



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias (Estructuras)

**SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE TRÁFICO PESADO Y CALIBRACIÓN CON CARGAS DE DISEÑO PARA
PUENTES MEXICANOS, BASADO EN REGISTROS WIM FRANCESES**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Alejandro Moreno Gómez

Dirigido por:

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

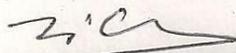
SINODALES

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Presidente



Firma

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Secretario



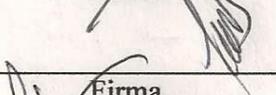
Firma

Dr. Carlos Santiago López Cajún
Vocal



Firma

Dr. José Antonio Romero Navarrete
Suplente



Firma

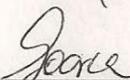
Dr. Eduardo Betanzo Quezada
Suplente



Firma



Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería



Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Mayo 2016
México

RESUMEN

Este proyecto de investigación tiene como objetivo utilizar el modelo de simulación Montecarlo para generar escenarios de tráfico vehicular pesado representativo del que circula en México, teniendo como variables los datos de escenarios de tráfico real de Weigh In Motion (WIM) de vialidades en Francia así como los datos de aforos vehiculares y de estaciones estáticas de pesaje mexicanas y datos geométricos de los fabricantes de vehículos pesados que circulan en México. El modelo de simulación de tráfico mexicano, se integrará en el software denominado "Diagnóstico estadístico, efectos de fatiga y extremos en puentes ante cargas de tráfico pesado, DEEFEP" desarrollado en lenguaje C++ (Bárceñas, 2011; Herrada 2013; Medina, 2014). Las variables representantes del tráfico simulado estarán acotadas por las geometrías de los fabricantes de vehículos, cargas estáticas medidas en el país, datos estadísticos reportados por SCT, IMT y otras instituciones, archivos WIM de Francia, entre otros. Con estos escenarios de tráfico simulado se obtendrán valores de cargas extremas y se calibrarán con las cargas de diseño reglamentarias. Finalmente se ilustrará la metodología con la generación de 2 escenarios de tráfico simulado de la carretera Querétaro-San Luis Potosí y el libramiento nororiente, con sus respectivas cargas extremas y su calibración con las cargas de diseño.

(Palabras clave: Simulación Montecarlo, tráfico simulado, puente, concreto presforzado, sistema WIM)

SUMMARY

This research project has as an objective to generate the Montecarlo simulation model for representative heavy vehicular traffic scenery of México, having as variables the data from Weigh In Motion (WIN) real traffic scenery for highways in France, so as the data of vehicular capacity and static stations for Mexican passage and geometric data of the heavy vehicles manufacturers that circulate in México. The simulation model of the Mexican traffic will be integrated in the software denominated as “Diagnóstico estadístico, efectos de fatiga y extremos en puentes ante cargas de tráfico pesado, DEEFEP) developed in C++ language (Bárcenas, 2011; Herrada 2013; Medina, 2014). The representative variables for the simulated traffic will be bounded by the geometries of the vehicles manufacturers, measured static loads in the country, statistical data reported by SCT, IMT and other institutions, WIM records from France, and more. With these scenarios of simulated traffic extreme load values will be obtained and these values will be calibrated with the loads of the design regulation. Finally it will be illustrated the methodology with the generation of two different simulated traffic scenarios, from the Queretaro-San Luis Potosí highway and the northeast freeway of the Queretaro city with their respective extreme loads and their calibration with the design loads.

(Key words: Montecarlo simulation, simulated traffic, bridge, prestressed concrete, WIM system)

DEDICATORIA

A mi madre q.e.p.d., que gracias a ella he llegado a este punto de mi vida profesional. A mi padre por su esfuerzo, trabajo y dedicación. A mis hermanos por formar una familia maravillosa y apoyarme siempre y en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme cumplir esta meta en mi vida proporcionándome la fortaleza necesaria para llevarla a cabo.

A mi asesor Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras por su tiempo y apoyo dedicado a ésta investigación.

A los profesores de la DIP-FI-UAQ que tuve el placer de conocer, por sus enseñanzas y conocimientos transmitidos.

Al LCPC-Francia por la aportación de información de registros de pesaje dinámico (WIM).

Se agradece al CONACYT por la beca otorgada para la realización de mis estudios y al apoyo por parte del Gobierno del Estado de Querétaro, ofrecido por medio del Proyecto QRO-2012-C01-193364 de la Convocatoria FOMIX 2012-01:Fortalecimiento a través de Laboratorios de la Maestría en Ciencias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

ÍNDICE

RESUMEN	I
SUMMARY	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IXX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Justificación	3
1.3. Hipótesis	4
1.4. Objetivo general	4
1.5. Objetivos particulares	4
1.6. Alcances	5
1.7. Limitaciones	5
2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1. Antecedentes en México	6
2.2. Antecedentes en E.U.A.	8
2.3. Antecedentes en Asia	9
3. MARCO TEÓRICO	11
3.1. Pesaje dinámico	11
3.2. Simulación Montecarlo	12
3.3. Características de los vehículos pesados en México	14
3.4. El sobrepeso en el autotransporte de carga en México	20
3.5. Obtención del modelo virtual de cargas vivas de diseño	23
3.5.1. Diseño conceptual del modelo de cargas concentradas	24
3.5.2. Metodología para integrar cuantitativamente el modelo de cargas concentradas	25
3.5.3. Obtención de la ley de probabilidades de PE1, PT1 y PT2 así como los valores correspondientes a cada variable del modelo de cargas vivas concentradas	26
3.5.4. Validación utilizando los momentos flexionantes máximos	26
4. METODOLOGÍA	27
4.1. Características estadísticas de pesaje en movimiento de vehículos pesados de Francia y su tratamiento con DEEFEP	30
4.2. Distribuciones de los flujos vehiculares de las carreteras en México	33
4.3. Información requerida para el proceso de simulación	35
4.3.1. Tiempo de simulación	35
4.3.2. Clasificación en porcentaje del flujo vehicular	36
4.3.3. Distancia entre ejes de acuerdo al tipo de vehículo y su número de ejes	36
4.3.4. Peso por eje de acuerdo al tipo de vehículo y su número de ejes	36
4.3.5. Velocidad de acuerdo al tipo de vehículo	37
4.3.6. Tiempo en segundos entre el paso de 2 vehículos por un mismo punto	37
4.4. Generación de archivo en formato DEEFEP	37
5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN	39
5.1. Generación del escenario de tráfico simulado para la carretera Querétaro-San Luis Potosí	39
5.2. Generación del escenario de tráfico simulado para el libramiento nororiente de la ciudad de Querétaro	42
5.3. Obtención de los valores extremos de la carga pesada de la carretera Querétaro-San Luis Potosí libramiento de la ciudad de Querétaro	45

5.4.	Obtención de los valores extremos de la carga pesada del libramiento nororiente de la ciudad de Querétaro _____	47
5.5.	Calibración de la carga lineal extrema del tráfico Querétaro-S.L.P.con la carga reglamentaria de S.C.T y ASSHTO _____	50
5.6.	Calibración de la carga lineal extrema del tráfico del libramiento nororiente de la ciudad de Querétaro con la carga reglamentaria de S.C.T y ASSHTO _____	52
5.7.	Obtención de valores para las variables del modelo virtual de cargas vivas propuesto ____	54
5.7.1	Obtención de la ley de probabilidades de PE1 y el valor de CV1 _____	54
5.7.2	Obtención de la ley de probabilidades de PT1 y el valor de CV2 _____	55
5.7.3	Obtención de la ley de probabilidades de PT2 y el valor de CV3 _____	57
5.7.4	Cálculo de las separaciones entre las cargas virtuales _____	59
5.7.5	Obtención del factor de carga viva básico del modelo propuesto _____	59
5.7.6	Validación utilizando los momentos flexionantes máximos _____	60
5.8.	Calibración del modelo propuesto con el modelo de cargas vivas del reglamento SCT y ASSHTO _____	61
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS _____	63
6.1.	Parámetros estadísticos _____	63
6.2.	Calibración de las distribuciones del escenario de tráfico Qro-SLP con el tráfico de la autopista A64 y datos estadísticos de tráfico Qro-SLP-SCT _____	65
6.3.	Calibración de las distribuciones del escenario de tráfico del libramiento nororiente con el tráfico de la autopista A64 y datos estadísticos de tráfico libramiento nororiente-SCT _____	67
6.4.	Comparación de las distribuciones del escenario de tráfico de la carretera Qro-SLP con el escenario de tráfico del libramiento nororiente _____	69
6.5.	Cargas máximas y extremas Qro-SLP _____	71
6.6.	Cargas máximas y extremas libramiento nororiente _____	72
7.	CONCLUSIONES _____	74
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	75
	APÉNDICE A. AYUDA PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DE TRÁFICO SIMULADO _____	79
A.1.	Escenario de tráfico de la carretera Querétaro-San Luis Potosí _____	79
A.2.	Escenario de tráfico del libramiento nororiente de la ciudad de Querétaro. _____	87
	APÉNDICE B. PARÁMETROS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO REALIZADO AL ARCHIVO WIM A64 DE FRANCIA _____	95
	APÉNDICE C. PARÁMETROS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO REALIZADO AL ARCHIVO SIMULADO DE LA CARRETERA QUERÉTARO-SAN LUIS POTOSI _____	101
	APÉNDICE D. PARÁMETROS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO REALIZADO AL ARCHIVO SIMULADO DEL LIBRAMIENTO NORORIENTE DE QUERETARO _____	107
	APÉNDICE E. LIMITES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE ACOTACIÓN DE LAS VARIABLES ALEATORIAS UTILIZADOS EN LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE TRÁFICO POR SIMULACIÓN _____	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
3-1. Clasificación de vehículos (NOM-012-SCT-2-2014)	14
3 2. Clasificación del vehículo tipo autobús. (Fuente: NOM-012-SCT-2-2014).	15
3 3. Clasificación del vehículo tipo camión unitario y camión remolque. (Fuente: NOM-012-SCT-2-2014).	15
3 4. Clasificación del vehículo tipo tractocamión articulado. (Fuente: NOM-012-SCT-2-2014).	16
3 5. Clasificación del vehículo tipo tractocamión doblemente articulado. (Fuente: NOM-012-SCT-2-2014).	17
3 6. Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino en toneladas. (Fuente: NOM-012-SCT-2-2014).	18
3 7. Peso bruto vehicular máximo autorizado para la clase B.	18
3 8. Peso bruto vehicular máximo autorizado para las clases C, C-R, T-S, T-S-R y T-S-S.	19
4 1. Significado de cada columna del archivo WIM en el formato DEEFEP, 2015.	31
4 2. Tipos de vehículos que más circulan por las carreteras de México, S.C.T., 2014.	27
5-1. Datos utilizados en el módulo generador de tráfico vehicular para generar el archivo de la carretera Querétaro-San Luis Potosí, obtenidos de las publicaciones anuales de la S.C.T., 2014.	39
5-2. Datos utilizados en el módulo generador de tráfico vehicular para generar el archivo del libramiento nororiente de la ciudad de Querétaro, obtenidos de las publicaciones anuales de la S.C.T., 2014.	42
5-3. Valores extremos obtenidos con el software DEEFEP para la carretera Querétaro-San Luis Potosí.	45
5-4. Valores máximos de carga registrados para la carretera Querétaro-San Luis Potosí.	47
5-5. Valores extremos obtenidos con el software DEEFEP para el libramiento nororiente.	47
5-6. Valores máximos de carga registrados para el libramiento nororiente.	49
5-7. Comparación de la carga lineal máxima y extrema a 50 años en el tráfico simulado de la carretera Qro-SLP con las cargas reglamentarias de diseño SCT, AASHTO y el modelo propuesto.	50
5-8. Comparación del peso máximo registrado del vehículo de 3 ejes en el tráfico de la carretera Qro-SLP con las cargas reglamentarias de diseño SCT y AASHTO.	50
5-9. Carga lineal máxima y extrema a 50 años para cada tipo de vehículo en el tráfico simulado de la carretera Qro-SLP.	51
5-10. Comparación de la carga lineal máxima y extrema a 50 años en el tráfico simulado del libramiento nororiente de Qro. con las cargas reglamentarias de diseño SCT, AASHTO y el modelo propuesto.	52
5-11. Comparación del peso máximo registrado del vehículo de 3 ejes en el tráfico del libramiento nororiente con las cargas reglamentarias de diseño SCT y AASHTO.	53
5-12. Carga lineal máxima y extrema a 50 años para cada tipo de vehículo en el tráfico simulado del libramiento nororiente.	53
5-13. Probabilidad de excedencia p de $PE1 > CV1$ en 50 años.	54
5-14. Probabilidad de excedencia p de $PT1 > CV2$ en 50 años.	56
5-15. Probabilidad de excedencia p de $PT2 > CV3$ en 50 años.	57
5-16. Valores de $CV1$, $CV2$ y $CV3$ obtenidos con diferentes muestras	58
5-17. Distancias obtenidas con el análisis estadístico.	59

6-1. Datos de entrada utilizados en el módulo generador de tráfico vehicular para generar el archivo de la carretera Querétaro-San Luis Potosí, 2014.	63
6-2. Parámetros de la longitud entre ejes 1 y 2 de la carretera A64.	64
6-3. Parámetros de la longitud entre ejes 1 y 2 de la carretera Qro.-SLP.	64
6-4. Datos de entrada utilizados para generar los escenarios de tráfico vehicular pesado de la carretera Querétaro-San Luis Potosí y del libramiento nororiente de Querétaro, 2014.	71
6-5. Comparación de la carga máxima registrada del vehículo de 3 ejes en el tráfico de la carretera Qro-SLP con las cargas reglamentarias de diseño SCT y AASHTO.	72
6-6. Comparación de la carga lineal máxima y extrema a 50 años en el tráfico simulado de la carretera Qro-SLP con las cargas reglamentarias de diseño SCT, AASHTO y el modelo propuesto.	72
6-7. Comparación de la carga máxima registrada del vehículo de 3 ejes en el tráfico del libramiento nororiente con las cargas reglamentarias de diseño SCT y AASHTO.	73
6-8. Comparación de la carga lineal máxima y extrema a 50 años en el tráfico simulado del libramiento nororiente de Qro. con las cargas reglamentarias de diseño SCT, AASHTO y el modelo propuesto.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2-1. Tipos de puentes de la red federal de carreteras. Fuente: SIPUMEX. _____	7
2-2. Edad de servicio de los puentes. Fuente: SIPUMEX. _____	7
3-1. Diagrama de flujo de simulación MonteCarlo. _____	14
3-2. Modelo conceptual de cargas vivas concentradas propuestas. _____	24
4-1. Metodología integral y estructura para el análisis y evaluación de puentes carreteros del programa DEEFEP 2015. _____	28
4-2. Diagrama del modelo propuesto de generación de escenarios de tráfico vehicular pesado en México por simulación Montecarlo. _____	29
4-3. Análisis estadístico del archivo WIM A64 de Francia realizado con el software DEEFEP a la columna que representa el peso total de los vehículos. _____	30
4-4. Archivo de pesaje en movimiento (WIM) en formato del software DEEFEP, 2014. _____	32
4-5. Datos publicados por S.C.T. del flujo vehicular en el estado de Querétaro, 2014. _____	33
4-6. Datos utilizados en el módulo generador de tráfico vehicular pesado obtenidos de las publicaciones anuales de la S.C.T., 2014. _____	34
5-1. Valores introducidos en la pantalla de inicio del módulo generador de tráfico para generar el archivo correspondiente a la carretera Querétaro-San Luis Potosí, 2014. _____	40
5-2. Archivo simulado de la carretera Querétaro-San Luis Potosí, 2015. _____	41
5-3. Análisis estadístico con el software DEEFEP al archivo de tráfico simulado de la carretera Querétaro-San Luis Potosí, 2015. _____	41
5-4. Valores introducidos en la pantalla de inicio del módulo generador de tráfico para generar el archivo correspondiente al libramiento nororiente, 2014. _____	43
5-5. Archivo simulado del libramiento nororiente de Querétaro, 2015. _____	44
5-6. Análisis estadístico con el software DEEFEP al archivo de tráfico simulado del libramiento nororiente de Querétaro, 2015. _____	44
5-7. Obtención de valores extremos a 50 años por el método POT al archivo de tráfico simulado de la carretera Querétaro-San Luis Potosí mediante el software DEEFEP, 2015. _____	45
5-8. Obtención de valores extremos a 50 años por el método GEV al archivo de tráfico simulado de la carretera Querétaro-San Luis Potosí mediante el software DEEFEP, 2015. _____	46
5-9. Obtención de valores extremos a 50 años por el método GUMBEL al archivo de tráfico simulado de la carretera Querétaro-San Luis Potosí mediante el software DEEFEP, 2015. _____	46
5-10. Obtención de valores extremos a 50 años por el método POT al archivo de tráfico simulado del libramiento nororiente de Querétaro mediante el software DEEFEP, 2015. _____	48
5-11. Obtención de valores extremos a 50 años por el método GEV al archivo de tráfico simulado del libramiento nororiente de Querétaro mediante el software DEEFEP, 2015. _____	48
5-12. Obtención de valores extremos a 50 años por el método GUMBEL al archivo de tráfico simulado del libramiento nororiente de Querétaro mediante el software DEEFEP, 2015. _____	49
5-13. Modelo de cargas vivas vehiculares IMT 66.5 para el análisis longitudinal de puentes, SCT. ____	51
5-14. Modelo de cargas de diseño AASHTO LRFD, 2012. _____	52
5-15. Distribución acumulada para CV1 de los vehículos T3S3 y T3S2R4 de la carretera Qro.-SLP. ____	55
5-16. Distribución acumulada para CV2 de los vehículos T3S3 y T3S2R4 de la carretera Qro.-SLP. ____	56
5-17. Distribución acumulada para CV3 de los vehículos T3S3 y T3S2R4 de la carretera Qro.-SLP. ____	58

5-18. Modelo propuesto de cargas vivas concentradas. _____	60
5-19. Momentos flexionantes máximos producidos por el modelo SCT, el modelo propuesto y el tráfico simulado DEEFEP en puentes de diferentes longitudes, 2015. _____	61
5-20. Modelo propuesto de cargas vivas concentradas (sin escala). _____	62
5-21. Modelo de cargas vivas vehiculares para el diseño de puentes en México (sin escala). _____	62
5-22. Modelo de cargas de diseño AASHTO LRFD, 2012 (sin escala). _____	62
6-1. Distribuciones bimodales de peso total de las carreteras Qro.-SLP y A64. _____	65
6-2. Distribuciones bimodales de peso total de las carreteras A64 y Qro.-SLP. _____	66
6-3. Distribuciones bimodales de peso total del libramiento nororiente y la carretera A64. _____	67
6-4. Distribuciones bimodales de peso total de la carretera A64 y el libramiento nororiente. _____	68
6-5. Distribuciones bimodales de peso total del libramiento nororiente y la carretera Qro.-SLP. _____	69
6-6. Distribuciones bimodales de peso total de la carretera Qro.-SLP y el libramiento nororiente. _____	70

1. INTRODUCCIÓN

Debido al desarrollo social y tecnológico logrado en las últimas décadas los vehículos pesados han mejorado tanto en capacidad de carga como en velocidad de circulación. Se presenta actualmente un incremento pronunciado en la densidad del tráfico vehicular a nivel mundial, además de que los vehículos con sobrepeso reducen la vida útil de las carreteras (Lee et al., 2012), traduciéndose en un aumento en el costo de mantenimiento. Por otra parte, la infraestructura vial va reduciendo su período de vida útil, lo cual presenta la necesidad prioritaria de estudiar el comportamiento de la interacción entre la infraestructura y el tráfico pesado. (Liljencrantz et al., 2007).

Mucha de la infraestructura y puentes se diseñaron con criterios y reglamentos previos a su construcción, por lo que dependiendo de su antigüedad será su vulnerabilidad ante las recientes cargas vehiculares. El comportamiento de las estructuras se va modificando con el tiempo y también la aplicación de las cargas, por lo que las condiciones de linealidad se modifican conforme se aplican cargas extremas. Uno de los aspectos que determinan el estado actual de los puentes carreteros es el fenómeno de fatiga y efectos extremos producidos por tráfico pesado (Bangoura, 2007).

En la UAQ, Bárcenas (2011) desarrolló un software que sistematiza la metodología para evaluar la vida a fatiga en puentes de acero, el cual utiliza datos de pesaje dinámico Weighing in Motion (WIM) para obtener los esfuerzos a través de las líneas de influencia tomando principios elástico – lineales, realizando el conteo de esfuerzos a través del método de Rainflow y la aplicación de la Regla de Miner para la evaluación del daño acumulado y la predicción de la vida a fatiga, esta metodología está basada en las recomendaciones del código europeo (Eurocode, 2003).

Posteriormente Herrada (2013) y Medina (2014) mejoraron el software mencionado anteriormente al agregar mejoras en los cálculos por medio de superficies de influencia, además de crear un enfoque más amigable en la interacción con el usuario e incluir el módulo de puentes de concreto presforzado.

1.1. Descripción del problema

Dadas las nuevas exigencias, se están construyendo puentes de mayor envergadura con claros de más de 40 o 50 metros, lo que implica una revisión más precisa sobre la problemática de fatiga en los mismos ante tráfico pesado (O'Brien et al., 2009). Cabe señalar que el movimiento de mercancías pesadas, se realiza principalmente a través de medios de transporte terrestre, es decir, a través de las carreteras y puentes federales, por lo que es importante tener una infraestructura en buen estado.

Las cargas con las que se diseñan los puentes son idealizadas, en la realidad debido a diversas demandas éstas varían respecto a cada vehículo, para medirlas existen básculas estáticas para el pesaje del tráfico vehicular aunque también existen métodos de pesaje dinámico como lo es el WIM, el cual obtiene datos reales de las cargas aplicadas (Jacob et al., 1989).

Desafortunadamente en México el registro de pesaje en movimiento (WIM) en las carreteras mexicanas no existe (Herrada, 2013), por lo que es necesario generar el tráfico del país por medio de un método de simulación y obtener el archivo en el formato que requiere el software DEEFEP (Diagnóstico estadístico, efectos de fatiga y extremos en puentes) ante cargas de tráfico pesado para realizar el análisis, alimentando esta simulación con los datos que se tengan a la mano obtenidos de CAPUFE (Caminos y puentes federales de ingresos y servicios conexos), S.C.T. (Secretaría de comunicaciones y transportes) y otros más.

Para este proyecto se optará por la simulación Montecarlo ya que es una de las más aplicadas y se utiliza en una infinidad de ámbitos como alternativa a los modelos matemáticos exactos o incluso como único medio de estimar soluciones para problemas complejos. Así, en la actualidad es posible encontrar modelos que hacen uso de simulación Montecarlo en las áreas de: informática, empresarial, económica, industrial e incluso social. En otras palabras, la simulación de Montecarlo está presente en todos aquellos ámbitos en los que el comportamiento aleatorio o probabilístico desempeña un papel fundamental (Samayoa et al., 2006).

1.2. Justificación

Al transcurrir el tiempo, los puentes acumulan deformaciones debido a las cargas a las que están sometidos, cuando estas deformaciones rebasan los límites elásticos o elasto-plásticos de los materiales surgen fracturas que pueden llegar a provocar daño estructural. Por lo anterior, existe una necesidad prioritaria de revisar los puentes ante las demandas de hoy en día (Lindorf and Manfred, 2010).

El adecuado control de carga por cada eje es uno de los temas más esenciales en el transporte por carretera para evitar daños a las infraestructuras y mejorar la seguridad vial. Si las cargas por eje de vehículos exceden los permitidos, las estructuras de las carreteras se deformarán y se requerirán considerables costos económicos para repararlas (Mahmoudabadi and Seyedhosseini, 2012).

Una evaluación más precisa de seguridad puede prevenir reparaciones innecesarias o evita la sustitución de los puentes existentes, que a su vez puede resultar en grandes ahorros de los costos de mantenimiento de la red carretera (O'Brien et al., 2010).

En la actualidad se dispone de métodos visuales y experimentales para detectar el daño provocado a los puentes, pero la viabilidad de estos métodos es poca debido al hecho de que se tiene que tener acceso a todas las partes del puente para poder realizar la evaluación, además de requerir de personal técnico calificado (Carrión et al., 2006).

Debido a la necesidad de evaluar la vida útil restante ante fatiga con las nuevas demandas de los puentes carreteros, es de gran ayuda contar con una herramienta alternativa que integre la metodología que permita realizar estas evaluaciones, sin necesidad de realizar instrumentaciones, pruebas destructivas, ni de requerir de personal técnico calificado como en el caso de inspecciones visuales, además de que facilite el trabajo y permita ahorro de tiempo al sistematizar los procesos. (Bárcenas, 2011).

El objetivo del programa DEEFEP es utilizarse como una herramienta que permita hacer el análisis estadístico de cargas, identificar y realizar comparativas de las leyes de distribución de las variables, pronosticar valores extremos de pesos, realizar el cálculo de líneas y superficies de influencia y estimar la vida a fatiga, siendo éste programa de gran ayuda para realizar la evaluación del comportamiento de puentes ante tráfico pesado (Herrada, 2013).

En particular, los modelos deducidos en este trabajo, de generación de escenarios de tráfico pesado en México, utilizando la simulación Montecarlo e información parcial existente, se sistematizarán e integrarán en un nuevo módulo del programa DEEFEP, desarrollado por Bárcenas (2011), Herrada (2013) y Medina (2014).

1.3. Hipótesis

Se podrán generar escenarios de tráfico pesado para puentes en México por simulación Montecarlo tomando como semillas referentes los registros WIM de Francia y los datos estadísticos provistos por instituciones mexicanas. Éstas cargas y sus distribuciones probabilísticas máximas esperadas se calibrarán con las cargas de diseño de la normatividad existente.

1.4. Objetivo general

Proponer un modelo de generación de escenarios de tráfico pesado representativos de los tráficos de las carreteras y puentes en México y de las cargas de diseño reglamentarias, por simulación Montecarlo, tomando en cuenta la información WIM de Francia e información disponible en México. Además crear algoritmos de generación sistematizada de aplicación de este modelo y su integración al software DEEFEP desarrollado en la UAQ.

1.5. Objetivos particulares

1. Caracterización de los parámetros estadísticos de los registros WIM de Francia.
2. Obtención de información estadística documentada en México del tráfico en las carreteras de México.

3. Definición de las distribuciones probabilistas acotadas y/o truncadas de las variables de peso total, peso por eje, distancia entre ejes, velocidad y tiempo de arribo, para la generación aleatoria de escenarios de tráfico pesado en México.
4. Validación de los escenarios de tráfico simulados por calibración con los escenarios de tráfico y su congruencia con el tráfico en México.
5. Obtención de valores extremos de las cargas totales por aplicación de diferentes métodos de predicción extrema.
6. Calibración de las cargas extremas a 50 años con las cargas reglamentarias.
7. Elaboración de algoritmos para la sistematización del modelo y su integración al programa DEEFEP.
8. Elaboración de manuales y ayudas de utilización de la metodología y módulos desarrollados en ésta tesis.
9. Ejemplos ilustrativos.

1.6. Alcances

Proponer una metodología para la obtención de escenarios de tráfico por simulación Montecarlo con características del tráfico pesado que circula en México basándose principalmente en los registros WIM franceses y en información disponible en el país. Lo anterior para poder utilizarse dentro del software DEEFEP y evaluar en una mejor aproximación el estado en que se encuentran los puentes mexicanos.

1.7. Limitaciones

Dado que en México no se ha implementado un sistema de pesaje en movimiento, esta investigación se limita a desarrollar una herramienta para generar escenarios de tráfico tomando en cuenta pesos estáticos reportados en las estaciones instaladas en el año de 2003, por lo que se espera actualizar el modelo cambiando los pesos de cada tipo de vehículo por pesos actuales y deseando en un futuro implementar el pesaje WIM en las carreteras del país.

2. ESTADO DEL ARTE

Al finalizar el siglo XX, el autotransporte se ha presentado como el modo dominante en el movimiento terrestre de mercancías en gran parte del mundo industrializado. Este predominio del modo carretero en el reparto modal autotransporte-ferrocarril observado en México, en los Estados Unidos de Norteamérica y Europa se ha reafirmado luego de los cambios macroeconómicos resultantes de los acuerdos de libre comercio que cubren extensas regiones.

2.1. Antecedentes en México

En nuestro país, la necesidad de conservar el inventario de puentes de la Red Federal de Carreteras ha llevado a proponer un sistema de administración de puentes, que no solo contenga información relevante de los puentes, sino que incorpore módulos de capacidad de carga y vida útil, además de módulos económicos en la estimación de costos de rehabilitación y un modelo de asignación de prioridades de conservación, basándose en información objetiva, actualizada y completa del estado de las estructuras.

A partir de lo anterior, el interés del tema se ha incrementado, dada la necesidad de seguir operando a los puentes en las condiciones existentes y a la escasez de recursos económicos para mantenerlos, rehabilitarlos, o en el peor de los casos, realizar su reposición; por éstas razones es necesario conocer los efectos de fatiga en puentes para poder realizar intervenciones tempranas y evitar fallas estructurales que llevarían a gastos excesivos.

En México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) son los encargados de realizar la mayor parte de los estudios sobre las redes viales. De acuerdo con estas instituciones existen aproximadamente 9 mil puentes dentro de la red federal de carreteras de México, de los cuales el 63% es de concreto reforzado, el 22% de concreto presforzado, el 8% de concreto y acero, el 4% de acero y el 3% de trilidosa y mampostería principalmente (Carrión et al., 2006).

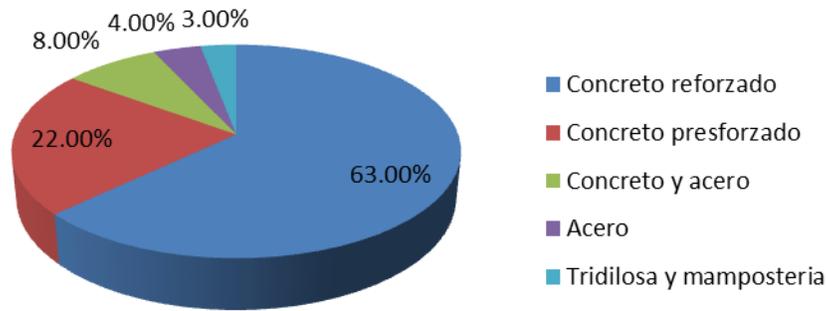


Figura 2-1. Tipos de puentes de la red federal de carreteras. Fuente: SIPUMEX, 2010.

Otro punto importante a considerar es la vida de servicio de los puentes, según datos de SIPUMEX (Sistema de Puentes de México) más del 60% de los puentes tienen más de 30 años de servicio, por lo que el deterioro estructural es significativo, y afecta directamente en el comportamiento de éste. Los requerimientos económicos para mantenimiento, reparación o sustitución son altos, por lo que es importante invertir adecuadamente sólo en los puentes que presenten un mayor deterioro, debido a esto es prioritario contar con una herramienta para determinar el estado en que se encuentran los puentes. El SIPUMEX cuenta con una base de datos en la que se tiene el inventario de todos los puentes con sus características geométricas y estructurales básicas, su ubicación, los materiales con que están contruidos, su estado físico y los datos de tránsito de los vehículos que soportan.

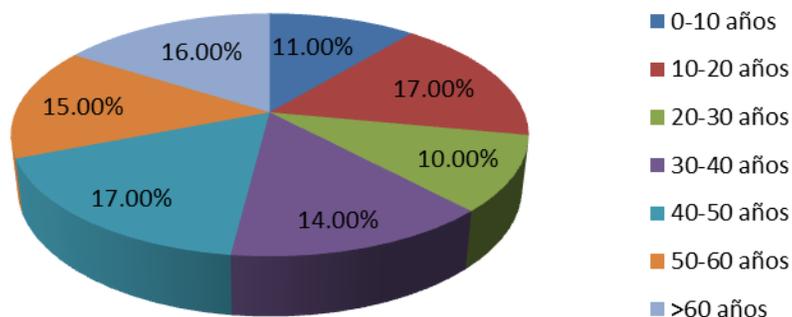


Figura 2-2. Edad de servicio de los puentes. Fuente: SIPUMEX, 2010.

Mendoza et al. (1992) realizaron para el IMT una serie de análisis estadístico de pesos y dimensiones de los vehículos que circulan sobre las carreteras mexicanas para conformar un entorno de operación de los vehículos pesados, en materia de pesos y dimensiones, permitiendo proteger a los pavimentos y puentes de un excesivo deterioro y eventual colapso. Los análisis en éste informe se basaron, primordialmente, en los valores reglamentados en 1980.

Las estaciones de pesaje estático son la forma más común de medir la carga de los vehículos, por lo que han estado en funcionamiento durante muchos años en la mayoría de las carreteras federales de varios países, con el fin de garantizar que los camiones de carga no sobrepasen los pesos jurídicamente permitidos en las localidades correspondientes. Desafortunadamente, las estaciones existentes no son suficientes ante el aumento del parque vehicular de transporte pesado, lo que provoca que aumente la longitud de las colas durante el pesaje. Como consecuencia, se ven transitando ilegalmente camiones con sobrecarga a través de las redes viales (Katz, 2001).

Vehículos que exceden los límites legales de carga aumentan el riesgo de accidentes de tráfico y los daños a la infraestructura. Ello también da lugar a una competencia desleal entre los diferentes modos de transporte y las empresas. Las nuevas tecnologías se están desarrollando para la detección más eficiente de sobrecarga, la tecnología WIM permite que los camiones puedan ser pesados en el flujo de tráfico sin ninguna interrupción de las operaciones. Se ha utilizado con gran éxito desde hace casi dos décadas, ha ayudado a reducir el número de camiones sobrecargados, y ha contribuido a un uso más eficiente y eficaz del tiempo de las autoridades de tránsito (Jacob and Feypell, 2010).

2.2. Antecedentes en E.U.A.

Los Estados Unidos de América es uno de los países con mayor avance en el estudio de los puentes carreteros, esto debido a que su infraestructura vial está compuesta en gran parte por este tipo de construcciones (Lee et al. 2012). En 1974 la Federal-Aid Highway Amendments aumentó el peso permitido en el sistema vial interestatal a 20 mil libras en un solo eje, 34 mil libras en un doble eje y 80 mil libras de peso total bruto (Kwon and Frangopol, 2010).

Przekop et al (2006) evalúan la calidad con que se estima la vida a fatiga teniendo una historia de esfuerzos amplia a través de un método para estructuras sometidas a vibraciones aleatorias y geoméricamente no lineales. Las magnitudes de los esfuerzos son obtenidas por medio del conteo de Rainflow, el cual proporciona estimaciones precisas para la predicción de la vida a fatiga. La resistencia a la fatiga se calcula utilizando los rangos de tensión adecuados para el material (curvas S-N) y un principio lineal de cálculo de daño acumulado (regla de Miner).

McInnes and Meehan (2008) hacen la evaluación de la posibilidad de fatiga en los detalles de conexiones de puentes de acero, y a su vez, se basa en las curvas S-N de las especificaciones del AASHTO y en la regla de daño acumulado de Miner. El enfoque propuesto es aplicado a un puente real, el cual está controlado por la Tecnología Avanzada para Grandes Sistemas Estructurales, ATLSS, del Centro de Investigación Nacional de Ingeniería en la Universidad Lehigh. Con los datos de monitoreo de campo se estiman los esfuerzos efectivos y el número de ciclos de esfuerzo para la predicción de vida a fatiga.

2.3. Antecedentes en Asia

Yang and Su (2011) mencionan en su trabajo el fenómeno de fatiga en puentes de acero en Japón. En este artículo sugieren un parámetro para predeterminar la vida a fatiga de las vigas principales de puentes de claro corto y medio, con sección tipo I y rectangular, teniendo en cuenta su estructuración y las propiedades de carga. Este parámetro da un factor en función de una carga modificada descrita de manera matemática y obtenida con la simulación Monte Carlo. Los resultados pueden ser convenientemente utilizados para determinar en qué condiciones un puente de acero puede presentar daños por fatiga en la etapa de vida útil. Además, se describe el procedimiento de análisis por fatiga de la siguiente forma: en primer lugar, se mueve la carga de diseño a lo largo de un eje del puente y se calculan los rangos de esfuerzos y sus frecuencias en el punto de análisis, entonces, se determina si el diseño es bueno o no mediante la comparación de los rangos de esfuerzos y la resistencia a fatiga dada en las especificaciones de diseño. El cálculo de tensiones se hace mediante líneas de influencia y la resistencia a fatiga se obtiene con la comparación entre las curvas S-N y el histograma de rangos de esfuerzo, construido mediante la

aplicación del método de Rainflow. Finalmente utiliza la Regla de Miner para estimar la vida remanente del puente.

Karim et al. (2013) realizaron procedimientos probabilísticos basados en teorías de confiabilidad, con el fin de lograr una estimación racional de los daños por fatiga en puentes ferroviarios de Corea del Sur. Los procedimientos sistemáticos para evaluar el nivel de confiabilidad y la resistencia a fatiga de un puente ferroviario de acero se muestran mediante el estudio de los miembros críticos, los cuales son seleccionados entre aquellos que experimentan rangos de esfuerzos máximos (superiores a 2 millones de ciclos) causados por la condición de carga máxima. Las cargas aplicadas en el puente varían al azar debido a la incertidumbre de las condiciones de demanda, tales como horarios de tráfico, el volumen de pasajeros, días no hábiles, etc. Durante el proceso se identificaron miembros con fisuras, por lo cual se propuso un método de reparación que mejora su resistencia ante el fenómeno de fatiga.

3. MARCO TEÓRICO

A continuación se describen los elementos utilizados en la metodología para elaborar el presente trabajo de investigación:

3.1. Pesaje dinámico

El sistema WIM (Weighing in motion) ha sido desarrollado desde la década de 1950 con el propósito de reducir las amenazas de camiones sobrecargados a las operaciones de transporte en carreteras (Morales-Nápoles and Steenbergen, 2014). WIM tiene como objetivo ayudar a minimizar los problemas relacionados con lo siguiente:

- Evitar los accidentes de tráfico debido a la mayor inestabilidad del camión, pérdida de movilidad y maniobrabilidad o sobrecalentamiento de los neumáticos.
- Daños a la infraestructura, ayudando a prevenir el daño al pavimento y puentes.

Europa es el lugar donde la implementación del pesaje en movimiento ha tenido mayor impacto. O'Brien and Znidaric (2001) menciona el proyecto denominado WAVE (Weighing-in-motion of Axles and Vehicles for Europe), donde se realiza el estudio de pesaje en movimiento en carreteras y puentes, necesario para hacer frente a los requisitos de investigación. El sistema de pesaje WAVE fue un proyecto terminado en junio de 1999 y su objetivo era llevar a cabo un importante paso para el estudio de las vialidades europeas, facilitando el trabajo de los responsables de la restauración de carreteras a través de las siguientes acciones:

- Mejorando el funcionamiento y la capacidad de los sistemas convencionales de WIM (Weigh In Motion) para estimar con precisión las cargas estáticas y las mediciones de las fuerzas de impacto dinámico por ejes, esto a través del uso de matrices de sensores cuyos resultados combinados pueden permitir la interacción dinámica entre el vehículo y el pavimento.

- Desarrollando centros de recolección de datos con formatos comunes y procedimientos de garantía de calidad para facilitar el intercambio y la comparación de los datos de WIM en toda Europa, aumentando así la confianza de éstos.
- Realizando pruebas en los sistemas de pesaje para evaluar su durabilidad y rendimiento ante diferentes condiciones climáticas, especialmente en las regiones frías, donde los pavimentos se deforman y los sensores son susceptibles a la sal del deshielo.
- Desarrollando métodos normalizados de calibración y aplicándolos para diferentes climas europeos y distintos tipos de sistemas de WIM.

3.2. Simulación Montecarlo

La simulación Montecarlo es un método estadístico, lo que implica la utilización de una secuencia de números aleatorios para realizar una simulación que emula numéricamente un sistema real mediante un modelo matemático. El proceso físico se simula directamente y no se requiere escribir las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema. El requisito único es que el sistema físico o matemático sea descrito por funciones de densidad de probabilidad (Samayoa, 2006). Una vez que es conocida la función de probabilidad, la simulación Montecarlo puede efectuarse mediante un muestreo aleatorio a partir de la función de densidad de probabilidad para luego efectuar las simulaciones deseadas. De ahí que sea un proceso computacional que utiliza números aleatorios para derivar una salida, por lo que en vez de tener entradas con puntos dados, se asignan distribuciones de probabilidad a alguna o a todas las variables de entrada; esto generará una distribución de probabilidad para una salida, después de una corrida de la simulación.

Los orígenes de esta técnica están ligados al trabajo desarrollado por Stan Ulam y John Von Neumann a finales de los 40 en el laboratorio de Los Álamos, cuando investigaban el movimiento aleatorio de los neutrones. En años posteriores, la simulación de Montecarlo se ha venido aplicando a una infinidad de ámbitos como alternativa a los modelos matemáticos exactos o incluso como único medio de estimar soluciones para problemas complejos (Monforti and Szikszai, 2010).

El algoritmo de simulación Montecarlo Crudo o Puro está fundamentado en la generación de números aleatorios por el método de Transformación Inversa, el cual se basa en las distribuciones acumuladas de frecuencias:

- Determinar la(s) variable(s) aleatoria(s) y sus distribuciones acumuladas
- Generar un número aleatorio $\epsilon \in (0,1)$
- Determinar el valor de la variable aleatoria para el número aleatorio generado de acuerdo a las clases que tengamos
- Calcular media, desviación estándar, error y realizar el histograma
- Analizar los resultados para distintos tamaños de muestra

Otra opción para trabajar con el método Montecarlo es cuando la variable aleatoria no es directamente el resultado de la simulación o tenemos relaciones entre variables:

- Diseñar el modelo lógico de decisión
- Especificar distribuciones de probabilidad para las variables aleatorias relevantes
- Incluir posibles dependencias entre variables
- Muestrear valores de las variables aleatorias
- Calcular el resultado del modelo según los valores del muestreo (iteración) y registrar el resultado
- Repetir el proceso hasta tener una muestra estadísticamente representativa
- Obtener la distribución de frecuencias del resultado de las iteraciones
- Calcular media, desviación estándar, error y realizar el histograma
- Analizar los resultados para distintos tamaños de muestra

Las principales características a tener en cuenta para la implementación o utilización del algoritmo son:

- El sistema debe ser descrito por 1 o más funciones de distribución de probabilidad
- Cómo se generan los números aleatorios es importante para evitar que se produzca correlación entre los valores muestrales
- Establecer límites y reglas de muestreo para las funciones de probabilidad, es decir, conocer qué valores pueden adoptar las variables
- Definir cuándo un valor aleatorio tiene o no sentido para el modelo a simular.

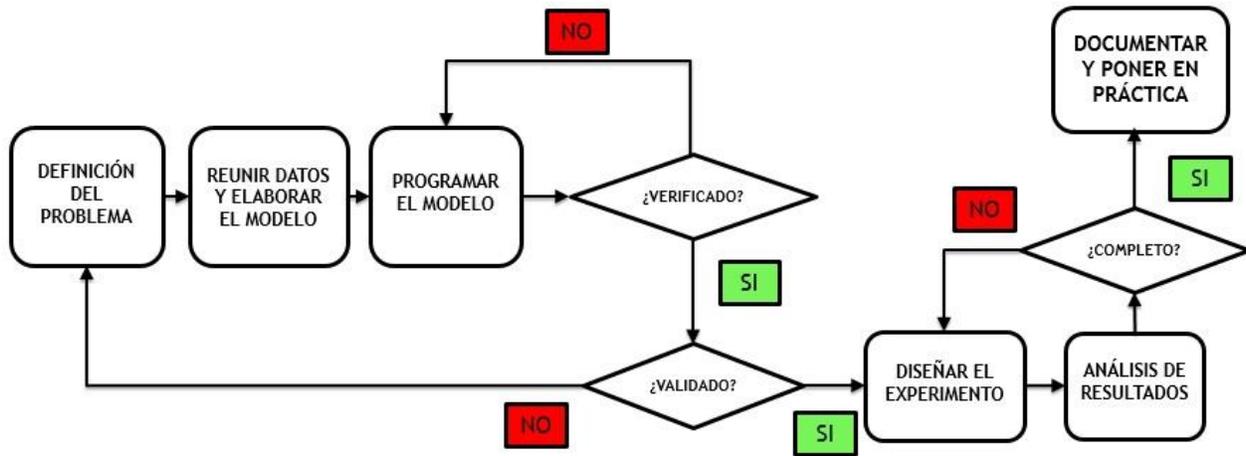


Figura 3-1. Diagrama de flujo de simulación Montecarlo.

3.3. Características de los vehículos pesados en México.

La Norma Oficial Mexicana (NOM-012-SCT-2-2014) se refiere al peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de jurisdicción federal. Para los fines de esta norma los vehículos se clasifican por su clase en:

Tabla 3-1. Clasificación de vehículos (NOM-012-SCT-2-2014)

<i>Clase</i>	<i>Nomenclatura</i>
Autobús	B
Camión unitario	C
Camión remolque	C-R
Tractocamión articulado	T-S
Tractocamión doblemente articulado	T-S-R y T-S-S

Atendiendo a su clase, nomenclatura, número de ejes y llantas se clasifican como:

Tabla 3-2. Clasificación del vehículo tipo autobús. (Fuente: NOM-012-SCT-2-2014).

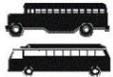
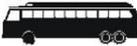
AUTOBÚS (B)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
B2	2	6	
B3	3	8 - 10	
B4	4	10	

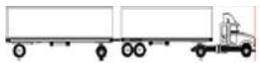
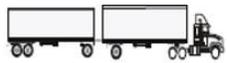
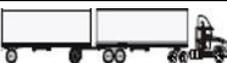
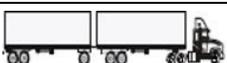
Tabla 3-3. Clasificación del vehículo tipo camión unitario y camión remolque. (Fuente: NOM-012-SCT-2-2014).

CAMIÓN UNITARIO (C)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
C2	2	6	
C3	3	8 - 10	
CAMIÓN - REMOLQUE (C - R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
C2-R2	4	14	
C3-R2	5	18	
C2-R3	5	18	
C3-R3	6	22	

Tabla 3-4. Clasificación del vehículo tipo tractocamión articulado. (Fuente: NOM-012-SCT-2-2014).

TRACTOCAMIÓN ARTICULADO			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	
T3-S2	5	18	
T3-S3	6	22	

Tabla 3-5. Clasificación del vehículo tipo tractocamión doblemente articulado. (Fuente: NOM-012-SCT-2-2014).

TRACTOCAMIÓN SEMIRREMOLQUE – REMOLQUE (T-S-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1-R2	5	18	
T2-S2-R2	6	22	
T2-S1-R3	6	22	
T3-S1-R2	6	22	
T3-S1-R3	7	26	
T3-S2-R2	7	26	
T3-S2-R3	8	30	
T3-S2-R4	9	34	
T2-S2-S2	6	22	
T3-S2-S2	7	26	
T3-S3-S2	8	30	

Las concentraciones máximas de carga por daño a pavimentos por eje de acuerdo al tipo de camino en que transitan son las indicadas en la tabla 3-6. Con el propósito de que los vehículos de pasajeros que cuenten con suspensión automática, circulen con mayor seguridad al permitir una mejor distribución del peso bruto vehicular en los ejes, la SCT podrá autorizar exclusivamente para el eje delantero una concentración máxima de carga de 7.5 toneladas. Así mismo la carga debe ser colocada para que cumpla con el peso bruto vehicular autorizado y la concentración de carga por eje o por configuración de ejes.

Tabla 3-6. Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino en toneladas. (Fuente: NOM-012-SCT-2-2014).

CONFIGURACIÓN DE EJES		VEHÍCULO O CONFIGURACIÓN	TIPO DE CAMINO			
			ET4 Y ET2 A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
	SENCILLO DOS LLANTAS	B, C-R y T-S-R	6.50	6.00	5.50	5.00
		C y T-S	6.50	6.00	5.50	5.00
	SENCILLO CUATRO LLANTAS	B, C-R y T-S-R	10.00	9.50	8.00	7.00
		C y T-S	11.00	9.50	8.00	7.00
	MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	B, C-R y T-S-R	11.00	10.50	9.00	8.00
		C y T-S	12.50	10.50	9.00	8.00
	MOTRIZ DOBLE O TANDEM SEIS LLANTAS	B, C-R y T-S-R	15.00	13.00	11.50	11.00
		C y T-S	18.00	13.00	11.50	11.00
	DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	B, C-R y T-S-R	17.00	15.00	13.50	12.00
		C y T-S	19.00	15.00	13.50	12.00
	MOTRIZ DOBLE O TANDEM 8 LLANTAS	B, C-R y T-S-R	18.00	17.00	14.50	13.50
		C y T-S	21.00	17.00	14.50	13.50
	TRIPLE O TRIDEM DOCE LLANTAS	B, C-R y T-S-R	23.50	22.50	20.00	NA
		C y T-S	26.50	22.50	20.00	NA

El peso bruto vehicular máximo autorizado para cada vehículo o configuración vehicular, según el tipo de camino en que transitan, es el indicado en las tablas 3-7 y 3-8, considerando la suma de pesos por eje. El peso bruto vehicular máximo autorizado para los vehículos y configuraciones vehiculares, se podrá incrementar en 1.5 toneladas en cada eje motriz y 1 tonelada en cada eje de carga exclusivamente cuando circulen por caminos tipo “ET” y “A”, siempre y cuando cumplan con cada una de las especificaciones técnicas y disposiciones de seguridad.

Tabla 3-7. Peso bruto vehicular máximo autorizado para la clase B.

VEHÍCULO O CONFIG. VEHICULAR	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	PESO BRUTO VEHICULAR (ton)			
			ET y A	B	C	D
B2	2	6	19.0	16.5	14.5	13
B3	3	8	24.0	19	17	16
B3	3	10	27.5	23	20	18.5
B4	4	10	30.5	25	22.5	21

Tabla 3-8. Peso bruto vehicular máximo autorizado para las clases C, C-R, T-S, T-S-R y T-S-S.

VEHÍCULO O CONFIG. VEHICULAR	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	PESO BRUTO VEHICULAR (ton)			
			ET y A	B	C	D
C2	2	6	19.0	16.5	14.5	13
C3	3	8	24.0	19	17	16
C3	3	10	27.5	23	20	18.5
C2-R2	4	14	37.5	35.5	NA	NA
C3-R2	5	18	44.5	42	NA	NA
C3-R3	6	22	51.5	47.5	NA	NA
C2-R3	5	18	44.5	41	NA	NA
T2-S1	3	10	30.0	26	22.5	NA
T2-S2	4	14	38.0	31.5	28.0	NA
T3-S2	5	18	46.5	38	33.5	NA
T3-S3	6	22	54	45.5	40	NA
T2-S3	5	18	45.5	39	34.5	NA
T3-S1	4	14	38.5	32.5	28	NA
T2-S1-R2	5	18	47.5	NA	NA	NA
T2-S1-R3	6	22	54.5	NA	NA	NA
T2-S2-R2	6	22	54.5	NA	NA	NA
T3-S1-R2	6	22	54.5	NA	NA	NA
T3-S1-R3	7	26	60.5	NA	NA	NA
T3-S2-R2	7	26	60.5	NA	NA	NA
T3-S2-R4	9	34	66.5	NA	NA	NA
T3-S2-R3	8	30	63	NA	NA	NA
T3-S3-S2	8	30	60	NA	NA	NA
T2-S2-S2	6	22	51.5	NA	NA	NA
T3-S2-S2	7	26	58.5	NA	NA	NA
NA = NO AUTORIZADO						

3.4. El sobrepeso en el autotransporte de carga en México.

El sobrepeso en el autotransporte de carga es una práctica ampliamente extendida alrededor del mundo la cual ocasiona niveles considerables de daño al camino que el responsable de la carretera tiene que reparar, la mayoría de las veces, con presupuestos limitados. El daño al pavimento tiene tres peculiaridades:

- Es atribuible exclusivamente a los vehículos de carga
- Crece muy rápidamente al aumentar los pesos en los ejes de los camiones
- No se percibe tan obviamente como los otros impactos que usualmente saltan a la vista

Hoy en día, los sistemas carreteros en la mayoría de los países desarrollados han dejado atrás su etapa de crecimiento; y la idea de asignar más recursos a la conservación de infraestructuras que a la extensión de estos sistemas, aparece con un gran sentido de actualidad. El sustancial incremento en el daño al camino que los movimientos sobrecargados generan perturban de modo notable los planes de mantenimiento y reparación del responsable del camino.

La práctica de sobrecargar los camiones, independientemente de su obvia ilegalidad y de su conexión con el aumento del riesgo de accidentes en los movimientos de carga, genera elevados costos de conservación para el responsable del camino, quien no siempre dispone del presupuesto necesario para mantener las carreteras en niveles aceptables de calidad. Desde el punto de vista del responsable del cuidado del camino, el sobrepeso en los camiones de carga genera serios impactos que se manifiestan por el deterioro acelerado del pavimento y el daño estructural a los puentes; por lo que es un problema que se tiene que enfrentar y controlar. Para ello requiere estimar la magnitud y los costos asociados al daño resultante, a fin de proponer medidas que reduzcan, o al menos compensen, este impacto negativo.

La práctica de sobrecargar los camiones, tiene cierta racionalidad desde el punto de vista económico, ya que aumenta la productividad al reducir el número de viajes requerido para

transportar y bajar los costos. Desde el punto de vista del transportista naturalmente se prefiere mover carga en carro completo a moverla al 50% de la carga útil ya que así reduce el costo. El operador que decide mover carga a niveles superiores a la carga útil especificada legalmente, incurre en sobrecarga, pero reduce el costo por ton-km; de este modo la sobrecarga resulta un incentivo económico ya que los transportistas consideran a las multas por sobrepeso como parte de los costos de operación, anulando así su efecto de disuasión.

El sobrepeso ocurre no solamente en el PBV, sino también en ejes (o grupos de ejes) individuales. Esta observación resalta el hecho de que algunos transportistas pudieran incurrir en sobrepeso de manera inadvertida, aun cuando sus camiones respeten los PBV máximos autorizados.

Para que el sobrepeso se presente en el transporte carretero de carga, tres condiciones básicas son necesarias:

- La sobrecarga debe ser físicamente factible. Tiene que ver con el tipo de carga movida y las características del camino y del vehículo.
- Los costos resultantes para el operador del transporte tienen que ser un incentivo económico para el mismo. Esta observación lleva a analizar los beneficios del sobrepeso en las operaciones del transportista, así como los límites en los cuales resulta conveniente llevar sobrecarga.
- La vulnerabilidad de los sistemas de vigilancia, que tiene que ver con la imposibilidad práctica de contar con sistemas de coerción al cumplimiento completamente infalibles, que a la vez no resulten excesivamente costosos. Esta observación no es una crítica a los sistemas de vigilancia establecidos; más bien sugiere analizar los elementos disponibles para controlar el sobrepeso en el transporte carretero de carga, así como sus alcances y limitaciones.

Hacer valer los reglamentos de pesos vehiculares vigentes es tarea común de los planificadores de caminos en todo el mundo. La historia del sobrepeso en camiones de carga ha señalado con frecuencia la incapacidad de los esquemas de vigilancia en uso para manejar el problema. Dos parámetros básicos sustentan la eficacia de un esquema de vigilancia de la reglamentación:

- La capacidad de inspección
- El nivel de las multas.

El primero determina la probabilidad de detener a los transgresores, la cual al multiplicarse por la segunda, da la multa esperada que en promedio pagará el operador con sobrepeso. La probabilidad de detener a los operadores sobrecargados varía de lugar a lugar, dependiendo de la extensión de la red de caminos y de los recursos disponibles para vigilancia.

Las estaciones fijas por ser un elemento claramente localizado en el proceso de selección de ruta, se convierten en obstáculos para los transportistas que tratan de evadir la inspección de peso. Un problema es que cuando el tráfico aumenta a niveles que exceden la capacidad de revisión se forman colas, que generan conflictos en el desvío de camiones para inspección y en la reincorporación de los ya revisados al tráfico que cruza. En estas circunstancias, cierto número de camiones pasan la estación sin ser revisados, quizá llevando sobrepeso.

Una estrategia común de los transportistas que quieren evitar la inspección es usar rutas alternas para esquivar la estación de pesaje (Moreno, 2004). Esta circunstancia hace evidente la utilidad de las básculas portátiles y el equipo WIM, como estrategia adicional que complementa el esquema de estaciones fijas para hacer cumplir los reglamentos de pesos en vigor. Las estaciones fijas manejan volúmenes vehiculares mayores y dan pesaje preciso con básculas estáticas, pero carecen de la versatilidad del equipo móvil y son bastante más caras.

Por lo anterior se buscan esquemas efectivos de control del sobrepeso, enfocados en frenar el acelerado desgaste de la infraestructura que este impacto genera, y que propicien así un uso más racional de la carretera y una mayor durabilidad de los recursos empleados en su mantenimiento.

De este modo, algunas estrategias como: la promoción del uso de vehículos con más ejes a fin de distribuir mejor el peso total de la carga, esquemas de sanciones de gran severidad o la mejora de las probabilidades de detección de camiones sobrecargados por medio de encuestas de pesaje o sistemas de pesaje en movimiento (WIM) pueden ser medidas para empezar a reducir los impactos negativos de la práctica de sobrecargar.

3.5. Obtención del modelo virtual de cargas vivas de diseño

Para proponer un modelo de cargas vivas utilizando los escenarios de tráfico simulados con el software DEEFEP para después compararlo con la normativa vigente de diseño para puentes en México se toma como base el trabajo realizado por el Instituto Mexicano del Transporte para su publicación técnica No. 118 llamada “Modelo de cargas vivas vehiculares para diseño estructural de puentes en México” (Rascón, 1999) y se proponen los siguientes pasos:

- a) Elaborar el diseño conceptual del modelo de cargas concentradas.
- b) Proponer una metodología para integrar cuantitativamente el modelo de cargas concentradas.
- c) Obtención de la ley de probabilidades de PE1, PT1 y PT2 así como los valores correspondientes a cada variable del modelo de cargas vivas concentradas.
- d) Validación utilizando los momentos flexionantes máximos del escenario de tráfico simulado.

3.5.1. Diseño conceptual del modelo de cargas concentradas

La información procesada que se utiliza corresponde a los valores de peso por eje, separación entre ejes y peso bruto vehicular. Para realizar los estudios estadísticos y probabilísticos se tomó en cuenta sólo los vehículos T3S3 y T3S2R4 ya que en la publicación técnica No. 97 “Análisis normativo y estadístico de cargas vivas en México” (Rascón, 1997) se comprobó que los elementos mecánicos más grandes en los puentes son ocasionados por los mencionados tipos de vehículos; así mismo, se tuvo la consideración que las cargas más grandes que los vehículos transmiten a la estructura de los puentes, se agrupan en los ejes que conforman tándems, trídems y dobles tándems.

Como punto de partida se plantea que el momento flexionante máximo que cada vehículo le ocasiona a un puente depende principalmente de las cargas totales de cada grupo de ejes y de la ubicación de sus líneas de acción. Para el modelo de cargas vivas vehiculares se propone un vehículo virtual que tiene un eje delantero, un intermedio y un trasero; el delantero corresponde al primer eje del tractor, el intermedio representa la carga total que se transmite por el tándem del tractor y el trasero representa el peso total que transmite el tridem de los vehículos T3S3y el doble tándem de los T3S2R4. El sistema de cargas vivas concentradas tiene la topología mostrada en la figura 3-2, el cual corresponde a un vehículo virtual con tres cargas virtuales CV1, CV2 y CV3 separadas por dos distancias d_1 y d_2 .

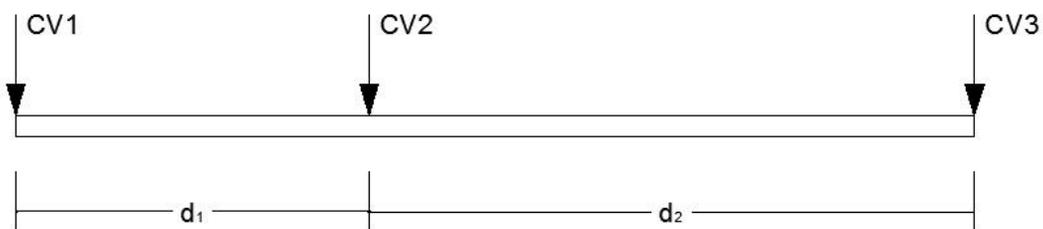


Figura 3-2. Modelo conceptual de cargas vivas concentradas propuestas.

Para calcular los valores que se les debe asignar a CV1, CV2 y CV3 se proponen las siguientes variables aleatorias en función de los pesos de los ejes PE_i, donde i es el número de eje:

PE1 = peso del eje 1 (delantero)

PT1 = peso del tándem 1 (del tractor) = PE2 + PE3

PT2 = peso del tándem 2 (del trídem en los T3S3 y del doble tándem en los T3S2R4) = PE4 + PE5 + PE6 + (PE7)

El nombre de PT2 se asigna para dar secuencia a la nomenclatura; las cargas virtuales CV1, CV2 y CV3 se relacionan respectivamente con PE1, PT1 y PT2. Para realizar los análisis estadísticos es necesario calcular primero los valores que asumen las variables anteriores para cada vehículo de la muestra de los vehículos T3S3 y T3S2R4 del escenario de tráfico de la carretera Qro-SLP.

3.5.2. Metodología para integrar cuantitativamente el modelo de cargas concentradas

Para determinar los valores que son asignados a las variables del modelo se propone la metodología siguiente:

- a) Determinar las leyes de probabilidades que representen adecuadamente a las variables PE1, PT1 y PT2 con el fin de poder realizar los análisis probabilísticos de riesgos.
- b) Con base en las leyes de probabilidades, determinar los valores que corresponden a PE1, PT1 y PT2 de manera que sólo se rebasen en un periodo de 50 años con una probabilidad muy baja. Los resultados que así se obtengan serán los valores de las cargas virtuales que integran el modelo, las cuales se denotan como CV1, CV2 y CV3.
- c) Asignar con base en resultados estadísticos, los dos valores de las separaciones que se propongan entre las cargas.
- d) Calcular el factor de carga viva vehicular básico y generar el sistema de cargas concentradas nominales del modelo, en congruencia con el peso bruto máximo establecido en el reglamento de pesos y dimensiones.

e) Aplicar el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas y validar los resultados comparándolos con los momentos máximos producidos por los vehículos del escenario de tráfico generado por simulación en puentes de diferentes longitudes.

3.5.3. Obtención de la ley de probabilidades de PE1, PT1 y PT2 así como los valores correspondientes a cada variable del modelo de cargas vivas concentradas

Para encontrar una distribución de probabilidades que modele razonablemente el comportamiento aleatorio de las variables PE1, PT1 y PT2 se hicieron intentos de ajuste de varias leyes de probabilidades a las frecuencias relativas acumuladas de las variables antes mencionadas, se intentaron la lineal, logarítmica y polinómica de segundo orden, habiendo resultado esta última como la mejor. Por lo tanto, se considera adecuada para realizar el análisis probabilístico de los riesgos de excedencia y seleccionar los valores para CV1, CV2 y CV3, además se obtuvieron también las distancias d1 y d2 del modelo virtual de cargas vivas concentradas.

3.5.4. Validación utilizando los momentos flexionantes máximos

Con el fin de validar el sistema de cargas vivas concentradas del modelo propuesto, se calcularon los momentos máximos que éste produce al aplicarse a puentes de 5 a 90 metros. Los resultados se comparan con los producidos por el modelo virtual SCT y con los valores máximos de momento flexionante que el escenario de tráfico simulado le produciría a puentes de longitudes igualmente de 5 a 90 metros.

4. METODOLOGÍA

Para la simulación de escenarios de tráfico vehicular pesado en México se utiliza la información estadística de: archivos WIM de Francia, datos de flujos vehiculares que publica cada año la SCT, así como diversas publicaciones del IMT y otras instituciones. La metodología que se propone en este trabajo de investigación para generar escenarios de tráfico pesado simulado para las carreteras de México se sustenta en los siguientes criterios y/o pasos a seguir:

a) Aprovechando los archivos de mediciones de pesaje en movimiento de Francia y las leyes de distribución de las variables: peso por eje y total, distancia entre ejes, velocidad y tiempo de arribo, se obtienen límites de variabilidad de las variables o rangos de valores que pueden tomar dichas variables, no solamente en términos probabilísticos sino también con representatividad física real y fenomenológica.

b) Aprovechando los parámetros estadísticos reportados por SCT e IMT de los flujos vehiculares pesados de las clases de vehículos, porcentajes por clases en el aforo y pesos estáticos, se alimentan y complementan los datos de entrada del simulador.

c) Con la información anteriormente descrita se inicia el proceso de simulación de números aleatorios para la generación de vehículos pesados, determinando para cada vehículo la clase, fecha y hora de entrada, número de ejes, interdistancia entre ejes, pesos por eje y velocidad, hasta generar el escenario de tráfico pesado del aforo del carretera de interés. En la figura 4-2 se muestra esta metodología a través de un diagrama de bloques.

d) El modelo de generación de escenarios de tráfico pesado simulado se calibra con características de escenarios de tráfico instrumentado de pesaje en movimiento en Francia, y con lo reportado para las cargas vehiculares reglamentarias, utilizando el programa DEEFEP.

La figura 4-1 muestra la ubicación del módulo de generación de tráfico vehicular pesado desarrollado en este trabajo de investigación anexo a la metodología de evaluación de puentes propuesta por Bárcenas, Herrada y Medina en el software DEEFEP.

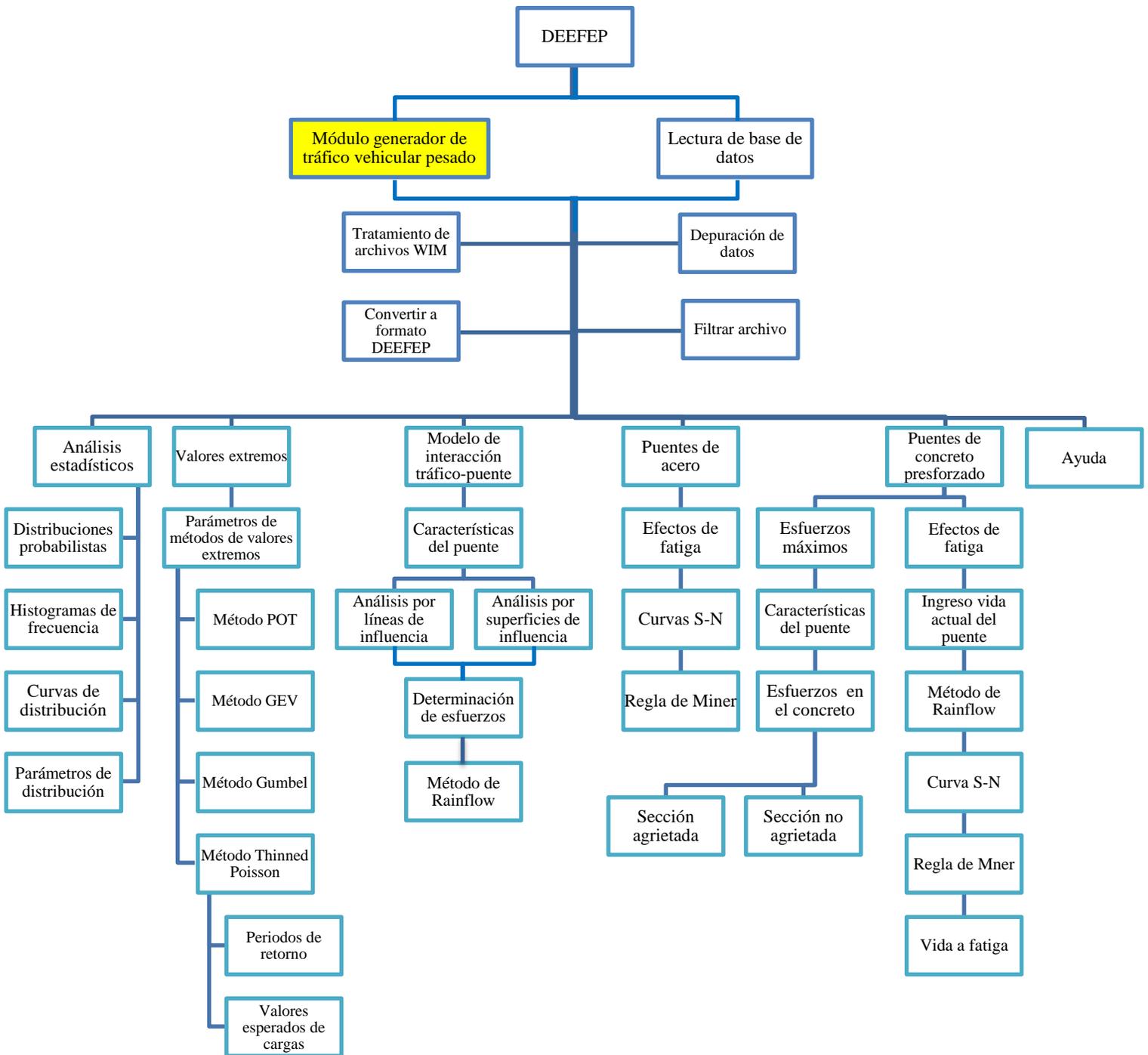


Figura 4-1. Metodología integral y estructura para el análisis y evaluación de puentes carreteros del programa DEEFEP 2015.

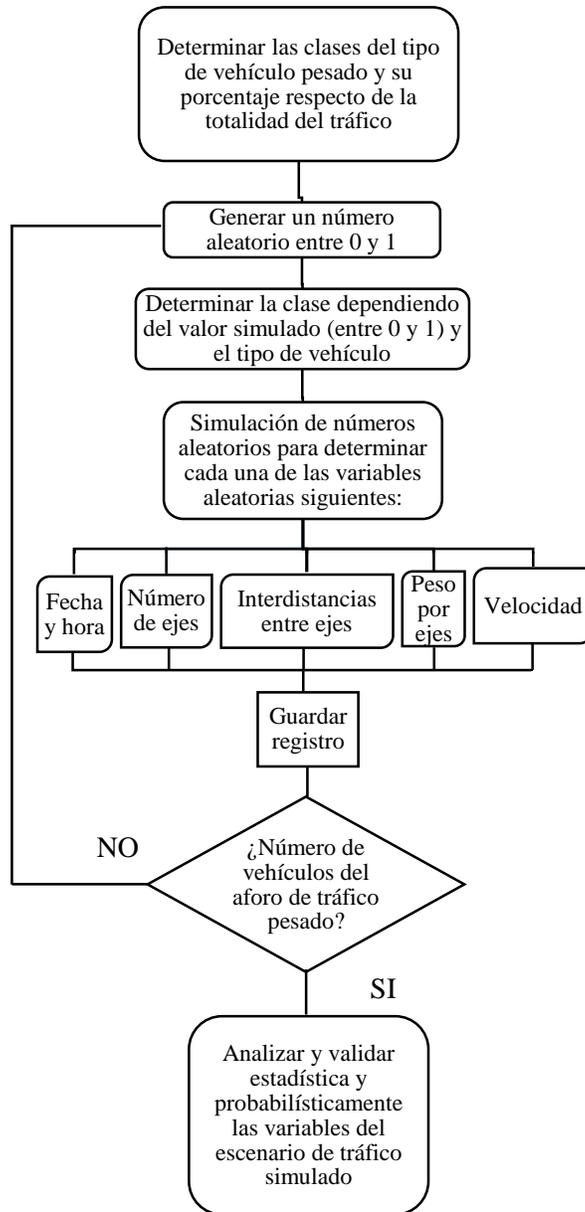


Figura 4-2. Diagrama del modelo propuesto de generación de escenarios de tráfico vehicular pesado en México por simulación Montecarlo.

4.1. Características estadísticas de pesaje en movimiento de vehículos pesados de Francia y su tratamiento con DEEFEP.

Para la caracterización de los registros de tráfico de vialidades francesas se cuenta con registros proporcionados por el Laboratorio Central de Puentes y Caminos (LCPC), se utilizó principalmente el archivo de la carretera A64 ya que cuenta con un mayor número de registros vehiculares, los cuales corresponden a los meses de junio y septiembre de 2007.

En base al análisis estadístico de los archivos WIM que se tienen de las autopistas en Francia, el software DEEFEP muestra en la pantalla los datos leídos, la marca de clase de los rangos, la frecuencia, la frecuencia relativa, el área de las barras (figura 4-3), además de guardar toda la información en un archivo .txt, el cual se ubica dentro de la carpeta asignada al inicio del análisis. Así mismo, el software realiza la aproximación de las curvas de distribución normal y bimodal, ésta última será utilizada para el análisis de valores extremos tanto para el método de Gumbel así como el de Poisson.

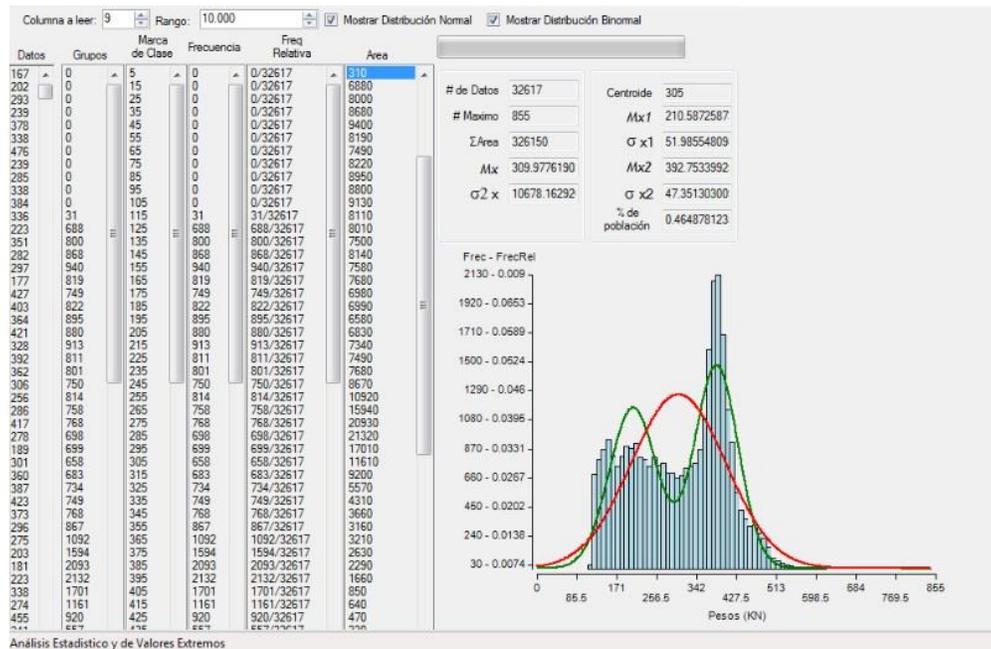


Figura 4-3. Análisis estadístico del archivo WIM A64 de Francia realizado con el software DEEFEP a la columna que representa el peso total de los vehículos, 2015.

La tabla 4-1 muestra el significado de los valores de cada columna del archivo “.txt” en formato DEEFEP que representa los escenarios de tráfico vehicular pesado en Francia. Este tipo de archivo es el resultado de un tratamiento previo que se hace a los archivos proporcionados por el LCPC para poder separar las variables involucradas en cada escenario de tráfico vehicular.

Tabla 4-1. Significado de cada columna del archivo WIM en el formato DEEFEP, 2015.

Columna	Datos por columna	Unidad
1	No. Consecutivo de vehículo	-
2	No. De estación	-
3	Fecha	(dd/mm/aa)
4	Hora	-
5	Minuto	-
6	Segundo	-
7	Centésima de segundo	-
8	Velocidad	dm/s
9	Peso total del vehículo	kN
10	Longitud total del vehículo (del eje inicial al eje final)	dm
11	Numero de ejes	-
12	Peso en el eje 1	kN
13	Longitud del eje 1 al eje 2	dm
14	Peso en el eje 2	kN
15	Longitud del eje 2 al eje 3	dm

27	Longitud del eje 8 al eje 9	dm
28	Peso en el eje 9	kN

La figura 4-4 muestra la distribución de columnas de un archivo de tráfico pesado en formato DEEFEP que representa cada una de las variables de los registros de pesaje WIM mencionadas en la tabla anterior.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
00001	02009	010308	00	03	23	64	233	0349	119	5	062	36	094	57	065	13	064	13	064	00	000	00	000	00	000	00	000
00002	02009	010308	00	05	01	54	244	0362	122	5	076	38	139	58	048	13	048	13	051	00	000	00	000	00	000	00	000
00003	02009	010308	00	05	09	88	275	0177	062	2	060	62	117	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00004	02009	010308	00	05	45	80	217	0371	120	5	065	36	097	58	071	13	069	13	069	00	000	00	000	00	000	00	000
00005	02009	010308	00	06	41	76	247	0289	120	5	064	36	060	58	056	13	054	13	055	00	000	00	000	00	000	00	000
00006	02009	010308	00	06	43	48	244	0146	119	4	056	37	039	69	029	13	022	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00007	02009	010308	00	08	58	22	253	0230	121	5	063	38	065	57	035	13	034	13	033	00	000	00	000	00	000	00	000
00008	02009	010308	00	09	34	88	239	0103	054	2	044	54	059	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00009	02009	010308	00	10	55	76	244	0308	121	5	068	38	094	57	050	13	049	13	047	00	000	00	000	00	000	00	000
00010	02009	010308	00	11	31	46	247	0242	120	5	065	36	096	58	026	13	027	13	028	00	000	00	000	00	000	00	000
00011	02009	010308	00	12	55	68	244	0308	144	5	066	49	081	14	052	66	054	15	055	00	000	00	000	00	000	00	000
00012	02009	010308	00	14	33	42	275	0180	075	3	057	62	084	13	039	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00013	02009	010308	00	15	17	68	247	0159	097	4	056	37	043	47	032	13	028	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00014	02009	010308	00	17	20	58	278	0184	058	2	065	58	119	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00015	02009	010308	00	18	38	60	242	0260	121	5	067	37	109	58	028	13	028	13	028	00	000	00	000	00	000	00	000
00016	02009	010308	00	18	43	78	228	0346	121	5	065	37	108	58	058	13	059	13	056	00	000	00	000	00	000	00	000
00017	02009	010308	00	19	15	52	272	0179	063	2	059	63	120	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00018	02009	010308	00	19	41	10	242	0112	121	4	028	45	041	68	023	08	020	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00019	02009	010308	00	21	16	20	244	0178	121	5	060	38	049	57	023	13	023	13	023	00	000	00	000	00	000	00	000
00020	02009	010308	00	24	08	66	222	0354	120	5	063	36	101	58	063	13	064	13	063	00	000	00	000	00	000	00	000
00021	02009	010308	00	25	30	30	244	0178	162	5	052	45	042	14	024	52	030	51	030	00	000	00	000	00	000	00	000
00022	02009	010308	00	25	45	22	336	0031	033	2	015	33	016	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00023	02009	010308	00	26	15	76	247	0221	124	5	055	39	053	59	039	13	037	13	037	00	000	00	000	00	000	00	000
00024	02009	010308	00	27	43	62	244	0383	120	5	080	38	104	56	068	13	066	13	065	00	000	00	000	00	000	00	000
00025	02009	010308	00	28	00	14	247	0034	037	2	015	37	019	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00026	02009	010308	00	28	37	40	244	0152	121	5	052	39	045	56	018	13	019	13	018	00	000	00	000	00	000	00	000
00027	02009	010308	00	29	37	28	250	0241	119	5	068	37	072	56	036	13	033	13	032	00	000	00	000	00	000	00	000
00028	02009	010308	00	30	06	60	278	0188	080	3	062	67	085	13	041	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00029	02009	010308	00	30	16	46	281	0178	058	2	060	58	118	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00030	02009	010308	00	31	40	34	231	0392	148	5	062	49	122	14	058	68	075	17	075	00	000	00	000	00	000	00	000
00031	02009	010308	00	33	51	92	272	0234	072	3	066	59	115	13	053	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00032	02009	010308	00	34	08	32	250	0311	123	5	063	37	128	60	040	13	041	13	039	00	000	00	000	00	000	00	000
00033	02009	010308	00	34	54	76	211	0150	120	5	060	36	035	58	019	13	018	13	018	00	000	00	000	00	000	00	000
00034	02009	010308	00	37	44	96	242	0180	121	5	060	37	055	58	021	13	024	13	020	00	000	00	000	00	000	00	000
00035	02009	010308	00	38	29	10	236	0226	120	5	065	37	073	57	030	13	029	13	029	00	000	00	000	00	000	00	000
00036	02009	010308	00	38	59	90	275	0253	137	5	066	62	111	13	063	55	005	07	008	00	000	00	000	00	000	00	000
00037	02009	010308	00	39	09	18	242	0244	121	4	066	38	085	70	047	13	046	00	000	00	000	00	000	00	000	00	000
00038	02009	010308	00	39	21	20	247	0402	119	5	065	36	123	57	070	13	072	13	072	00	000	00	000	00	000	00	000

Figura 4-4. Archivo de pesaje en movimiento (WIM) en formato del software DEEFEP, 2014.

Para iniciar con el tratamiento de los archivos WIM de escenarios de tráfico primero se eliminan los vehículos ligeros que en el presente ejercicio se establece menor a 35 kN. Esto se hace analizando la columna 9 del archivo que es la que representa el peso total de cada vehículo. A continuación se separa el archivo completo en sub-archivos que contengan vehículos con el mismo número de ejes, utilizando la columna 11 que corresponde al número de ejes. Cuando se ha hecho lo anterior se procede a realizar el análisis estadístico de todas las columnas para determinar la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación en cada sub-archivo.

Al haber obtenido los parámetros estadísticos de cada columna de cada tipo de vehículo se cuenta con una base para comparar los vehículos que circulan en Francia y México para determinar similitudes y diferencias en su configuración vehicular y capacidad de carga.

4.2. Distribuciones de los flujos vehiculares de las carreteras en México.

La S.C.T. a través de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) publica cada año los datos del flujo vehicular que se registra en cada una de las estaciones establecidas en todo el país. Estos datos se toman como base para alimentar el algoritmo generador de tráfico vehicular mexicano que se desarrolla en el presente trabajo de investigación.

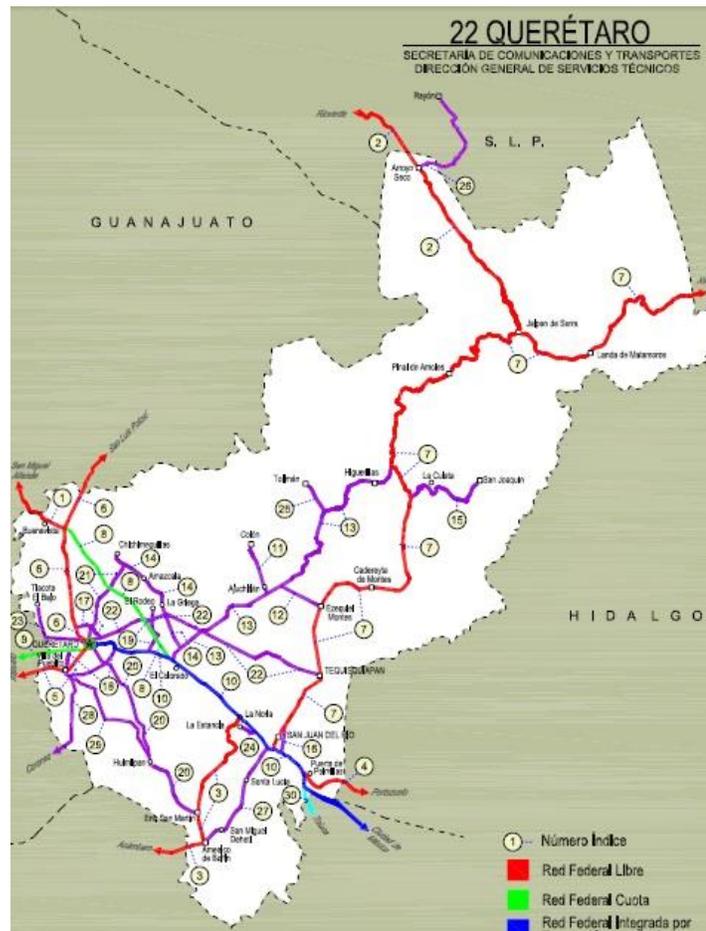


Figura 4-5. Datos publicados por S.C.T. del flujo vehicular en el estado de Querétaro, 2014.

Cada una de las tablas que la S.C.T. publica anualmente cuenta con diferentes datos de interés, como son: año, ruta, tramo carretero observado, lugar, estación y sus coordenadas, tránsito diario promedio anual (TDPA) entre otros; así como también la clasificación vehicular en

porcentaje de las principales clases de vehículos que circulan en las carreteras del país, las cuales son las que se indican en la tabla 4-2.

Tabla 4-2. Tipos de vehículos que más circulan por las carreteras de México, S.C.T., 2014.

TIPO DE VEHÍCULO	DESCRIPCIÓN
M	Motos
A	Automóviles
B	Autobuses
C2	Camiones unitarios de 2 ejes
C3	Camiones unitarios de 3 ejes
T3S2	Tractor de 3 ejes con semirremolque de 2 ejes
T3S3	Tractor de 3 ejes con semirremolque de 3 ejes
T3S2R4	Tractor de 3 ejes con semirremolque de 2 ejes y remolque de 4 ejes
Otros	Considera otro tipo de combinaciones de camiones de carga

Los datos que se toman en cuenta para la alimentación del módulo de simulación de tráfico son el TDPA y los porcentajes de las clases de la tabla 4-2, exceptuando las clases M y A por ser vehículos ligeros, es decir, se introducen solamente los datos correspondientes a vehículos pesados como se indica en la figura 4-6.

QUERETARO

CLAVE: 00111 RUTA: MEX-057 AÑO: 2014

ESTACION		S	TDPA	CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO											COORDEN				
KM	TE			M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	A	B	C	K'	D	LATITUD	LO
0.00	3	1	11454	0.7	83.0	3.0	6.0	1.7	4.1	0.7	0.2	0.6	81.7	3.0	13.3	0.090	0.506	20.822209	-100.4
7.91																			
12.00	1	0	6721	0.9	85.7	3.1	4.6	1.5	3.0	0.6	0.3	0.3	86.6	3.1	10.3	0.103	0.504	20.881011	-100.4
35.11	1	0	10402	1.0	80.9	5.1	6.8	1.4	3.1	0.8	0.2	0.7	81.9	5.1	13.0	0.086	0.504	20.902090	-100.4

Figura 4-6. Datos utilizados en el módulo generador de tráfico vehicular pesado obtenidos de las publicaciones anuales de la S.C.T., 2014.

Los vehículos más comunes en el movimiento de mercancías han sido camiones unitarios C2 y C3, los tractocamiones sencillos T3–S2 y T3–S3 y los tractocamiones doblemente articulados T3–S2–R4. Estos cinco tipos representan más del 95% del total de los vehículos pesados analizados.

La suma de los porcentajes de las clases indicadas en la figura 4-6 se escala uniformemente hasta obtener un 100%. Con los nuevos porcentajes se obtiene la distribución acumulada de las clases para posteriormente generar aleatoriamente un número entre 0 y 1 y después determinar a qué clase corresponde cada número aleatorio generado y continuar con el proceso de simulación.

4.3. Información requerida para el proceso de simulación.

Para poder generar el archivo de cada escenario de tráfico en formato DEEFEP se requiere establecer límites y reglas de muestreo para las funciones de probabilidad, es decir, conocer qué valores pueden adoptar las variables. Para esto se describen a continuación los criterios que se utilizaron para llevarlo a cabo.

4.3.1 Tiempo de simulación.

El tiempo de simulación al que corresponde cada escenario de tráfico se obtiene mediante 2 formas. En la primera, se introduce el número de vehículos que se desea contenga el archivo simulado. Dividiendo este número entre el TDPA que corresponde únicamente a vehículos pesados se obtiene el tiempo de simulación en días, semanas y/o meses. En la segunda, se introduce directamente el número de días a generar. Cabe señalar que a cada escenario de tráfico vehicular se le puede dar una fecha y hora de inicio deseada en particular.

4.3.2 Clasificación en porcentaje del flujo vehicular.

Los porcentajes que corresponden a cada clase de las que se indican en la figura 4-6, es decir las clases que corresponden al tramo en estudio: B, C2, C3, T3S2, T3S3, T3S2R4 y OTROS, además del TDPA, se encuentran en las publicaciones anuales de SCT.

4.3.3 Distancia entre ejes de acuerdo al tipo de vehículo y su número de ejes.

Los datos de entrada de las distancias entre ejes que se utilizaron fueron aquellos que resultaron del análisis paramétrico hecho al archivo WIM de la carretera A64 de Francia en los cuales se utilizó la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada tipo de vehículo de acuerdo a su número de ejes. Para obtener el límite máximo a la media aritmética se le sumaron 2 desviaciones estándar y para el mínimo se le restaron 2, asegurando así contar con una probabilidad del 98% de que esa distancia entre ejes corresponda a una configuración que circule en México. Al tener los límites máximos y mínimos el módulo genera un número aleatorio entre estos 2 límites y adjudica un valor que corresponde a las distancias entre ejes en cada uno de los vehículos generados durante el proceso de simulación para cada tipo de vehículo.

4.3.4 Peso por eje de acuerdo al tipo de vehículo y su número de ejes.

Para obtener los límites máximos y mínimos del peso en cada eje se hizo un procedimiento similar al de las distancias entre ejes sólo que en este caso se utilizó la media aritmética de los pesos registrados por estaciones estáticas en México (Gutiérrez y Mendoza, 2004), para cada clase de vehículo. En la obtención de la desviación estándar se propuso un coeficiente de variación similar al de Francia para con éste y la media aritmética calcularla en cada caso. Para el límite máximo a la media aritmética se le sumaron 2 desviaciones estándar. Para obtener el límite mínimo se tomó el peso promedio de los vehículos vacíos registrado por estaciones estáticas en el país en 2003 para cada tipo de vehículo.

4.3.5 Velocidad de acuerdo al tipo de vehículo.

Los límites máximos y mínimos para la velocidad de cada tipo de vehículo se establecieron de acuerdo a la velocidad máxima y mínima registrada en el archivo WIM de la carretera francesa A64, es decir la velocidad máxima para el límite máximo y la mínima para el límite mínimo.

4.3.6 Tiempo en segundos entre el paso de 2 vehículos por un mismo punto.

Para establecer los límites máximos y mínimos de tiempo en segundos, en los que 2 vehículos pasan por un mismo punto se utilizó la distribución de Poisson obtenida del archivo WIM de la carretera A64 de Francia, analizando las columnas consecutivas correspondientes a la fecha y hora del archivo en formato DEEFEP, obteniendo con ello que el tiempo promedio crítico de arribo entre 2 vehículos es de 2 segundos, utilizando este valor como dato de entrada en el módulo simulador para generar los escenarios de tráfico en México.

4.4. Generación de archivo en formato DEEFEP

Con los datos de entrada mencionados en la sección 4.3 se procede a generar el archivo de texto .txt que tiene el formato desarrollado en el software DEEFEP. El número total de vehículos que contiene el archivo correspondiente a cada escenario de tráfico se calcula mediante 2 formas. En la primera, se introduce directamente el número de vehículos que se desea contenga el archivo. En la segunda, se introduce el número de días que se requiere contenga el archivo, utilizando el TDPA el módulo calcula la cantidad total de vehículos a generar.

Al contar con la cantidad total de vehículos que tendrá el archivo y habiendo introducido los porcentajes de las clases de vehículos pesados proporcionados por las tablas de la S.C.T., se procede a cargar un archivo en formato de excel el cual cuenta con los parámetros máximos y mínimos necesarios descritos en la sección anterior para simular cada clase de vehículo, después el programa genera cuantas veces se requiere un número aleatorio entre 0 y 1 y determina a qué

clase de vehículo corresponde ese número. A continuación de acuerdo a la clase escogida se adjudican valores aleatorios entre los límites máximos y mínimos para cada columna del archivo en formato DEEFEP y posteriormente se escribe una línea del archivo .txt, la cual representa un vehículo con las características del tipo elegido en cada iteración y se repite el proceso hasta llegar a la cantidad total de vehículos ingresada. Este modelo de generación de escenarios de tráfico vehicular pesado es el que se indica en la figura 4-2.

Los valores que pueden tomar cada una de las variables en cada una de las diferentes clases de vehículos se describen en el apéndice E.

5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Para ilustrar la metodología propuesta en este trabajo de investigación se generaron 2 escenarios de tráfico, correspondientes a la carretera federal libre MEX-057 en la ruta Querétaro-San Luis Potosí y al libramiento nororiente de cuota de la ciudad de Querétaro MEX-057D. Estos escenarios corresponden a un periodo de 30 días de tráfico.

5.1. Generación del escenario de tráfico simulado para la carretera Querétaro-San Luis Potosí.

Para la generación del archivo correspondiente al escenario de tráfico de este ejemplo se tomaron como datos de entrada los porcentajes de clase indicados en la tabla 5-1 los cuales se registraron en el año 2014 en la estación del km 0.00 ubicada en el tramo entronque Buenavista-San Miguel de Allende.

Tabla 5-1. Datos utilizados en el módulo generador de tráfico vehicular para generar el archivo de la carretera Querétaro-San Luis Potosí, obtenidos de las publicaciones anuales de la S.C.T., 2014.

TDPA	Clasificación vehicular en porcentaje						
	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS
11454	3.0	6.0	1.7	4.1	0.7	0.2	0.6

El procedimiento completo para la generación de este archivo se presenta en el Apéndice A al final de esta tesis. En la figura 5-1 se muestran los valores introducidos en el módulo de generación de tráfico, además se indica que la fecha inicial del archivo para este caso se tomó el día 1 de diciembre de 2015 y como hora inicial las 00:00, pudiéndose haber tomado otras cualesquiera. El tiempo promedio de arribo entre un vehículo y otro se propuso de 2 segundos. El

cálculo del tiempo de duración del escenario simulado se estableció de 30 días, realizándose por medio del método 2 como se observa en la misma figura.

The screenshot shows a software interface for traffic simulation. It includes several input fields and buttons. At the top left is a button labeled "Calcular Rangos.". To its right are fields for "No. Vehiculos" (empty), "No. Dias." (30), and "Fecha:" (01/12/15). Below these are checkboxes for "Metodo 1." (unchecked) and "Metodo 2." (checked). To the right of these are fields for "Hora:" (00:00:00). Below this section is a section titled "(%) Clases Vehiculares" with a row of input fields: 3.0 (B), 6.0 (C2), 1.7 (C3), 4.1 (T3S2), 0.7 (T3S3), 0.2 (T3S2R4), 0.6 (Otros), 11454 (TDPA), and 2 (Tiempo Promedio de ambo entre vehiculos (seg)). To the right of these fields is a button labeled "Poisson". Below the vehicle class fields are two buttons: "Cargar Archivo(Excel)" and "Generar Archivo (txt)". At the bottom left is a label "Guardado en:" followed by an empty text box.

Figura 5-1. Valores introducidos en la pantalla de inicio del módulo generador de tráfico para generar el archivo correspondiente a la carretera Querétaro-San Luis Potosí, 2014.

Al contar con el archivo generado para este ejemplo se realiza un análisis estadístico procediendo como se indica en la sección 4.1, obteniéndose para cada uno de los sub-archivos la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación y con esto poder realizar las comparaciones pertinentes entre cada escenario de tráfico y los valores de entrada propuestos en el modelo. La figura 5-2 muestra los primeros 35 vehículos del archivo generado por simulación para este caso. La figura 5-3 muestra la gráfica del análisis realizado a la columna que representa los pesos totales de los vehículos de la carretera Querétaro-San Luis Potosí. Los valores de los parámetros estadísticos obtenidos para este ejemplo se presentan en el apéndice C.

5.2. Generación del escenario de tráfico simulado para el libramiento nororiente de la ciudad de Querétaro.

Para la generación del archivo correspondiente al escenario de tráfico de este ejemplo se tomaron como datos de entrada los porcentajes de clase indicados en la tabla 5-2 los cuales se registraron en el año 2014 en la estación del km 0.00 del libramiento nororiente.

Tabla 5-2. Datos utilizados en el módulo generador de tráfico vehicular para generar el archivo del libramiento nororiente de la ciudad de Querétaro, obtenidos de las publicaciones anuales de la S.C.T., 2014.

TDPA	Clasificación vehicular en porcentaje						
	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS
6758	2.6	4.1	4.4	30.8	4.9	3.2	0.4

El procedimiento completo para la generación de este archivo se presenta en el Apéndice A al final de esta tesis. En la figura 5-4 se muestran los valores introducidos en el módulo de generación de tráfico, además se indica que la fecha inicial del archivo para este caso se tomó el día 1 de diciembre de 2015 y como hora inicial las 00:00, pudiéndose haber tomado otras cualesquiera. El tiempo promedio de arribo entre un vehículo y otro se propuso de 2 segundos. El cálculo del tiempo de duración del escenario simulado se estableció de 30 días, realizándose por medio del método 2 como se observa en la misma figura.

The screenshot shows a software interface for traffic simulation. It includes several input fields and buttons:

- Calcular Rangos.** (Button)
- No. Vehiculos:** Input field (empty)
- No. Dias:** Input field with value **30**
- Fecha:** Date picker showing **01/12/15**
- Hora:** Time input field showing **00:00:00**
- Metodo 1:**
- Metodo 2:**
- (%) Clases Vehiculares:** A row of input fields with values: **2.6**, **4.1**, **4.4**, **30.8**, **4.9**, **3.2**, **0.4**, **6758**, **2**
- Labels below the percentages: **B**, **C2**, **C3**, **T3S2**, **T3S3**, **T3S2R4**, **Otros**, **TDPA.**
- Poisson** (Button)
- Tiempo Promedio de arribo entre vehiculos (seg)** (Label)
- Cargar Archivo(Excel)** (Button)
- Generar Archivo (txt)** (Button)
- Guardado en:** Input field (empty)

Figura 5-4. Valores introducidos en la pantalla de inicio del módulo generador de tráfico para generar el archivo correspondiente al libramiento nororiente, 2014.

Al contar con el archivo generado para este ejemplo se realiza un análisis estadístico procediendo como se indica en la sección 4.1, obteniéndose para cada uno de los sub-archivos la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación y con esto poder realizar las comparaciones pertinentes entre cada escenario de tráfico y los valores de entrada propuestos en el modelo. La figura 5-5 muestra los primeros 35 vehículos del archivo generado por simulación para este caso. La figura 5-6 muestra la gráfica del análisis realizado a la columna que representa los pesos totales de los vehículos del libramiento nororiente de Querétaro. Los valores de los parámetros estadísticos obtenidos para este ejemplo se presentan en el apéndice D.

5.3. Obtención de los valores extremos de la carga pesada de la carretera Querétaro-San Luis Potosí.

Con el archivo generado por simulación para este ejemplo se obtienen mediante el software DEEFEP los valores extremos a 50 años que se pronostican por los métodos de POT (Peak Over Threshold), GEV (Generalized Extreme Values) y GUMBEL arrojando como resultados los indicados en la tabla 5-3.

Tabla 5-3. Valores extremos obtenidos con el software DEEFEP para la carretera Querétaro-San Luis Potosí.

Pronóstico de valores extremos a 50 años		
POT	GEV	GUMBEL
1164.22 KN	2602.23 KN	936 KN

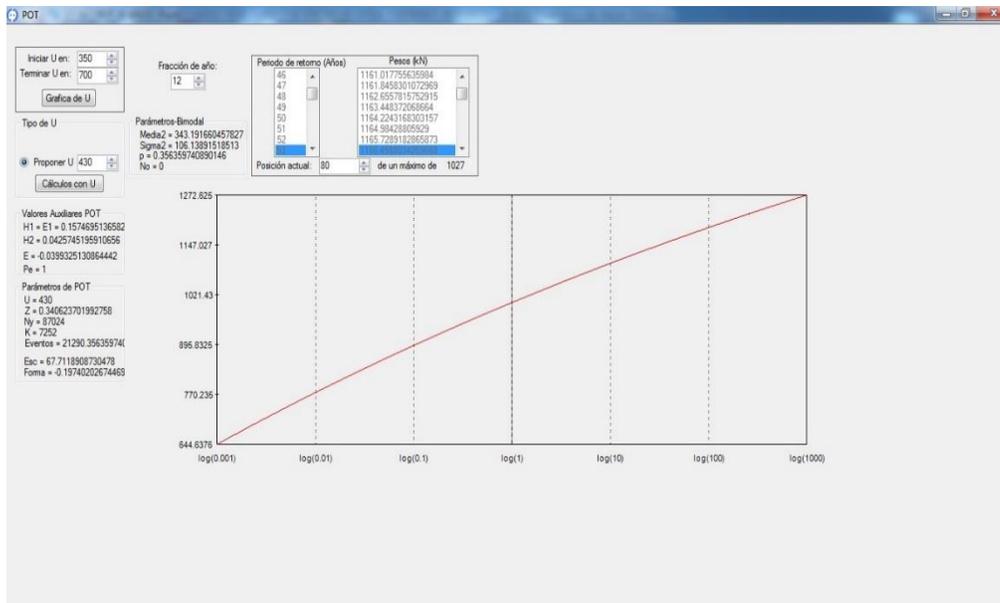


Figura 5-7. Obtención de valores extremos a 50 años por el método POT al archivo de tráfico simulado de la carretera Querétaro-San Luis Potosí mediante el software DEEFEP, 2015.

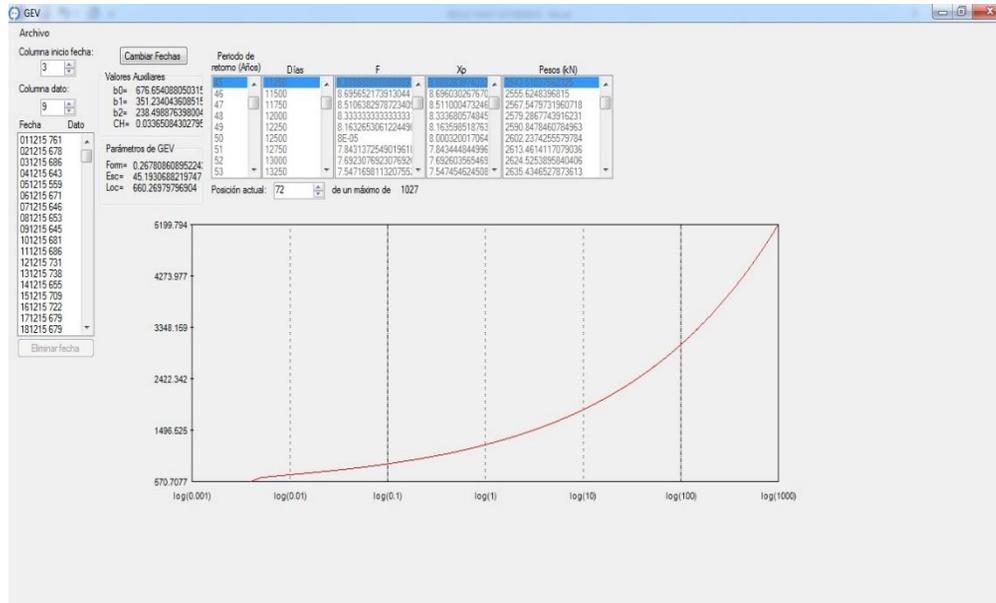


Figura 5-8. Obtención de valores extremos a 50 años por el método GEV al archivo de tráfico simulado de la carretera Querétaro-San Luis Potosí mediante el software DEEFEP, 2015.

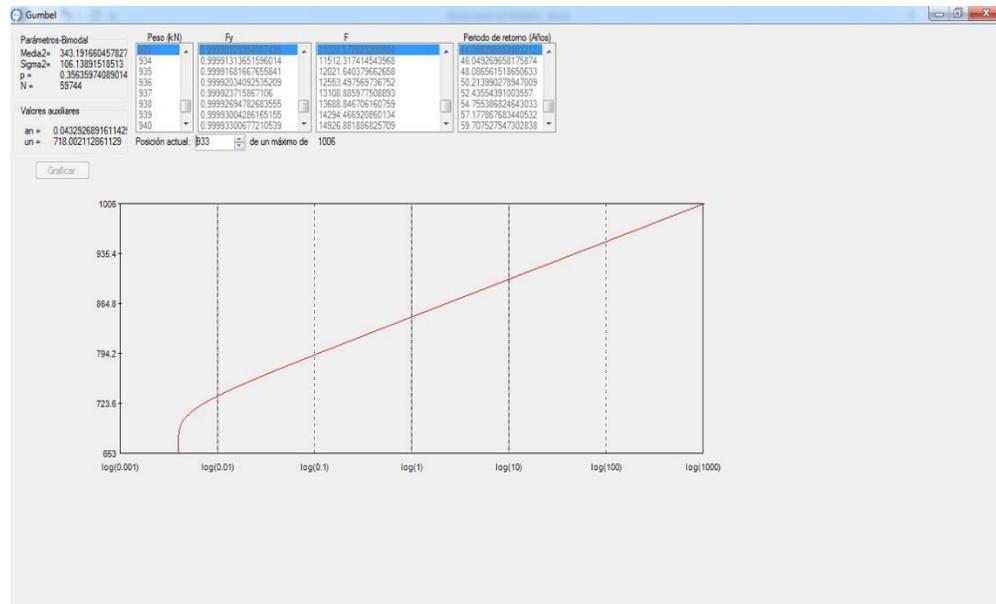


Figura 5-9. Obtención de valores extremos a 50 años por el método GUMBEL al archivo de tráfico simulado de la carretera Querétaro-San Luis Potosí mediante el software DEEFEP, 2015.

Así mismo para este archivo se obtienen las cargas máximas registradas en cada sub-archivo, clasificados por número de ejes, dando como resultado los indicados en la tabla 5-4.

Tabla 5-4. Valores máximos de carga registrados para la carretera Querétaro-San Luis Potosí.

Valores máximos de carga registrados								
Número de ejes	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso (KN)	237	439	416	595	779	686	530	812

5.4. Obtención de los valores extremos de la carga pesada del libramiento nororiente de la ciudad de Querétaro

Con el archivo generado por simulación para este ejemplo se obtienen mediante el software DEEFEP los valores extremos a 50 años que se pronostican por los métodos de POT (Peak Over Threshold), GEV (Generalized Extreme Values) y GUMBEL arrojando como resultados los indicados en la tabla 5-5.

Tabla 5-5. Valores extremos obtenidos con el software DEEFEP para el libramiento nororiente.

Pronóstico de valores extremos a 50 años		
POT	GEV	GUMBEL
1145.23 KN	1917.36 KN	920 KN

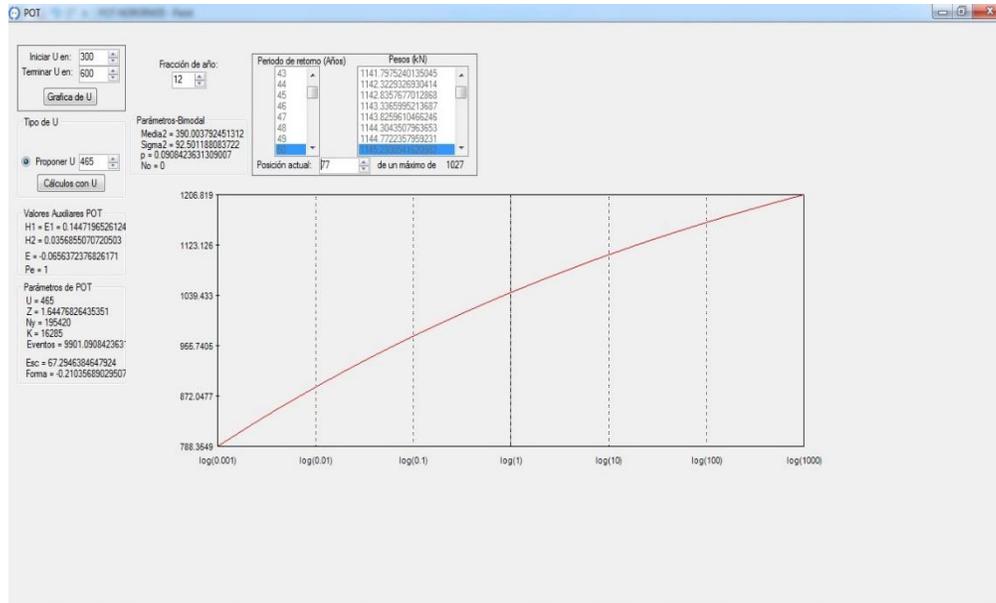


Figura 5-10. Obtención de valores extremos a 50 años por el método POT al archivo de tráfico simulado del libramiento nororiente de Querétaro mediante el software DEEFEP, 2015.

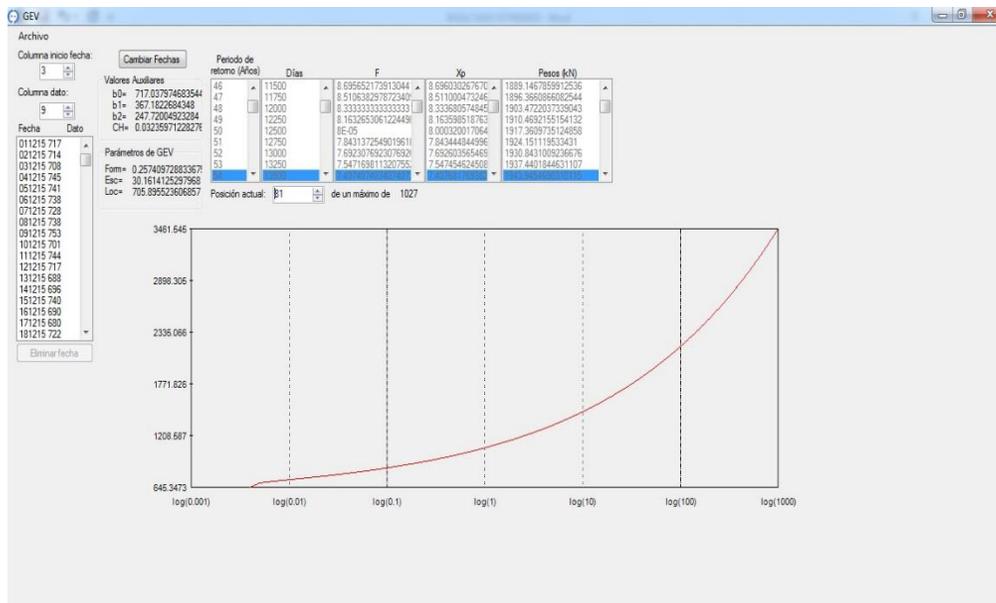


Figura 5-11. Obtención de valores extremos a 50 años por el método GEV al archivo de tráfico simulado del libramiento nororiente de Querétaro mediante el software DEEFEP, 2015.

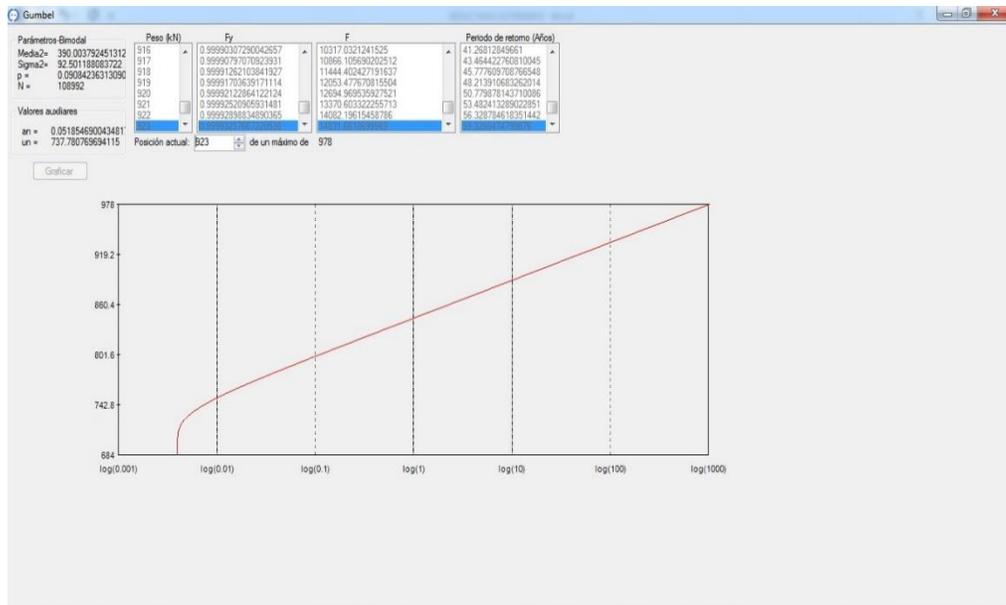


Figura 5-12. Obtención de valores extremos a 50 años por el método GUMBEL al archivo de tráfico simulado del libramiento nororiente de Querétaro mediante el software DEEFEP, 2015.

Así mismo para este archivo se obtienen las cargas máximas en cada sub-archivo, clasificados por número de ejes, dando como resultado los indicados en la tabla 5-6.

Tabla 5-6. Valores máximos de carga registrados para el libramiento nororiente.

Valores máximos de carga registrados								
Número de ejes	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso (KN)	222	444	388	570	765	675	497	799

5.5. Calibración de la carga lineal extrema del tráfico Querétaro-San Luis Potosí con las cargas de diseño reglamentarias de S.C.T. y AASHTO

Las cargas lineales máximas obtenidas del archivo de tráfico de la carretera Querétaro-San Luis Potosí y sus valores extremos a 50 años se comparan con lo establecido en la reglamentación para vehículos de diseño SCT, AASHTO y el modelo propuesto como se observa en la tabla 5-7. Primero se divide la carga vehicular por unidad de longitud y se obtiene la carga lineal para cada vehículo del escenario de tráfico, posteriormente a estas cargas se les obtiene su valor extremo en un periodo de retorno de 50 años por el método de Gumbel.

Tabla 5-7. Comparación de la carga lineal máxima y extrema a 50 años en el tráfico simulado de la carretera Qro-SLP con las cargas reglamentarias de diseño SCT, AASHTO y el modelo propuesto.

Carga lineal máxima registrada, extrema a 50 años y cargas lineales de diseño					
Tipo de vehículo por número de ejes	Valor máximo simulado Qro-SLP (kN/dm)	Extremo a 50 años Qro-SLP (kN/dm)	Diseño SCT (kN/dm)	Diseño AASHTO (kN/dm)	Diseño modelo propuesto (kN/dm)
Archivo total	8947	8501	4657	3756	5468

En la tabla 5-8 se muestran los valores del peso máximo registrado del vehículo de 3 ejes y su comparación directa con los vehículos de diseño SCT y AASHTO.

Tabla 5-8. Comparación del peso máximo registrado del vehículo de 3 ejes en el tráfico de la carretera Qro-SLP con las cargas reglamentarias de diseño SCT y AASHTO.

Carga máxima registrada y cargas de diseño reglamentarias			
Vehículo	Simulado Qro-SLP	Diseño SCT	Diseño AASHTO
Número de ejes	3	3	3
Peso (kN)	439	652	320.27

En la tabla 5-9 se muestran los valores de carga lineal máxima de cada tipo de vehículo y su valor extremo calculado a 50 años por el método de Gumbel.

Tabla 5-9. Carga lineal máxima y extrema a 50 años para cada tipo de vehículo en el tráfico simulado de la carretera Qro-SLP.

Carga lineal máxima registrada y extrema a 50 años		
Tipo de vehículo por número de ejes	Carga lineal máxima Qro-SLP (kN/dm)	Extremo a 50 años Qro-SLP (kN/dm)
2	7500	8427
3	8947	9310
4	5532	6491
5	4473	4744
6	7010	7569
7	4545	5264
8	2679	2848
9	3807	3971

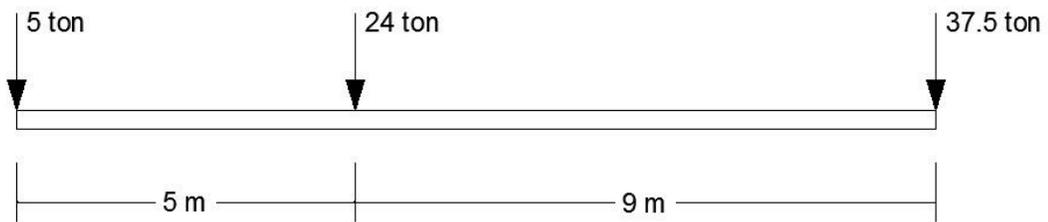


Figura 5-13. Modelo de cargas vivas vehiculares IMT 66.5 para el análisis longitudinal de puentes, SCT.

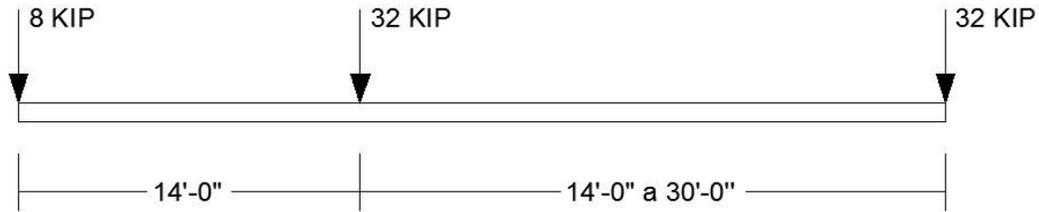


Figura 5-14. Modelo de cargas de diseño AASHTO LRFD, 2012.

5.6. Calibración de la carga extrema del tráfico del libramiento nororiental de la ciudad de Querétaro con la carga reglamentaria de S.C.T y ASSHTO

Al igual que en el ejemplo anterior las cargas lineales máximas obtenidas del archivo de tráfico del libramiento nororiental de Querétaro y sus valores extremos a 50 años se comparan con lo establecido en la reglamentación para vehículos de diseño SCT, AASHTO y el modelo propuesto como se observa en la tabla 5-10.

Tabla 5-10. Comparación de la carga lineal máxima y extrema a 50 años en el tráfico simulado del libramiento nororiental de Qro. con las cargas reglamentarias de diseño SCT, AASHTO y el modelo propuesto.

Carga lineal máxima registrada, extrema a 50 años y cargas de diseño reglamentarias					
Tipo de vehículo por número de ejes	Valor máximo simulado nororiental (kN/dm)	Extremo a 50 años nororiental (kN/dm)	Diseño SCT (kN/dm)	Diseño AASHTO (kN/dm)	Diseño propuesto (kN/dm)
Archivo total	9189	8417	4657	3756	5468

En la tabla 5-11 se muestran los valores del peso máximo registrado del vehículo de 3 ejes y su comparación directa con los vehículos de diseño SCT y AASHTO.

Tabla 5-11. Comparación del peso máximo registrado del vehículo de 3 ejes en el tráfico del libramiento nororiente con las cargas reglamentarias de diseño SCT y AASHTO.

Carga máxima registrada y cargas de diseño reglamentarias			
Vehículo	Simulado nororiente	Diseño SCT	Diseño AASHTO
Número de ejes	3	3	3
Peso (kN)	444	652	320.27

En la tabla 5-12 se muestran los valores de carga lineal máxima de cada tipo de vehículo y su valor extremo calculado a 50 años por el método de Gumbel.

Tabla 5-12. Carga lineal máxima y extrema a 50 años para cada tipo de vehículo en el tráfico simulado del libramiento nororiente.

Carga lineal máxima registrada y extrema a 50 años		
Tipo de vehículo por número de ejes	Carga lineal máxima Qro-SLP (kN/dm)	Extremo a 50 años Qro- SLP (kN/dm)
2	7464	8276
3	9189	9397
4	5459	6361
5	4702	5421
6	7240	7723
7	4069	4825
8	2534	2836
9	3635	3894

5.7. Obtención de valores para las variables del modelo virtual de cargas vivas propuesto

A continuación se presentan los resultados del análisis estadístico realizado para conocer la ley de probabilidades de PE1, PT1 y PT2; posteriormente se obtienen los valores para CV1, CV2, CV3, d1 y d2, así como el factor de carga viva básico del modelo propuesto.

5.7.1. Obtención de la ley de probabilidades de PE1 y el valor de CV1

En primer lugar el tiempo de simulación del escenario de tráfico fue de 30 días. En ese periodo de tiempo se observaron 3054 vehículos T3S3 y 770 vehículos T3S2R4 sumando 3824 en total. Suponiendo que se mantiene a lo largo del tiempo el mismo número promedio de vehículos por día, en un lapso de 50 años pasarían 1857850 vehículos del tipo T3S3, 468417 del tipo T3S2R4 y 2326267 de ambos.

Las probabilidades estimadas “p” de que en 50 años se exceda el valor más grande de CV1 son los recíprocos de esas cantidades, los cuales se presentan en la tabla 5-13, así como sus probabilidades “q” de no excedencia. Para conocer los valores de PE1 que corresponden a las probabilidades antes determinadas, se calculan los percentiles correspondientes y se obtiene CV1, con las funciones de confiabilidad en cada caso. Los resultados se muestran en la tabla.

Tabla 5-13. Probabilidad de excedencia p de PE1>CV1 en 50 años.

Tipo	p	q = 1 - p	CV1 (kN)
T3S3	5.3825×10^{-7}	0.999999461	116.80
T3S2R4	2.1348×10^{-6}	0.999999786	93.04
Ambos	4.2987×10^{-7}	0.99999957	116.80

En la figura 5-15 se muestra la distribución acumulada de PE1 de la muestra de vehículos de los tipos T3S3 y T3S2R4 del escenario de tráfico simulado obtenido para la carretera Qro,-SLP. Ésta distribución contiene a ambos tipos.

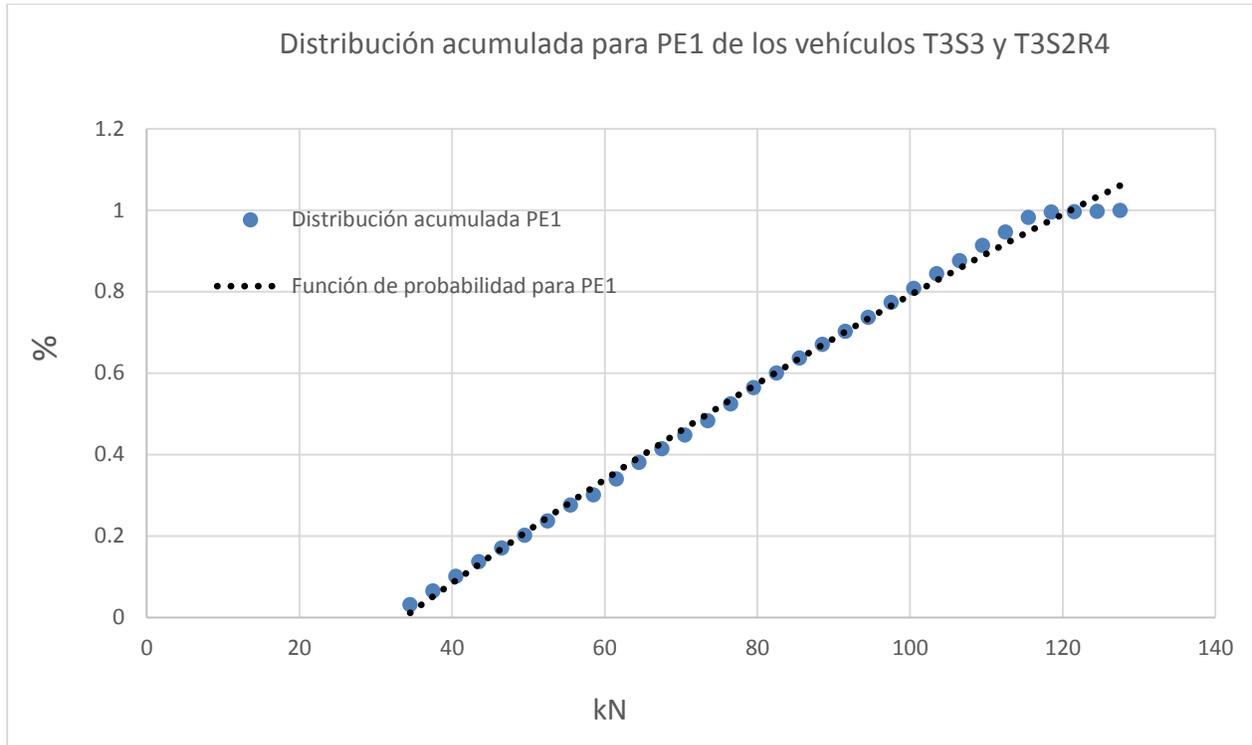


Figura 5-15. Distribución acumulada para CV1 de los vehículos T3S3 y T3S2R4 de la carretera Qro.-SLP.

5.7.2. Obtención de la ley de probabilidades de PT1 y el valor de CV2

Para calcular CV2 se procede de forma similar a la obtención de CV1. Las probabilidades estimadas “p” de que en 50 años se exceda el valor más grande de CV2 son los recíprocos de esas cantidades, los cuales se presentan en la tabla 5-14, así como sus probabilidades “q” de no excedencia. Para conocer los valores de PT1 que corresponden a las probabilidades antes determinadas, se calculan los percentiles correspondientes y se obtiene CV2, con las funciones de confiabilidad en cada caso. Los resultados se muestran en la tabla.

Tabla 5-14. Probabilidad de excedencia p de $PT1 > CV2$ en 50 años.

Tipo	p	$q = 1 - p$	CV2 (kN)
T3S3	5.3825×10^{-7}	0.999999461	276.48
T3S2R4	2.1348×10^{-6}	0.999999786	165.23
Ambos	4.2987×10^{-7}	0.99999957	289.72

En la figura 5-16 se muestra la distribución acumulada de PT1 de la muestra de vehículos de los tipos T3S3 y T3S2R4 del escenario de tráfico simulado obtenido para la carretera Qro,-SLP. Ésta distribución contiene a ambos tipos.

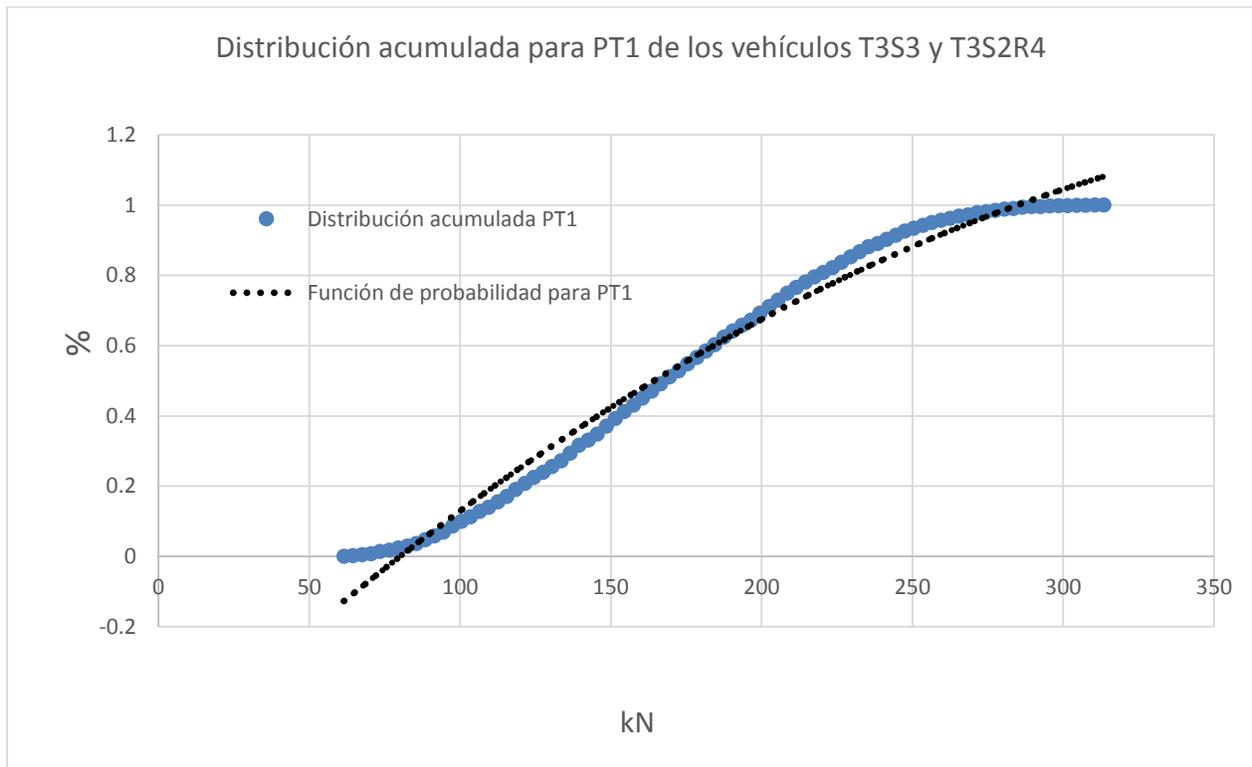


Figura 5-16. Distribución acumulada para CV2 de los vehículos T3S3 y T3S2R4 de la carretera Qro.-SLP.

5.7.3. Obtención de la ley de probabilidades de PT2 y el valor de CV3

Para calcular CV3 se procede de forma similar a la obtención de CV1. Las probabilidades estimadas “p” de que en 50 años se exceda el valor más grande de CV3 son los recíprocos de esas cantidades, los cuales se presentan en la tabla 5-15, así como sus probabilidades “q” de no excedencia. Para conocer los valores de PT2 que corresponden a las probabilidades antes determinadas, se calculan los percentiles correspondientes y se obtiene CV3, con las funciones de confiabilidad en cada caso. Los resultados se muestran en la tabla.

Tabla 5-15. Probabilidad de excedencia p de PT2>CV3 en 50 años.

Tipo	p	q = 1 - p	CV3 (kN)
T3S3	5.3825×10^{-7}	0.999999461	396.13
T3S2R4	2.1348×10^{-6}	0.999999786	692.59
Ambos	4.2987×10^{-7}	0.999999957	550.00

En la figura 5-17 se muestra la distribución acumulada de PT2 de la muestra de vehículos de los tipos T3S3 y T3S2R4 del escenario de tráfico simulado obtenido para la carretera Qro,-SLP. Ésta distribución contiene a ambos tipos.

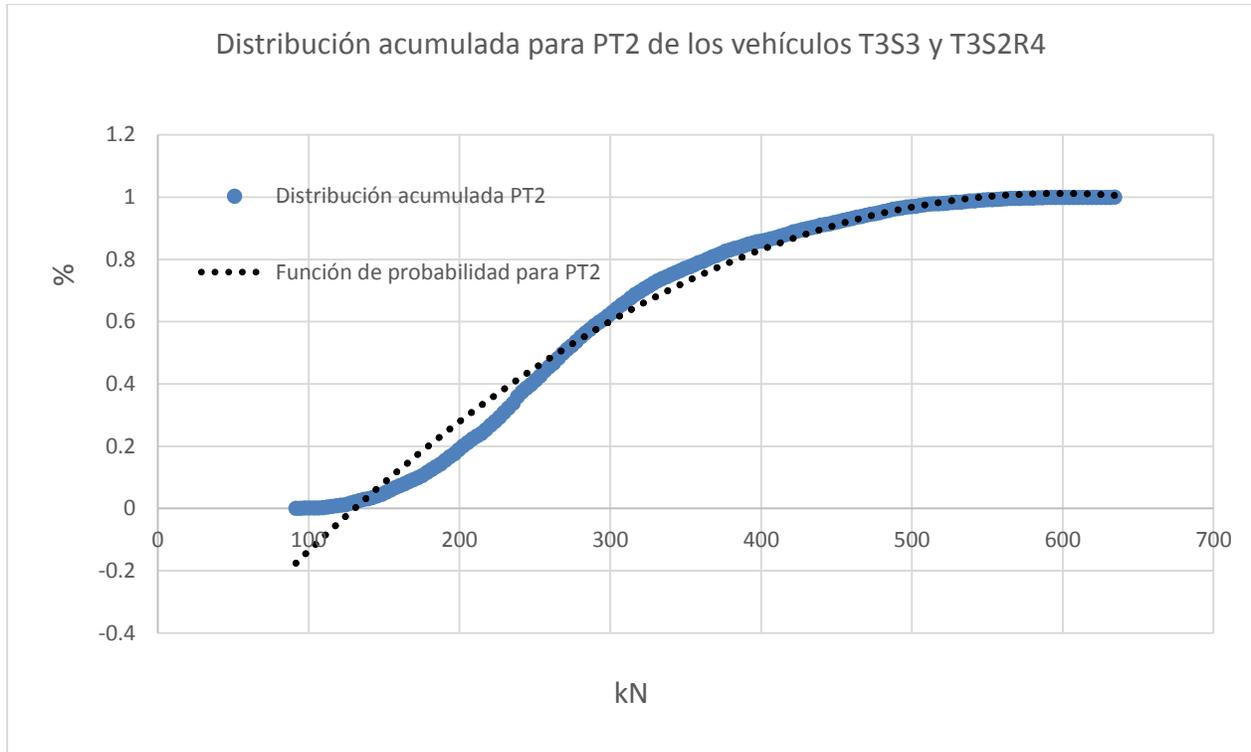


Figura 5-17. Distribución acumulada para CV3 de los vehículos T3S3 y T3S2R4 de la carretera Qro.-SLP.

En la tabla 5-16 se observan los valores de las cargas virtuales CV1, CV2 y CV3 obtenidos con las muestras solamente de un tipo de vehículo y con ambos, eligiendo esta última muestra como la que rige el modelo de cargas vivas concentradas ya que cuenta con una mayor cantidad de datos vehiculares.

Tabla 5-16. Valores de CV1, CV2 y CV3 obtenidos con diferentes muestras

CARGA	T3S3 (kN)	T3S2R4 (kN)	AMBOS (kN)	AMBOS (ton)	PROPUESTO (ton)
CV1	117	93	117	11.9	12
CV2	276	165	290	29.5	30
CV3	396	693	550	56.1	56
Total	789	951	957	97.5	98

5.7.4. Cálculo de las separaciones entre las cargas virtuales

Para determinar la separación entre las cargas CV1 y CV2, se calcularon por separado en las 2 muestras de vehículos los promedios de las separaciones del primero y segundo entre-ejes, resultando para el tipo T3S3 de 3.52m y 1.35 m respectivamente. Considerando que la resultante de las cargas que transmiten los ejes 2 y 3 pasa por el medio de éstos, la ubicación de CV2 estará a 4.20 m de CV1. Se procedió igualmente en los vehículos T3S2R4 obteniendo 4.78 m como la distancia entre CV1 y CV2. Como primer intento se propone 4 m la distancia entre CV1 y CV2 (d1).

Por otra parte, los promedios calculados para las separaciones que hay entre las líneas de acción de CV2 y CV3 fueron 7.62 m para los vehículos T3S3 y 8.57 m para los T3S2R4. Para fines del modelo se propone como primer intento 8 m la distancia entre CV2 y CV3 (d2) como se presenta en la tabla 5-17.

Tabla 5-17. Distancias obtenidas con el análisis estadístico.

DISTANCIA	T3S3 (m)	T3S2R4 (m)	PROPUESTO (m)
d1	4.2	4.8	4.0
d2	7.6	8.6	8.0

5.7.5. Obtención del factor de carga viva básico del modelo propuesto

Dado que los factores de carga se aplican multiplicándolos por las cargas nominales, para tomar en cuenta la incertidumbre y su variabilidad sobre los valores máximos que eventualmente asumirán, es necesario calcular el valor que le corresponde al factor de carga viva básico que se utilizará en el modelo propuesto, para el diseño de puentes con métodos que se basen en los estados límites de resistencia y servicio. Los valores antes calculados para las cargas virtuales tienen ya incorporado el efecto de la incertidumbre antes mencionada, toda vez que se asocian a una probabilidad de excedencia que se consideró razonablemente pequeña. Por otra parte, los valores

nominales de los pesos brutos vehiculares están establecidos en el reglamento de pesos y dimensiones.

Tomando en cuenta que los valores de las cargas virtuales suman 98 toneladas y que el valor máximo del peso bruto permitido es de 66.5 toneladas, el cociente del primero entre el segundo es el factor de carga viva básico y su valor es de 1.47. Dividiendo las cargas virtuales entre 1.47 y ajustando la suma, se obtienen las siguientes cargas nominales:

$$CV1 = 8 \text{ ton}$$

$$CV2 = 20 \text{ ton}$$

$$CV3 = 38.5$$

Por lo tanto, el sistema de cargas concentradas nominales del modelo de carga viva queda como se muestra en la figura 5-18, con un factor de carga viva básico de 1.47.

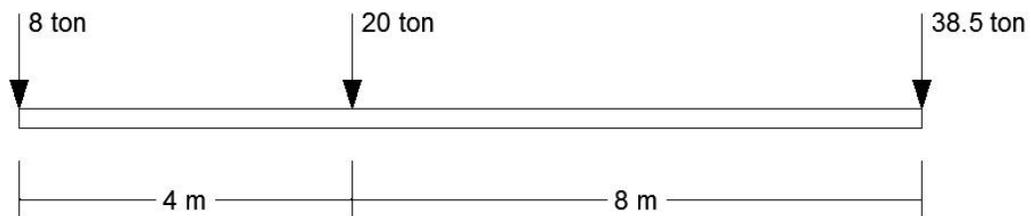


Figura 5-18. Modelo propuesto de cargas vivas concentradas.

5.7.6. Validación utilizando los momentos flexionantes máximos

Con el fin de validar el sistema de cargas concentradas del modelo de carga viva propuesto, se calcularon los momentos máximos que éste produce al aplicarse a puentes de 5 a 90 metros. Los resultados se comparan con los producidos por el modelo virtual SCT y con los valores máximos de momento flexionante que el escenario de tráfico simulado le produciría a puentes de longitudes igualmente de 5 a 90 metros.

En la figura 5-19 se muestra la comparación antes referida, se aprecia que los resultados del modelo superan a los máximos simulados y son un poco inferiores a los producidos por el

modelo virtual SCT por lo que se concluye que el modelo propuesto de cargas vivas concentradas es satisfactorio.

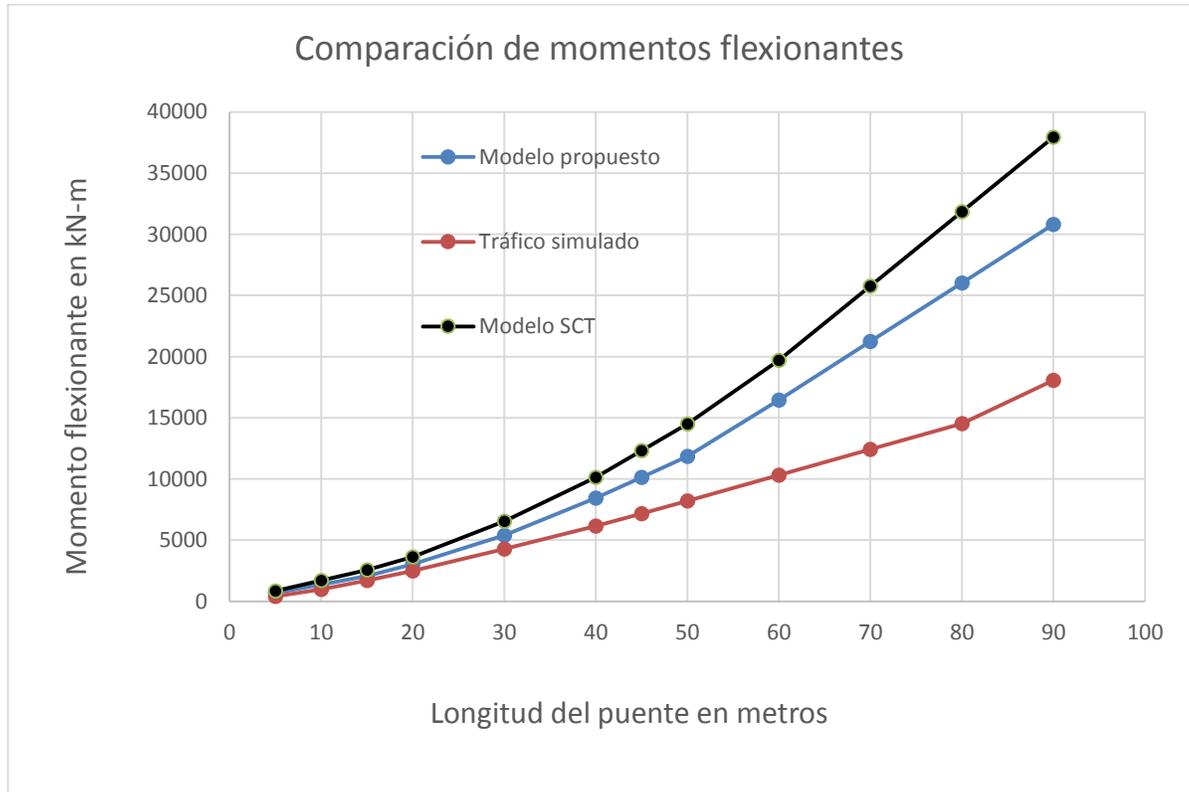


Figura 5-19. Momentos flexionantes máximos producidos por el modelo SCT, el modelo propuesto y el tráfico simulado DEEFEP en puentes de diferentes longitudes, 2015.

5.8. Calibración del modelo propuesto con el modelo de cargas vivas del reglamento SCT y ASSHTO

En la figura 5-20 se muestra el modelo propuesto de cargas vivas concentradas, en la figura 5-21 se presenta el modelo utilizado en México para diseño de puentes y en la figura 5-22 se muestra el modelo utilizado en la reglamentación AASHTO.

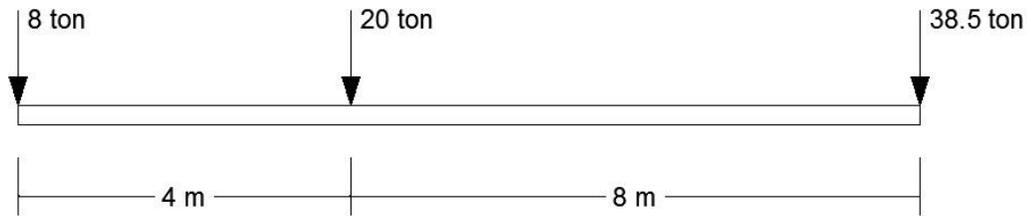


Figura 5-20. Modelo propuesto de cargas vivas concentradas (sin escala).

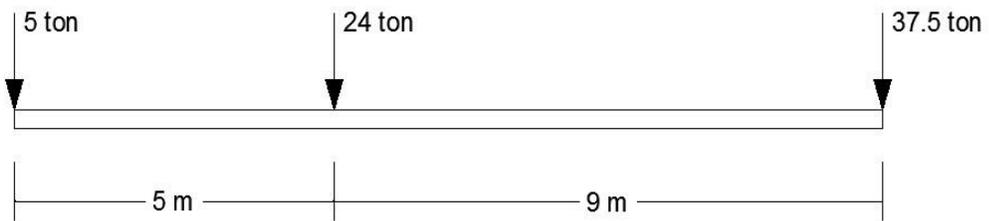


Figura 5-21. Modelo de cargas vivas vehiculares para el diseño de puentes en México (sin escala).

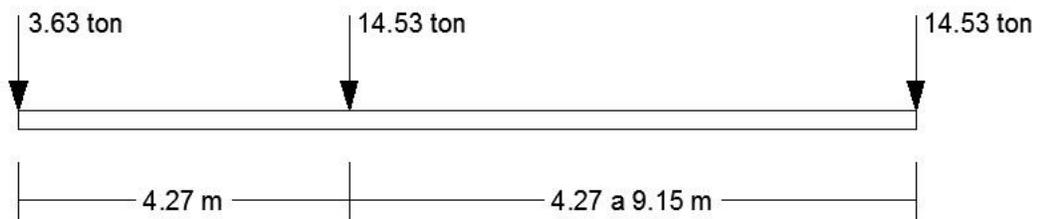


Figura 5-22. Modelo de cargas de diseño AASHTO LRFD, 2012 (sin escala).

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados se realiza la comparación de los parámetros estadísticos obtenidos de los escenarios de tráfico simulados con los de la carretera francesa A64, así mismo se comparan entre sí los 2 escenarios simulados. Los parámetros estadísticos obtenidos de la carretera francesa A64 se presentan en el apéndice B de esta tesis, los de la carretera Querétaro-San Luis Potosí en el apéndice C y los del libramiento nororiente en el apéndice D. Así mismo los parámetros de entrada del simulador se presentan en el apéndice E. A continuación se realiza la comparación modelo

6.1. Parámetros estadísticos

Cuando se trata del vehículo de 3 ejes en el caso de la distancia entre el eje 1 y el eje 2, existe una diferencia importante entre el escenario de tráfico simulado de la carretera Qro.-SLP y el tráfico de la carretera francesa A64, la media aritmética del primero es de 54.02 decímetros contra 43.28 del segundo, esto se debe a que el porcentaje de vehículos tipo autobús influye en los resultados del tráfico simulado en comparación a la ausencia de este tipo de vehículos en el registro WIM A64 ya que en esta ruta prácticamente no circulan autobuses dado que la mayoría de las personas se transporta por otros medios como por ejemplo el tren, a diferencia de México en donde gran parte de las personas se transporta por autobús.

Tabla 6-1. Datos de entrada utilizados en el módulo generador de tráfico vehicular para generar el archivo de la carretera Querétaro-San Luis Potosí, 2014.

TDPA	Clasificación vehicular en porcentaje						
	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS
11454	3.0	6.0	1.7	4.1	0.7	0.2	0.6

Tabla 6-2. Parámetros de la longitud entre ejes 1 y 2 de la carretera A64.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 1 AL 2		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	48.20	10.19	0.21
3 EJES	43.28	10.10	0.23
4 EJES	38.80	8.95	0.23
5 EJES	37.74	2.62	0.07
6 EJES	34.86	7.16	0.21
7 EJES	28.05	3.70	0.13
8 EJES	36.77	3.08	0.08
9 EJES	40.55	4.76	0.12

Tabla 6-3. Parámetros de la longitud entre ejes 1 y 2 de la carretera Oro.-SLP.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 1 AL 2		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	48.58	12.17	0.25
3 EJES	54.02	12.26	0.23
4 EJES	38.30	10.72	0.28
5 EJES	37.54	3.46	0.09
6 EJES	35.09	8.53	0.24
7 EJES	27.90	4.18	0.15
8 EJES	36.80	3.84	0.10
9 EJES	40.83	6.19	0.15

Al tratarse de las distancias entre ejes de los vehículos vemos que para todas las clases la media aritmética de la distancia entre el eje 1 y el eje 2 es similar en el archivo WIM A64 y el tráfico simulado para la carretera Querétaro-San Luis Potosí. Así mismo los coeficientes de variación de ambos archivos también son similares, lo cual indica que los rangos de variabilidad de las variables aleatorias utilizados en el modelo de simulación cuentan con validez no solamente en términos probabilísticos sino también con representatividad física real y fenomenológica.

6.2. Calibración de las distribuciones del escenario de tráfico Qro.-SLP con el tráfico de la autopista A64 y datos estadísticos de tráfico Qro.-SLP-SCT

Al comparar las distribuciones bimodales de pesos totales contra frecuencia de la carretera A64 (verde) con la carretera Qro.-SLP (roja) se observa que esta última cuenta con una curva más sesgada en su primer moda en comparación con la A64 debido a un mayor porcentaje de vehículos de las clases B, C2 y C3 respecto de las otras clases de vehículos pesados. La primer moda de la carretera Qro.-SLP se presenta alrededor de los 126 kN y de la carretera A64 alrededor de los 160 kN, por esto es que se observa que la primera se encuentra a la izquierda de la segunda en las figuras 6-1 y 6-2.

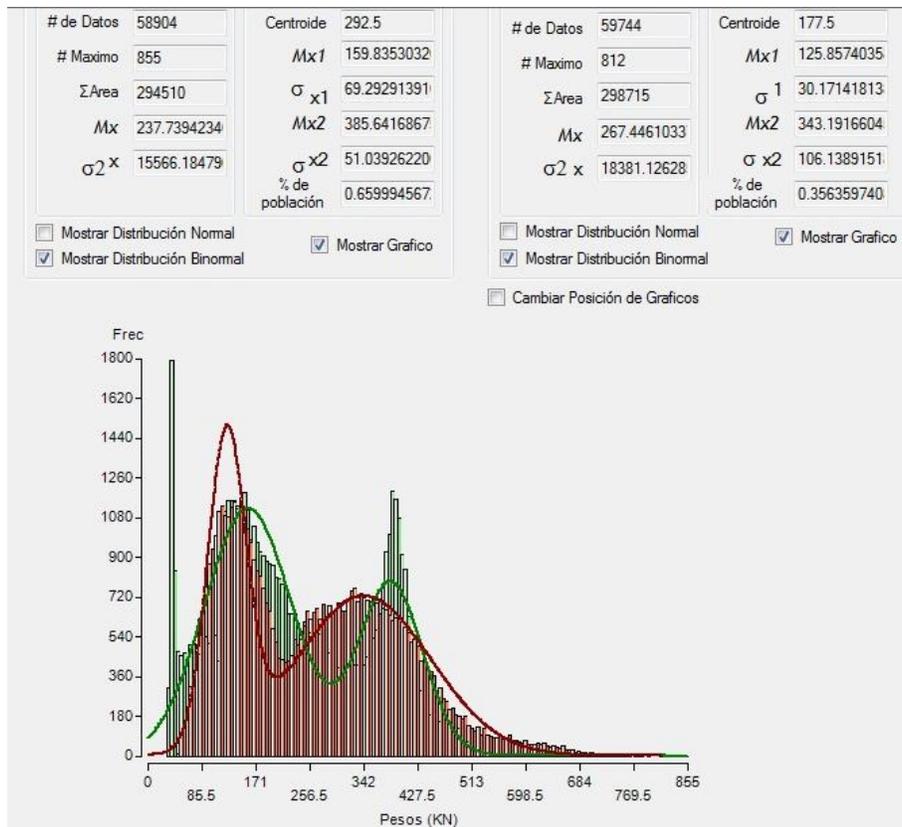


Figura 6-1. Distribuciones bimodales de peso total de las carreteras Qro.-SLP y A64.

También se puede observar que la segunda moda de la carretera A64 se presenta alrededor de los 385 kN y de la Qro.-SLP alrededor 343 kN, es por esto que la primera se encuentra a la derecha de la segunda, en la Qro.-SLP su segunda moda es más amplia respecto de la A64 lo cual nos indica que hay una distribución de pesos más amplia en las diferentes clases de vehículos pesados como se aprecia en las figuras 6-1 y 6-2.

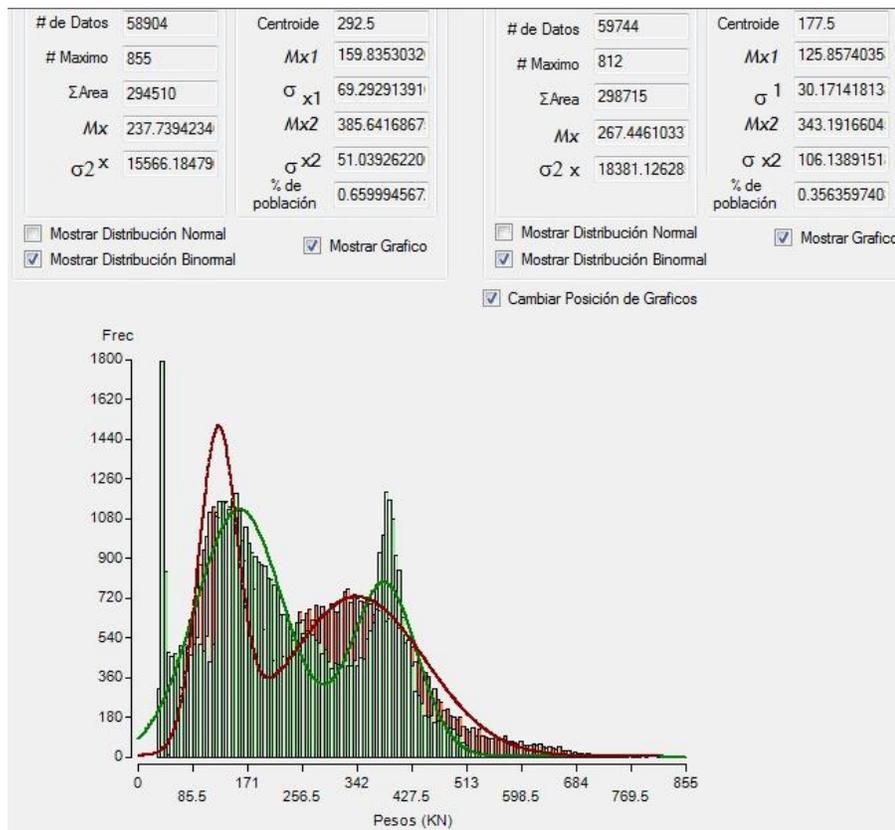


Figura 6-2. Distribuciones bimodales de peso total de las carreteras A64 y Qro.-SLP.

6.3. Calibración de las distribuciones del escenario de tráfico del libramiento nororiental con el tráfico de la autopista A64 y datos estadísticos de tráfico libramiento nororiental-SCT

Al comparar las distribuciones bimodales de pesos totales contra frecuencia de la carretera A64 (verde) con el libramiento nororiental (rojo) se observa que esta última cuenta con una curva más amplia en su segunda moda en comparación con la A64 debido al gran porcentaje de vehículos de las clases T3S2 y T3S3 que circulan respecto de las otras clases de vehículos pesados. Se observa que la segunda moda se encuentra muy próxima en ambas distribuciones, es decir para el libramiento nororiental se presenta alrededor de los 390 kN y de la carretera A64 alrededor de los 386 kN en las figuras 6-3 y 6-4.

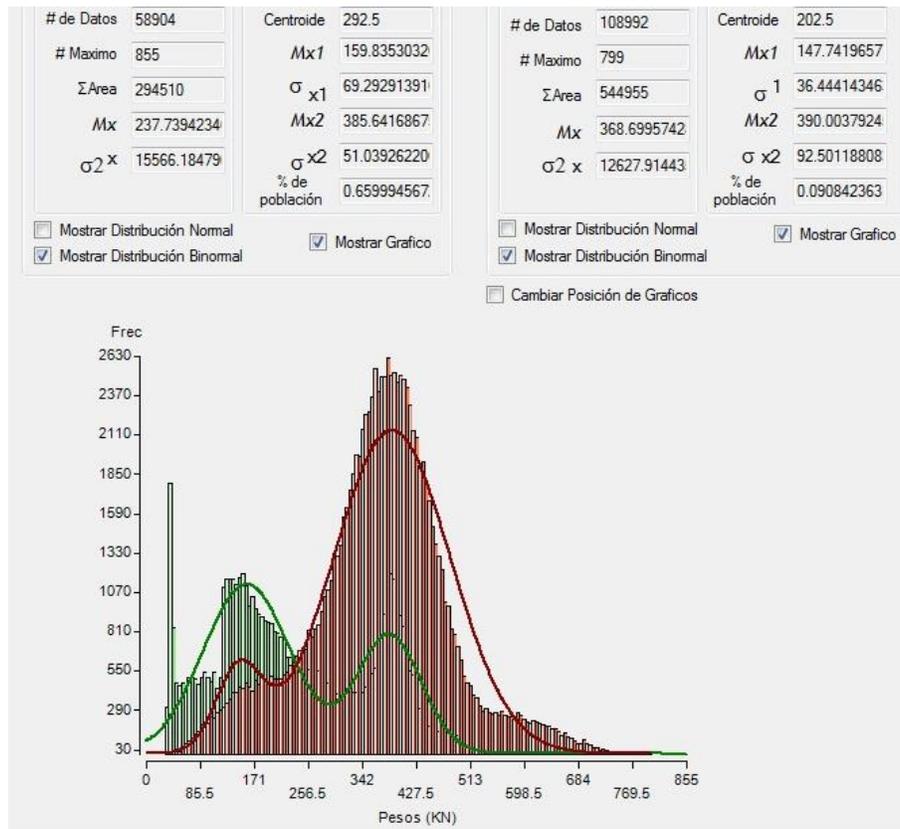


Figura 6-3. Distribuciones bimodales de peso total del libramiento nororiental y la carretera A64.

También se puede observar que la primer moda de la carretera A64 se presenta alrededor de los 160 kN y del libramiento nororiente alrededor de 148 kN, es por esto que la primera se encuentra a la derecha de la segunda pero por poco. En la distribución de la carretera A64 la primer moda tiene mayor frecuencia que la segunda, lo cual indica que los vehículos más pesados se presentan en menor cantidad respecto de los más ligeros. Caso contrario ocurre en el libramiento nororiente donde la mayor concentración de vehículos se da en los vehículos T3S2, T3S3 y T3S2R4 respecto de los vehículos clase B, C2 y C3, como se aprecia en las figuras 6-3 y 6-4.

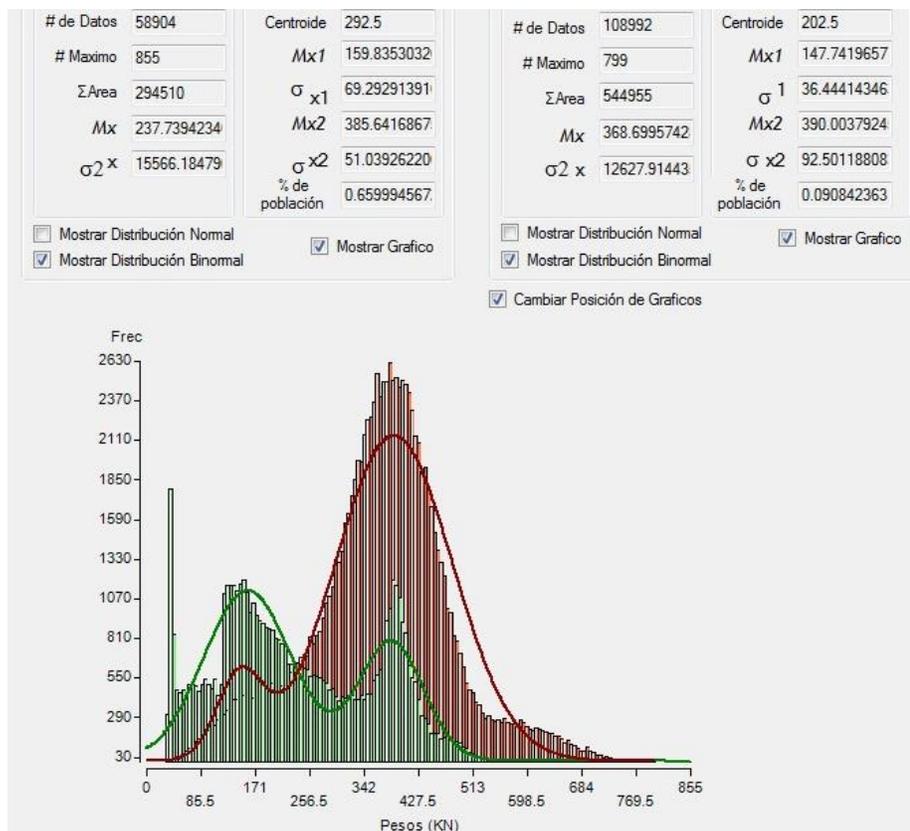


Figura 6-4. Distribuciones bimodales de peso total de la carretera A64 y el libramiento nororiente.

6.4. Comparación de las distribuciones del escenario de tráfico de la carretera Qro.-SLP con el escenario de tráfico del libramiento nororiente

Al comparar las distribuciones bimodales de pesos totales contra frecuencia de la carretera Qro.-SLP (verde) con el libramiento nororiente (roja) se observa que en la Qro.-SLP la primer moda tiene mayor frecuencia que la segunda lo cual indica que hay mayor concentración de vehículos tipo B, C2 y C3 que de vehículos más pesados. En la distribución del libramiento nororiente se observa que los vehículos clase T3S2, T3S3 y T3S2R4 influyen de manera significativa en la forma de la curva debido a su gran porcentaje dentro del flujo total de vehículos de esta carretera, como se observa en las figuras 6-5 y 6-6.

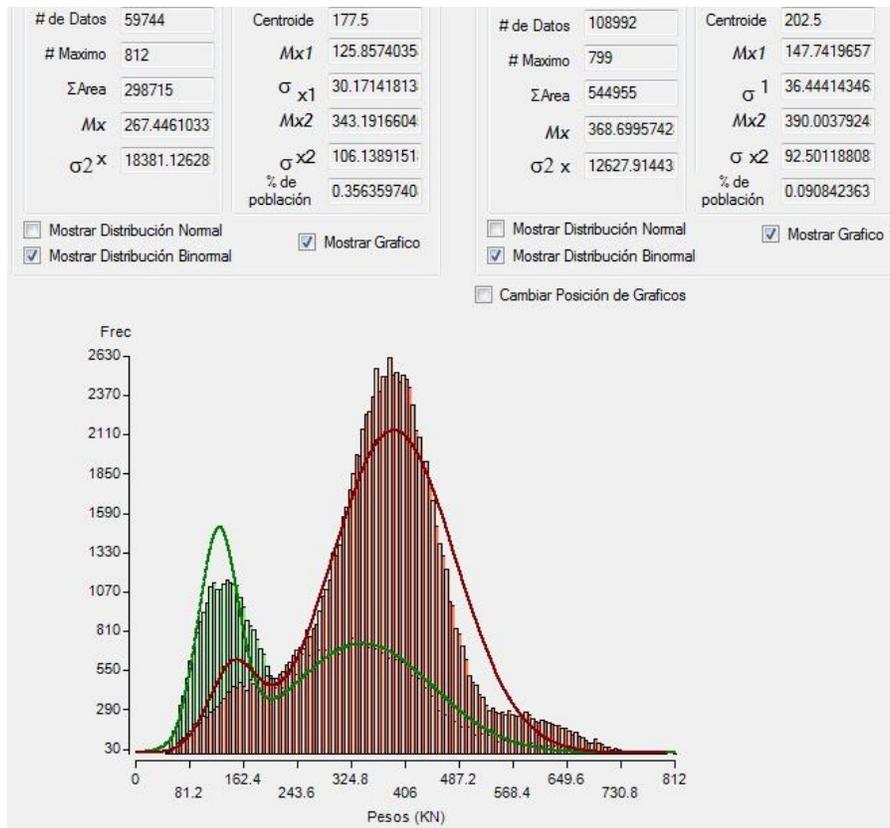


Figura 6-5. Distribuciones bimodales de peso total del libramiento nororiente y la carretera Qro.-SLP.

También se puede observar que la primer moda de la carretera Qro.-SLP se presenta alrededor de los 126 kN y del libramiento nororiente alrededor de 148 kN, es por esto que la primera se encuentra a la izquierda de la segunda. La segunda moda de la carretera Qro.-SLP se ubica alrededor de los 343kN y la del libramiento alrededor de los 390 kN, como se aprecia en las figuras 6-5 y 6-6.

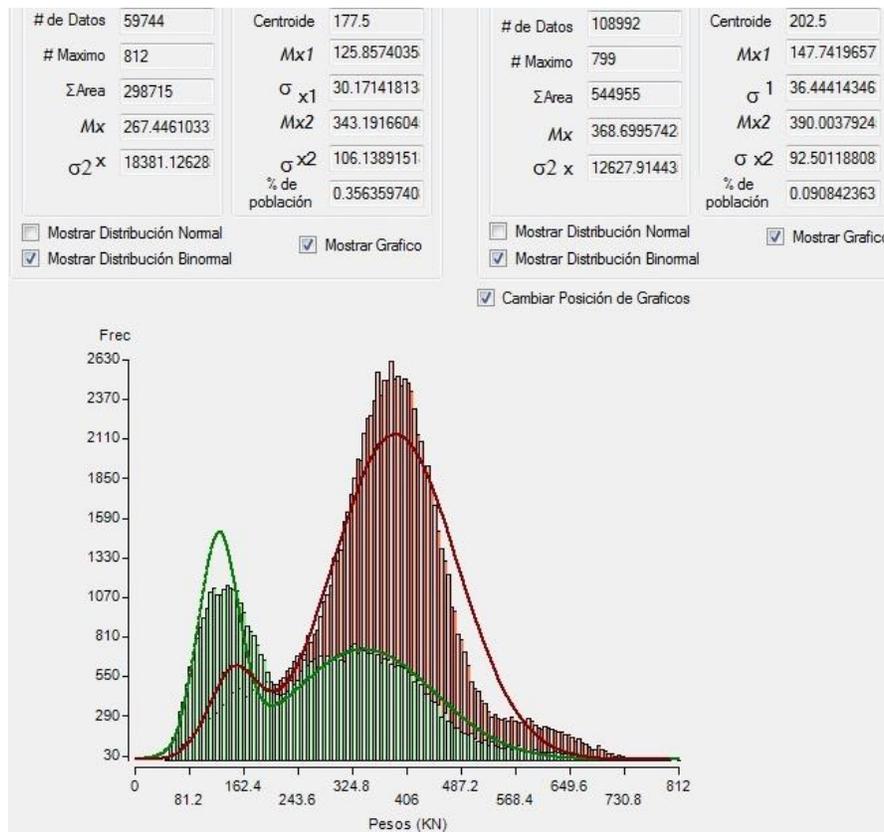


Figura 6-6. Distribuciones bimodales de peso total de la carretera Qro.-SLP y el libramiento nororiente.

En la tabla 6-4 se presentan los porcentajes de clasificación vehicular de cada clase respecto del total utilizados como datos de entrada del simulador para generar los escenarios de tráfico de la carretera Querétaro-San Luis Potosí así como del libramiento nororiente de Querétaro y con esto apreciar de mejor manera lo descrito en las secciones 6.2 a 6.4.

Tabla 6-4. Datos de entrada utilizados para generar los escenarios de tráfico vehicular pesado de la carretera Querétaro-San Luis Potosí y del libramiento nororiente de Querétaro, 2014.

CARRETERA	TDPA	Clasificación vehicular en porcentaje						
		B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS
Querétaro-San Luis Potosí	11454	3.0	6.0	1.7	4.1	0.7	0.2	0.6
Libramiento nororiente	6758	2.6	4.1	4.4	30.8	4.9	3.2	0.4

6.5. Cargas máximas y lineales extremas Qro-SLP

En la tabla 6-5 se compara el vehículo de diseño de 3 ejes con las cargas máximas registradas de los vehículos simulados de 3 ejes, se observa que las cargas máximas rebasan las cargas de diseño de lo reglamentado en AASHTO pero se encuentran por debajo del límite del vehículo de diseño establecido por SCT. Al comparar de manera directa las cargas lineales (peso / longitud) extremas a 50 años se observa que rebasan a las cargas lineales de los vehículos SCT, AASHTO y modelo propuesto (tabla 6-6), es decir, esto se observa al dividir las cargas de diseño permitidas entre las longitudes de diseño, lo anterior solamente para tener un marco de referencia. Lo importante en este punto es que los momentos flexionantes máximos de los vehículos simulados no rebasan los momentos que producirían los vehículos virtuales de diseño del modelo SCT ni del modelo propuesto como se presentó en la figura 5-19 de la sección 5.7.6.

Tabla 6-5. Comparación de la carga máxima registrada del vehículo de 3 ejes en el tráfico de la carretera Qro-SLP con las cargas reglamentarias de diseño SCT y AASHTO.

Carga máxima registrada y cargas de diseño reglamentarias			
Vehículo	Simulado Qro-SLP	Diseño SCT	Diseño AASHTO
Número de ejes	3	3	3
Peso (KN)	439	652	320.27

Tabla 6-6. Comparación de la carga lineal máxima y extrema a 50 años en el tráfico simulado de la carretera Qro-SLP con las cargas reglamentarias de diseño SCT, AASHTO y el modelo propuesto.

Carga lineal máxima registrada, extrema a 50 años y cargas lineales de diseño					
Tipo de vehículo por número de ejes	Valor máximo simulado Qro-SLP (kN/dm)	Extremo a 50 años Qro-SLP (kN/dm)	Diseño SCT (kN/dm)	Diseño AASHTO (kN/dm)	Diseño modelo propuesto (kN/dm)
Archivo total	8947	8501	4657	3756	5468

6.6. Cargas máximas y lineales extremas libramiento nororiente

En la tabla 6-7 se compara el vehículo de diseño de 3 ejes con las cargas máximas registradas de los vehículos simulados de 3 ejes, se observa que las cargas máximas rebasan las cargas de diseño de lo reglamentado en AASHTO pero se encuentran por debajo del límite del vehículo de diseño establecido por SCT. Al comparar de manera directa las cargas lineales (peso / longitud) extremas a 50 años se observa que rebasan a las cargas lineales de los vehículos SCT, AASHTO y modelo propuesto (tabla 6-8), es decir, esto se observa al dividir las cargas de diseño permitidas entre las longitudes de diseño, lo anterior solamente para tener un marco de referencia. Lo importante en este punto es que los momentos flexionantes máximos de los vehículos simulados

no rebasan los momentos que producirían los vehículos virtuales de diseño del modelo SCT ni del modelo propuesto como se presentó en la figura 5-19 de la sección 5.7.6.

Tabla 6-7. Comparación de la carga máxima registrada del vehículo de 3 ejes en el tráfico del libramiento nororiente con las cargas reglamentarias de diseño SCT y AASHTO.

Carga máxima registrada y cargas de diseño reglamentarias			
Vehículo	Simulado Qro-SLP	Diseño SCT	Diseño AASHTO
Número de ejes	3	3	3
Peso (KN)	444	652	320.27

Tabla 6-8. Comparación de la carga lineal máxima y extrema a 50 años en el tráfico simulado del libramiento nororiente de Qro. con las cargas reglamentarias de diseño SCT, AASHTO y el modelo propuesto.

Carga lineal máxima registrada, extrema a 50 años y cargas de diseño reglamentarias					
Tipo de vehículo por número de ejes	Valor máximo simulado nororiente (kN/dm)	Extremo a 50 años nororiente (kN/dm)	Diseño SCT (kN/dm)	Diseño AASHTO (kN/dm)	Diseño propuesto (kN/dm)
Archivo total	9189	8417	4657	3756	5468

7. CONCLUSIONES

Gracias a este modelo de simulación de escenarios de tráfico pesado se podrá predecir mejor el comportamiento de los puentes e infraestructura de transporte ante cargas recientes, a falta de dispositivos de pesaje en movimiento (WIM) en la infraestructura carretera de México.

Una valiosa contribución de este modelo y su integración en el software DEEFEP, permitirá ser utilizada para generar los escenarios de tráfico con características de tráfico del país, necesarios para aplicar el software DEEFEP y dictaminar el estado en que se encuentran los puentes del país ante fatiga y extremos, a un bajo costo.

Se propone un modelo de simulación de tráfico pesado para México basado en información estadística reportada por SCT del tráfico de la red carretera mexicana y con información estadística de la red de tráfico francés.

Este modelo se calibró con las cargas de diseño de SCT encontrándose una gran similitud. Se utiliza el mismo modelo de determinación de cargas de diseño para el tráfico simulado como para las cargas de diseño SCT.

Este modelo de simulación se integró en el programa DEEFEP para su aplicación de manera sistematizada y amigable para fines prácticos y de investigación.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. 2012.** *AASHTO LRFD Bridge design specifications*. 6th Edition. USA.
- ACI Committee 215. 1992.** *Considerations for design of concrete structures subjected to fatigue loading*. USA.
- Badiola V. 2004.** *Diseño de Máquinas-Cargas Variables*. Dpto. Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, pp. 55-79.
- Bangoura A. 2007.** *Metodología para la Optimización de Análisis de Esfuerzos por Fatiga de Alto Ciclo en Componentes de Maquinas*. Instituto Politécnico Nacional, D.F., México, pp.25- 48.
- Bárceñas V. 2011.** *Desarrollo de un programa de cómputo para el análisis estadístico de cargas vehiculares en movimiento y sus efectos de fatiga en puentes de acero*. Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. México.
- Carrión V. F., Quintana R. J., López L. J., Balankin A. and Samayoa O. D. 2006.** *Metodologías de inspección no destructiva aplicables a sistemas de gestión de puentes*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes e Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 302, Sanfandila, Qro.
- Castillo E., Fernández C. A., Esslinger V. and Thürlimann B. 1985.** *Statistical Model for Fatigue Analysis of Wires, Strands and Cables*. IABSE Proceedings, pp.82-85.
- Crespo S. 2011.** *Análisis del deterioro estructural por fatiga y prognosis de un puente típico de concreto utilizando simulación Monte Carlo*. Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. México.
- Eurocode. 2003.** *Eurocode 3: Design of steel structures. Part. 1.9: Fatigue*.
- Gutierrez J.L. and Mendoza A. 2004.** *Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 2003*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes e Instituto Mexicano del Transporte, Documento Técnico No. 33, Sanfandila, Qro.
- Hangenberg M.J. 2004.** *Consideration of strand fatigue for load rating prestressed*. University of Texas at Austin. Austin. EUA.

- Herrada J. 2013.** *Sistematización del análisis del comportamiento de puentes carreteros ante escenarios de tráfico pesado.* Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. México.
- Jacob B. and Feypell B.V. 2010.** *Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology.* Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris, France.
- Jacob B. y Eymard R. 1989.** *Un nouveau logiciel: le programme Castor pour le calcul des actions et sollicitations du trafic dans les ouvrages routiers.* Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris. France.
- Karim M.R., Ibrahim N.I., Saifizul A.A. and Yamanaka H. 2013.** *Effectiveness of vehicle weight enforcement in a developing country using weigh-in-motion sorting system considering vehicle by-pass and enforcement capability.* Center for Transportation Research, Faculty of Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Katz Bryan J. 2001.** *Field and modeling framework for evaluating truck weigh station operations,* Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg Virginia, pp. 4-12.
- Kwon K. and Frangopol D. 2010.** *Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data,* Department of Civil and Environmental Engineering, ATLSS Center, Lehigh University, 117 ATLSS Dr., Bethlehem, USA.
- Lee D.H., Sung-Seok K., Zhongren G. and Myong K. J. 2012.** *Adaptive weigh-in-motion algorithms for truck weight enforcement.* Department of Civil and Environmental Engineering, University of Tennessee, Knoxville, TN 37996-2010, USA.
- Liljencrantz A., Karoumi R. and Olofsson P. 2007.** *Implementing bridge weigh-in-motion for railway traffic,* Computers and Structures 85, Edit: Elsevier, pp. 80–88.
- Lindorf A. and C. Manfred. 2010.** *S–N curves for fatigue of bond in reinforced concrete structures under transverse tension,* Engineering Structures, Edit: Elsevier, Volume 32, Issue 10, pp. 3068-3074.
- Mahmoudabadi A. and Seyedhosseini S.M. 2012.** *Improving the efficiency of weigh in motion systems through optimized allocating truck checking oriented procedure.* Department of Industrial Engineering, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran.
- McInnes C.H. and Meehan P.A. 2008.** *Equivalence of four-point and three-point rainflow cycle counting algorithms.* International Journal of Fatigue, Volume 30, Issue 3, Edit: Elsevier, pp. 547-559.

- Medina J. L. 2013.** *Efectos de fatiga y extremos en puentes de concreto presforzado ante cargas de vehículos pesados.* Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. México.
- Mendoza D.A., Cadena R.A., De Buen R. A., Domínguez P.L. and Rico R.A. 1992.** *Análisis estadístico del peso y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan por la red nacional de carreteras. Estaciones instaladas durante 1991.* Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No.8, Sanfandila, Querétaro, México.
- Monforti, F. and A. Szikszai. 2010.** *A MonteCarlo approach for assessing the adequacy of the European gas transmission system under supply crisis conditions.* Energy Policy 38, 2486–2498.
- Morales Nápoles O. and Steenbergen R.D.J.M. 2014.** *Analysis of axle and vehicle load properties through bayesian networks based on weigh-in-motion data.* Reliability engineering and system safety, Volumen 125, Editorial Elsevier, pp. 153-164.
- Moreno E. 2004.** *El sobrepeso en el autotransporte de carga: elementos para su estudio y control.* Secretaría de Comunicaciones y Transportes e Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 250, Sanfandila, Qro.
- Nowak A.S. and Al-Zaid R. 1989.** Fatigue reliability of prestressed concrete bridges. 5th International Conference on Structural Safety and Reliability. 1639-1642.
- O’Brien E.J., Cantero D., Enright B. and González A. 2010.** *Characteristic Dynamic Increment for extreme traffic loading events on short and medium span highway bridges.* School of Architecture, Landscape and Civil Engineering, University College Dublin, Ireland.
- O’Brien E.J., Rattigan P., González A., Dowling J. and Znidaric A. 2009.** *Characteristic dynamic traffic load effects in bridges.* School of Architecture, Landscape and Civil Engineering, University College Dublin, Belfield, Dublin 4, Ireland.
- O’Brien E.J., Znidaric A. 2001.** *Weighing-in-motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE).* Report of Work Package 1.2, Bridge WIM systems (B- WIM), European Commission DG VII – Transport, 4h Framework Programme Transport, Ljubljana, Slovenia.
- Ottosson A., Pedersen C. and O’Connor A. 2012.** *Employing train weigh in motion data in comparison of cumulative fatigue damage on bridges.* Ramboll Danmark A/S, Hannemanns Allé 53, DK-2300 Cpoenhagen, Denmark.

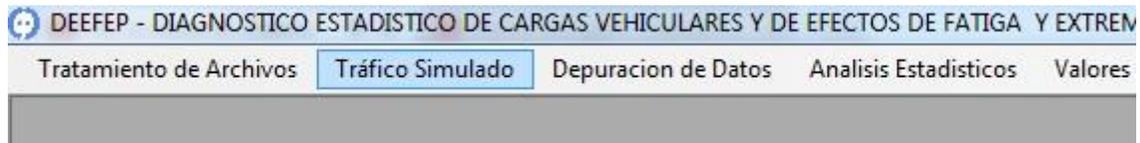
- Przekop A., Rizzi S. and Groen D. 2006.** *Nonlinear acoustic response of an aircraft fuselage sidewall structure by a reduced order analysis.* IX International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics Southampton, UK.
- Rascón O. 1997.** *Análisis normativo y estadístico de cargas vivas en México.* Secretaría de Comunicaciones y Transportes e Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 97, Sanfandila, Qro.
- Rascón O. 1999.** *Modelo de cargas vivas vehiculares para diseño estructural de puentes en México.* Secretaría de Comunicaciones y Transportes e Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 118, Sanfandila, Qro.
- Samayoa Ochoa, D. Balankin, A. Carrión Viramontes, F. J. López López, J. A. 2006.** *Análisis de confiabilidad y riesgo en puentes atirantados.* Secretaría de Comunicaciones y Transportes e Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 301. Sanfandila, Querétaro.
- Yang G.T. and Su Q.T. 2011.** *Discussion on “composite (steel–concrete) highway bridge fatigue assessment”* by F.N. Leitão, J.G.S. da Silva, P.C.G. da S. Vellasco, S.A.L. de Andrade, and L.R.O. de Lima [J Constr Steel Res 2011; 67(1): 14–24].
- Zanuy C., Albajar L. y de la Fuente P. 2011.** *El proceso de fatiga del hormigón y su influencia estructural.* MATER. CONSTRUCC. 385-399.

APÉNDICE A. AYUDA PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DE TRÁFICO SIMULADO

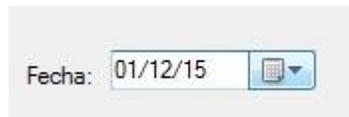
A continuación se describe de manera detallada el procedimiento para generar un escenario de tráfico de la carretera deseada. Primero se presenta el caso de la carretera Querétaro-San Luis Potosí y posteriormente el del libramiento nororiente de la ciudad de Querétaro.

A.1. Escenario de tráfico de la carretera Querétaro-San Luis Potosí

PASO 1. Activar el módulo de tráfico simulado.



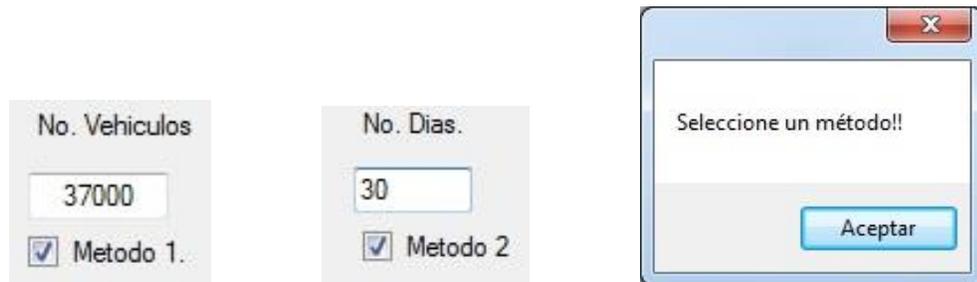
PASO 2. Seleccionar la fecha de inicio del escenario de tráfico.



PASO 3. Seleccionar la hora de inicio del escenario de tráfico, predeterminado el programa muestra 00:00:00.



PASO 4. Introducir el número total de vehículos requerido para el escenario de tráfico y seleccionar la casilla “Método 1”. En caso contrario introducir el número de días deseado para el escenario de tráfico y seleccionar la casilla “Método 2”. Si no se selecciona una casilla el programa marca un error y aparece el mensaje “Seleccione un método!!”.



PASO 5. Introducir los porcentajes correspondientes a cada clase en la clasificación del flujo vehicular que publica SCT para la estación de interés, así como el TDPA y el tiempo promedio de arribo entre vehículos. Si falta una casilla por llenar el programa marca un error y aparece el mensaje “Falta Llenar las clases vehiculares”.



PASO 6. Presionar el botón “Calcular rangos”. Obtiene las frecuencias acumuladas para las clases vehiculares.

The screenshot shows a software interface for calculating vehicle class frequencies. It includes the following elements:

- Calcular Rangos.**: A blue button to initiate the calculation.
- No. Vehiculos**: An empty text input field.
- No. Dias.**: A text input field containing the value "30".
- Fecha:** A date picker set to "01/12/15".
- Hora:** A time input field set to "00:00:00".
- Metodo 1.**: An unchecked checkbox.
- Metodo 2.**: A checked checkbox.
- (%) Clases Vehiculares**: A row of seven input fields with values: 3.0, 6.0, 1.7, 4.1, 0.7, 0.2, and 0.6. Below these are labels: B, C2, C3, T3S2, T3S3, T3S2R4, and Otros.
- 11454**: A text input field labeled "TDPA".
- 2**: A text input field labeled "Tiempo Promedio de ambo entre vehiculos (seg)".
- Poisson**: A button.
- Cargar Archivo(Excel)**: A button.
- Generar Archivo (txt)**: A button.
- Guardado en:**: An empty text input field.

PASO 7. Aparece el mensaje “Datos leídos!”. Confirma la lectura correcta de los valores ingresados anteriormente.



PASO 8. Presionar el botón “Poisson”. Obtiene las frecuencias acumuladas de tiempo entre el paso de vehículos.

Calcular Rangos.

No. Vehiculos:

No. Dias:

Fecha:

Hora:

Metodo 1. Metodo 2

(%) Clases Vehiculares

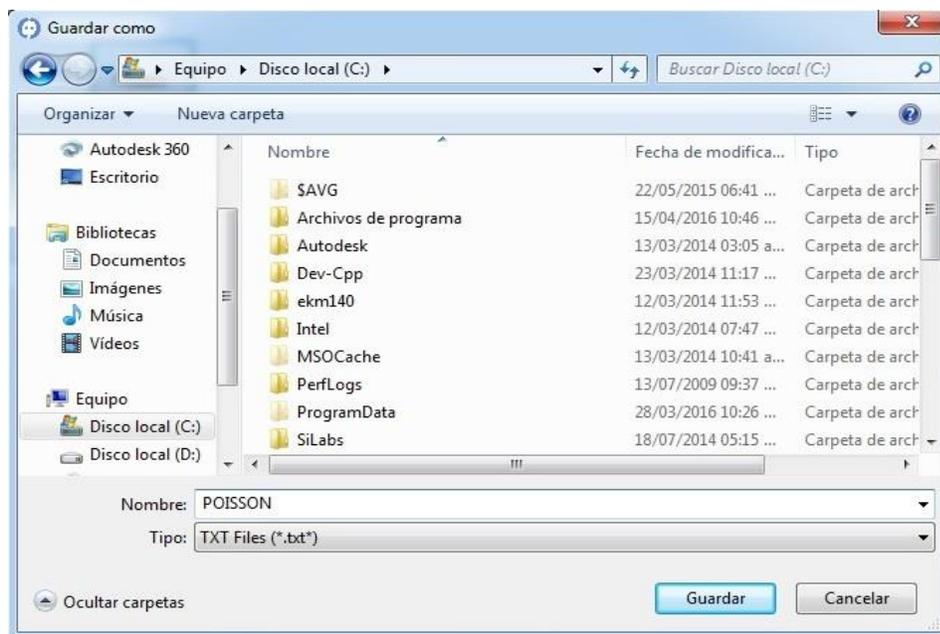
<input type="text" value="3.0"/>	<input type="text" value="6.0"/>	<input type="text" value="1.7"/>	<input type="text" value="4.1"/>	<input type="text" value="0.7"/>	<input type="text" value="0.2"/>	<input type="text" value="0.6"/>	<input type="text" value="11454"/>	<input type="text" value="2"/>
B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	Otros	TDPA.	Tiempo Promedio de arribo entre vehiculos (seg)

Cargar Archivo(Excel)

Generar Archivo (.txt)

Guardado en:

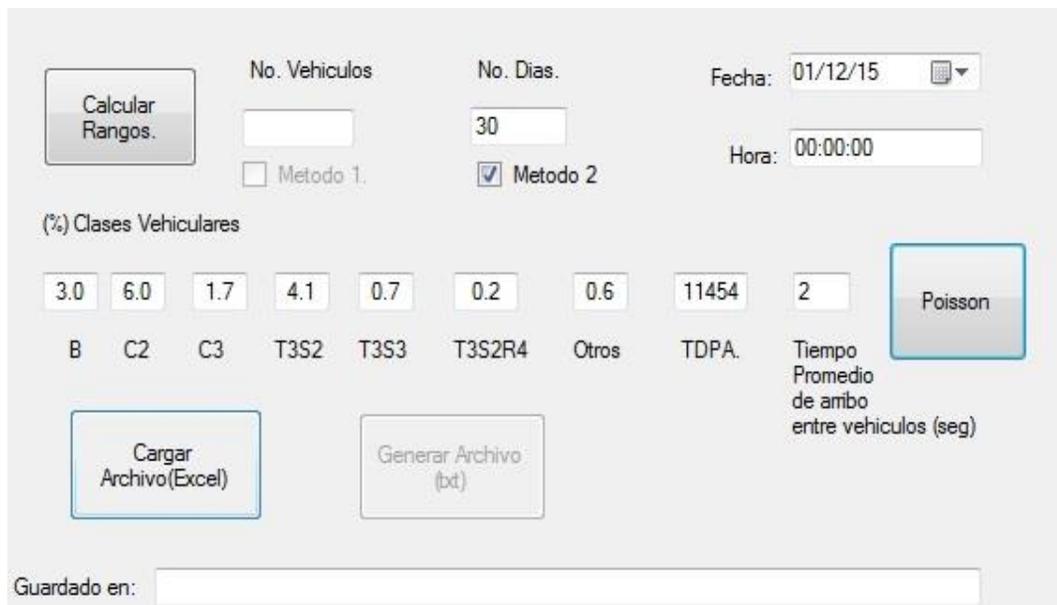
PASO 9. Seleccionar la ubicación donde se guardará el archivo Poisson y nombrarlo como el usuario desee.



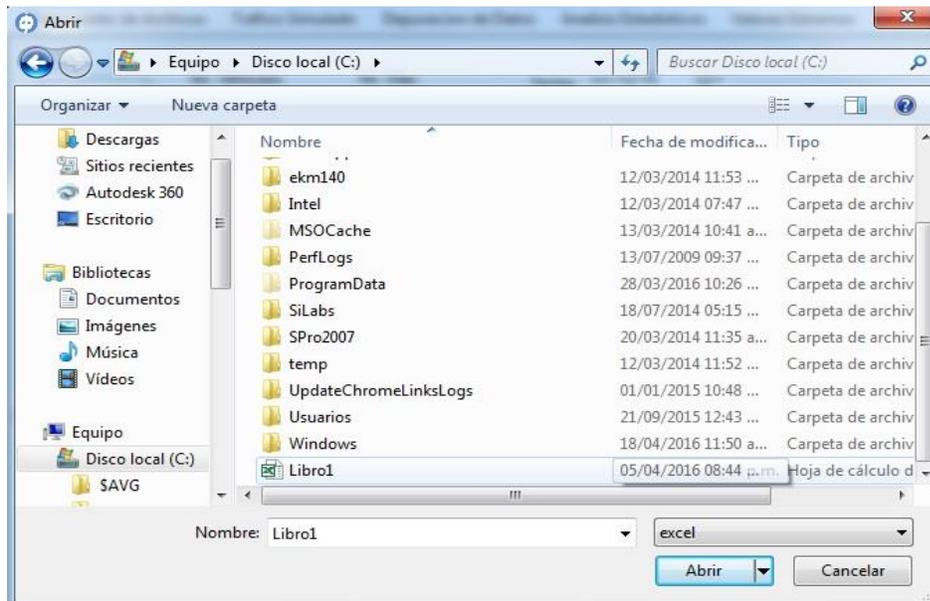
PASO 10. Aparece el mensaje “Archivo Poisson Generado!”. Confirma la lectura correcta de los valores ingresados anteriormente.



PASO 11. Presionar el botón “Cargar Archivo (Excel)”.

A screenshot of a software interface for traffic simulation. The interface is light gray and contains several input fields and buttons. At the top left is a button labeled "Calcular Rangos.". To its right are fields for "No. Vehiculos" (empty), "No. Dias." (30), and "Fecha:" (01/12/15). Below these are checkboxes for "Metodo 1." (unchecked) and "Metodo 2." (checked). To the right of "Metodo 2." is a "Hora:" field (00:00:00). Below these fields is a section titled "(%) Clases Vehiculares" with several input fields: 3.0 (B), 6.0 (C2), 1.7 (C3), 4.1 (T3S2), 0.7 (T3S3), 0.2 (T3S2R4), 0.6 (Otros), 11454 (TDPA), and 2 (Tiempo Promedio de ambo entre vehiculos (seg)). To the right of these fields is a button labeled "Poisson". Below the "Poisson" button are two buttons: "Cargar Archivo(Excel)" and "Generar Archivo (txt)". At the bottom left is a field labeled "Guardado en:".

PASO 12. Abrir el archivo de excel “Libro1.xls” ubicado previamente en el disco “C” del equipo de cómputo.



PASO 13. Aparece el mensaje “Archivo Excel leído”. Confirma la lectura correcta del archivo “Libro1.xls”.



PASO 14. Presionar el botón “Generar Archivo (txt)”.

Calculador Rangos.

No. Vehiculos:

No. Dias:

Fecha:

Hora:

Metodo 1. Metodo 2

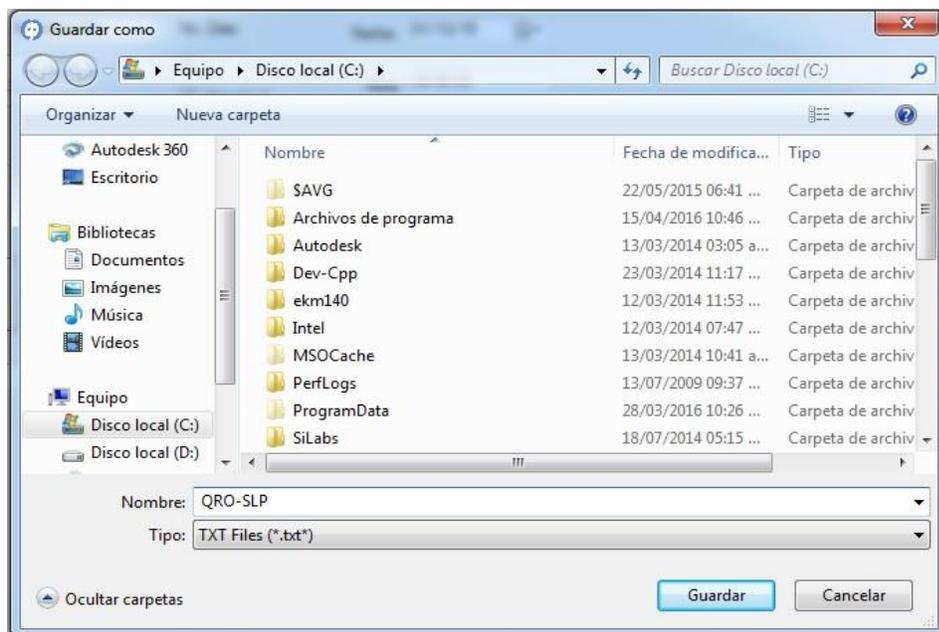
(%) Clases Vehiculares

<input type="text" value="3.0"/>	<input type="text" value="6.0"/>	<input type="text" value="1.7"/>	<input type="text" value="4.1"/>	<input type="text" value="0.7"/>	<input type="text" value="0.2"/>	<input type="text" value="0.6"/>	<input type="text" value="11454"/>	<input type="text" value="2"/>	Poisson
B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	Otros	TDPA.	Tiempo Promedio de ambo entre vehiculos (seg)	

Cargar Archivo(Excel) Generar Archivo (txt)

Guardado en:

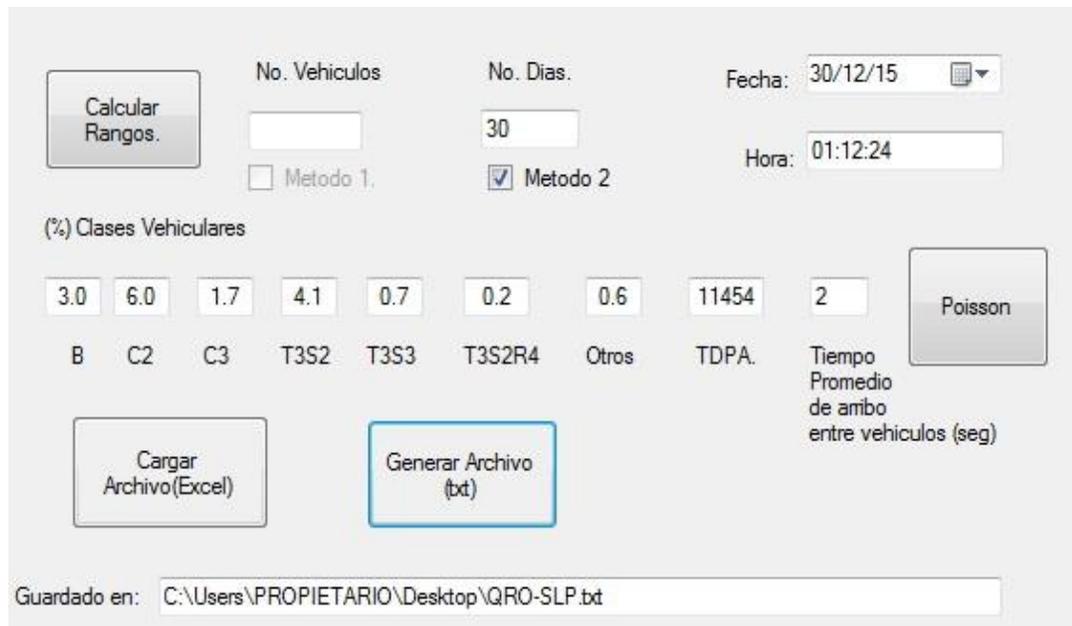
PASO 15. Seleccionar la ubicación donde se guardará el archivo y nombrarlo.



PASO 16. Aparece el mensaje “Archivo Generado”. Confirma la generación correcta del archivo del escenario de tráfico simulado en formato DEEFEP.

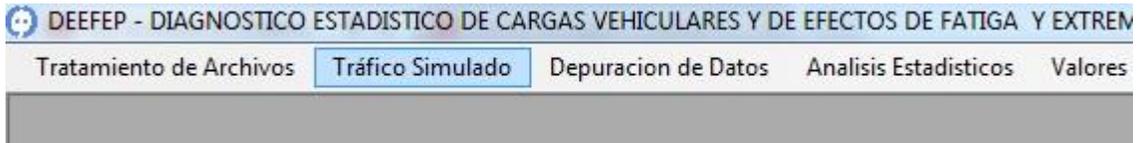


PASO 17. Se muestra la ubicación donde se guardó el archivo y su nombre.

A screenshot of a software interface for traffic simulation. The interface is light gray and contains several input fields and buttons. At the top left is a button labeled 'Calcular Rangos.'. To its right are two input fields: 'No. Vehiculos' (empty) and 'No. Dias.' (containing '30'). Further right are two date/time pickers: 'Fecha:' (containing '30/12/15') and 'Hora:' (containing '01:12:24'). Below these are two checkboxes: 'Metodo 1.' (unchecked) and 'Metodo 2.' (checked). In the middle section, there is a label '(%) Clases Vehiculares' followed by a row of eight input fields containing the values: 3.0, 6.0, 1.7, 4.1, 0.7, 0.2, 0.6, and 11454. Below these fields are labels: B, C2, C3, T3S2, T3S3, T3S2R4, Otros, and TDPA. To the right of these labels is another input field containing '2' and a button labeled 'Poisson'. Below the 'Poisson' button is the text 'Tiempo Promedio de amibo entre vehiculos (seg)'. At the bottom left is a button labeled 'Cargar Archivo(Excel)'. At the bottom center is a button labeled 'Generar Archivo (txt)'. At the bottom right is a text field labeled 'Guardado en:' containing the path 'C:\Users\PROPIETARIO\Desktop\QRO-SLP.txt'.

A.2. Escenario de tráfico del libramiento nororiente de la ciudad de Querétaro.

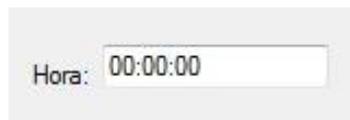
PASO 1. Activar el módulo de tráfico simulado.



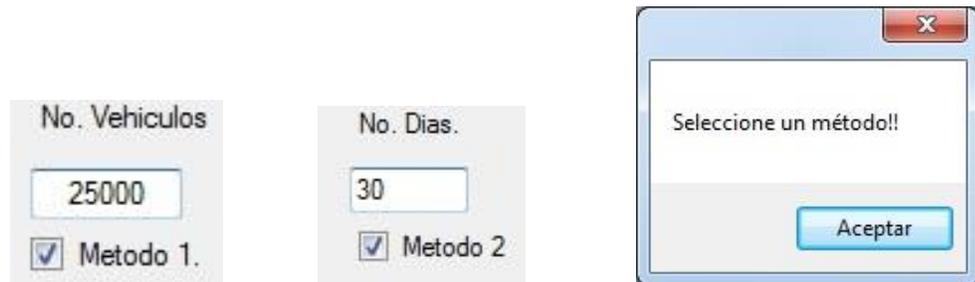
PASO 2. Seleccionar la fecha de inicio del escenario de tráfico.



PASO 3. Seleccionar la hora de inicio del escenario de tráfico, predeterminado el programa muestra 00:00:00.



PASO 4. Introducir el número total de vehículos requerido para el escenario de tráfico y seleccionar la casilla “Método 1”. En caso contrario introducir el número de días deseado para el escenario de tráfico y seleccionar la casilla “Método 2”. Si no se selecciona una casilla el programa marca un error y aparece el mensaje “Seleccione un método!!”.



PASO 5. Introducir los porcentajes correspondientes a cada clase en la clasificación del flujo vehicular que publica SCT para la estación de interés, así como el TDPA y el tiempo promedio de arribo entre vehículos. Si falta una casilla por llenar el programa marca un error y aparece el mensaje “Falta Llenar las clases vehiculares”.

(%) Clases Vehiculares								
2.6	4.1	4.4	30.8	4.9	3.2	0.4	6758	2
B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	Otros	TDPA.	Tiempo Promedio



PASO 6. Presionar el botón “Calcular rangos”. Obtiene las frecuencias acumuladas para las clases vehiculares.

Calcular Rangos.

No. Vehiculos:

No. Dias:

Fecha:

Hora:

Metodo 1. Metodo 2

(%) Clases Vehiculares

2.6	4.1	4.4	30.8	4.9	3.2	0.4	6758	2
B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	Otros	TDPA.	Tiempo Promedio de arribo entre vehiculos (seg)

Cargar Archivo(Excel) Generar Archivo (bt)

Guardado en:

PASO 7. Aparece el mensaje “Datos leídos!”. Confirma la lectura correcta de los valores ingresados anteriormente.



PASO 8. Presionar el botón “Poisson”. Obtiene las frecuencias acumuladas de tiempo entre el paso de vehículos.

Calculador Rangos.

No. Vehiculos:

No. Dias:

Fecha:

Hora:

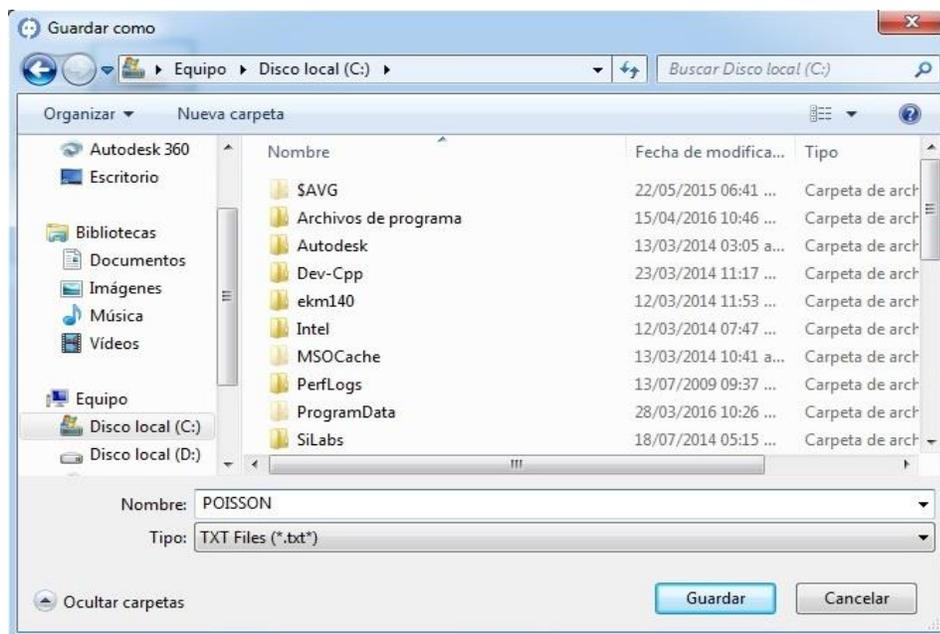
Metodo 1. Metodo 2

(%) Clases Vehiculares

2.6	4.1	4.4	30.8	4.9	3.2	0.4	6758	2
B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	Otros	TDPA.	Tiempo Promedio de arribo entre vehiculos (seg)

Guardado en:

PASO 9. Seleccionar la ubicación donde se guardará el archivo Poisson y nombrarlo como el usuario desee.



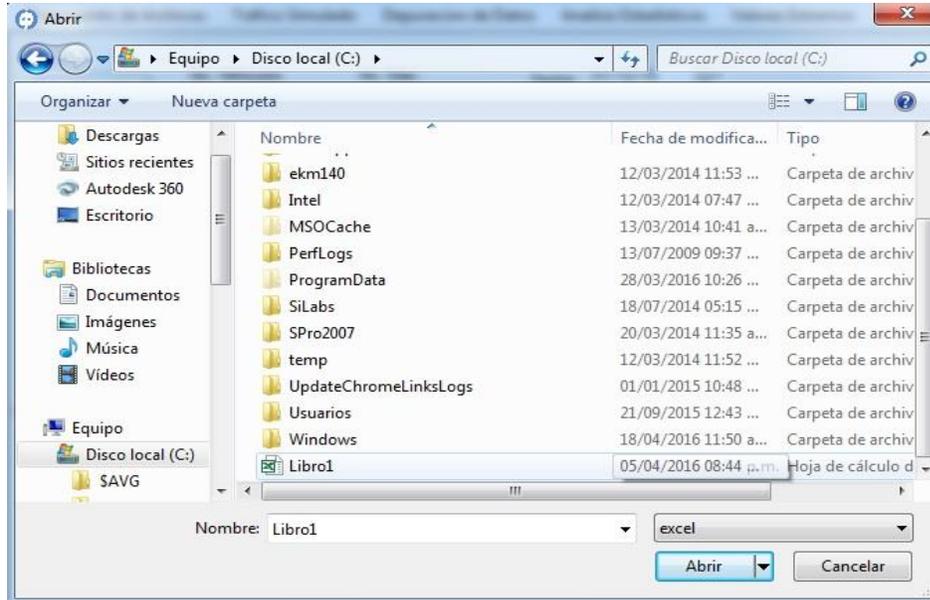
PASO 10. Aparece el mensaje “Archivo Poisson Generado!”. Confirma la lectura correcta de los valores ingresados anteriormente.



PASO 11. Presionar el botón “Cargar Archivo (Excel)”.

A screenshot of a software interface for traffic simulation. It features several input fields and buttons. At the top left is a button labeled "Calcular Rangos.". To its right are fields for "No. Vehiculos" (empty), "No. Dias." (30), and "Fecha:" (01/12/15). Below these are checkboxes for "Metodo 1." (unchecked) and "Metodo 2." (checked). Further right is a "Hora:" field (00:00:00). A section titled "(%) Clases Vehiculares" contains a row of input fields with values: 2.6 (B), 4.1 (C2), 4.4 (C3), 30.8 (T3S2), 4.9 (T3S3), 3.2 (T3S2R4), 0.4 (Otros), 6758 (TDPA.), and 2 (Tiempo Promedio de ambo entre vehiculos (seg)). A "Poisson" button is highlighted with a blue border. Below this section are two buttons: "Cargar Archivo(Excel)" (highlighted with a blue border) and "Generar Archivo (bt)". At the bottom, a text field shows "Guardado en: C:\Users\PROPIETARIO\Desktop\QRO-SLP.txt".

PASO 12. Abrir el archivo de excel “Libro1.xls” ubicado previamente en el disco “C” del equipo de cómputo.



PASO 13. Aparece el mensaje “Archivo Excel leído”. Confirma la lectura correcta del archivo “Libro1.xls”.



PASO 14. Presionar el botón “Generar Archivo (txt)”.

Calcular Rangos.

No. Vehiculos:

No. Dias:

Fecha:

Hora:

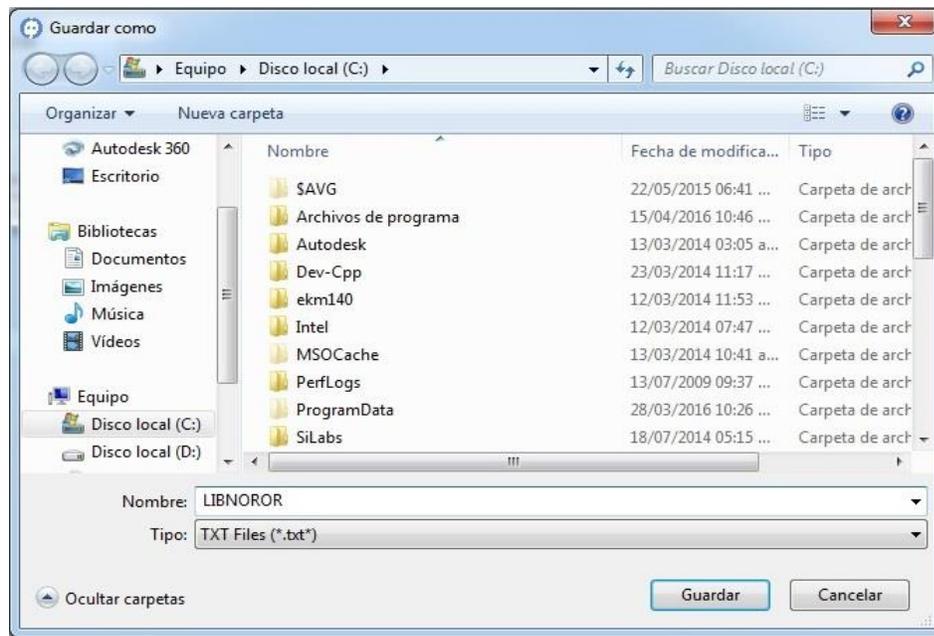
Metodo 1. Metodo 2

(%) Clases Vehiculares

2.6	4.1	4.4	30.8	4.9	3.2	0.4	6758	2
B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	Otros	TDPA.	Tiempo Promedio de arribo entre vehiculos (seg)

Guardado en:

PASO 15. Seleccionar la ubicación donde se guardará el archivo y nombrarlo.



PASO 16. Aparece el mensaje “Archivo Generado”. Confirma la generación correcta del archivo del escenario de tráfico simulado en formato DEEFEP.



PASO 17. Se muestra la ubicación donde se guardó el archivo y su nombre.

A screenshot of a software interface for traffic simulation. The interface is light gray and contains several input fields and buttons. At the top left is a button labeled 'Calcular Rangos.'. To its right are fields for 'No. Vehiculos' (empty), 'No. Dias.' (30), and 'Fecha:' (31/12/15). Below these are checkboxes for 'Metodo 1.' (unchecked) and 'Metodo 2.' (checked). To the right of these are fields for 'Hora:' (00:00:03). In the middle section, there is a label '(%) Clases Vehiculares' followed by a row of input fields with values: 2.6, 4.1, 4.4, 30.8, 4.9, 3.2, 0.4, 6758, and 2. Below these fields are labels: B, C2, C3, T3S2, T3S3, T3S2R4, Otros, TDPA., and 'Tiempo Promedio de arribo entre vehiculos (seg)'. To the right of this row is a button labeled 'Poisson'. At the bottom left is a button labeled 'Cargar Archivo(Excel)'. At the bottom center is a button labeled 'Generar Archivo (bt)'. At the bottom right is a text field labeled 'Guardado en:' containing the path 'C:\Users\PROPIETARIO\Desktop\LIBNOROR.bt'.

APÉNDICE B. PARÁMETROS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO REALIZADO AL ARCHIVO WIM A64 DE FRANCIA

Tabla B-1. Parámetros de la longitud entre ejes 1 y 2.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 1 AL 2		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	48.20	10.19	0.21
3 EJES	43.28	10.10	0.23
4 EJES	38.80	8.95	0.23
5 EJES	37.74	2.62	0.07
6 EJES	34.86	7.16	0.21
7 EJES	28.05	3.70	0.13
8 EJES	36.77	3.08	0.08
9 EJES	40.55	4.76	0.12

Tabla B-2. Parámetros de la longitud entre ejes 2 y 3.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 2 AL 3		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	15.82	1.48	0.09
4 EJES	59.78	18.49	0.31
5 EJES	15.56	8.73	0.56
6 EJES	13.72	0.78	0.06
7 EJES	12.52	1.47	0.12
8 EJES	13.77	2.78	0.20
9 EJES	13.54	0.52	0.04

Tabla B-3. Parámetros de la longitud entre ejes 3 y 4.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 3 AL 4		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	13.23	2.52	0.19
5 EJES	68.64	6.39	0.09
6 EJES	63.21	13.41	0.21
7 EJES	48.73	9.07	0.19
8 EJES	53.24	3.12	0.06
9 EJES	56.67	2.07	0.04

Tabla B-4. Parámetros de la longitud entre ejes 4 y 5.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 4 AL 5		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	13.12	0.57	0.04
6 EJES	13.31	2.03	0.15
7 EJES	16.15	6.89	0.43
8 EJES	13.78	5.46	0.40
9 EJES	14.20	0.63	0.04

Tabla B-5. Parámetros de la longitud entre ejes 5 y 6.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 5 AL 6		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	13.31	1.45	0.11
7 EJES	14.25	1.54	0.11
8 EJES	13.21	8.44	0.64
9 EJES	13.61	1.26	0.09

Tabla B-6. Parámetros de la longitud entre ejes 6 y 7.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 6 AL 7		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	57.28	1.56	0.03
8 EJES	54.47	7.28	0.13
9 EJES	13.85	0.78	0.06

Tabla B-7. Parámetros de la longitud entre ejes 7 y 8.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 7 AL 8		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	12.79	2.21	0.17
9 EJES	57.42	3.40	0.06

Tabla B-8. Parámetros de la longitud entre ejes 8 y 9.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 8 AL 9		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	---	---	---
9 EJES	13.91	0.65	0.05

Tabla B-9. Parámetros del peso en el eje 1.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 1		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	44.20	20.15	0.46
3 EJES	62.94	23.13	0.37
4 EJES	58.93	12.00	0.20
5 EJES	65.31	8.56	0.13
6 EJES	64.31	13.86	0.22
7 EJES	53.73	9.24	0.17
8 EJES	66.43	3.60	0.05
9 EJES	54.40	18.66	0.34

Tabla B-10. Parámetros del peso en el eje 2.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 2		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	59.64	33.16	0.56
3 EJES	75.57	29.60	0.39
4 EJES	67.38	29.16	0.43
5 EJES	87.09	32.65	0.37
6 EJES	62.14	27.21	0.44
7 EJES	52.57	24.03	0.46
8 EJES	60.13	7.29	0.12
9 EJES	85.5	11.61	0.14

Tabla B-11. Parámetros del peso en el eje 3.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 3		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	60.24	31.57	0.52
4 EJES	47.77	26.39	0.55
5 EJES	52.49	23.20	0.44
6 EJES	68.20	24.83	0.36
7 EJES	55.31	22.70	0.41
8 EJES	60.40	4.28	0.07
9 EJES	110.1	15.31	0.14

Tabla B-12. Parámetros del peso en el eje 4.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 4		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	46.71	26.98	0.58
5 EJES	52.31	23.17	0.44
6 EJES	51.13	24.65	0.48
7 EJES	45.73	19.68	0.43
8 EJES	31.77	1.68	0.05
9 EJES	81.27	21.66	0.27

Tabla B-13. Parámetros del peso en el eje 5.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 5		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	52.46	23.78	0.45
6 EJES	53.87	39.70	0.74
7 EJES	44.78	18.96	0.42
8 EJES	33.83	2.34	0.07
9 EJES	76.27	13.84	0.18

Tabla B-14. Parámetros del peso en el eje 6.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 6		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	55.22	40.69	0.74
7 EJES	45.63	19.22	0.42
8 EJES	33.21	2.31	0.07
9 EJES	77.81	15.40	0.20

Tabla B-15. Parámetros del peso en el eje 7.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 7		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	45.26	19.64	0.43
8 EJES	32.88	2.03	0.06
9 EJES	82.63	24.69	0.30

Tabla B-16. Parámetros del peso en el eje 8.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 8		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	32.19	2.91	0.09
9 EJES	80.81	24.62	0.30

Tabla B-17. Parámetros del peso en el eje 9.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 9		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	---	---	---
9 EJES	79.42	24.63	0.31

Tabla B-18. Parámetros de la velocidad.

TIPO DE VEHICULO	VELOCIDAD		
	MEDIA (dm/seg)	D.S.	C.V.
2 EJES	260.69	28.33	0.11
3 EJES	249.88	20.66	0.08
4 EJES	245.23	8.97	0.04
5 EJES	244.78	5.48	0.02
6 EJES	239.66	10.84	0.05
7 EJES	216.05	27.63	0.13
8 EJES	242.67	1.15	0.00
9 EJES	193.55	10.10	0.05

APÉNDICE C. PARÁMETROS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO REALIZADO AL ARCHIVO SIMULADO DE LA CARRETERA QUERÉTARO-SAN LUIS POTOSI

Tabla C-1. Parámetros de la longitud entre ejes 1 y 2.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 1 AL 2		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	48.58	12.17	0.25
3 EJES	54.02	12.26	0.23
4 EJES	38.30	10.72	0.28
5 EJES	37.54	3.46	0.09
6 EJES	35.09	8.53	0.24
7 EJES	27.90	4.18	0.15
8 EJES	36.80	3.84	0.10
9 EJES	40.83	6.19	0.15

Tabla C-2. Parámetros de la longitud entre ejes 2 y 3.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 2 AL 3		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	14.46	1.96	0.14
4 EJES	60.11	22.86	0.38
5 EJES	22.94	6.04	0.26
6 EJES	13.57	1.17	0.09
7 EJES	12.41	1.71	0.14
8 EJES	13.54	1.22	0.09
9 EJES	13.54	0.52	0.04

Tabla C-3. Parámetros de la longitud entre ejes 3 y 4.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 3 AL 4		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	12.59	3.07	0.24
5 EJES	68.39	7.54	0.11
6 EJES	63.11	16.01	0.25
7 EJES	48.60	10.30	0.21
8 EJES	57.57	3.31	0.06
9 EJES	56.67	2.07	0.04

Tabla C-4. Parámetros de la longitud entre ejes 4 y 5.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 4 AL 5		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	13.01	0.83	0.06
6 EJES	12.98	2.65	0.20
7 EJES	15.90	8.10	0.51
8 EJES	14.22	1.07	0.08
9 EJES	14.20	0.63	0.04

Tabla C-5. Parámetros de la longitud entre ejes 5 y 6.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 5 AL 6		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	13.01	2.04	0.16
7 EJES	14.08	1.96	0.14
8 EJES	25.87	2.51	0.10
9 EJES	13.8	1.95	0.14

Tabla C-6. Parámetros de la longitud entre ejes 6 y 7.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 6 AL 7		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	56.53	1.99	0.04
8 EJES	52.77	8.37	0.16
9 EJES	13.73	1.41	0.10

Tabla C-7. Parámetros de la longitud entre ejes 7 y 8.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 7 AL 8		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	12.48	2.83	0.23
9 EJES	58.35	4.98	0.09

Tabla C-8. Parámetros de la longitud entre ejes 8 y 9.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 8 AL 9		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	---	---	---
9 EJES	14.21	1.06	0.07

Tabla C-9. Parámetros del peso en el eje 1.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 1		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	53.21	18.84	0.35
3 EJES	81.50	27.25	0.33
4 EJES	69.67	20.78	0.30
5 EJES	69.16	18.16	0.26
6 EJES	76.34	25.01	0.33
7 EJES	67.95	18.92	0.28
8 EJES	76.02	18.97	0.25
9 EJES	53.12	17.77	0.33

Tabla C-10. Parámetros del peso en el eje 2.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 2		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	76.97	28.63	0.37
3 EJES	99.51	33.74	0.34
4 EJES	96.86	34.46	0.36
5 EJES	117.51	39.37	0.34
6 EJES	90.82	33.66	0.37
7 EJES	83.52	30.34	0.36
8 EJES	73.84	21.16	0.29
9 EJES	65.91	19.36	0.29

Tabla C-11. Parámetros del peso en el eje 3.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 3		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	88.67	32.31	0.36
4 EJES	81.68	29.56	0.36
5 EJES	74.79	26.21	0.35
6 EJES	95.27	34.08	0.36
7 EJES	92.11	31.27	0.34
8 EJES	70.26	19.15	0.27
9 EJES	86.05	25.11	0.29

Tabla C-12. Parámetros del peso en el eje 4.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 4		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	45.40	9.08	0.20
5 EJES	47.23	10.09	0.21
6 EJES	47.53	11.61	0.24
7 EJES	45.24	11.03	0.24
8 EJES	34.26	8.25	0.24
9 EJES	54.20	12.72	0.23

Tabla C-13. Parámetros del peso en el eje 5.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 5		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	75.78	26.70	0.35
6 EJES	102.23	40.68	0.40
7 EJES	71.91	25.23	0.35
8 EJES	39.05	10.67	0.27
9 EJES	60.72	19.44	0.32

Tabla C-14. Parámetros del peso en el eje 6.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 6		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	104.97	42.22	0.40
7 EJES	74.66	26.40	0.35
8 EJES	38.62	10.44	0.27
9 EJES	66.99	20.73	0.31

Tabla C-15. Parámetros del peso en el eje 7.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 7		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	72.22	25.69	0.36
8 EJES	37.53	10.29	0.27
9 EJES	77.03	25.67	0.33

Tabla C-16. Parámetros del peso en el eje 8.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 8		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	40.01	9.84	0.25
9 EJES	75.63	25.67	0.34

Tabla C-17. Parámetros del peso en el eje 9.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 9		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	---	---	---
9 EJES	75.98	25.01	0.33

Tabla C-18. Parámetros de la velocidad.

TIPO DE VEHICULO	VELOCIDAD		
	MEDIA (dm/seg)	D.S.	C.V.
2 EJES	290.51	87.78	0.30
3 EJES	243.77	63.45	0.26
4 EJES	277.09	52.46	0.19
5 EJES	232.12	34.84	0.15
6 EJES	236.62	23.64	0.10
7 EJES	226.57	12.37	0.05
8 EJES	234.41	5.03	0.02
9 EJES	185.86	10.78	0.06

APÉNDICE D. PARÁMETROS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO REALIZADO AL ARCHIVO SIMULADO DEL LIBRAMIENTO NORORIENTE DE QUERÉTARO

Tabla D-1. Parámetros de la longitud entre ejes 1 y 2.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 1 AL 2		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	48.45	12.24	0.25
3 EJES	46.98	13.11	0.28
4 EJES	37.52	9.87	0.26
5 EJES	37.45	3.45	0.09
6 EJES	35.15	8.40	0.24
7 EJES	27.60	4.35	0.16
8 EJES	36.35	3.84	0.11
9 EJES	40.45	5.52	0.14

Tabla D-2. Parámetros de la longitud entre ejes 2 y 3.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 2 AL 3		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	15.43	13.11	0.85
4 EJES	56.60	21.77	0.38
5 EJES	23.01	6.04	0.26
6 EJES	13.50	1.12	0.08
7 EJES	12.39	1.80	0.15
8 EJES	12.83	3.33	0.26
9 EJES	13.5	1.12	0.08

Tabla D-3. Parámetros de la longitud entre ejes 3 y 4.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 3 AL 4		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	13.52	3.14	0.23
5 EJES	68.50	7.65	0.11
6 EJES	63.34	15.90	0.25
7 EJES	50.03	10.14	0.20
8 EJES	51.95	3.59	0.07
9 EJES	57.12	2.62	0.05

Tabla D-4. Parámetros de la longitud entre ejes 4 y 5.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 4 AL 5		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	13.01	0.81	0.06
6 EJES	12.45	2.62	0.21
7 EJES	15.09	7.22	0.48
8 EJES	13.92	6.71	0.48
9 EJES	14.01	0.83	0.06

Tabla D-5. Parámetros de la longitud entre ejes 5 y 6.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 5 AL 6		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	12.98	2.01	0.15
7 EJES	13.46	2.02	0.15
8 EJES	25.51	2.45	0.10
9 EJES	13.49	1.70	0.13

Tabla D-6. Parámetros de la longitud entre ejes 6 y 7.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 6 AL 7		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	56.15	2.08	0.04
8 EJES	53.47	8.82	0.16
9 EJES	13.49	1.13	0.08

Tabla D-7. Parámetros de la longitud entre ejes 7 y 8.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 7 AL 8		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	12.36	3.01	0.24
9 EJES	57.55	4.06	0.07

Tabla D-8. Parámetros de la longitud entre ejes 8 y 9.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA DEL EJE 8 AL 9		
	MEDIA (dm)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	---	---	---
9 EJES	14.00	0.83	0.06

Tabla D-9. Parámetros del peso en el eje 1.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 1		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	53.19	18.73	0.35
3 EJES	72.84	25.39	0.35
4 EJES	69.81	20.63	0.30
5 EJES	141.98	10.24	0.07
6 EJES	75.42	24.53	0.33
7 EJES	64.81	17.80	0.27
8 EJES	72.52	18.38	0.25
9 EJES	51.87	17.66	0.34

Tabla D-10. Parámetros del peso en el eje 2.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 2		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	73.30	28.68	0.39
3 EJES	89.38	31.41	0.35
4 EJES	103.81	33.18	0.32
5 EJES	117.70	39.30	0.33
6 EJES	91.28	33.57	0.37
7 EJES	85.85	32.75	0.38
8 EJES	73.05	22.51	0.31
9 EJES	65.62	18.46	0.28

Tabla D-11. Parámetros del peso en el eje 3.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 3		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	79.68	29.94	0.38
4 EJES	76.69	26.90	0.35
5 EJES	75.10	26.26	0.35
6 EJES	93.63	33.09	0.35
7 EJES	84.8	29.35	0.35
8 EJES	68.70	18.81	0.27
9 EJES	85.15	23.87	0.28

Tabla D-12. Parámetros del peso en el eje 4.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 4		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	13.12	0.57	0.04
5 EJES	46.98	10.08	0.21
6 EJES	46.76	11.61	0.25
7 EJES	44.46	11.13	0.25
8 EJES	32.86	7.94	0.24
9 EJES	52.32	12.01	0.23

Tabla D-13. Parámetros del peso en el eje 5.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 5		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	75.63	26.53	0.35
6 EJES	100.7	41.43	0.41
7 EJES	71.03	27.16	0.38
8 EJES	40.92	10.19	0.25
9 EJES	61.68	18.52	0.30

Tabla D-14. Parámetros del peso en el eje 6.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 6		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	104.23	42.66	0.41
7 EJES	69.06	25.98	0.38
8 EJES	37.22	9.77	0.26
9 EJES	64.78	19.49	0.30

Tabla D-15. Parámetros del peso en el eje 7.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 7		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	70.22	26.40	0.38
8 EJES	38.76	9.63	0.25
9 EJES	75.12	24.87	0.33

Tabla D-16. Parámetros del peso en el eje 8.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 8		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	35.64	10.52	0.30
9 EJES	73.95	24.71	0.33

Tabla D-17. Parámetros del peso en el eje 9.

TIPO DE VEHICULO	PESO EN EL EJE 9		
	MEDIA (kN)	D.S.	C.V.
2 EJES	---	---	---
3 EJES	---	---	---
4 EJES	---	---	---
5 EJES	---	---	---
6 EJES	---	---	---
7 EJES	---	---	---
8 EJES	---	---	---
9 EJES	73.48	24.39	0.33

Tabla D-18. Parámetros de la velocidad.

TIPO DE VEHICULO	VELOCIDAD		
	MEDIA (dm/seg)	D.S.	C.V.
2 EJES	291.20	87.73	0.30
3 EJES	242.76	72.55	0.30
4 EJES	273.13	54.34	0.20
5 EJES	231.85	34.91	0.15
6 EJES	237.49	23.43	0.10
7 EJES	225.76	13.02	0.06
8 EJES	230.36	6.19	0.03
9 EJES	187.48	10.86	0.06

APÉNDICE E. LÍMITES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE ACOTACIÓN DE LAS VARIABLES ALEATORIAS UTILIZADOS EN LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE TRÁFICO POR SIMULACIÓN

Tabla E-1. Límites máximos y mínimos de la longitud entre el eje 1 y 2.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA ENTRE EJES (dm)	
	EJE 1 A 2	
	MAX	MIN
B3	71.37	49.89
2 EJES	68.59	27.81
3 EJES	63.49	23.07
4 EJES	56.70	20.90
5 EJES	42.99	32.49
6 EJES	49.18	20.54
7 EJES	35.45	20.65
8 EJES	42.93	30.61
9 EJES	50.07	31.03

Tabla E-2. Límites máximos y mínimos de la longitud entre el eje 2 y 3.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA ENTRE EJES (dm)	
	EJE 2 A 3	
	MAX	MIN
B3	15.08	12.21
2 EJES	---	---
3 EJES	18.77	12.87
4 EJES	96.75	22.81
5 EJES	33.01	13.05
6 EJES	15.27	12.17
7 EJES	15.47	9.57
8 EJES	19.33	8.21
9 EJES	14.58	12.50

Tabla E-3. Límites máximos y mínimos de la longitud entre el eje 3 y 4.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA ENTRE EJES (dm)	
	EJE 3 A 4	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	18.26	8.20
5 EJES	81.43	55.85
6 EJES	90.02	36.40
7 EJES	66.86	30.60
8 EJES	59.48	47.00
9 EJES	60.81	52.53

Tabla E-4. Límites máximos y mínimos de la longitud entre el eje 4 y 5.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA ENTRE EJES (dm)	
	EJE 4 A 5	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	---	---
5 EJES	14.25	11.99
6 EJES	17.38	9.24
7 EJES	29.93	2.37
8 EJES	24.70	2.86
9 EJES	15.46	12.94

Tabla E-5. Límites máximos y mínimos de la longitud entre el eje 5 y 6.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA ENTRE EJES (dm)	
	EJE 5 A 6	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	---	---
5 EJES	---	---
6 EJES	16.22	10.40
7 EJES	17.33	11.17
8 EJES	30.09	22.15
9 EJES	16.13	11.09

Tabla E-6. Límites máximos y mínimos de la longitud entre el eje 6 y 7.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA ENTRE EJES (dm)	
	EJE 6 A 7	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	---	---
5 EJES	---	---
6 EJES	---	---
7 EJES	60.41	54.15
8 EJES	69.03	39.91
9 EJES	15.41	12.29

Tabla E-7. Límites máximos y mínimos de la longitud entre el eje 7 y 8.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA ENTRE EJES (dm)	
	EJE 7 A 8	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	---	---
5 EJES	---	---
6 EJES	---	---
7 EJES	---	---
8 EJES	17.21	8.37
9 EJES	64.22	50.62

Tabla E-8. Límites máximos y mínimos de la longitud entre el eje 8 y 9.

TIPO DE VEHICULO	DISTANCIA ENTRE EJES (dm)	
	EJE 8 A 9	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	---	---
5 EJES	---	---
6 EJES	---	---
7 EJES	---	---
8 EJES	---	---
9 EJES	15.21	12.61

Tabla E-9. Límites máximos y mínimos del peso en el eje 1.

TIPO DE VEHICULO	PESO POR EJE (kN)	
	EJE 1	
	MAX	MIN
B3	107.24	44.38
2 EJES	84.62	20.86
3 EJES	107.13	29.13
4 EJES	104.42	37.10
5 EJES	99.81	37.54
6 EJES	117.73	34.43
7 EJES	100.41	33.20
8 EJES	108.92	42.79
9 EJES	81.87	21.59

Tabla E-10. Límites máximos y mínimos del peso en el eje 2.

TIPO DE VEHICULO	PESO POR EJE (kN)	
	EJE 2	
	MAX	MIN
B3	132.15	53.20
2 EJES	126.15	28.14
3 EJES	132.22	34.98
4 EJES	158.29	42.42
5 EJES	184.53	50.06
6 EJES	149.11	33.27
7 EJES	139.92	32.49
8 EJES	110.52	38.73
9 EJES	97.04	33.93

Tabla E-11. Límites máximos y mínimos del peso en el eje 3.

TIPO DE VEHICULO	PESO POR EJE (kN)	
	EJE 3	
	MAX	MIN
B3	121.03	42.42
2 EJES	---	---
3 EJES	121.05	27.88
4 EJES	126.61	30.08
5 EJES	119.74	30.17
6 EJES	150.78	36.51
7 EJES	140.03	34.18
8 EJES	102.01	38.91
9 EJES	125.61	43.69

Tabla E-12. Límites máximos y mínimos del peso en el eje 4.

TIPO DE VEHICULO	PESO POR EJE (kN)	
	EJE 4	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	59.97	29.41
5 EJES	64.23	30.07
6 EJES	66.38	27.38
7 EJES	64.45	28.26
8 EJES	47.10	20.47
9 EJES	73.07	32.25

Tabla E-13. Límites máximos y mínimos del peso en el eje 5.

TIPO DE VEHICULO	PESO POR EJE (kN)	
	EJE 5	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	---	---
5 EJES	121.11	30.15
6 EJES	170.50	28.84
7 EJES	114.98	27.67
8 EJES	56.97	21.79
9 EJES	92.79	30.27

Tabla E-14. Límites máximos y mínimos del peso en el eje 6.

TIPO DE VEHICULO	PESO POR EJE (kN)	
	EJE 6	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	---	---
5 EJES	---	---
6 EJES	174.76	29.57
7 EJES	116.88	28.20
8 EJES	55.96	21.39
9 EJES	96.95	30.88

Tabla E-15. Límites máximos y mínimos del peso en el eje 7.

TIPO DE VEHICULO	PESO POR EJE (kN)	
	EJE 7	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	---	---
5 EJES	---	---
6 EJES	---	---
7 EJES	117.55	27.97
8 EJES	54.65	21.18
9 EJES	117.83	32.79

Tabla E-16. Límites máximos y mínimos del peso en el eje 8.

TIPO DE VEHICULO	PESO POR EJE (kN)	
	EJE 8	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	---	---
5 EJES	---	---
6 EJES	---	---
7 EJES	---	---
8 EJES	56.23	20.74
9 EJES	116.08	32.07

Tabla E-17. Límites máximos y mínimos del peso en el eje 9.

TIPO DE VEHICULO	PESO POR EJE (kN)	
	EJE 9	
	MAX	MIN
B3	---	---
2 EJES	---	---
3 EJES	---	---
4 EJES	---	---
5 EJES	---	---
6 EJES	---	---
7 EJES	---	---
8 EJES	---	---
9 EJES	114.86	31.52

Tabla E-18. Límites máximos y mínimos de la velocidad.

TIPO DE VEHICULO	VELOCIDAD (dm/seg)	
	MAX	MIN
B3	337	152
2 EJES	442	139
3 EJES	375	111
4 EJES	369	189
5 EJES	292	172
6 EJES	278	197
7 EJES	250	206
8 EJES	244	227
9 EJES	206	169