	0.447	1.162	1.381	0.002	0.437	0.173	0.089
	9-Circuito Transistmico	0.022	0.566	0.412	0.447	1.153	1.401	0.002	0.457	0.166	0.100
	10-Acapulco-Tuxpan	0.018	0.591	0.391	0.447	1.171	1.409	0.002	0.481	0.164	0.122
	11-Acapulco-Veracruz	0.039	0.350	0.610	0.447	0.608	1.413	0.002	0.385	0.193	0.056
	12-Altiplano	0.017	0.561	0.422	0.447	1.138	1.398	0.002	0.482	0.168	0.109
	13-Transpeninsular de Baja California	0.022	0.571	0.407	0.447	1.120	1.421	0.002	0.423	0.154	0.080
	14-Peninsular de Yucatán	0.018	0.566	0.416	0.447	1.117	1.391	0.002	0.477	0.167	0.099
	15-Del Pacífico	0.015	0.673	0.312	0.447	1.108	1.413	0.002	0.465	0.176	0.097

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.10 Parámetros de ajuste y LSF para el eje dual agrupado por corredor carretero

	Parametros de Ajuste Eje Dual										
	W ₁	W ₂	W ₃	μ ₁	μ ₂	μ ₃	σ ₁	σ ₂	σ ₃	LSF	
Corredores carreteros	1-México - Nogales, con ramal a Tijuana	0.065	0.692	0.242	0.896	1.464	2.135	0.644	0.329	0.293	0.697
	2-México - Nuevo Laredo, con ramal a Piedras Negras	0.119	0.596	0.285	0.060	1.553	2.082	0.527	0.358	0.344	0.871
	3-Querétaro - Ciudad Juárez	0.922	0.046	0.032	1.671	1.375	2.352	0.407	0.067	0.100	0.721
	4-Veracruz - Monterrey, con ramal a Matamoros	0.151	0.458	0.391	0.695	1.363	1.807	0.209	0.262	0.389	0.449
	5-México - Puebla - Progreso	0.046	0.798	0.156	0.596	1.524	2.178	0.142	0.405	0.260	0.663
	6-Mazatlán - Matamoros	0.369	0.138	0.493	1.367	1.407	2.003	0.523	0.119	0.360	1.129
	7-Puebla - Oaxaca - Ciudad Hidalgo	0.067	0.809	0.124	0.298	1.545	2.220	0.442	0.387	0.216	0.583
	8-Manzanillo - Tampico, con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo	0.088	0.682	0.230	0.481	1.445	2.074	0.492	0.304	0.305	0.542
	9-Circuito Transistmico	0.254	0.556	0.191	1.150	1.460	2.185	0.666	0.291	0.211	0.663
	10-Acapulco-Tuxpan	0.092	0.813	0.095	0.316	1.551	2.273	0.437	0.364	0.192	0.517
	11-Acapulco-Veracruz	0.011	0.931	0.058	0.170	1.573	2.238	0.803	0.465	0.134	0.756
	12-Altiplano	0.118	0.624	0.258	0.287	1.423	2.125	0.412	0.300	0.286	0.635
	13-Transpeninsular de Baja California	0.737	0.242	0.021	1.517	1.432	2.418	0.463	0.172	0.081	0.498
	14-Peninsular de Yucatán	0.112	0.632	0.256	0.985	1.348	2.153	0.666	0.290	0.290	0.727
	15-Del Pacífico	0.031	0.189	0.780	0.624	1.429	1.494	0.751	0.169	0.553	0.821

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.11 Parámetros de ajuste y LSF para el eje tándem agrupado por corredor carretero

	Parametros de Ajuste Eje Tándem										
	W ₁	W ₂	W ₃	μ ₁	μ ₂	μ ₃	σ ₁	σ ₂	σ ₃	LSF	
Corredores carreteros	1-México - Nogales, con ramal a Tijuana	0.302	0.442	0.256	1.997	2.538	2.930	0.239	0.261	0.170	1.072
	2-México - Nuevo Laredo, con ramal a Piedras Negras	0.301	0.341	0.358	2.053	2.584	2.902	0.242	0.217	0.177	1.196
	3-Querétaro - Ciudad Juárez	0.259	0.582	0.160	1.984	2.659	2.973	0.234	0.297	0.143	1.373
	4-Veracruz - Monterrey, con ramal a Matamoros	0.492	0.142	0.366	1.946	2.426	2.872	0.224	0.140	0.189	0.919
	5-México - Puebla - Progreso	0.329	0.215	0.457	1.985	2.491	2.889	0.193	0.167	0.169	1.183
	6-Mazatlán - Matamoros	0.253	0.389	0.358	1.971	2.552	2.932	0.211	0.260	0.164	1.310
	7-Puebla - Oaxaca - Ciudad Hidalgo	0.404	0.181	0.415	2.008	2.549	2.902	0.255	0.148	0.168	1.150
	8-Manzanillo - Tampico, con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo	0.382	0.364	0.254	1.908	2.584	2.949	0.219	0.283	0.167	1.142
	9-Circuito Transistmico	0.512	0.435	0.052	1.994	2.878	2.987	0.249	0.232	0.042	1.369
	10-Acapulco-Tuxpan	0.410	0.456	0.134	2.008	2.708	2.992	0.222	0.269	0.136	1.194
	11-Acapulco-Veracruz	0.170	0.385	0.445	1.951	2.127	2.911	0.065	0.426	0.147	1.217
	12-Altiplano	0.325	0.437	0.237	1.980	2.354	2.927	0.166	0.401	0.165	0.996
	13-Transpeninsular de Baja California	0.008	0.504	0.488	2.001	2.015	2.729	0.019	0.248	0.277	0.925
	14-Peninsular de Yucatán	0.423	0.484	0.093	2.787	1.984	3.000	0.276	0.236	0.079	1.274
	15-Del Pacífico	0.092	0.480	0.428	2.445	1.963	2.900	0.152	0.246	0.213	1.257

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.12 Parámetros de ajuste y LSF para el eje tridem agrupado por corredor carretero

	Parametros de Ajuste Eje Tridem									
	W_1	W_2	W_3	μ_1	μ_2	μ_3	σ_1	σ_2	σ_3	LSF
1-México - Nogales, con ramal a Tijuana	0.348	0.474	0.178	2.389	3.093	3.391	0.205	0.249	0.110	0.953
2-México - Nuevo Laredo, con ramal a Piedras Negras	0.251	0.607	0.142	2.371	3.155	3.388	0.222	0.235	0.090	1.131
3-Querétaro - Ciudad Juárez	0.263	0.498	0.240	2.348	3.104	3.401	0.243	0.259	0.107	1.189
4-Veracruz - Monterrey, con ramal a Matamoros	0.539	0.194	0.267	2.355	2.977	3.315	0.162	0.174	0.145	0.628
5-México - Puebla - Progreso	0.269	0.371	0.360	2.310	3.032	3.337	0.146	0.271	0.152	1.106
6-Mazatlán - Matamoros	0.196	0.420	0.384	2.420	3.213	3.402	0.214	0.211	0.093	1.577
7-Puebla - Oaxaca - Ciudad Hidalgo	0.288	0.513	0.199	2.322	3.127	3.384	0.175	0.253	0.107	1.113
8-Manzanillo - Tampico, con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo	0.361	0.441	0.198	2.283	3.111	3.392	0.182	0.290	0.094	1.082
9-Circuito Transistmico	0.427	0.283	0.290	2.325	3.096	3.356	0.151	0.230	0.135	0.933
10-Acapulco-Tuxpan	0.323	0.427	0.249	2.328	3.170	3.394	0.152	0.242	0.096	1.207
11-Acapulco-Veracruz	0.293	0.287	0.420	2.221	2.958	3.302	0.082	0.488	0.105	1.315
12-Altiplano	0.433	0.281	0.286	2.323	2.989	3.311	0.134	0.266	0.149	0.765
13-Transpeninsular de Baja California	0.442	0.459	0.099	2.323	3.012	3.466	0.179	0.305	0.084	0.781
14-Peninsular de Yucatán	0.471	0.406	0.123	2.366	3.173	3.401	0.157	0.240	0.089	0.897
15-Del Pacífico	0.265	0.298	0.437	2.373	3.197	3.406	0.195	0.224	0.088	1.522

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Comportamiento del eje sencillo

En las Figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13 se pueden observar los comportamientos obtenido de LSF₄ para el análisis realizado por año, estado, región económica y corredor carretero del país, respectivamente.

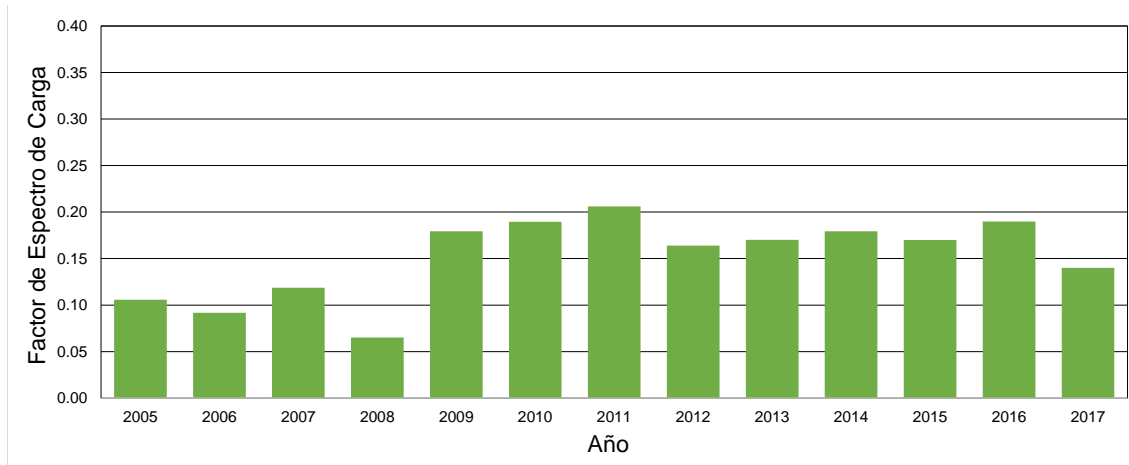


Figura 4.10 Factor de espectro de carga por año para el eje sencillo

Fuente: Elaboración propia.

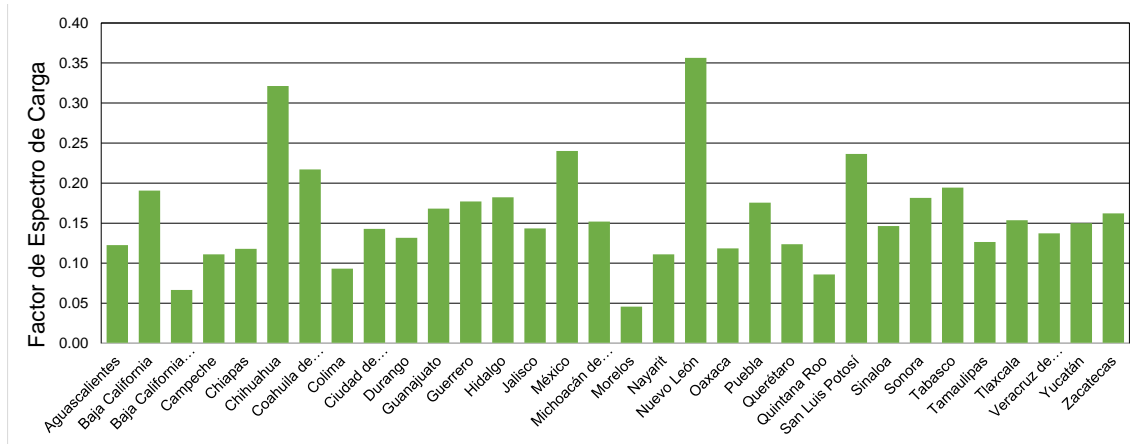


Figura 4.11 Factor de espectro de carga por estado para el eje sencillo

Fuente: Elaboración propia.

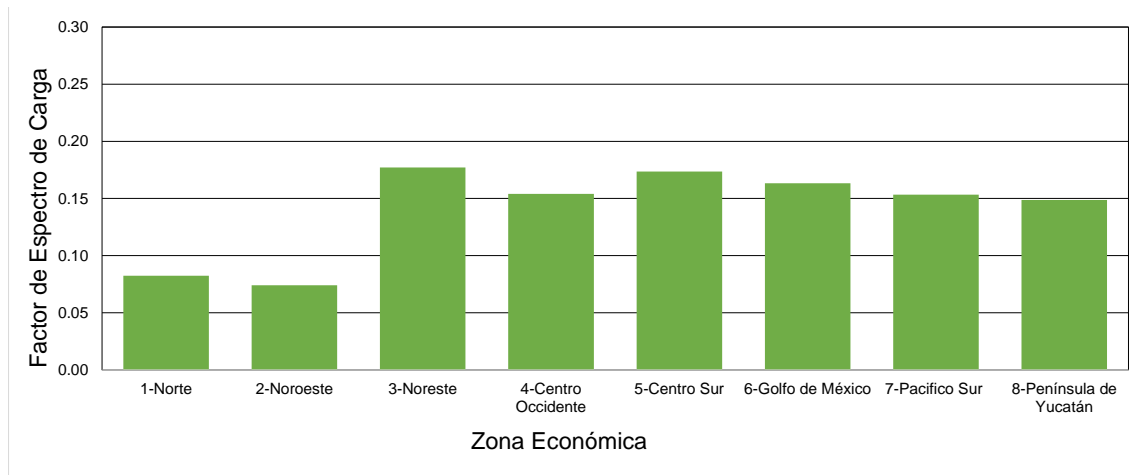


Figura 4.12 Factor de espectro de carga por región económica para el eje sencillo

Fuente: Elaboración propia.

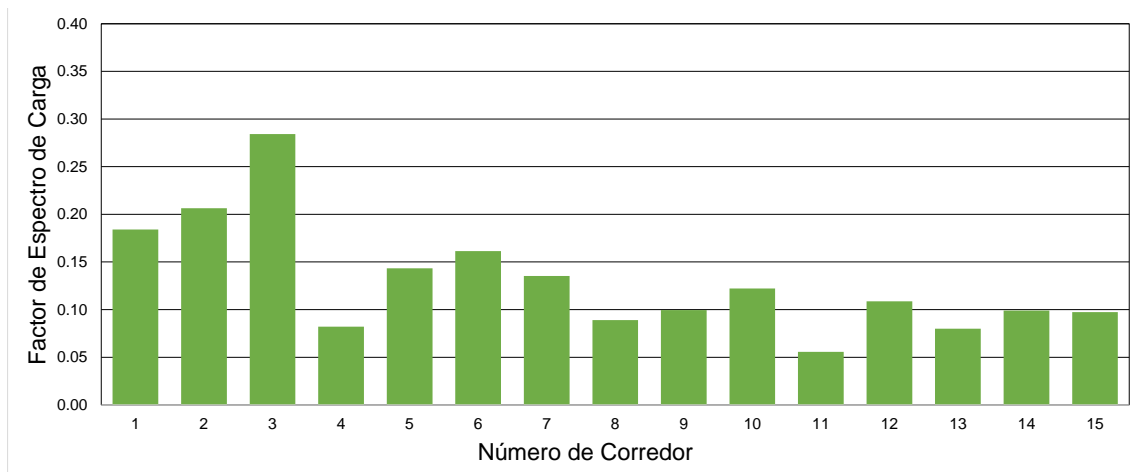


Figura 4.13 Factor de espectro de carga por corredor carretero para el eje sencillo

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Comportamiento del eje dual

En la Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17. Se presentan los resultados obtenidos del análisis realizado para eje dual.

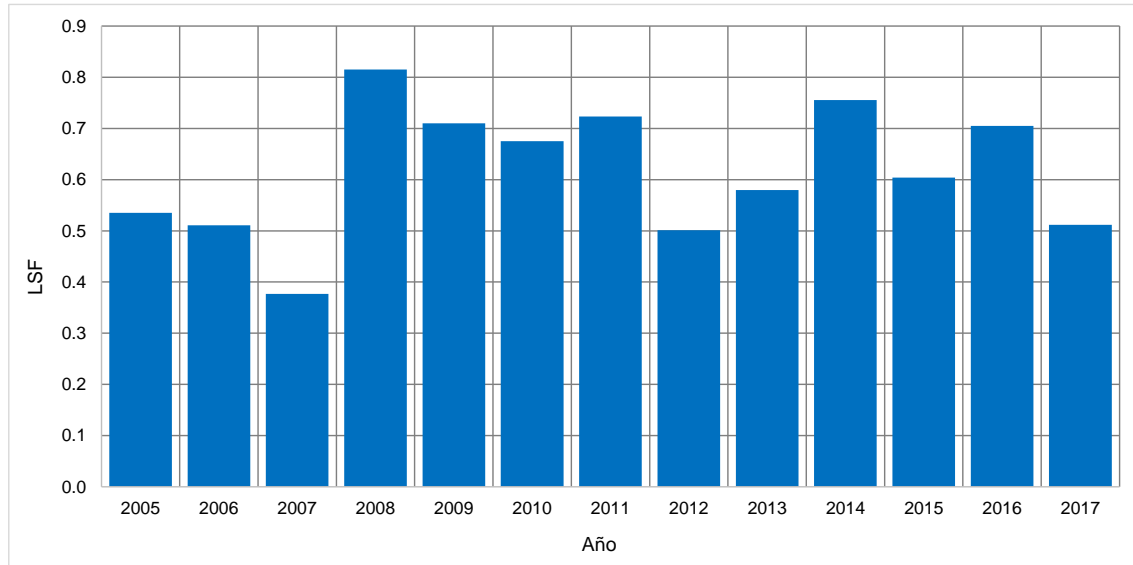


Figura 4.14 Factor de espectro de carga por año para el eje dual

Fuente: Elaboración propia.

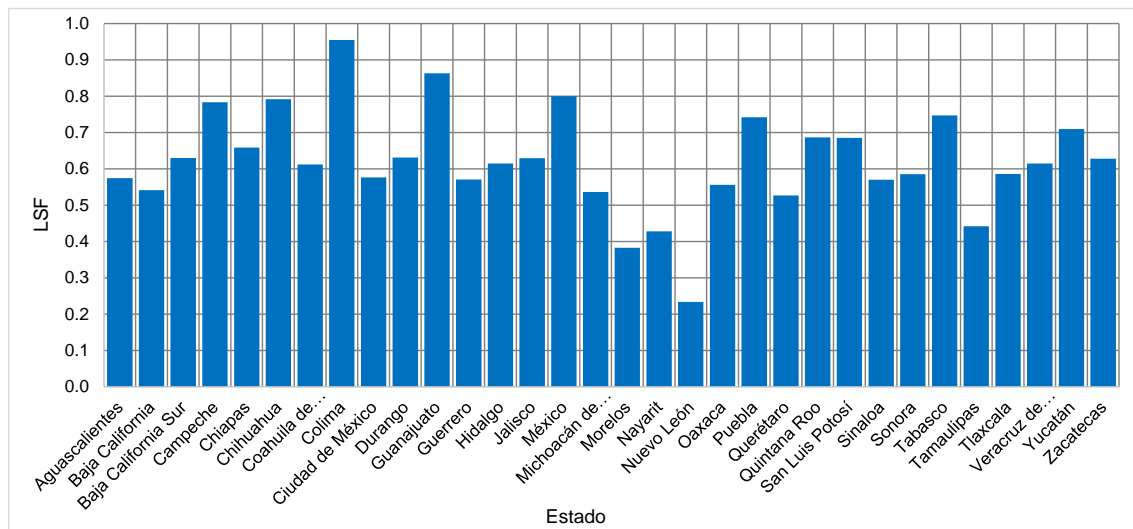


Figura 4.15 Factor de espectro de carga por estado para el eje dual

Fuente: Elaboración propia.

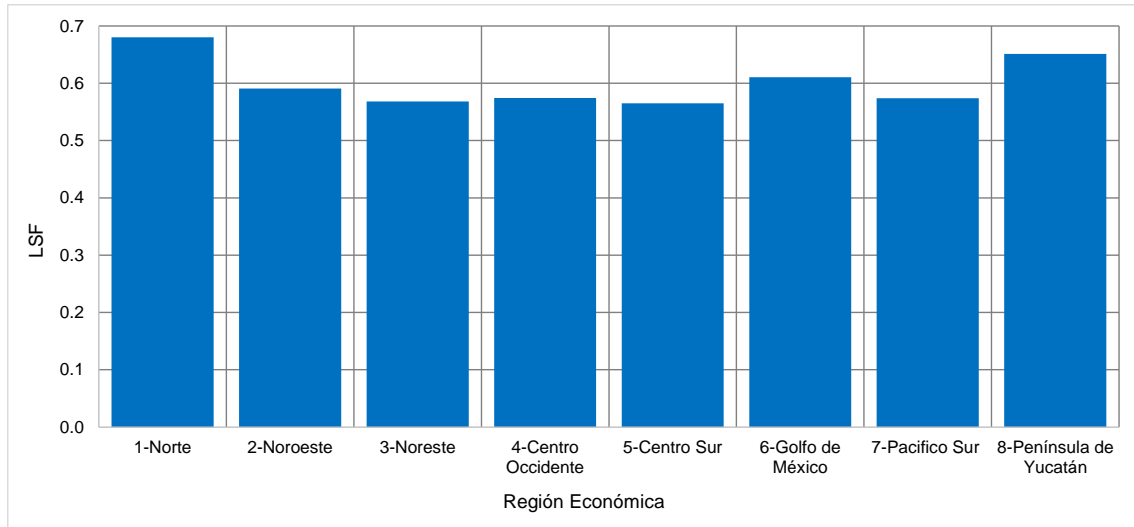


Figura 4.16 Factor de espectro de carga por región económica para el eje dual

Fuente: Elaboración propia.

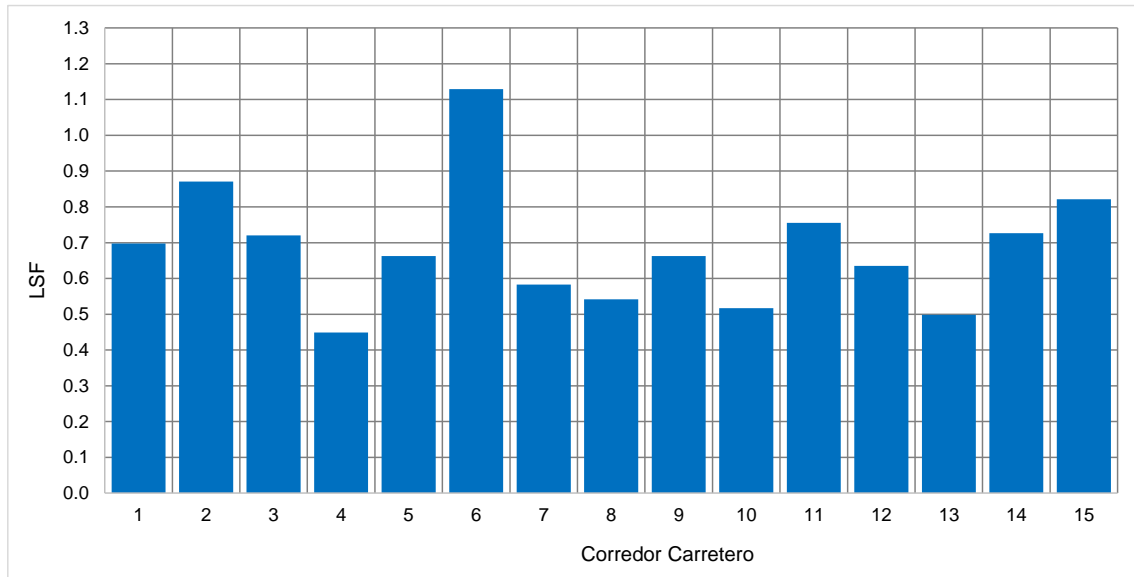


Figura 4.17 Factor de Espectro de carga por corredor carretero para el eje dual

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Comportamiento del eje tándem

En las Figuras 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21, se presentan los resultados obtenidos del análisis realizado para eje tándem.

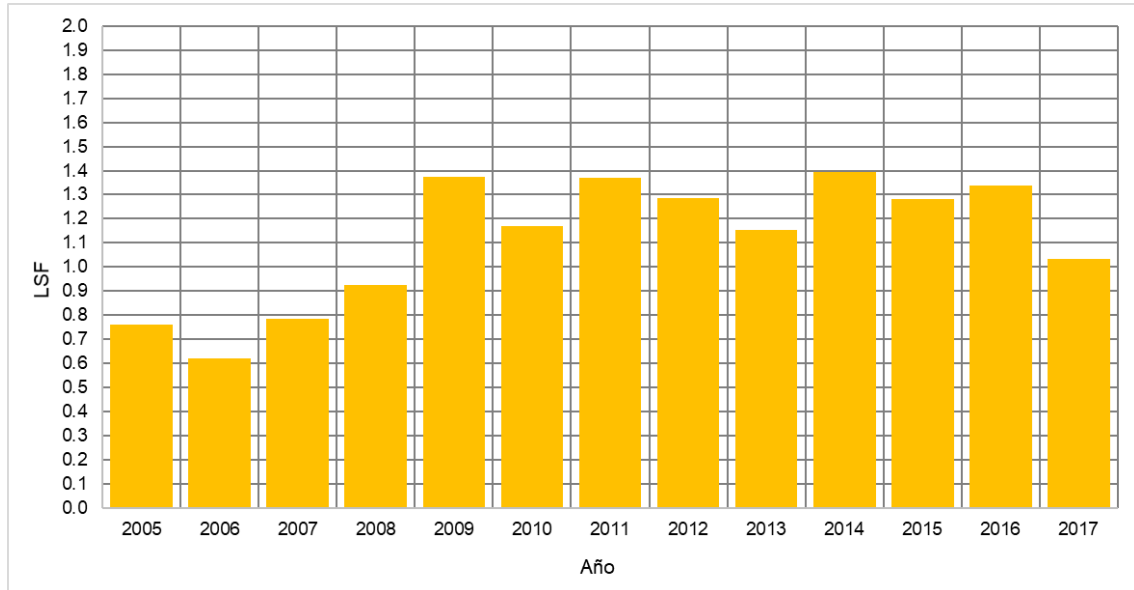


Figura 4.18 Factor de espectro de carga por año para el eje tándem

Fuente: Elaboración propia.

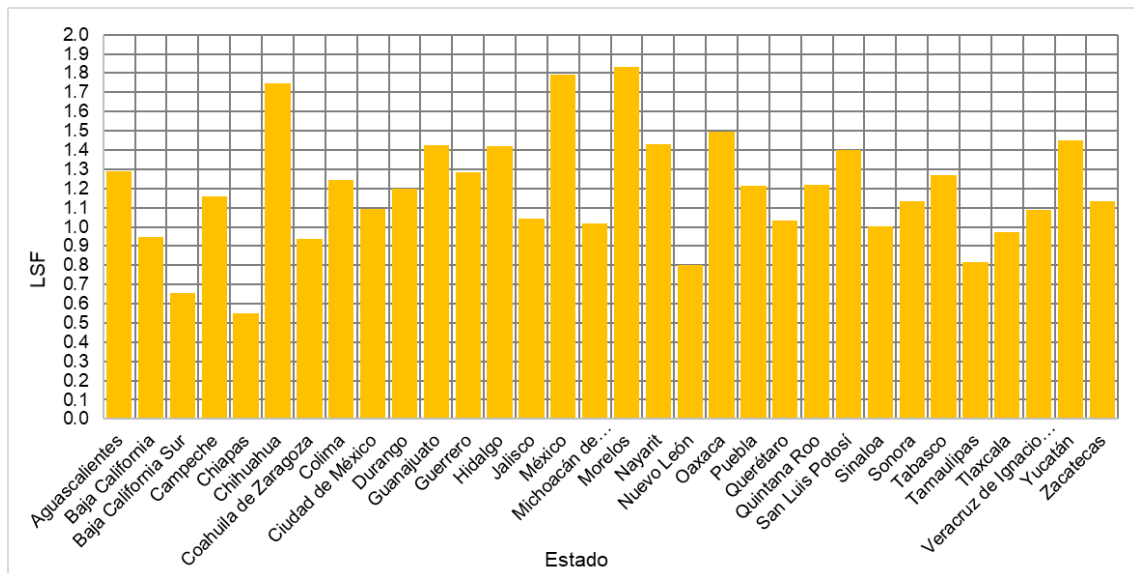


Figura 4.19 Factor de espectro de carga por estado para el eje tándem

Fuente: Elaboración propia.

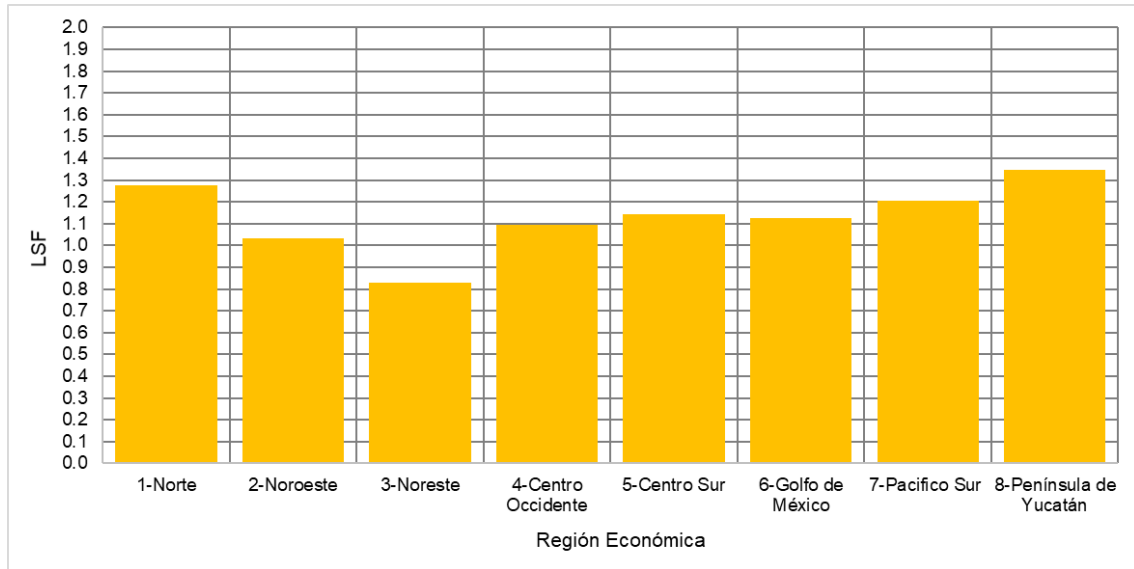


Figura 4.20 Factor de espectro de carga por región económica para el eje tándem

Fuente: Elaboración propia.

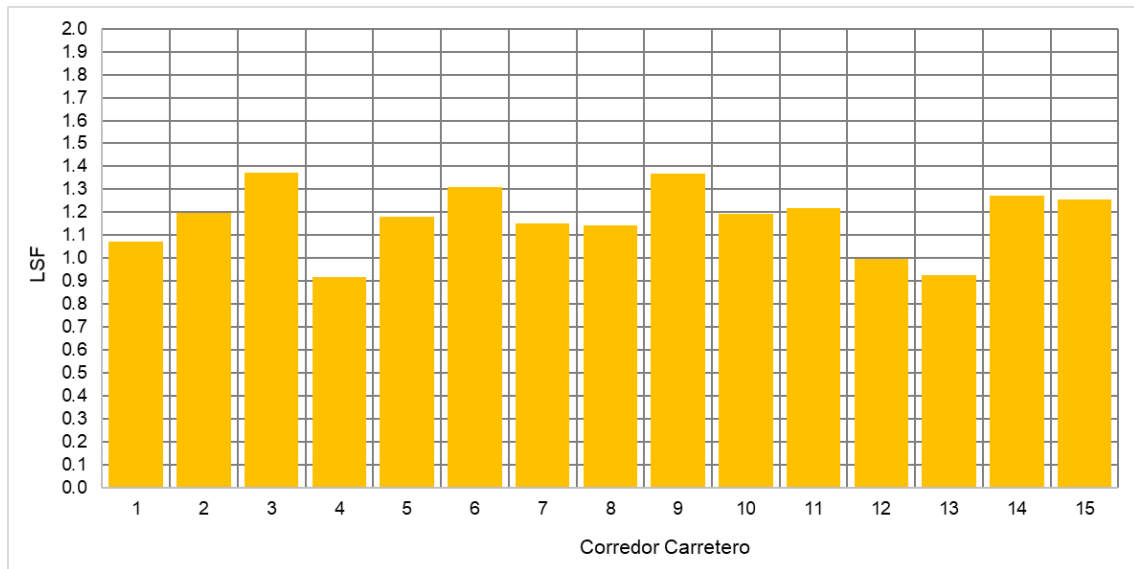


Figura 4.21 Factor de espectro de carga por corredor carretero para el eje tándem

Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 Comportamiento del eje trídém

En las Figuras 4.22, 4.23, 4.24 y 4.25. Se presentan los resultados obtenidos del análisis realizado para eje trídém.

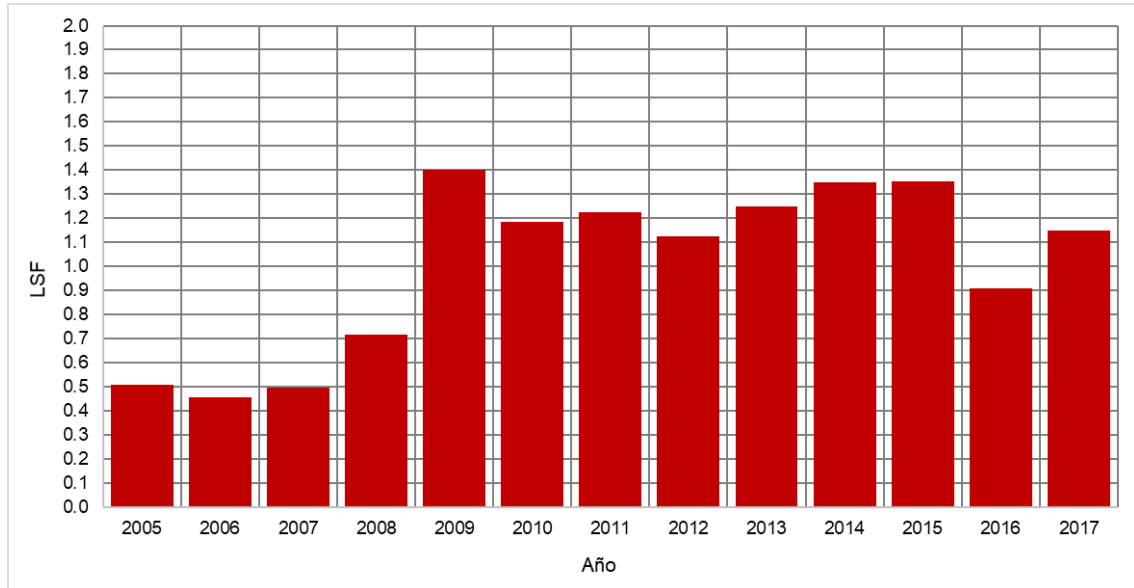


Figura 4.22 Factor de espectro de carga por año para el eje trídém

Fuente: Elaboración propia.

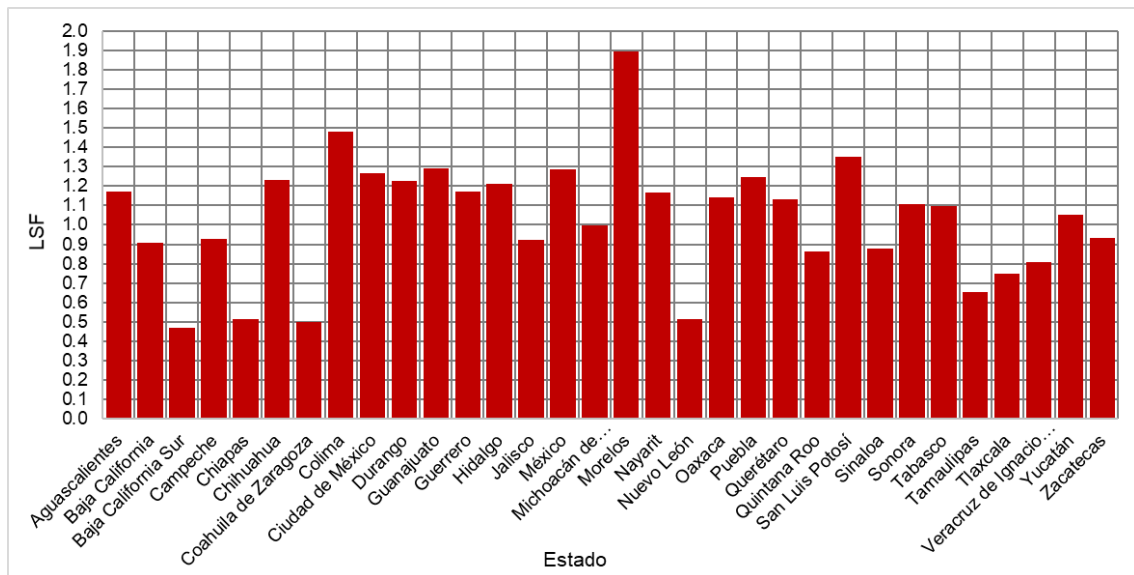


Figura 4.23 Factor de espectro de carga por estado para el eje trídém

Fuente: Elaboración propia.

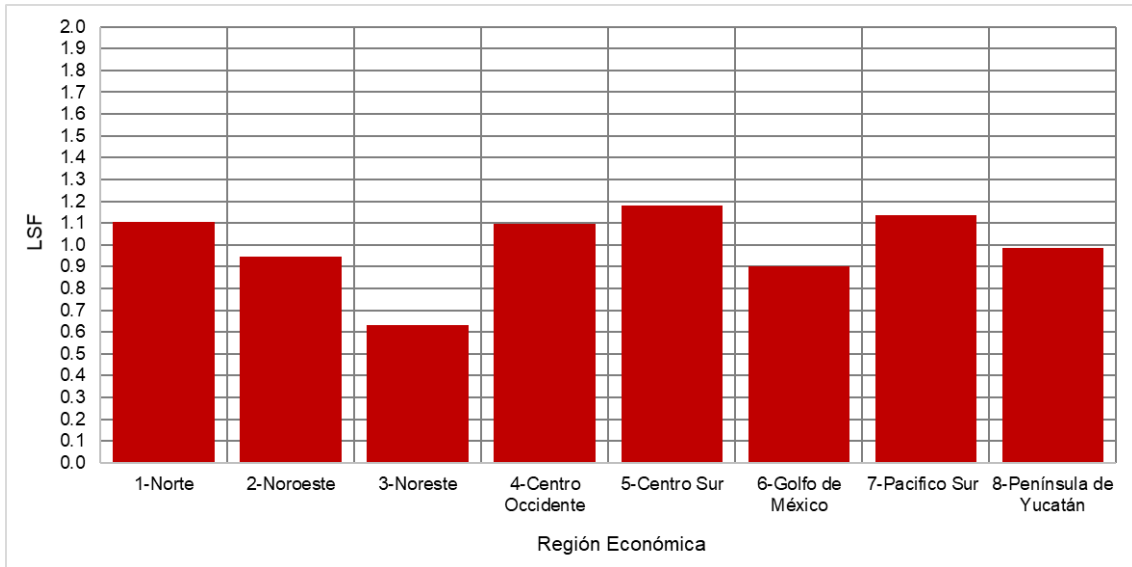


Figura 4.24 Factor de espectro de carga por región económica para el eje trídém

Fuente: Elaboración propia.

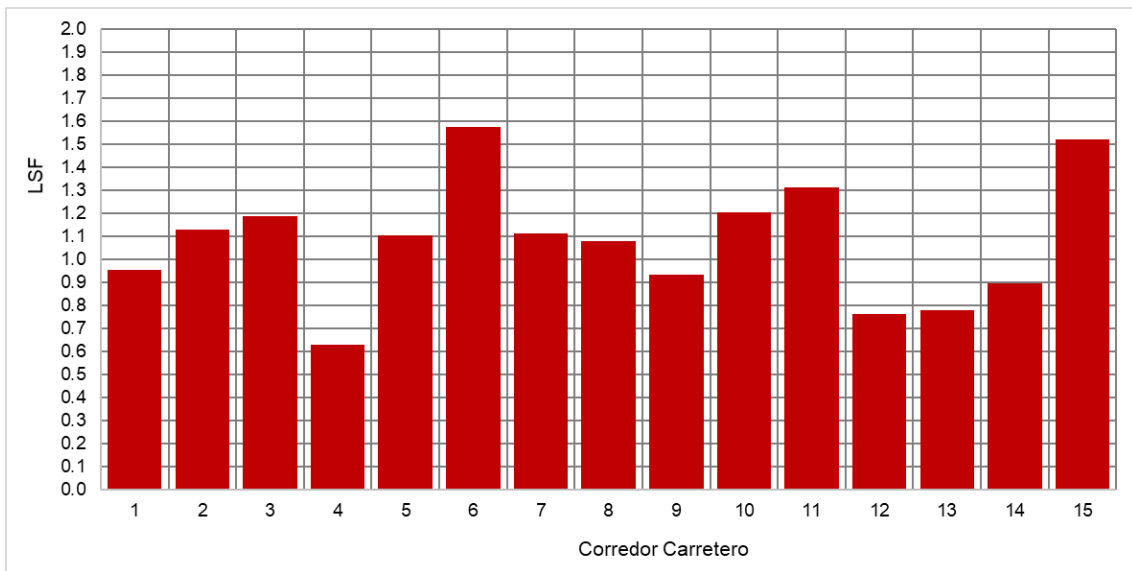


Figura 4.25 Factor de espectro de carga por corredor carretero para el eje trídém

Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones

Este trabajo presenta una parte introductoria del desarrollo y alcance de la herramienta diseñada para conocer la sobrecarga en México, basado en los propios datos tomados por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

La intención al comparar los valores de LSF de cada corredor, año, estado y región y compararlos entre sí, no es acreditar aquellas que “cumplen” los límites legales, pues ya se observa en las primeras gráficas 4.2 a 4.9 que al sobrepasar el límite legal de carga están incurriendo en incumplimiento y, por lo tanto, en un daño acelerado a la condición de la carretera que muy probablemente no consideró la sobrecarga en su diseño estructural. Esta misma constante puede observarse al explorar cada una de las 200 estaciones de pesaje del año 2005 al 2017.

Se desea resaltar que, al comparar distintos tipos de variables y agrupar los valores de pesaje vehicular, como se hizo en este ejemplo, se pueden obtener datos relevantes, por ejemplo, se pueden agrupar por tipo y estructura de pavimento, para conocer cuales estructuras están subdiseñadas, se pueden agrupar por vías libres y de cuota, esperando observar un comportamiento diferenciado entre ellas. Se pueden combinar los climas más desfavorables con la sobrecarga presentada. También sería de interés plantear el escenario de igual LSF para detectar la concordancia de estructuras de pavimento.

Bibliografía

WRIGHT, PAUL H y DIXON, KAREN K. Highway Engineering. Séptima. s.l. : Jhon Wiley & Sons, Inc., 2004.

TIMM, DAVID H, BOWER, JULIA M y TUROCHY, ROD E. Effect of Load Spectra on Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design. Submitted to the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

TIMM, DAVID H, TISDALE, MICHELLE S y TUROCHY, ROD E. Axle Load Spectra Characterization by Mixed Distribution Modeling.. 2005, Journal of Transportation Engineering.

Use of Long-Term Pavement Performance Data to Develop Traffic Defaults in Support of Mechanistic-Empirical Pavement Design Procedures. TAM, WENG ON y QUINTUS, HAROLD VON. Transportation Research Board.

PROZZI, JORGE A, HONG, FENG y LEIDY, J. Optimal Statistical Characterization of WIM Data Bases on Pavement Impact. 2006. CD-ROM Proceeding of the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

PROZZI, JORGE A y KAPOOR, KARAN. Methodology for Quantifying Pavement Damage Caused by Different Axle and Load Configurations.

PROZZI, JORGE A y HONG, FENG. Hierarchical Axle Load Data for Mechanistic-Empirical Design. TRB. CD-ROM Proceeding of the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

PROZZI, JORGE A, HONG, FENG y PEREIRA, FERNANDA M. Comparison of Equivalent Single Axle Loads from Empirical and Mechanistic-Empirical Approaches,. Austin , Texas : s.n.

PROZZI, Jorge A y HONG, Feng. Evaluation of Equipment, Methods, and Pavement Design. 2006.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>