



INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE



Certificación ISO 9001:2008 ‡

HACIA EL DESARROLLO DE UN MODELO NACIONAL DE TRANSPORTE; PRIMERA FASE: CONSTRUCCIÓN DE LA RED INTERMODAL Y PRIMEROS ANÁLISIS

Eric Moreno Quintero
Agustín Bustos Rosales
Luz Angélica Gradilla Hernández
Ricardo Montoya Zamora
Carlos Martner Peyrelongue

**Publicación Técnica No. 459
Sanfandila, Qro, 2015**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Hacia el desarrollo de un modelo nacional de
transporte; primera fase: Construcción de la red
intermodal y primeros análisis**

Publicación Técnica No. 459
Sanfandila, Qro, 2015

Este proyecto surgió en el contexto del Laboratorio Nacional de Sistemas de Transporte y Logística que forma parte del Centro Nacional para la Innovación en Transporte Intermodal y Logística (CeNIT Logístico) el cual es impulsado y desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

El trabajo se realizó en el IMT por un equipo de investigación conformado por el Dr. Eric Moreno Quintero y el Dr. Agustín Bustos Rosales de la Coordinación de Integración del Transporte; la Dra. Luz Angélica Gradilla Hernández, de la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales, y el Dr. Ricardo Montoya Zamora, consultor especialista en modelos de transporte.

La representación computacional del modelo y la migración de la plataforma TransCAD a la de VISUM fueron dirigidas por el Dr. Ricardo Montoya, con apoyo del equipo de modelación.

También participó el Dr. Carlos Martner Peyrelongue, coordinador de Integración del Transporte, en el desarrollo conceptual del modelo y en la obtención de información de acceso restringido, que fue de gran ayuda para la investigación.

Contenido

Resumen		iii
Abstract		v
Resumen	ejecutivo	vii
Capítulo 1.	Introducción	1
	1.1 Antecedentes de modelado en reparto modal	2
	1.2 La migración de TransCAD a VISUM	7
Capítulo 2.	La demanda del transporte de carga terrestre	15
	2.1 Matrices OD del transporte de carga	15
	2.2 Ajuste de la matriz de carga carretera	17
Capítulo 3.	Oferta del transporte de carga: la red bimodal carretera-ferrocarril	23
	3.1 Características de las redes carretera y ferroviaria	23
	3.2 La integración de la red bimodal	26
Capítulo 4.	Modelación de flujos de carga terrestre	31
	4.1 El modelo de asignación	31
	4.2 Escenarios con base tiempo y congestión	43
	4.3 Modelación en corredores seleccionados	46
Capítulo 5.	Revisión de resultados de la modelación	53
	5.1 Validación de flujos pronosticados	53
	5.2 Un ejemplo de análisis de caso	58
Capítulo 6.	Conclusiones y trabajo futuro	61
Bibliografía		65

Resumen

Este trabajo es la primera etapa en la construcción de un modelo nacional de transporte en México cuyo objetivo es integrar los distintos modos en un modelo de red, apoyado con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos de optimización de redes que permitan estimar el comportamiento de los flujos de carga y las transferencias entre modos, partiendo de información origen-destino disponible y características físicas y operativas de la red de transporte.

El esfuerzo principal de esta primera etapa fue construir una red bimodal del transporte terrestre de carga, así como de generar las matrices origen-destino adecuadas y los escenarios básicos para evaluar el desempeño del modelo de flujos implementado con software de planeación del transporte reciente.

Los primeros resultados obtenidos servirán de base para los desarrollos posteriores y servirán de guía para la extensión de este primer modelo a refinamientos de los datos utilizados y de los supuestos de modelación para obtener representaciones más realistas del sistema de transporte terrestre de carga. En desarrollos posteriores, se podrán afinar los detalles necesarios para integrar los otros modos de transporte: marítimo -tanto de altura como costero-, y aéreo; además de que eventualmente también se podrá integrar el movimiento de pasajeros que, sin duda, es también de gran importancia en el contexto socioeconómico del país.

El capítulo 1 inicia con una introducción que trata los antecedentes del modelado en el reparto modal y presenta una breve descripción del software especializado en planeación del transporte utilizado. El capítulo 2 trata la modelación de la demanda de carga terrestre por medio de las matrices origen-destino de los dos modos y describe los ajustes necesarios para esta información.

El capítulo 3 trata la oferta de carga en la red bimodal carretera-ferrocarril y detalla las características de la red conformada. El capítulo 4 da las bases del modelo de flujos utilizado, que es un modelo de asignación, y las consideraciones matemáticas, los criterios utilizados, los escenarios modelados y sus primeros resultados.

En el capítulo 5 se examinan los resultados obtenidos, incluyendo criterios de validación y un ejemplo de análisis de caso. Finalmente en el capítulo 6 se resumen las conclusiones de la experiencia adquirida en esta primera fase y se indican algunas pautas para trabajos futuros dentro de esta misma línea.

Abstract

This work is the first step towards building a national transport model in Mexico in order to integrate the different modes into a network model, supported by Geographic Information Systems (GIS) and models of network optimization to estimate the behaviour of cargo flows and transfers between modes, based on origin-destination information available and the physical and operational characteristics of the transport network.

The main effort of this first stage was to build a bimodal network for land freight transport and generate the appropriate origin-destination matrices, as well as the basic scenarios to assess the performance of the flow model implemented with recent software transport planning.

The first results obtained will be the basis for subsequent development tasks and will also set guidelines for extending this first model through refinements of the data used and modelling assumptions, in order to obtain more realistic representations of the land freight transport system. In future works, more refinement on the details necessary to integrate other modes of transport will be reached: maritime and coastal movements, as well as air transportation. Eventually, this will enable the integration of passenger movement, an issue of undoubtedly great importance taking into consideration the Mexico's socioeconomic context.

Chapter 1 begins with an introduction dealing with the backgrounds on modal split and a brief description of specialized transportation planning software used. Chapter 2 focuses on modelling the demand for land cargo through origin-destination matrices of these two modes and describes the necessary adjustments to this information.

Chapter 3 discusses the freight offer on the bimodal road-rail network and details the characteristics of the formed network. Chapter 4 provides the basis for the flow model used, which is an assignment model, and addresses mathematical considerations, criteria used, modelled scenarios and the first results obtained.

Chapter 5 examines the results, including validation criteria and provides an example of case analysis. Finally, chapter 6 summarizes the conclusions from the experience gained in this first phase and sets some guidelines for future work within this same line.

Resumen ejecutivo

Con este trabajo se inicia el desarrollo de un modelo nacional de transporte para México que permita representar la oferta y la demanda del servicio y sus interacciones en el sistema de transporte. Esta primera fase considera solamente el transporte terrestre de carga, centrándose en las redes carretera y ferroviaria con movimiento de mercancías.

El presente muestra, asimismo, la oferta de transporte disponible como: las redes carretera y ferroviaria, las terminales de transferencia, o puertos fronterizos y marítimos, así como elementos para identificar la demanda de transporte, como: información de orígenes, destinos, tipo de carga y sus flujos en el movimiento terrestre de carga. También se incluyen supuestos sobre el comportamiento de los flujos de carga según atributos de los modos, necesidades específicas de ciertas cargas y una descripción de los flujos de carga en condiciones de congestión para el transporte carretero.

La implementación del modelo necesita de información adecuada sobre la oferta y demanda de transporte, al igual que software especializado para la modelación de las redes y los flujos bajo diversos escenarios, y la posibilidad de usar distintos modelos matemáticos de la congestión carretera para determinar su adecuación.

En este primer modelo la oferta se representó con una primera versión de una red bimodal georreferenciada representativa de los modos carretero y ferroviario, con conexiones exclusivas en nodos donde se registra transferencia de carga intermodal.

La demanda se representó con matrices origen-destino (OD), de flujos de autotransporte y de ferrocarril, incluidos los tipos de carga típicos por modo, así como aquellos movidos por carretera, pero que son susceptibles de viajar por ferrocarril, y los que sólo se mueven por autotransporte. Los primeros datos corresponden a 2010, con un ajuste a 2014 para flujos carreteros y datos de 2013 para el sistema ferroviario.

El software usado en los primeros modelados fue TransCAD, de la empresa norteamericana Caliper Corporation. Este producto es de uso extendido entre los profesionales de la planeación del transporte y ofrece una interfaz para sistemas de información geográfica (SIG) con buena flexibilidad para manejar rutinas de asignación de tráfico en las redes.

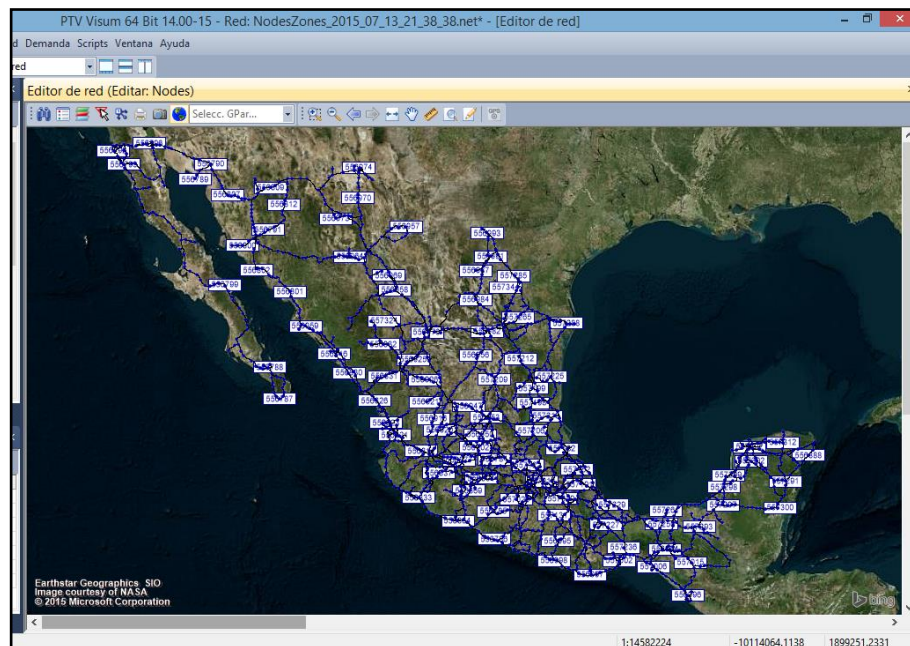
En las etapas finales del modelado se comenzó a ensayar con otro software reciente de planeación del transporte: Visum, de la empresa alemana Planung Transport Verkehr AG (PTV). Este producto es un software de análisis y

planeación de transporte, que puede manejar datos de Sistemas de Información Geográfica y varios modelos de transporte. El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) lo tiene a su disposición gracias a un convenio de colaboración tecnológica con la empresa PTV, con larga experiencia en planeación del transporte.

Para la importación de redes de TransCAD a Visum, se utilizó la llamada *Red Nacional de Caminos (RNC)*, una red digitalizada, resultado de un trabajo conjunto reciente entre el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el IMT. Se trata de la red nacional más actualizada y reconocida como referencia oficial en el Gobierno Federal (*Diario Oficial de la Federación*, 6 de octubre de 2014), cuya cobertura es la siguiente:

- 158,000 km de carreteras pavimentadas, incluidos 48,685 km de jurisdicción federal
- 36,139 km de vialidades urbanas
- 118,812 km de caminos no pavimentados

La siguiente figura muestra las carreteras federales de la RNC en el ambiente del software Visum, luego de los procesos de migración originados con TransCAD.



Red de carreteras federales de la RNC en Visum (elaboración propia).

La información origen-destino

Las matrices OD del modelo contienen datos de traslados de carga entre los pares origen-destino de cada matriz: una de autotransporte y otra de ferrocarril.

Para el transporte por carretera, la matriz OD original usada fue una versión con datos de 2010, utilizada en estudios previos de reparto modal del transporte de carga terrestre. A fin de integrarla en el modelo, fue necesario hacer ajustes para mejorar la representación del escenario nacional de transporte terrestre en 2014.

En el caso ferroviario, la matriz OD se obtuvo a partir de información reciente de la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal (DGTFM) de la SCT por un convenio de colaboración con las empresas ferroviarias. La matriz usada en el modelo corresponde a movimientos ferroviarios de 2013. En el caso de esta matriz, dado que la información correspondiente representa el total anual de movimientos de las empresas ferroviarias no necesita ajustarse como sucede para movimientos carreteros.

Un aspecto importante para hacer la matriz OD carretera compatible con la matriz OD ferroviaria, fue clasificar el tipo de producto movido, para poder comparar las asignaciones globales de flujo por tipo de carga en la red bimodal. Aunque la clasificación de productos para la información carretera es más amplia que la correspondiente a la información ferroviaria, la clasificación carretera se adecuó para hacerla compatible con la de movimientos ferroviarios. Esta clasificación, usada en la modelación de ambos modos, es la siguiente (Moreno, E. *et al.*, 2014a):

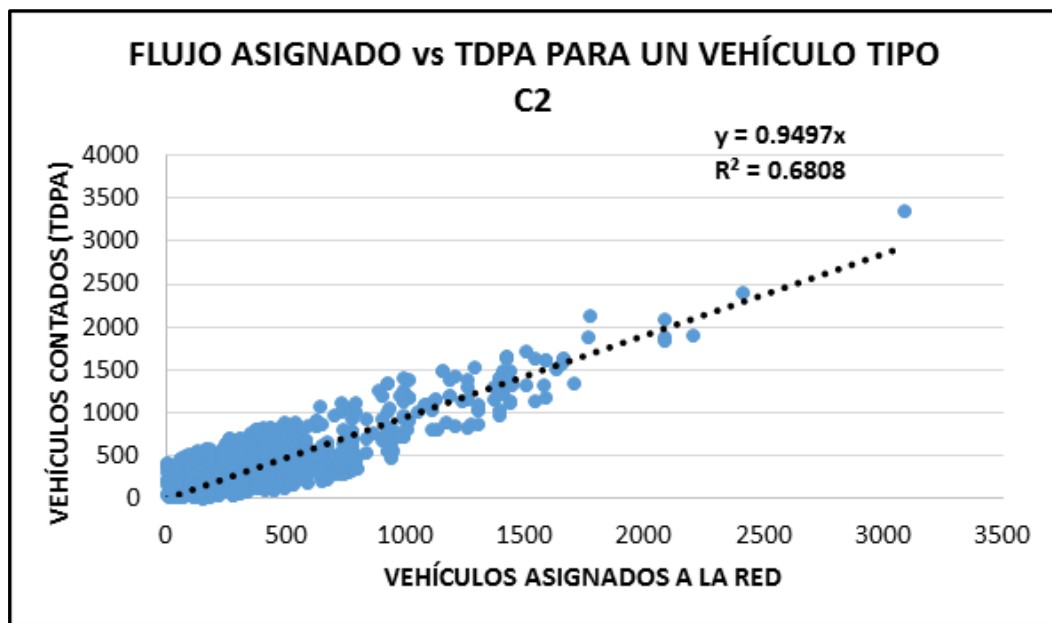
1. Productos industriales
2. Hierro, acero y sus derivados
3. Productos químicos
4. Graneles agrícolas
5. Graneles líquidos
6. Graneles minerales
7. Productos forestales
8. Equipo ferroviario
9. Productos petrolíferos
10. Contenedores
11. Vehículos nuevos y autopartes
12. Otros

Ya homologadas las clasificaciones de productos para ambos modos, se realizó el ajuste de la matriz OD carretera, llamada matriz “semilla”, con el criterio de que los

flujos pronosticados por el modelo basados en dicha matriz fueran consistentes con la información disponible sobre datos viales que publica la SCT.

La matriz OD carretera se ajustó con el método de Nielsen que maneja aforos de tráfico con posibles inconsistencias o incertidumbres (Nielsen, O., 1998) con el propósito de reducir las diferencias entre los flujos generados en el modelo y los aforos observados. El método de Nielsen está implementado en el software TransCAD como procedimiento de ajuste de matrices OD y ha reportado buenos resultados con cualquier método de asignación, tanto para generar el equilibrio del usuario como la versión estocástica del mismo.

La figura siguiente muestra el resultado comparativo de los flujos pronosticados por el modelo contra los conteos vehiculares identificados en Datos Viales para el caso de camiones tipo C2 con valores razonablemente buenos en la R^2 y en la pendiente de la recta de comparación.



Flujo asignado vs tránsito diario promedio anual (TDPA), 2014. Camiones tipo C2. (Fuente: elaboración propia.)

Los ajustes para los otros tipos vehiculares y para el total de los movimientos también fueron comparados, obteniéndose ajustes razonables en todos los casos.

Integración de la red bimodal

En las etapas previas de modelación para llegar a la red bimodal del proyecto, se utilizó una versión de la red carretera con 8,612 nodos, 9,218 arcos y 564 centroides (refiriendo las ciudades y localidades principales del país). En esta red se representaron 56,363 km de carreteras, de los cuales 44,400 son de administración federal, 8,616 corresponden a gobiernos estatales y 2,496 pertenecen al ámbito municipal (Moreno, E., *et al.*, 2014).

En el proceso de migración del software TransCAD hacia el software Visum, se utilizó la Red Nacional de Caminos (RNC) para el modelado:

“La RNC es una red vial modelada a gran detalle y estructurada de acuerdo con la norma *ISO 14825:2011 Intelligent Transport Systems -- Geographic Data Files -- GDF5.0*, para determinar rutas en sistemas de información geográfica, orientada al análisis de redes de transporte. Además de integrar los diversos elementos que conforman las vías de comunicación (carreteras, terracerías, brechas, principales vialidades en áreas urbanas) que permiten el tránsito de vehículos automotores, esta red incorpora infraestructura asociada (túneles, puentes, plazas de cobro, marcas de kilometraje), así como otros medios o instalaciones de transporte como transbordadores, aeropuertos, puertos, estaciones de ferrocarril y destinos diversos como sitios de interés para el turismo.

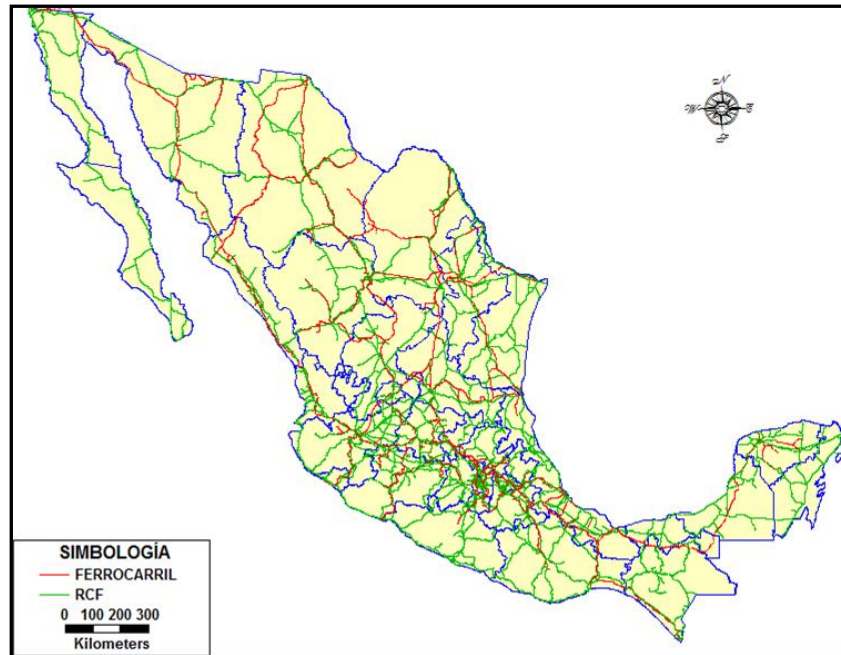
Se estructuró a partir de la topología de redes geométricas para atender métodos de ruteo y tiene como fin apoyar la localización de destinos y facilitar el conocimiento de las vías de comunicación a través de la red vial, además de incorporar diversos elementos que revisten importancia en la planeación de viajes, como son las estaciones de abastecimiento de combustible.” (INEGI, 2015).

En su versión original completa, la RNC importada al software TransCAD generó una estructura de 550,076 nodos y 619,680 arcos, la cual no se pudo manejar en el software Visum, pues la licencia en uso en el IMT está limitada a 375,000 arcos. Para un manejo adecuado de la RNC en la modelación de flujos de carga, se hicieron ajustes para considerar sólo los arcos utilizados efectivamente por el autotransporte de carga, es decir, la red federal más gran parte de la red pavimentada, evitando caminos estatales y municipales de especificaciones menores.

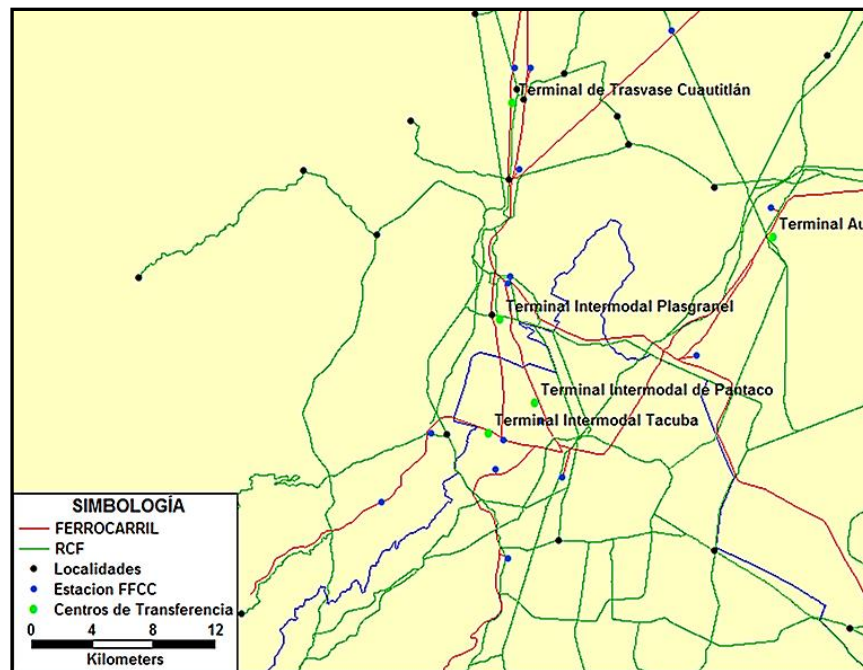
La red ferroviaria resultante es una red georreferenciada con información oficial del INEGI (Mapa Digital de México) en formato “shape”. Esta red se cambió a una proyección Cónica Conforme de Lambert (CCL), con las mismas especificaciones de la red carretera, para asegurar el ajuste entre las dos capas.

La red ferroviaria contiene 3,430 arcos, 3,357 nodos y 1404 centroides. Su longitud total cubre 21,066.27 kilómetros y dispone de los atributos siguientes: distancia, velocidad máxima de operación y tiempo de viaje.

Las figuras enseguida muestran el mapa con las redes carretera y ferroviaria, desplegado con TransCAD, y detalles de los puntos de transferencia modelados en la zona norte del Valle de México, alrededor de la terminal intermodal de Ferrovalle (Pantaco).



Redes carretera y ferroviaria en TransCAD (elaboración propia).



Nodos de transferencia intermodal al norte del Valle de México (elaboración propia.)

El modelo de asignación de flujos

El modelo de asignación estima los flujos vehiculares que se producirán en la red frente a una demanda de movilidad conocida. El pronóstico usa un procedimiento de asignación a las distintas rutas posibles en la red, considerando aspectos como tiempo de recorrido, congestión por la presencia de otros vehículos en la ruta y costos operativos. El modelo matemático para la congestión vial son las funciones volumen-demora que dan a la asignación forma de elegir la mejor ruta según distintos criterios, como rutas de costo mínimo o criterios de equilibrio.

Los pronósticos de flujos vehiculares del modelo de asignación sirven para estimar indicadores de desempeño de la red de transporte (Willumsen, 2000). Los objetivos generales del modelo de asignación de flujos son los siguientes:

Objetivos principales:

- a. Obtener buenas mediciones agregadas del tráfico en la red, como: flujos totales que la usan, ingresos totales por peaje, reparto modal entre carretera y ferrocarril, etc.
- b. Obtener buenas estimaciones de los costos y los tiempos de viaje entre las zonas que representa la red de transporte para un nivel dado de demanda.
- c. Lograr pronósticos razonables de los flujos en los tramos de la red e identificar aquellos que están fuertemente congestionados.

Objetivos secundarios:

- a. Pronosticar las rutas que usará cada par origen-destino.
- b. Analizar cuáles pares OD utilizan un tramo o una ruta particular.
- c. Pronosticar los movimientos de vuelta en los entronques para auxiliar la planeación de infraestructura futura.

Las etapas básicas del modelo de asignación son tres tareas principales:

1. Identificar un conjunto de rutas atractivo para los usuarios; estas rutas se identifican y almacenan en una estructura de datos llamada *árbol*, y esta primera etapa se conoce como *etapa de construcción del árbol de rutas*.

2. Se asignan proporciones adecuadas de la matriz OD a las rutas del árbol, construyendo así el patrón de flujos en la red de transporte.

3.] Se verifica la convergencia. Este paso modela los cambios de ruta de los usuarios para optimizar sus tiempos y/o costos para llegar a sus destinos. Usa un algoritmo iterativo guiado con algún criterio como el equilibrio del usuario, el equilibrio del sistema o el criterio todo-o-nada. La convergencia sigue alguna regla de decisión para detener el algoritmo con una solución satisfactoria. Los criterios de asignación más comunes son los siguientes:

Criterio Todo o Nada: Este enfoque asigna los flujos vehiculares a la red siempre en la ruta más corta (en términos de distancia o tiempo) para unir un origen a un destino. Es el modelo básico de ruta más corta tratado en Teoría de Gráficas, para el cual hay algoritmos de solución muy eficientes. Este criterio se usa en redes con poca o nula congestión o cuando la operación vehicular es muy controlada, como pasa en las redes ferroviarias. Este es el criterio del modelo para flujos ferroviarios.

Equilibrio del Usuario (EU): Es el comportamiento de usuarios en la red que eligen libremente sus rutas buscando sus mejores tiempos de recorrido; no acuerdan entre sí ni con el administrador de la red. En este estado ningún usuario adquiere ventaja si cambia su ruta, pues la congestión se ha generalizado en la red. Se usa para modelar la congestión en redes viales. En este enfoque, como los usuarios eligen individualmente sus rutas, éstas empiezan a ocuparse a medida que el tráfico aumenta, con lo cual se incrementan los tiempos de traslado y el uso de rutas alternas, hasta llegar a un punto de equilibrio donde el tiempo de recorrido para cualquier par origen-destino será el mismo en cualquiera de las rutas usadas.

Equilibrio del Sistema (ES): Modela el comportamiento de usuarios que de algún modo acuerdan entre sí o aceptan sugerencias del administrador de la red para escoger rutas. En este equilibrio el tiempo total de todos los recorridos (o el tiempo medio) es mínimo. Este criterio constituye el objetivo del administrador de la red para reducir el consumo de combustible y el desgaste de infraestructura, casi proporcionales a los tiempos de recorrido. Con el criterio ES surge la necesidad de motivar a algunos usuarios de la red para elegir ciertas rutas que no serían precisamente las mejores para sus tiempos, con el objetivo global de minimizar el costo total de los recorridos. En este equilibrio, la congestión bajaría siempre que los usuarios sean informados de las rutas que deberían usar.

La congestión en el modo carretero se modeló con la función volumen-demora) del *Bureau of Public Roads* norteamericano (*BPR function*), de uso muy extendido en la práctica de modelos de asignación de tráfico en redes. Se describe como sigue:

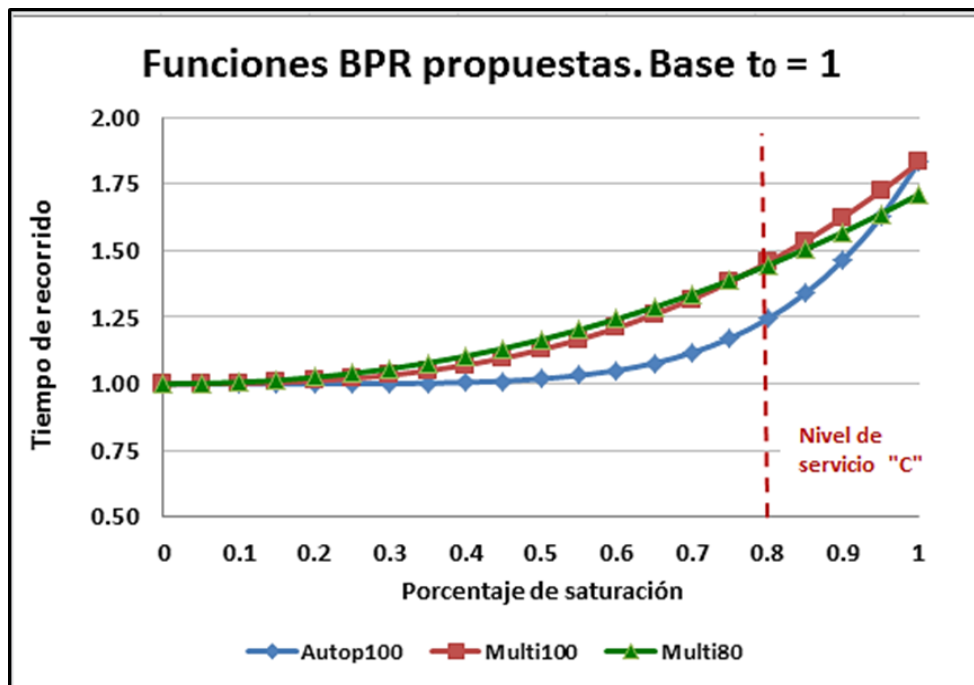
$$t(x) = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{C} \right)^\beta \right]$$

donde: t_0 = tiempo de viaje a flujo libre; x = flujo en el arco ; C = capacidad, y α , β son parámetros de calibración.

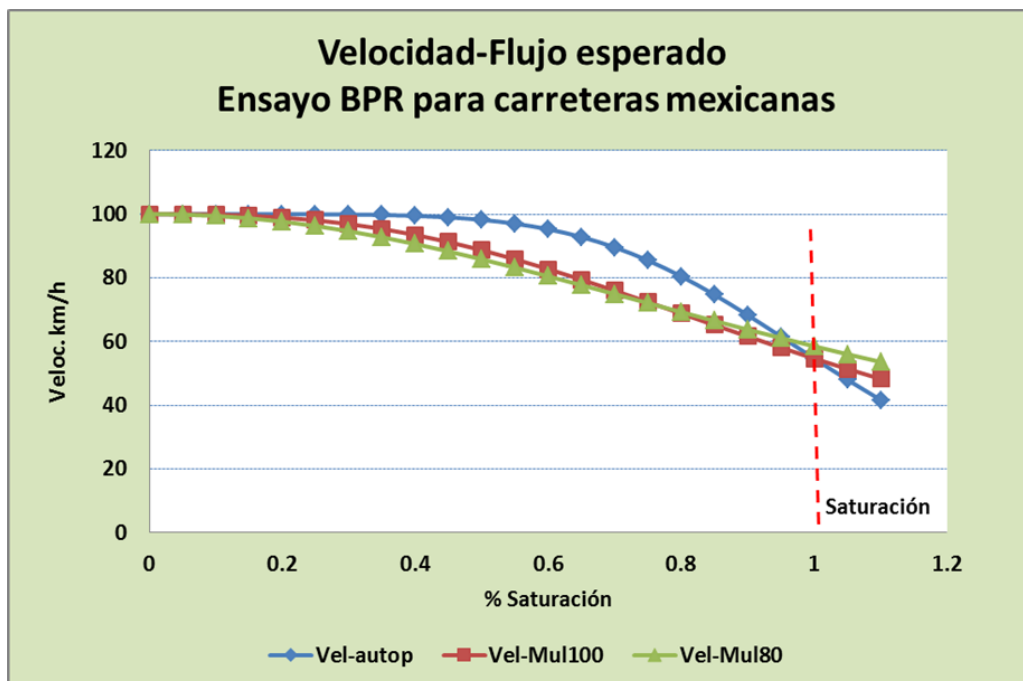
Para modelar la congestión carretera, se usaron los siguientes parámetros de la función BPR propuestos para las carreteras mexicanas (Moreno, E. *et al.*, 2014a).

	Autopistas		Libres de peaje	
Coefficiente	100 km/h	80 km/h	100 km/h	80 km/h
α	0.83	0.56	0.83	0.71
β	5.5	3.6	2.7	2.1

El cambio en el tiempo de traslado, para un valor unitario del tiempo a flujo libre $t_0 = 1$ (circulación, sin congestión) se muestra en la gráfica siguiente.

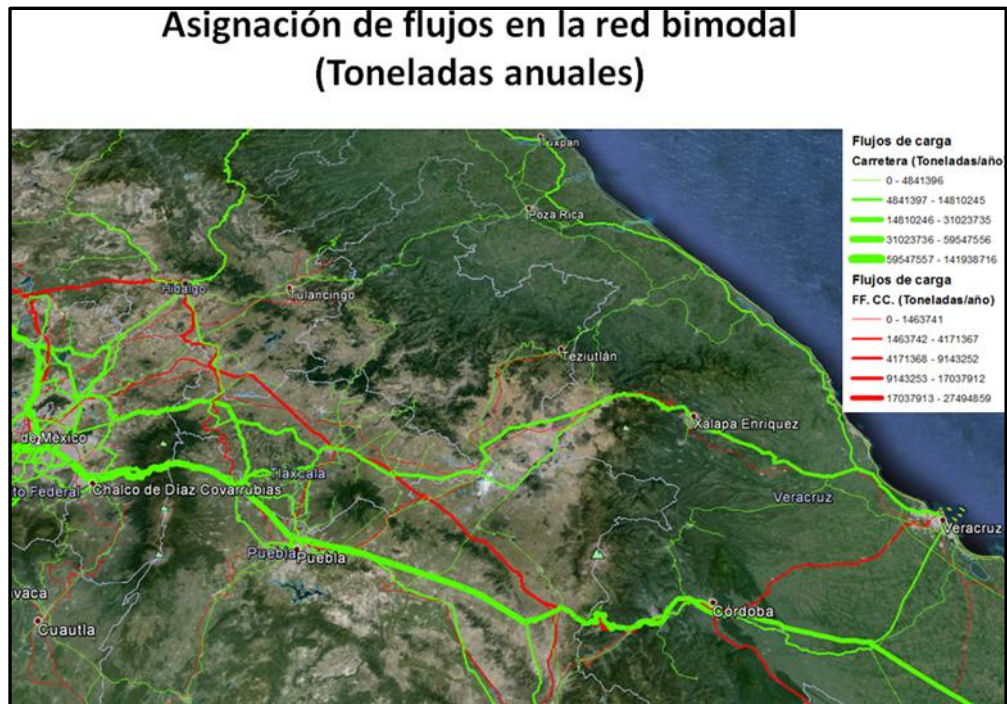


Las velocidades asociadas se ven enseguida. Se observa que en saturación, la velocidad está entre 57 y 60 km/h, un supuesto razonable de modelación.



En esta primera etapa de desarrollo del modelo de asignación, los criterios de optimización se basaron solamente en los tiempos de recorrido en las rutas, permitiendo confirmar la lógica del modelo y la validez de respuestas consistentes.

Enseguida se muestra un detalle de la distribución de flujos (ton/año) por carretera (en verde) y por ferrocarril (en rojo) en la ruta México-Veracruz.



En la gráfica anterior, se observa la mayor participación del autotransporte en los movimientos del centro al Puerto de Veracruz, resultado consistente con el criterio de tiempos de traslado en las redes correspondientes.

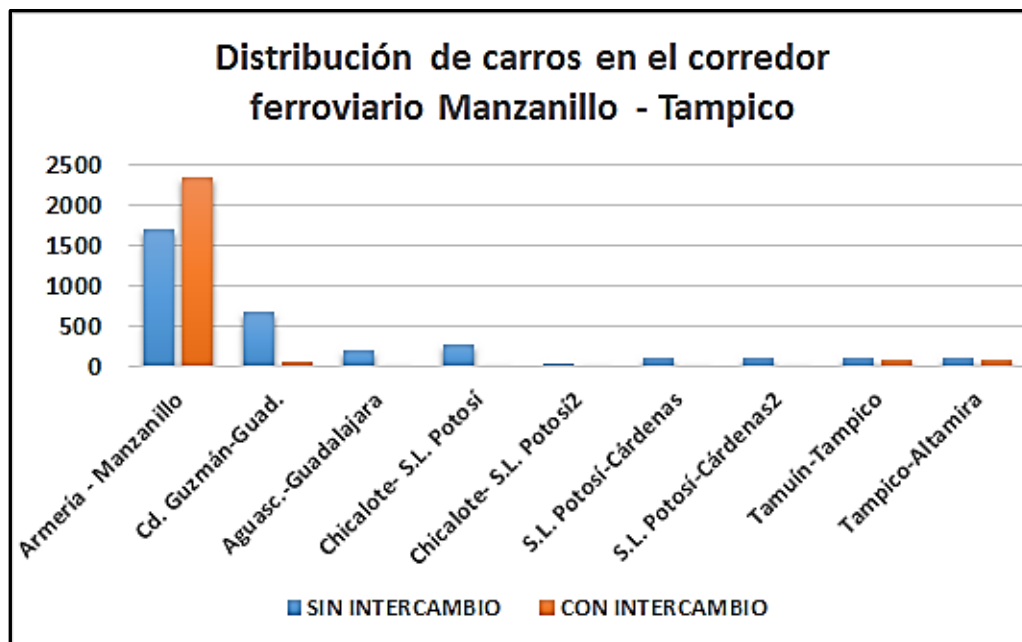
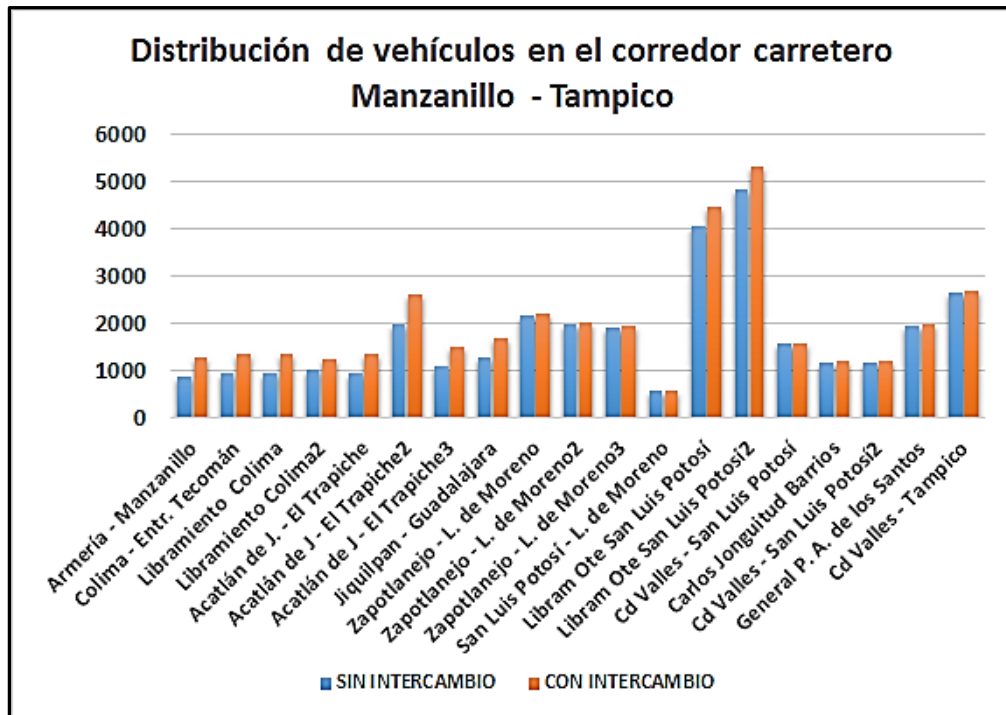
Escenarios con base tiempo y congestión en corredores seleccionados

Con la primera versión del modelo, usando las matrices OD ajustadas y la propuesta de función BPR para el sistema de carreteras federales en México se plantearon escenarios para observar los resultados del modelo, considerando solamente los tiempos de traslado en la red bimodal, pero incluyendo la modelación de la congestión para los movimientos carreteros. Los escenarios tratados fueron:

1. Corredor Manzanillo – Frontera Norte
2. Corredor Veracruz – México
3. Corredor México – Nuevo Laredo

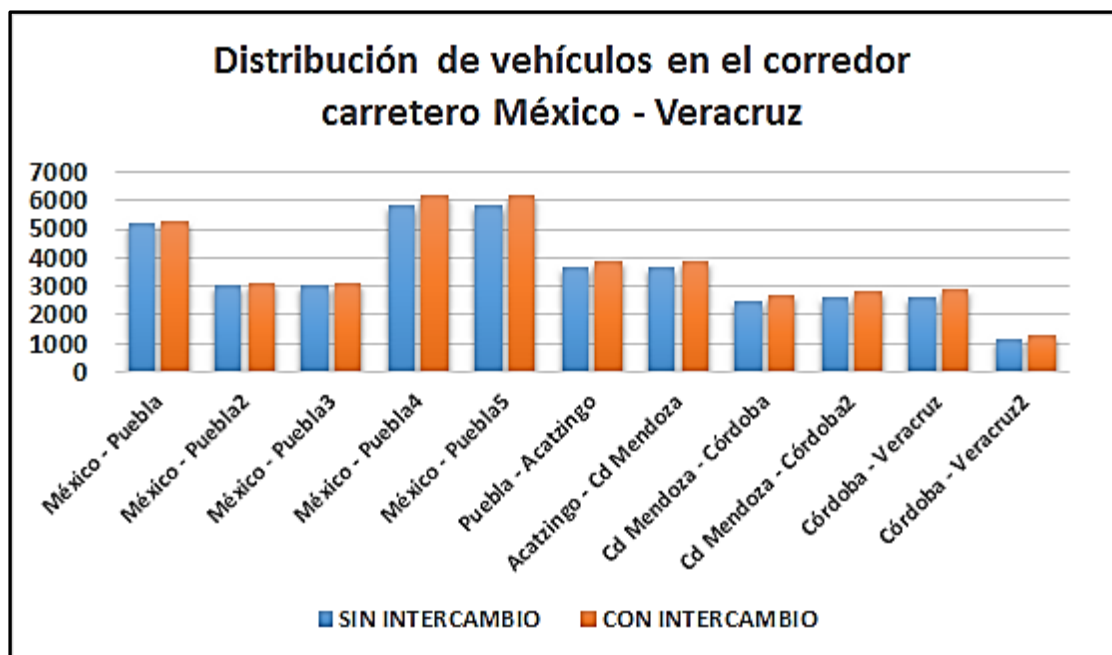
En los tres casos el modelo de transporte se corrió primero considerando las redes carretera y ferroviaria separadamente (sin intercambio intermodal de carga), y luego en la red bimodal, con transferencia de cargas entre los modos.

Las dos figuras siguientes muestran los resultados en tramos del corredor Manzanillo-Tampico.



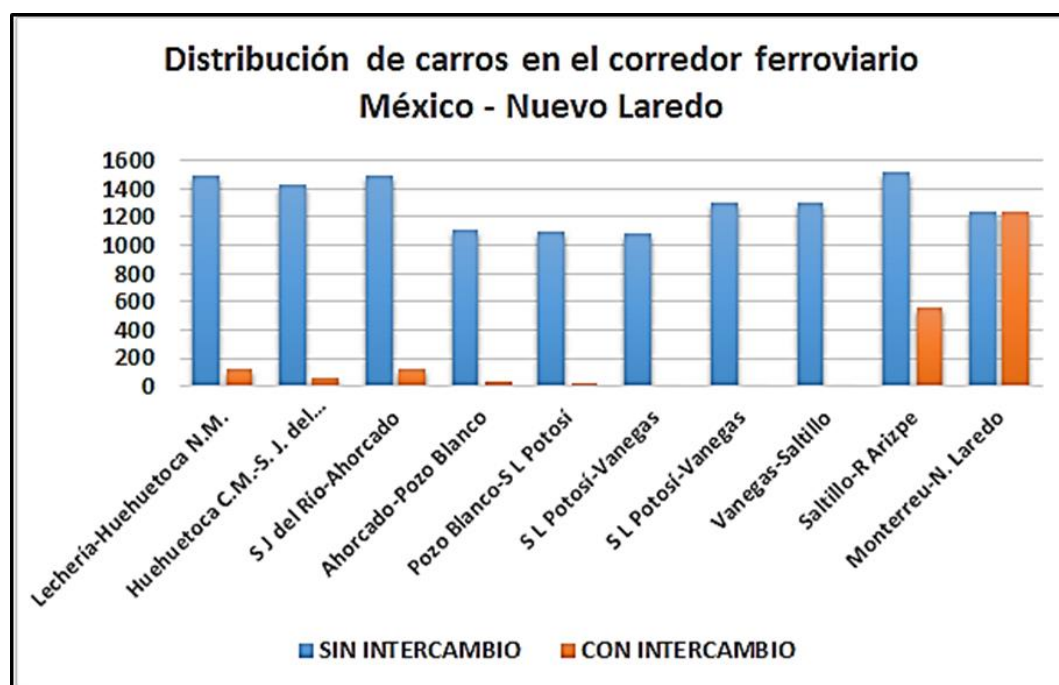
Las gráficas anteriores muestran los flujos en los tramos principales del corredor carretero de Manzanillo a Tampico para los dos casos: sin intercambio de carga entre modos y permitiendo la transferencia de cargas. En casi todos los tramos del corredor mostrado, los flujos carreteros se muestran aumentados para el caso en el que se permite transferencia de carga entre carretera y ferrocarril. Esta respuesta del modelo parece razonable, pues el criterio de optimización fueron las rutas de tiempo mínimo, y los tiempos en carretera en general son mejores que los ferroviarios. La excepción es el tramo de Armería, donde sucede lo opuesto, con un aumento de flujo ferroviario atraído del autotransporte. Este hecho pudiera relacionarse con el movimiento de contenedores desde Manzanillo, pero será necesario investigarlo cuando se agreguen costos operativos al modelo.

La gráfica que sigue muestra los resultados en el corredor Veracruz-México.



La figura anterior muestra el resultado de flujos carreteros en la ruta México-Veracruz sin intercambio de carga y con intercambio intermodal. Aquí se observa que, al permitir el intercambio de carga, el flujo vehicular aumenta ligeramente, a diferencia de los cambios observados en el corredor Manzanillo-Tampico. Como en el caso anterior, con el modelo mejorado al incluir costos de operación, será necesario confirmar este comportamiento en el corredor modelado.

En el caso del corredor México-Nuevo Laredo, la figura siguiente muestra el efecto en la distribución de vehículos en la red ferroviaria, también sin intercambio de carga y con intercambio intermodal.



La gráfica anterior muestra los correspondientes flujos ferroviarios en el corredor sin intercambio y con intercambio intermodal de carga. Esta gráfica indica una fuerte reducción del flujo ferroviario aparentemente en favor del movimiento carretero en casi todos los tramos de la ruta. Resalta el último tramo de la conexión Monterrey-Nuevo Laredo que prácticamente no muestra ningún cambio antes ni después de modelarse el intercambio de carga.

Los resultados anteriores indican que el modelo responde consistentemente con los supuestos de optimización en las rutas, que para estos casos fue solamente el tiempo de traslado, el cual en general, resulta mejor para el transporte carretero que para el ferroviario. La inclusión del modelado de la congestión para el movimiento carretero se reflejó en que los flujos ferroviarios, aunque en menor medida; al considerarse el intercambio, éstos flujos se mantuvieron en un nivel mínimo —no se anularon—, ya que, a pesar de que los tiempos en carretera son en general mejores, estos tiempos se deterioran en presencia de congestión.

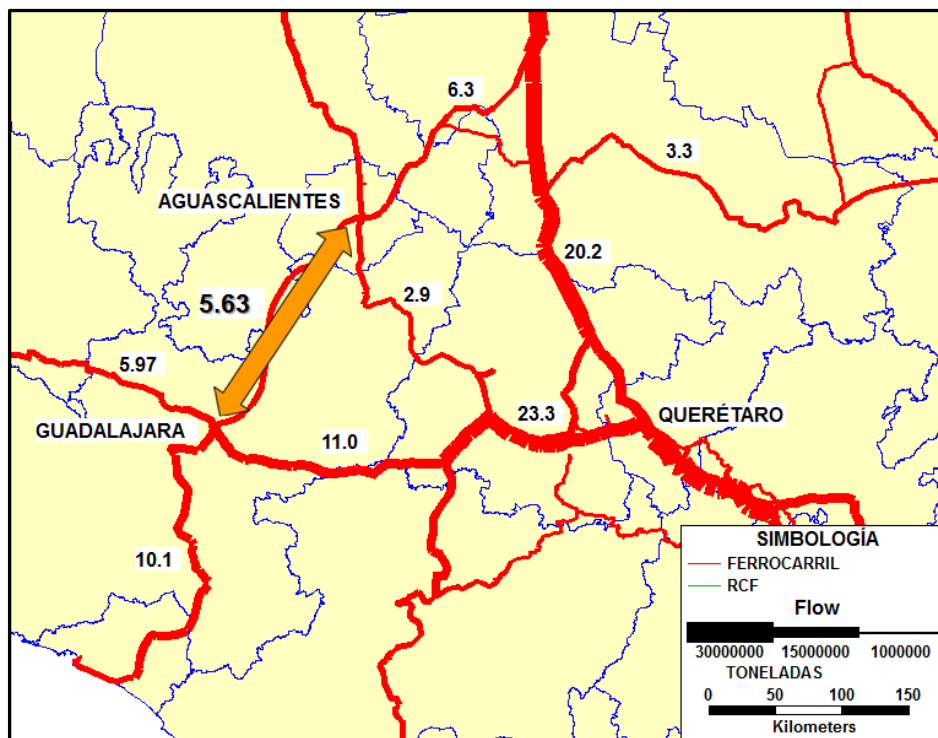
Todas las observaciones que se han comentado en estos primeros resultados se verificarán en versiones mejoradas del modelo en las que se incluirán costos de operación en ambos modos, a fin de verificar el comportamiento de los flujos.

Ejemplo de análisis de caso

Una de las tareas de planeación que pueden resolverse con un modelo como el que se está desarrollando en esta primera etapa es estimar el comportamiento de tramos de la red que aún no se construyen y que están planeados en proyectos de infraestructura de interés para el Sector.

Un ejemplo es el tramo corto Guadalajara-Aguascalientes, anunciado por la DGTFM en julio de 2014 en el marco de la XX Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres, celebrada en Acapulco, Gro. (Quintana, M., T21, 2014). Este proyecto registró, como uno de los primeros beneficios esperados, un ahorro de 16 horas en comparación con el trayecto original y una posible demanda de nueve millones 600 mil toneladas anuales. Este acortamiento pertenece a la cartera de proyectos de infraestructura de la actual administración.

Aunque no se pudo conseguir el trazo oficial del proyecto, se agregó una ruta factible en la red bimodal y se corrió el modelo de asignación para estimar el potencial de flujo del nuevo tramo. La figura enseguida muestra el resultado del modelo.



El tramo agregado a la red, considerando aspectos de pendiente del terreno y obstáculos geográficos para su diseño, resultó de 209 km, aproximadamente un 11% más largo que el valor de 188 km anunciado por la DGTFM en 2014.

El modelado del nuevo tramo consideró sólo el tiempo de traslado en la red bimodal; no obstante, la primera estimación del flujo potencial resultó de cinco millones 630 mil toneladas, aproximadamente el 59% del flujo proyectado durante el anuncio oficial del proyecto. Se espera que, con el modelo mejorado en siguientes etapas, la estimación resulte más precisa.

Conclusiones y trabajo futuro

El modelo actual se compone de los elementos principales siguientes:

- a) El conjunto de supuestos de comportamiento de los flujos según el tipo de producto y las prácticas operativas de cada modo.
- b) Una red bimodal que representa las redes carretera y ferroviaria operando conjuntamente con interacciones en las terminales intermodales.
- c) Los datos de origen y destino de los movimientos de carga.
- d) Las funciones volumen-demora que replican el fenómeno de la congestión carretera y los criterios de equilibrio, que en esta primera etapa se centran solamente en los tiempos de traslado en la red bimodal.

Con estos elementos, el modelo actual ha dado resultados consistentes, con pronósticos de flujo que privilegian el movimiento por carretero en la mayoría de los casos, debido a los mejores tiempos de viaje en el autotransporte.

Sin embargo, el modelado de la congestión evitó que el total de los flujos se pronosticaran para la carretera, dejando en un nivel mínimo la participación ferroviaria. Esta circunstancia se revisará en el modelo mejorado, en el cual se considerarán también costos operativos.

Esta primera experiencia de modelación del transporte terrestre de carga permitió identificar líneas de acción para mejoras del modelo. Las principales líneas de acción consideradas son:

1. Completar información de terminales intermodales con apoyo de la DGTFM. El modelo actual considera 43 terminales intermodales en la red, pero datos recientes indican cerca de 69 puntos de transferencia para modelar.
2. Actualizar la red ferroviaria con datos recientes de más detalle en el trazo (características geométricas, túneles, puentes, laderos, etc.), obtenidos de la DGTFM por la colaboración entre el IMT y la SCT.
3. Como las redes actuales no tienen datos completos de pendientes y curvatura requeridas para calcular costos de operación, se completará esta información para la red bimodal, incluidos datos del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) en carreteras para estimar costos de operación.

4. Completada la información de curvaturas, pendientes y rugosidad en carreteras, se diseñarán rutinas de cálculo de operación vehicular. Para carreteras con la metodología del Banco Mundial (*Vehicle Operating Cost* del modelo HDM-III) y para ferrocarril con estimaciones de costos ferroviarios ajustados conforme al crecimiento nacional de precios con el Índice Nacional de Precios Productor (INPP).
5. Extender la modelación de la congestión en la red carretera con las funciones de impedancia Cónica y Akcelik, como alternativas al uso de la función BPR propuesta para México. Con esta línea de trabajo, se busca encontrar también propuestas de parámetros de ajuste para las funciones Cónica y de Akcelik para aplicarse en la red nacional.

Las líneas de trabajo descritas guiarán la segunda etapa de desarrollo del Modelo Nacional de Transporte, el cual se centrará en la actualización de los datos que alimentan al modelo, la mejora en los criterios de asignación de flujos al incluir costos de operación y la exploración de resultados del modelo mejorado en diversos escenarios de planeación, que actualmente son de interés en nuestro país.

1. Introducción

El transporte terrestre de carga en México es un elemento imprescindible para el sistema productivo nacional. El abasto de insumos a la industria, el traslado de productos intermedios a plantas de procesamiento, el aprovisionamiento a centros de distribución o el flujo de productos terminados para el consumidor final son el reflejo cotidiano de la dinámica de la economía nacional.

Este movimiento terrestre de carga se hace principalmente por autotransporte y ferrocarril. Estos modos están desregulados, negocian libremente sus tarifas y compiten en el mercado de carga. Las características y atributos de cada uno de ellos —como cobertura de su red, tonelajes movidos por viaje, distancias recorridas, costos operativos, consumo de diésel, etc.— son las ventajas o desventajas competitivas que determinan el reparto modal de carga entre ellos.

A la vez, el transporte terrestre de carga genera impactos indeseados como congestión y accidentes en carreteras, consumo de combustibles fósiles y emisiones contaminantes, y desgaste acelerado de la infraestructura, que presionan a los planificadores del sistema nacional de transporte a diseñar políticas públicas con las que se busque eliminar o al menos aliviar estos impactos y que sean congruentes con las grandes líneas de la planeación nacional.

En el contexto descrito, resulta entonces pertinente contar con un modelo del sistema de transporte terrestre nacional para fines de planeación. Un modelo de este tipo incluye representaciones de la oferta de transporte disponible como las redes carretera y ferroviaria, las terminales de transferencia, los puertos fronterizos y marítimos, y también elementos que representan la demanda de transporte, como información de orígenes, destinos, tipos y flujos de cargas en el movimiento terrestre de carga.

Junto con la representación de oferta y demanda de transporte, el modelo debe incluir supuestos sobre el comportamiento de los flujos de carga según los atributos de los modos, las necesidades específicas de ciertos productos y una descripción del comportamiento de los flujos de carga bajo condiciones de congestión para el transporte carretero.

Implementar un modelo como el descrito requiere de información adecuada sobre la oferta y demanda de transporte, software especializado para modelación de las redes y los flujos bajo diversos escenarios de modelación, y la posibilidad de ensayar distintos modelos matemáticos de la congestión para determinar su adecuación al caso del transporte terrestre nacional.

Con un modelo de este tipo se podrá estimar el desempeño del sistema nacional de transporte terrestre de carga en diversos escenarios de planeación, pronosticar porcentajes esperados de reparto modal de flujos de carga entre carretera y ferrocarril, analizar la sensibilidad a cambios en los parámetros de interés para la planeación (peajes, conectividad, precios de combustibles, etc.) y ofrecer estos resultados como apoyo a la generación de políticas de transporte que mejoren el sistema nacional de transporte y reduzcan sus impactos no deseados.

Este trabajo corresponde a la primera fase del desarrollo de un modelo nacional de transporte, en el que se colecta información representativa de la oferta y la demanda del transporte de carga en México entre fuentes confiables, a fin de caracterizar en un sistema de información geográfica las variables de entrada de este modelo.

Para el modelado de la oferta, se construye una primera versión de una red bimodal georreferenciada representativa de los modos carretero y ferroviario, mediante conexiones exclusivas en nodos donde exista transferencia de carga entre los modos para representar el reparto modal de carga.

En el lado de la demanda, se propone un modelo matemático-computacional que pueda representar los flujos de carga en la red bimodal y su comportamiento con base en funciones de volumen-demora para replicar los efectos de congestión y de búsqueda de rutas de costo mínimo en el movimiento carretero. La implementación computacional del modelo se hace con dos tipos de software especializado en transporte: TransCAD y Visum, de amplio uso y reconocida eficiencia en el ámbito de los profesionales de la planeación del transporte.

En la primera versión del modelo nacional se muestran estimaciones de flujos de carga en varios escenarios posibles de interés para la planeación y se identifican tareas futuras para mejorar el desempeño del modelo.

1.1 Antecedentes de modelado en reparto modal

El reparto modal óptimo del transporte terrestre de carga ha interesado por mucho a la planeación del sistema de transporte nacional. El Instituto Mexicano del Transporte abordó el tema en las publicaciones técnicas núm. 413 y 435 (Moreno, E. *et al.*, 2014a, 2014b) correspondientes a las primera y segunda etapas del análisis.

En el primer estudio de reparto modal se comenzó por revisar trabajos previos del IMT en materia de modelado de flujos en la red carretera o ferroviaria. En estos trabajos previos se llevaron a cabo análisis sobre las redes de transporte por separado y se estimaron los flujos de carga movidos a nivel nacional sin considerar explícitamente los puntos de conexión entre carretera y ferrocarril donde se pudiera realizar el intercambio de la carga.

En la primera etapa del estudio de reparto modal, en cambio, se comenzó a ensayar la generación de una red única que representara todos los flujos de carga,

tanto en el modo carretero como en el ferroviario. Esta consideración llevó al planteamiento de construir una red bimodal para tal efecto.

El software usado fue TransCAD, de la empresa estadounidense Caliper Corporation. Este producto es de uso extendido entre los profesionales de la planeación del transporte y tiene una interfaz capaz de vincularse con sistemas de información geográfica (SIG) que le dan buena flexibilidad para manejar rutinas de asignación de tráfico en las redes modeladas. Asimismo, el software permite visualizar en mapas estas redes, así como los resultados de la modelación directamente de las áreas de interés para el modelador. Cuenta además con herramientas de análisis de problemas típicos de transporte, como ruteo, pronóstico de demanda, gestión territorial y análisis espacial.

TransCAD también logra un manejo adecuado de matrices de distancias o tiempos entre orígenes y destinos, así como matrices de flujos O-D requeridas para el modelado de la asignación de flujos vehiculares.

Para representar la demanda, se partió de matrices OD (origen-destino), de movimientos de autotransporte y ferroviarios, y se contemplaron en el modelo consideraciones respecto de los tipos de carga usuales en cada modo, así como de aquellos movidos por carretera, pero que son susceptibles de viajar por ferrocarril, y aquellos que siempre se mueven por autotransporte. Los datos de referencia obtenidos fueron para el año 2010.

Se incluyeron también supuestos operativos como las distancias mínimas aceptables para un traslado por ferrocarril, los puntos de transferencia de carga entre los modos (terminales de transferencia) y el criterio de usar las rutas que minimizan el costo total de los movimientos para ambos modos.

El aspecto de la congestión vehicular en el modo carretero se abordó con el uso de la función de impedancia (función volumen-demora) del *Bureau of Public Roads* norteamericano (BPR function), de uso muy extendido en la práctica de modelos de asignación de tráfico en redes. Esta función se describe como sigue:

$$t(x) = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{C} \right)^\beta \right]$$

donde: t_0 = tiempo de viaje a flujo libre

x = flujo en el arco; C = capacidad; α , β parámetros de calibración.

Para los flujos ferroviarios, ya que las condiciones de operación son distintas a las del modo carretero, se utilizó la llamada asignación “todo o nada”, considerando el tiempo de traslado, pero sin efectos de congestión. La tabla 1.1 resume la caracterización de las variables de entrada al modelo de reparto modal.

Tabla 1.1. Caracterización de variables; primer modelo de asignación (Moreno, E. et al., 2014a).

Variable	Tipo de arco		
	Carretera	Ferrocarril	Conector
Distancia	Calculada de acuerdo con la proyección	Calculada de acuerdo con la proyección	Calculada de acuerdo con la proyección
Tiempo	Calculado con velocidades promedio registradas en las carreteras	Estimado utilizando el 80% de la velocidad máxima	En el modelo de asignación inicial se estimó en 24 horas la transferencia de carretera a F. C. y 12 horas para la transferencia F. C. a carretera
Capacidad	Calculada de acuerdo con las capacidades reportadas en el manual de operación por tipo de carretera y número de carriles	No fue requerida	El número de operaciones reportadas por los centros de transferencia es variable: cajas, vehículos, toneladas, TEUs y unidades ferroviarias; además, no se cuenta con información para todos los centros de transferencia, por lo que se estimó la capacidad de los conectores tomando 1,800 TEU con un promedio de 6 toneladas.
Costo	Estimado con el modelo del Banco Mundial para calcular Costo de Operación Vehicular	Estimado por el tipo de terreno	
Alfa	0.83 (multicarril) ó 0.71 (2 carriles)	0	0.71
Beta	2.7 (multicarril) ó 2.1 (2 carriles)	1	2.1

Los primeros escenarios del modelo de asignación para reparto modal fueron:

- a) Flujos de carga tratando separadamente la red carretera de la ferroviaria considerando tiempo de tránsito o costo medio operativo en las redes.
- b) Flujos de carga carretera y ferroviaria en la red bimodal, impidiendo primero y permitiendo después la transferencia de carga entre modos, considerando tiempo de tránsito o costo medio operativo en las redes.

El análisis de estos escenarios fue una primera validación del modelo de asignación, ya que los resultados obtenidos fueron consistentes con las condiciones de modelación. De este modo, se observó que, con el único criterio de tiempo de traslado en las redes, no se generó transferencia de carga alguna de la carretera al ferrocarril, ya que los tiempos en el primer modo son en general mejores que los del ferrocarril.

Bajo la perspectiva anterior, se hubiera esperado que las cargas que mueve el ferrocarril se transfirieran totalmente a la carretera; sin embargo, en el modelo no ocurre así, ya que éste considera la limitante de la congestión carretera mediante una función BPR de volumen-demora.

Cuando se incluyeron también costos operativos medios, se observó alguna transferencia de la carretera al ferrocarril, un resultado que era de esperarse al agregar este parámetro. La gráfica siguiente muestra la distribución de toneladas en varias estaciones del eje ferroviario México-Nuevo Laredo, en dos escenarios:

- La red ferroviaria exclusivamente.
- La red ferroviaria como parte de la red bimodal.

La figura 1.1 muestra cómo al incluir costos operativos medios se prevé un aumento de carga en el ferrocarril.

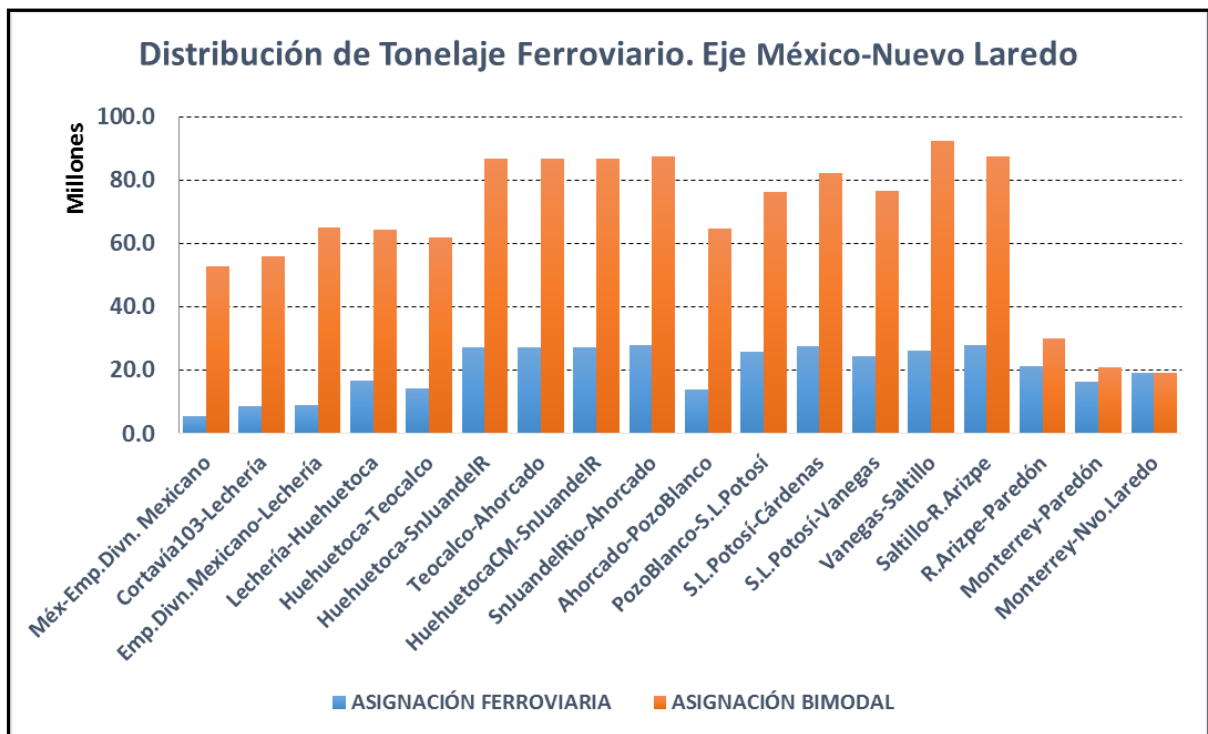


Figura 1.1. Gráfica representativa de la distribución de carga (t) en el eje ferroviario México-Nuevo Laredo (Moreno, E. et al., 2014a).

En el segundo estudio de reparto modal se comenzó con un diagnóstico del desempeño del modelo construido en la primera etapa, que permitió verificar las características de la red bimodal construida, así como probar su conectividad y la capacidad de generar rutas más cortas en TransCAD entre nodos con origen carretero y nodos destino de tipo exclusivamente ferroviario.

Un punto importante revisado en este segundo estudio de reparto modal fue la precisión de los flujos pronosticados por el modelo en comparación con flujos observados en la carretera. La referencia para esta comparación fueron los flujos estimados a través de los Datos Viales (TDPA en tramos de carreteras federales), que publica la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT.

Partiendo del análisis comparativo de los flujos, se realizó un proceso de ajuste de la matriz OD de flujos carreteros, basado en el algoritmo propuesto por Nielsen (1998), logrando una matriz OD ajustada con buena aproximación a los flujos observados, como se aprecia en la figura 1.2.

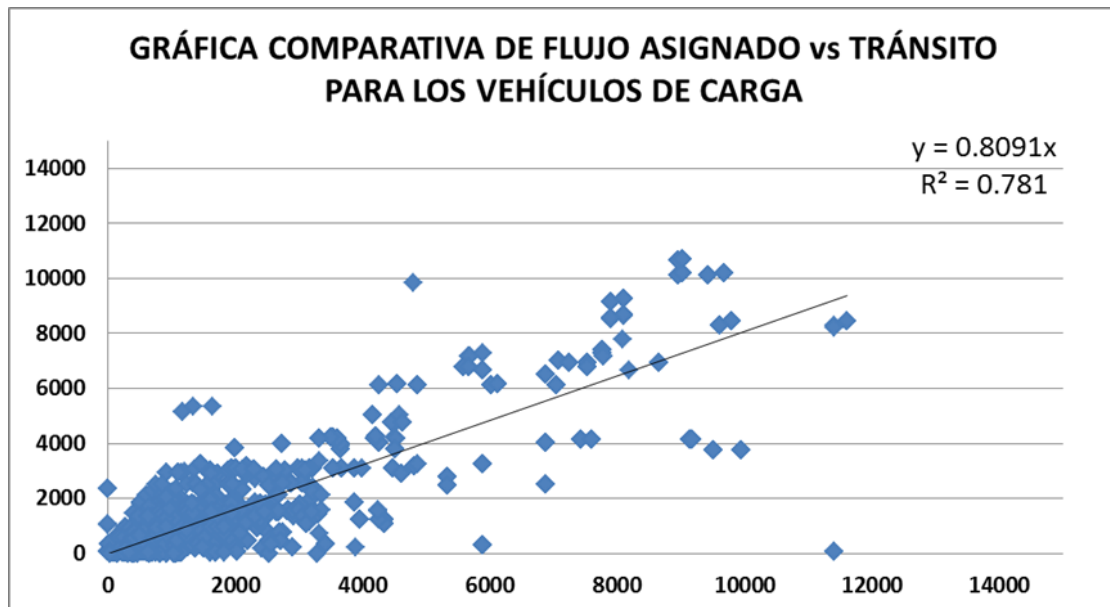


Figura 1.2. Comparación de flujos pronosticados y observados en “Datos Viales” (Moreno, E. et al., 2014a).

Para modelar la congestión carretera, se usaron los siguientes parámetros de la función BPR propuestos para las carreteras mexicanas.

	Autopistas		Libres de peaje	
Coefficiente	100 km/h	80 km/h	100 km/h	80 km/h
α	0.83	0.56	0.83	0.71
β	5.5	3.6	2.7	2.1

Estos parámetros se revisaron desde la primera etapa del modelo de reparto modal, y resultaron de buscar valores asociados a carreteras norteamericanas con alguna similitud razonable con las correspondientes carreteras mexicanas. Para el ferrocarril, con los flujos más controlados y donde los trenes no tienen tanta libertad de elegir rutas como lo hacen los usuarios de la carretera, se aplica el criterio de todo-o-nada.

En las corridas de asignación de flujos en el modelo mejorado, al igual que en la validación del primer modelo, se pudo observar que en el escenario que impide la transferencia de carga entre modos se pronosticó mayor intensidad de volumen vehicular en carretera que en ferrocarril; en cambio, en el escenario que permitió la transferencia de carga, se observó cierta reducción de flujos ferroviarios en algunos tramos de la red ferroviaria. En este último escenario se utilizó solamente el criterio del tiempo de recorrido en las redes, confirmando una validación más del modelo.

En este segundo modelo no se continuó la modelación con costos operativos, pues fue necesario reemplazar la red carretera originalmente usada por la *Red Nacional de Caminos (RNC)*, de uso obligatorio en las áreas de planeación del sector federal (IMT, 2015). Para emplear dicha red, se requiere trabajo adicional para considerar sus pendientes y curvaturas a fin de estimar los costos operativos del autotransporte. Finalmente, en la segunda etapa del estudio de reparto modal también se inició la exploración del software Visum como una alternativa al uso de TransCAD, según se detalla en la sección 1.2 enseguida.

1.2 La migración de TransCAD a Visum

A partir de las experiencias previas del reparto modal de carga carretera-ferrocarril con TransCAD, se comenzó a migrar información hacia el ambiente de Visum.

Visum es un software de análisis y planeación de transporte, capaz de manejar datos de Sistemas de Información Geográfica y diversos modelos de transporte, incluidos los del paradigma clásico de las cuatro etapas. Este software está disponible en el IMT gracias a un convenio de colaboración tecnológica celebrado con la empresa Planung Transport Verkehr AG (PTV), con larga experiencia en el desarrollo de este tipo de productos.

Importación de la red bimodal a Visum

Para la importación de redes de TransCAD a Visum, se consideró usar una versión actualizada de la red carretera, que corresponde a la llamada *Red Nacional de Caminos (RNC)*, una red digitalizada recientemente desarrollada en un trabajo conjunto por el INEGI, la SCT y el IMT.

Esta nueva red es la fuente oficial, única y de uso obligatorio según el Diario Oficial de la Federación del 6 de octubre de 2014; por ello, la RNC se integró al esquema de desarrollo del Modelo Nacional. La RNC es una representación digital georreferenciada de la red oficial de caminos de México, con una estructura de red (nodos y arcos) con capacidad de modelar rutas, conectividad intermodal con aeropuertos, puertos y terminales ferroviarias, etc. Comprende toda la red pavimentada del país, así como vialidades urbanas y rurales que las conectan; vías fluviales de transbordo vehicular; la mayoría de caminos rurales; aduanas; puentes; túneles; servicios de esparcimiento, y otros datos más.

La cobertura es la siguiente:

- 158,000 km de carreteras pavimentadas, incluidos 48,685 km de jurisdicción federal
- 36,139 km de vialidades urbanas
- 118,812 km de caminos no pavimentados

El primer paso en la importación de la red para su manejo en Visum, fue exportar los archivos con formato de TransCAD al formato “shape” (*.shp), lo cual facilita la migración. Las características básicas de este tipo de archivo son las siguientes:

“Un archivo *shape* (*shapefile*) almacena geometría no topológica e información de atributos de los rasgos espaciales en un conjunto de datos. La geometría de un rasgo espacial se almacena como una forma que comprende un conjunto de coordenadas vectoriales. Debido a que los archivos *shape* no requieren del esfuerzo computacional de una estructura de datos topológica, tienen ventajas sobre otras fuentes de datos como son la rapidez para dibujarse y la capacidad para editarse. Los archivos *shape* manejan rasgos espaciales individuales que se superponen o que no son contiguos. Típicamente requieren menos espacio en disco y son más fáciles de leerse o escribirse. Los archivos “shape” admiten rasgos de punto, línea y área. Las áreas se mantienen en un archivo en formato dBASE®. Cada registro de atributo tiene una relación uno-a-uno con el registro asociado del archivo ‘shape’.” (ESRI, 1998).

La figura 1.3 muestra el procedimiento de exportación a formato “shape” de los arcos de la Red Carretera Federal (RCF) basada en la RNC.

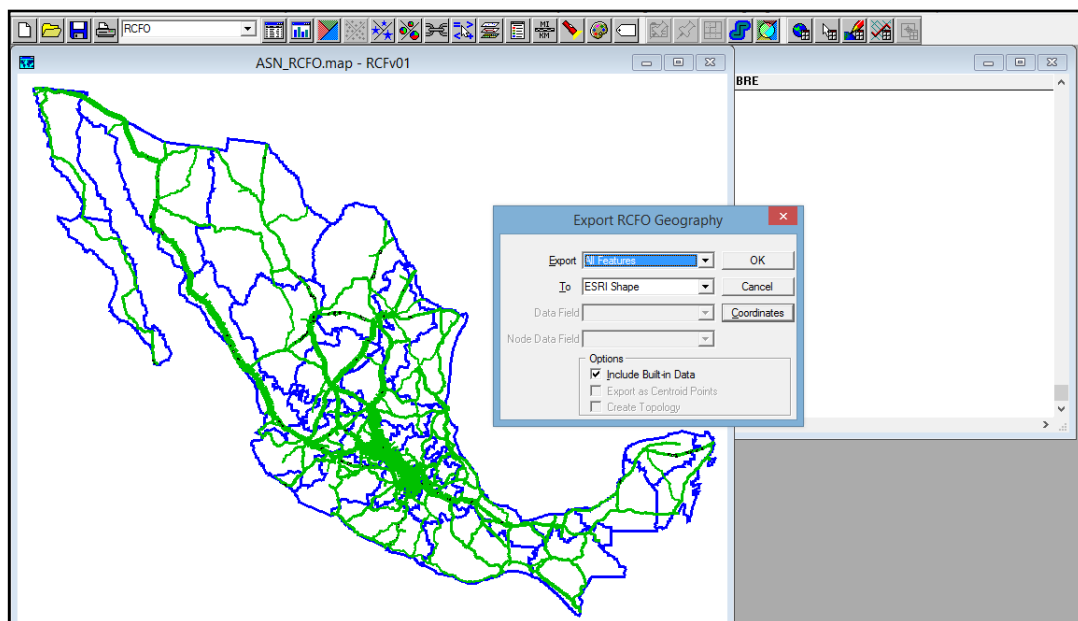


Figura 1.3. Exportación de los arcos de la RCF al formato “shape” en TransCAD.

La figura 1.4 muestra la correspondiente definición del sistema de coordenadas del archivo “shape” de arcos de la RCF. En las figuras 1.5 y 1.6 se muestran los procedimientos de TransCAD para exportar al formato “shape” la información de nodos y el correspondiente sistema de coordenadas.

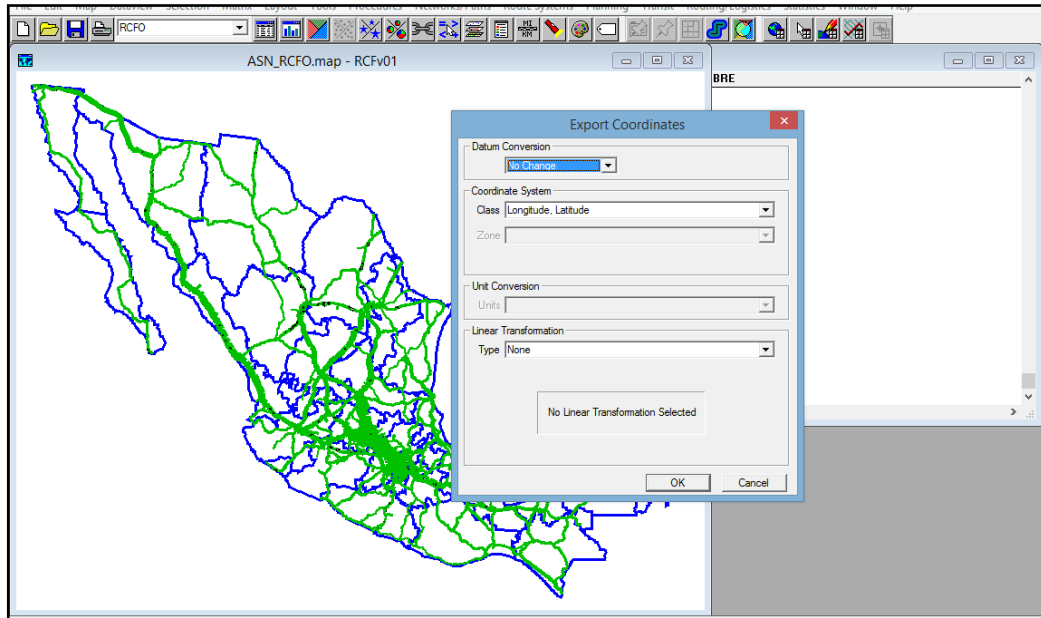


Figura 1.4. Definición del sistema de coordenadas del archivo “shape” de los arcos de la RCF.

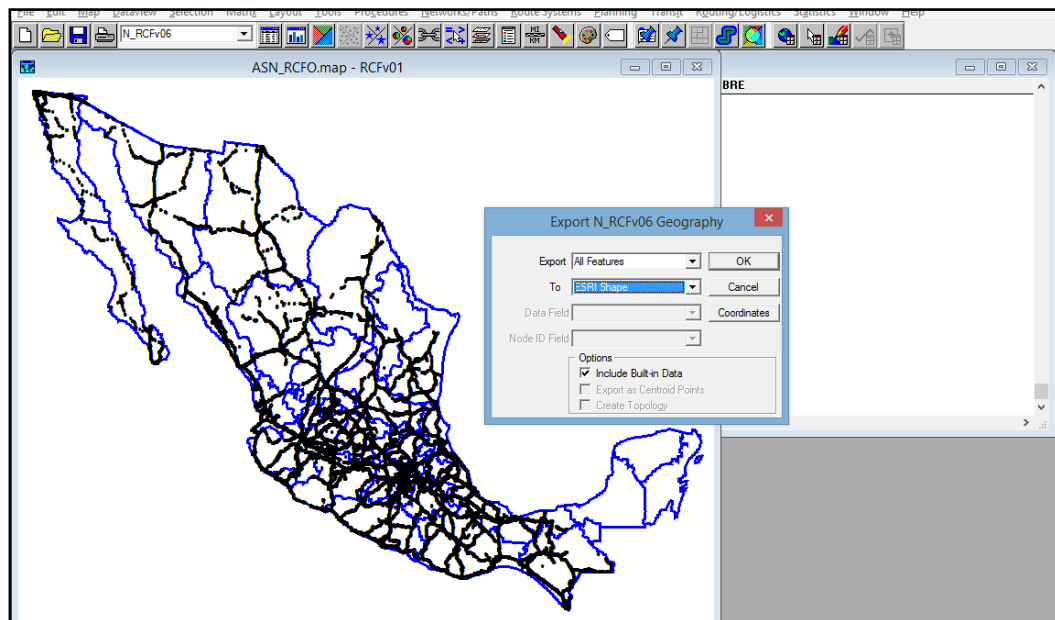


Figura 1.5. Exportación de los nodos de la RCF al formato “shape” en TransCAD.

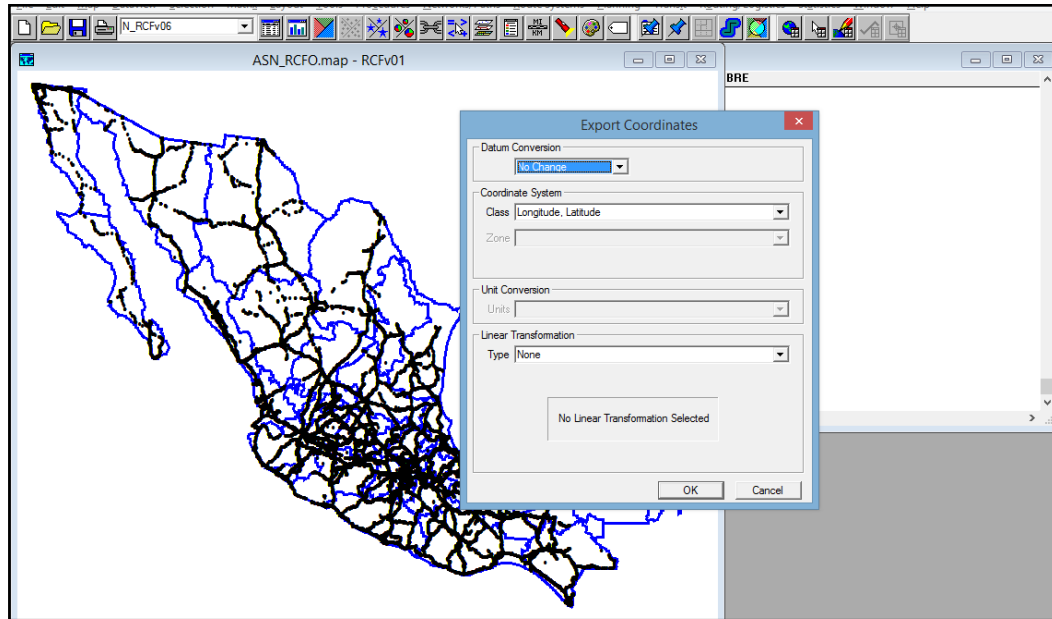


Figura 1.6. Definición de coordenadas del archivo “shape” de los nodos de la RCF.

El segundo paso en la migración a Visum fue importar la información de la red en formato *shape* desde TransCAD al formato “*.ver” (*version file*) de Visum. Los archivos *ver* en Visum son los más relevantes y los más usados para guardar proyectos. Contienen la red y otros datos más, que en general son (PTV, 2014):

- Datos de la red
- Datos de demanda y matrices
- Atributos definidos por el usuario, valores agregados, etc.
- Parámetros gráficos con volúmenes de flujo, volúmenes en vueltas, isócronas, referencias a escenarios activos y otros
- Estado activo o inactivo de objetos en la red –de modo que se puedan filtrar conjuntos de datos y selecciones espaciales
- Parámetros de procedimientos
- Resultados de asignaciones (p. ej., conexiones) y cualquier otro resultado calculado (p. ej., la calidad de los criterios de convergencia de tráfico de vehículos privados en una asignación)

Como Visum requiere especificar un sistema de coordenadas se usó el sistema de coordenadas geográficas para representar los datos. La figura 1.7 muestra el proceso de importación de la RNC en formato “shape” al ambiente Visum.

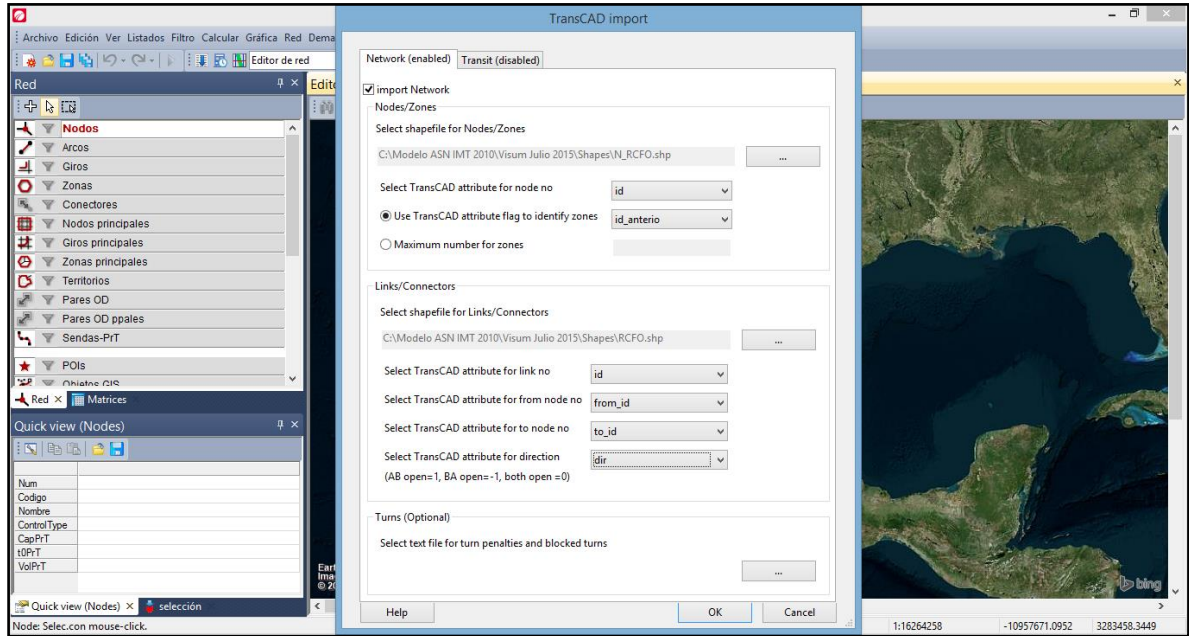


Figura 1.7. Importación de la red del formato “shape” al formato de Visum.

Con la Red Carretera Federal ya en Visum, se anexaron los centroides del modelo previo, para completar las conexiones con ciudades y localidades de interés. Se agregaron 564 centroides con conectores hacia elementos de la RNC. La figura 1.8 muestra un centroide conectado cerca de la ciudad de Aguascalientes.

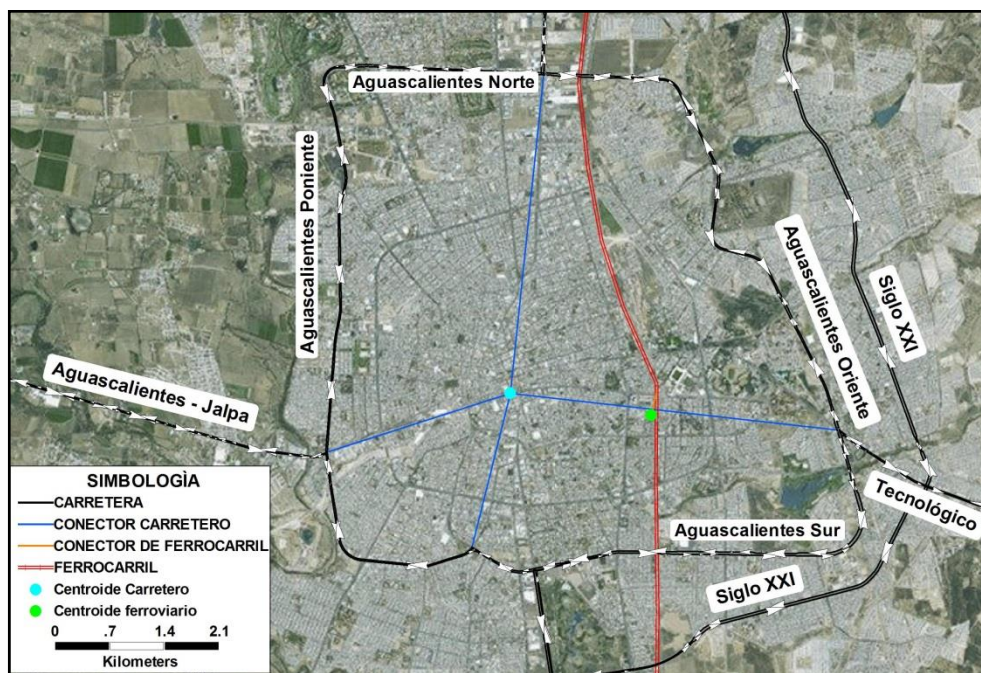


Figura 1.8. Centroide conectado a la RCF en Aguascalientes (detalle).

La Red Carretera Federal en ambiente Visum se ve en las figuras 1.9 y 1.10.

En la primera se aprecia una vista general de la red a escala nacional, y en la segunda se pueden ver detalles de la red en los alrededores de la Ciudad de México.

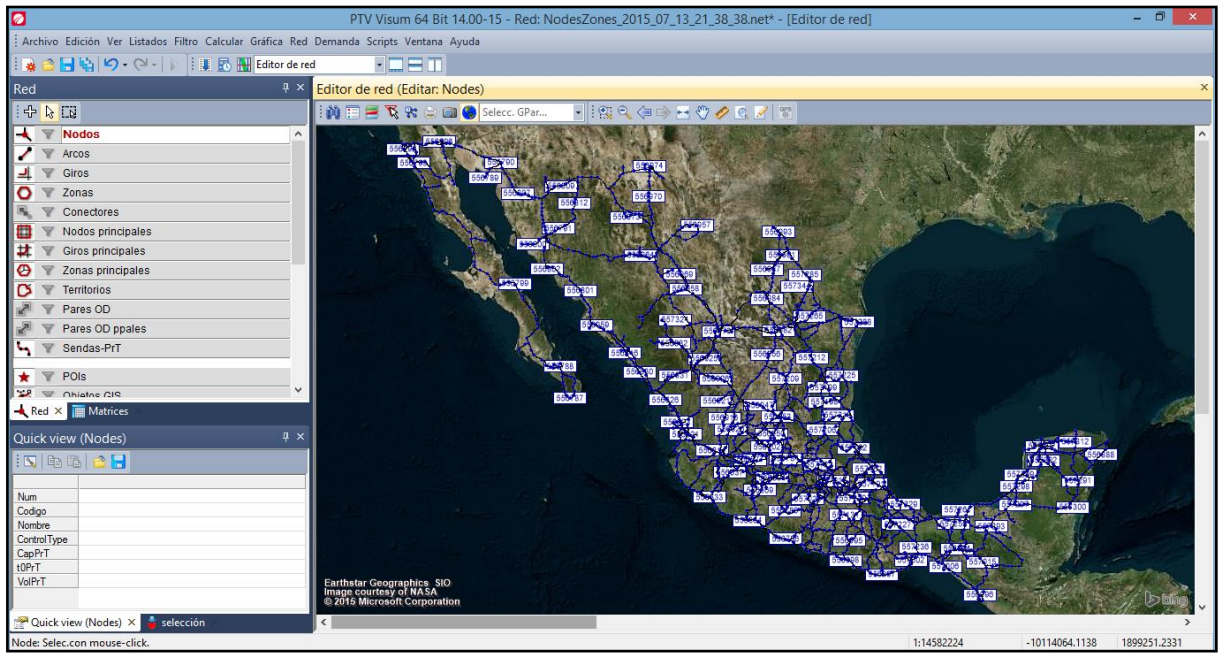


Figura 1.9. RCF importada al formato de Visum (elaboración propia).

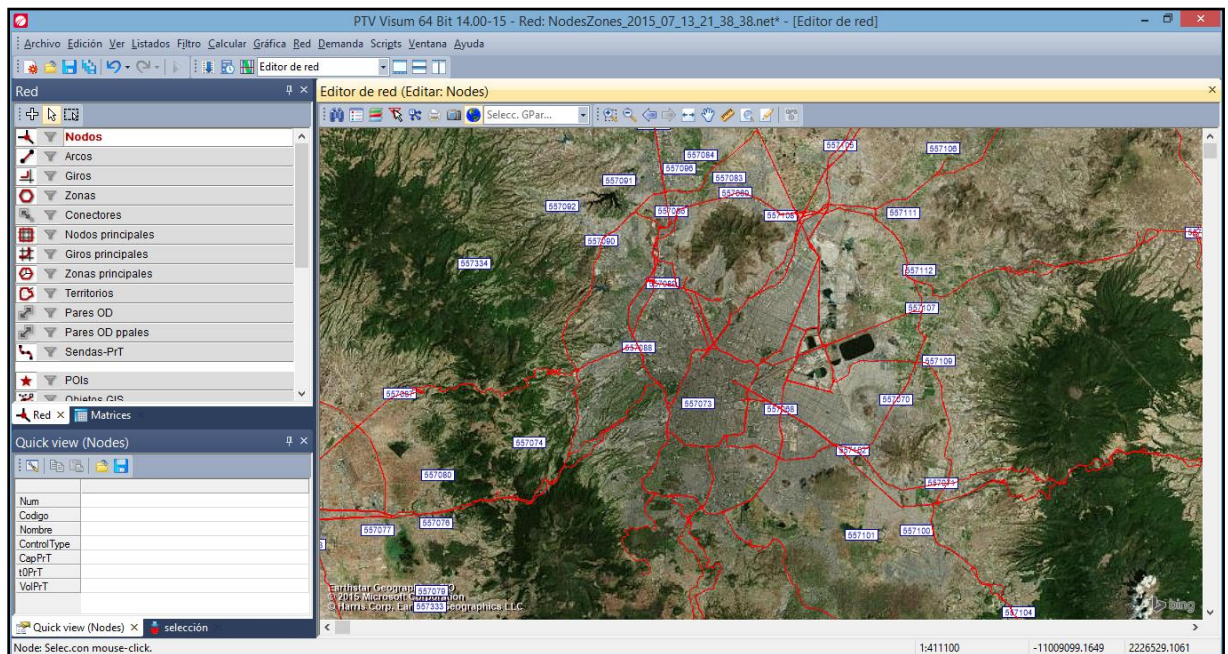


Figura 1.10. Detalle de la RCF en la Ciudad de México.

Revisión de la red con Visum

Una vez completado el proceso de migración de la RNC al ambiente Visum, con la información de centroides incluida, se aplicaron las herramientas disponibles en este software para la verificación de la congruencia de la red construida.

Visum ofrece en su menú *Calcular/Controlar Red* una lista de opciones a verificar en la red de interés como:

- Nodos aislados; giros y giros principales incongruentes
- Verificación de *consistencia de red* entre zonas y conectores
- Arcos sin sucesores
- Arcos con tiempos de viaje cero
- *Acoplamientos inconsistentes*, etc.

La figura 1.11 muestra el cuadro de diálogo del menú de verificación de la red.

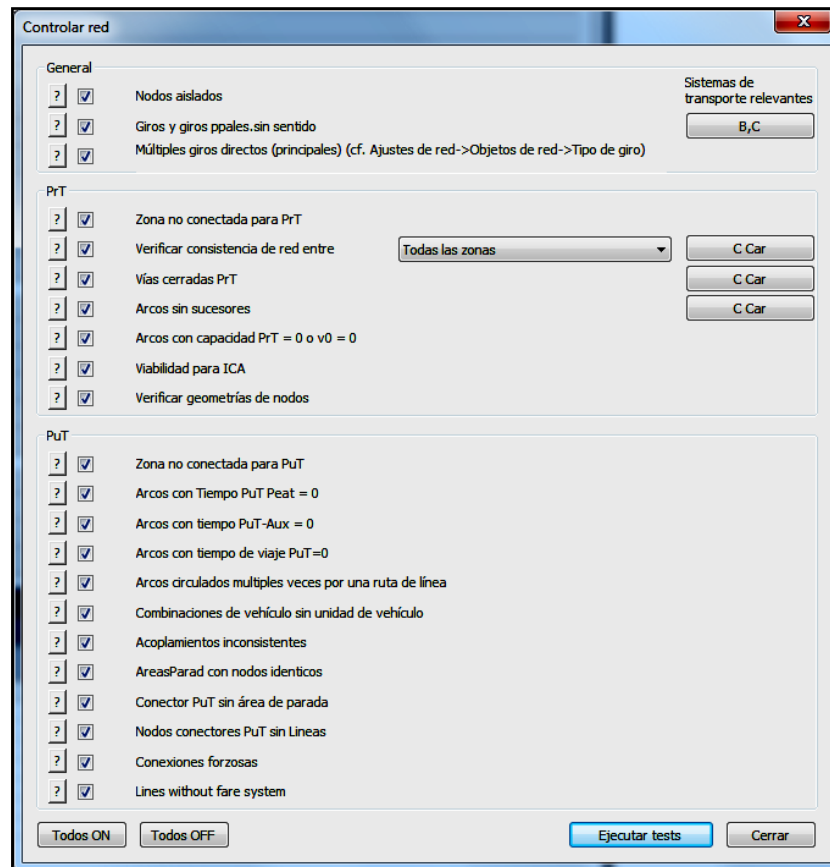


Figura 1.11. Menú para la verificación de la red en el software Visum.

En la figura 1.12 se muestra el resultado de la verificación, donde las opciones que resultaron debidamente verificadas aparecen marcadas con “ok”. Este proceso se aplicó en toda la red bimodal, de modo que se verificaron tanto la red carretera como la ferroviaria.

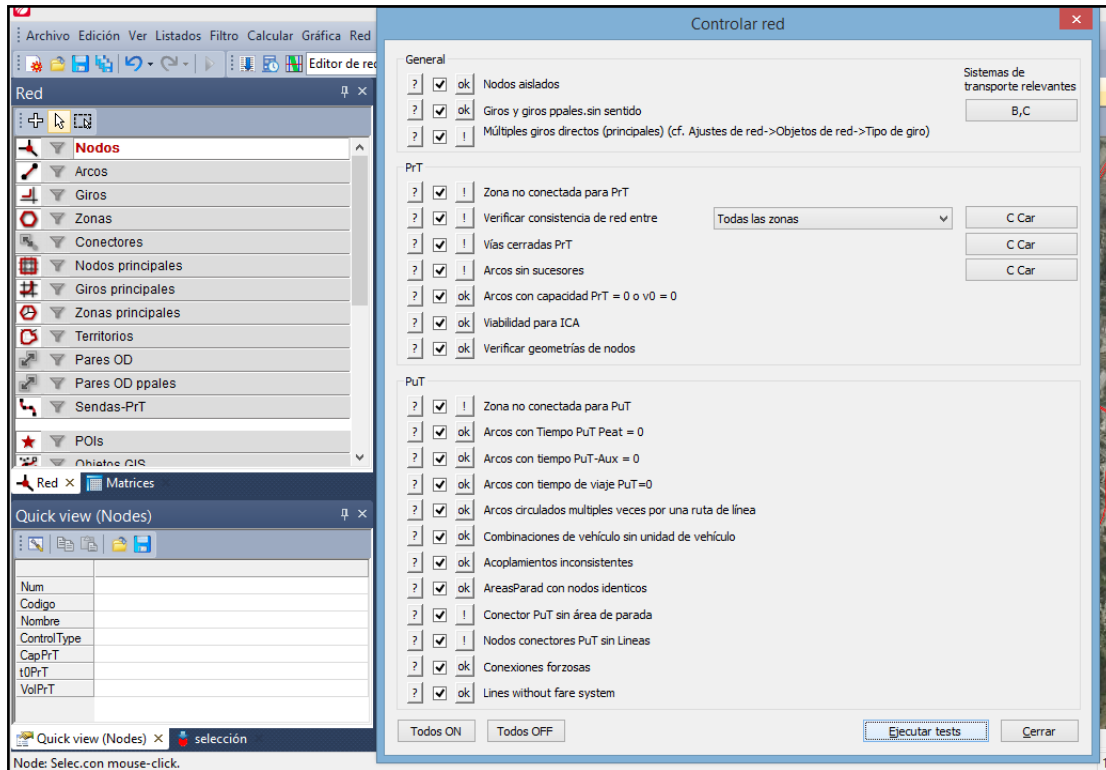


Figura 1.12 Resultado de la verificación de la red en Visum.

Con esta incorporación de la RNC para representar la infraestructura carretera y luego de importar la red ferroviaria con el mismo procedimiento y verificar toda la red bimodal, se continuó con los siguientes pasos de la modelación ya en ambiente Visum, descritos en los capítulos a continuación.

2.La demanda del transporte terrestre de carga

La demanda del transporte terrestre de carga en el Modelo Nacional se determina con matrices origen-destino (matrices OD) de movimientos de carga por carretera y por ferrocarril. La información origen-destino de que se dispone para el Modelo Nacional conceptualmente se considera del tipo de preferencia revelada, ya que es la que se observa bajo las circunstancias actuales de las redes carretera y ferroviaria.

Para el caso del transporte carretero, se partió de una matriz inicial con información origen-destino del año 2010; ésta se ajustó con base en datos viales recientes publicados por la SCT.

Para el caso ferroviario se obtuvo información de movimientos ferroviarios de la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal (DGTFM) de la SCT. Esta última información, en particular, se pudo obtener con el debido tratamiento de confidencialidad que maneja la DGTFM para los concesionarios ferroviarios que colaboran con esta Dirección General.

2.1 Matrices OD del transporte de carga

Las matrices OD que utiliza el Modelo Nacional contienen la información de los movimientos de carga entre los pares origen-destino que se incluyen en la estructura de cada una de las matrices, una para el autotransporte y otra para los movimientos por ferrocarril.

En el caso del transporte por carretera, la matriz OD se manejó en una primera versión con datos de 2010 y se utilizó en estudios de reparto modal óptimo del transporte de carga terrestre. Para su uso en el Modelo Nacional, fue necesario ajustar esta matriz para tener una mejor representación del escenario nacional de transporte terrestre en el año 2014. El procedimiento de ajuste se comenta en la siguiente sección.

En el caso ferroviario, la matriz OD usada se obtuvo a partir de información reciente a través de la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal (DGTFM) de la SCT, gracias a un convenio de colaboración con las empresas ferroviarias. La matriz usada en el Modelo Nacional corresponde a movimientos ferroviarios del año 2013. Con la matriz OD ferroviaria, dado que la información que se recibe es el total anual de movimientos registrados por las empresas ferroviarias, no es necesario hacer ajustes como sucede con los movimientos carreteros.

Con estas matrices OD de los dos modos de transporte, se tiene la base para modelar los flujos de transporte entre orígenes y destinos en la red bimodal que representa el sistema de transporte terrestre de carga, con nodos de intercambio de carga (terminales intermodales) para representar la transferencia de carga entre ambos modos.

Ya con la representación completa del sistema de transporte terrestre de carga en la red bimodal y las dos matrices OD mencionadas, un primer resultado de la modelación que se obtiene fácilmente es la identificación de los principales pares O-D tanto por modo de transporte como agregado, así como las correspondientes líneas de deseo, dos elementos básicos para caracterizar el escenario de la carga terrestre en México.

En la figura 2.1, se ilustra un mapa con líneas de deseo de los movimientos de camiones articulados del tipo T3-S2, donde el grosor de las líneas indican el nivel del flujo correspondiente en vehículos diarios en los pares OD graficados. Resalta el movimiento vehicular del centro del país (Distrito Federal, Querétaro) hacia la frontera norte en Nuevo Laredo y puntos cercanos.

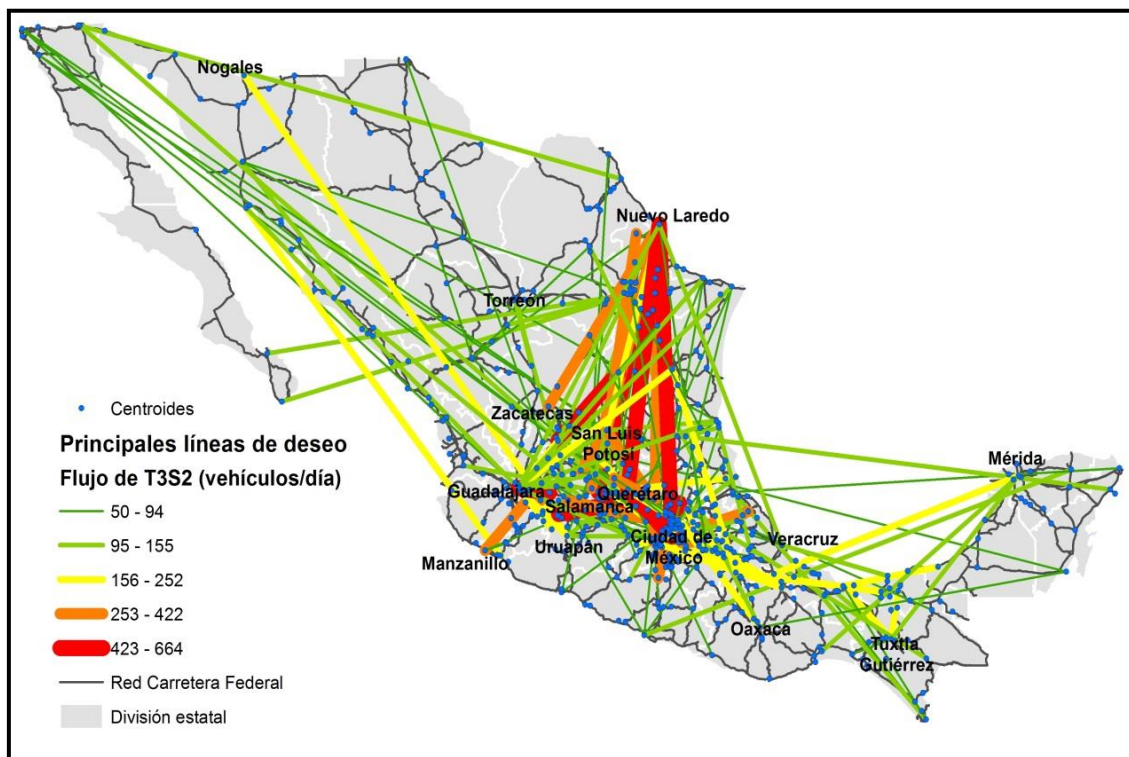


Figura 2.1. Líneas de deseo para flujos de camiones articulados T3S2. Estimaciones para 2014 (fuente: elaboración propia).

2.2 Ajuste de la matriz de carga carretera

La matriz OD de flujos carreteros tiene información de movimientos vehiculares entre cada par de origen y destino que registra. La matriz en principio debe ser consistente con los conteos vehiculares que se realizan en forma regular en la red carretera, de modo que la asignación de flujos que resulte al utilizar la red esté razonablemente cercana a los flujos deducidos de los conteos vehiculares.

En este trabajo, la matriz OD de transporte carretero se obtuvo inicialmente con datos de 2010, originados las encuestas origen-destino elaboradas anualmente por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT.

En el formato original del proyecto de reparto modal óptimo que realizó el IMT en 2014 (Moreno, E. *et al.*, 2014a), la información OD representó toneladas movidos; éstos se convirtieron a flujos vehiculares, representados por las cinco principales clases detectadas en las encuestas origen-destino de donde se generó esta matriz: camiones unitarios de dos y tres ejes C2 y C3, así como las clases articuladas T3S2, T3S3 y T3S2R4.

Con el objetivo de hacer compatible la matriz OD carretera con la matriz OD ferroviaria, un aspecto a destacar fue la clasificación del tipo de producto movido, para estudiar las asignaciones de flujo por tipo de carga de manera global en la red bimodal. Aun cuando la información carretera muestra una clasificación de productos más amplia que la de la información ferroviaria, fue posible homologar la clasificación de la primera para hacerla compatible con la de movimientos ferroviarios. La clasificación usada en la modelación de ambos modos es la siguiente (Moreno, E. *et al.*, 2014a):

1. Productos industriales
2. Hierro, acero y sus derivados
3. Productos químicos
4. Graneles agrícolas
5. Graneles líquidos
6. Graneles minerales
7. Productos forestales
8. Equipo ferroviario
9. Productos petrolíferos
10. Contenedores
11. Vehículos nuevos y autopartes
12. Otros

La matriz OD de carga transportada por modo carretero presenta la información en toneladas transportadas entre cada par origen-destino. La carga se encuentra clasificada por tipo de producto, de acuerdo con el Sistema Armonizado arancelario.

La matriz ferroviaria, por otra parte, tiene una clasificación mucho más generalizada —que es la que utilizan las empresas ferroviarias—, lo que hace conveniente homologar la clasificación de ambos modos con aquella utilizada en el ferrocarril (Moreno E. *et al.*, 2014a). Las matrices presentan las toneladas movidas entre los distintos pares O-D.

Los flujos de carga resultantes se pueden traducir en vehículos necesarios para transportarla. La cantidad de vehículos resultantes se obtiene de dividir las toneladas que pasan por un arco en particular entre la carga media de un determinado vehículo, ya sea en autotransporte o en ferrocarril.

Para el caso del autotransporte, se puede considerar la proporción de los distintos tipos de vehículo de carga que pasan por cada arco. Tal proporción corresponde a una estimación a partir de los datos viales publicados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Esto consiste en dividir la carga de cada arco entre la proporción de cada tipo vehicular y, posteriormente, dividir la carga de cada tipo vehicular entre la carga media transportada por dicho tipo de vehículo.

Una vez homologada la estructura de la matriz OD carretera con la del modo ferroviario, se procedió a realizar un ajuste de esta matriz “semilla”, con la finalidad de que los flujos pronosticados por el modelo de asignación con base en dicha matriz resultaran consistentes con la información disponible de datos viales que publica la SCT.

El proceso de ajuste de la matriz utiliza el método de Nielsen que permite el manejo de aforos de tráfico con posibles inconsistencias o incertidumbre (Nielsen, O., 1998) para reducir las diferencias entre los flujos generados en un modelo de asignación y los aforos observados. El método ha mostrado tener buen desempeño en la práctica, y en la literatura se encuentran diversos reportes de usuarios que lo confirman (Caliper, 2013).

En el método de Nielsen, los conteos vehiculares se consideran variables aleatorias que son medidas con cierto error, de modo que puedan modelarse posibles inconsistencias en las ecuaciones de conservación de flujo en la red. Este enfoque resulta más conveniente que suponer que los conteos vehiculares son cantidades determinísticas, ya que bajo esta hipótesis la literatura reporta la obtención de resultados inestables o con valores no realistas de los flujos.

En este método se parte del hecho común de que los aforos en una red están disponibles solamente para una parte del conjunto total de arcos de la misma, lo que obliga a buscar representaciones razonables de los flujos en arcos donde no se tienen esos aforos.

El método de Nielsen está implementado en el software TransCAD como procedimiento de ajuste de matrices OD y ha reportado buenos resultados con cualquier método de asignación, tanto equilibrio del usuario como la versión estocástica del mismo. Para lograr un buen ajuste, el método requiere tener un número razonable de aforos; en caso contrario, se puede intentar modelar con los resultados de ejercicios de asignación de tráfico de otros tramos de la red.

El algoritmo utilizado es un proceso iterativo que alterna entre la etapa de asignación de flujos y la etapa de estimación de la matriz OD. Se inicia con una estimación inicial de la matriz OD (llamada *matriz semilla*), la cual puede ser una matriz derivada de mediciones obtenidas a través de alguna encuesta previa o generada de modo sintético de algún modelo de distribución de viajes.

Para un manejo adecuado del algoritmo de Nielsen, el modelado de la red debe suponer que no hay viajes que inicien y terminen en un mismo nodo (movimientos locales), ya que en una red carretera la intención es modelar los flujos interurbanos, de modo que los elementos de la matriz OD en la diagonal deben ser todos cero, o al menos casi todos; de hecho, el algoritmo ignora la información de la diagonal de la matriz, para reflejar el manejo de la hipótesis mencionada.

Las matrices OD utilizadas en el presente trabajo, tanto para el modo carretero como para el ferroviario, ambas tienen diagonales con elementos cero, ya que no se representan los movimientos locales.

Otro aspecto importante en el ajuste de la matriz OD es que los conteos vehiculares de que se dispongan deben ser direccionales, es decir, indicar en qué sentido ocurre cada conteo, ya que en la práctica es claro que los flujos de ida y regreso en un mismo tramo pueden ser bastante distintos. Los valores de tránsito diario promedio anual (TDPA) representan también un recurso muy usado. En el caso de tener tramos de la red con valores TDPA únicos que no indiquen el valor para cada dirección (ida y regreso), una práctica común es utilizar la mitad del valor TDPA global del tramo para cada dirección (Caliper, 2013).

Para estimar la matriz OD carretera para el año 2014, se utilizó como matriz semilla la matriz OD generada en 2010 aplicando el método de Nielsen con los conteos del TDPA de 2014 para la estimación.

La figura 2.2 muestra un ejemplo de los datos de entrada en TransCAD para estimar la matriz OD para el caso de los conteos del TDPA en un vehículo tipo C2.

The image shows a software dialog box titled "OD Matrix Estimation". It contains several input fields and buttons. The "Line Layer" is set to "RCFO_IMT". The "Network File" is "C:\... NOV15 TRANSCAD\RED_2015.NET". The "Method" is "User Equilibrium". The "Matrix File" is "Matriz OD 2015". The "Matrix" is "C2". The "Fields" section includes "Time" (TIEMPO), "Alpha" (ALFA), "Capacity" (CAPACIDAD), "Beta" (BETA), "Count" (C2_2015), and "Preload" (None). The "Globals" section includes "Iterations" (20), "Convergence" (0.0100), "Function" (empty), "Alpha" (0.15), "Beta" (4.00), and "Error" (5.0000). The "O-D Matrix Estimation Settings" section includes "Iterations" (10) and "Convergence" (0.1000). Buttons for "OK", "Cancel", "Network", "Options", and "Settings" are on the right side.

Figura 2.2. Parámetros de entrada para la estimación de la matriz OD 2014 (fuente: elaboración propia).

Se efectuaron estimaciones de la matriz OD para movimientos carreteros para los distintos tipos vehiculares registrados en los datos del TDPA. El proceso de ajuste de la matriz OD termina cuando se obtiene una asignación de flujos en la cual las diferencias entre flujos pronosticados y flujos observados con base en los aforos son razonablemente pequeñas.

Una forma simple de comparar los resultados es graficar los valores de los flujos observados contra los flujos pronosticados por el modelo de asignación. Teóricamente, un buen pronóstico de flujos debe tener una relación lineal de la forma $Y = X$, que en el plano representa una línea recta con pendiente al origen cero y pendiente uno.

La figura 2.3 enseguida muestra esta representación gráfica para el ajuste de la matriz en el caso de vehículos C2, donde la recta del ajuste tiene una pendiente de 0.9497 y el coeficiente de determinación R^2 con un valor de 0.6808 indica un ajuste lineal razonable.

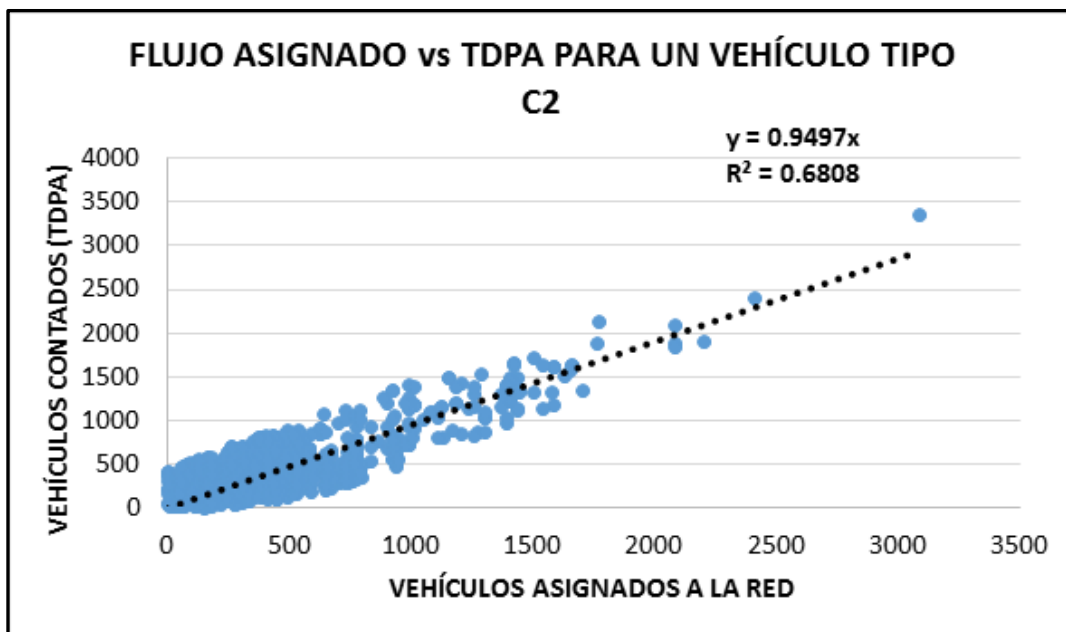


Figura 2.3. Flujo asignado vs TDPA 2014: camiones tipo C2 (fuente: elaboración propia).

Los ajustes para los otros tipos vehiculares y para el total de los movimientos también fueron comparados, obteniéndose en todos los casos ajustes razonables para la modelación en la red bimodal. Algunos de los resultados se detallan en el capítulo 5 al final del presente documento.

3.Oferta del transporte de carga: la red bimodal carretera-ferrocarril

La oferta del transporte terrestre de carga se representa por la infraestructura de las redes carretera y ferroviaria que permiten los movimientos de cada uno de los modos.

Esta infraestructura está representada por una red bimodal, con una parte correspondiente a la red ferroviaria y otra a la red carretera. La conexión entre ambas redes tiene lugar en los nodos que representan estaciones intermodales, donde se transfiere carga del autotransporte al ferrocarril y viceversa.

En este capítulo se describen los detalles de la conformación de esta red bimodal, y de su implementación en el software de planeación del transporte utilizado en la modelación de asignaciones de flujos vehiculares (TransCAD y Visum).

3.1 Características de las redes carretera y ferroviaria

En las etapas previas de modelación para llegar a la red bimodal del proyecto se utilizó una versión de la red carretera con 8,612 nodos; 9,218 arcos y 564 centroides (en referencia a las ciudades y localidades principales del país).

En esta red se representaron 56,363 km de carreteras, de los cuales 44,400 son de administración federal, 8,616 corresponden a gobiernos estatales y 2,496 son de jurisdicción nivel municipal (Moreno, E., *et al.*, 2014).

En el proceso de migración del software TransCAD hacia el software Visum, se comenzó a utilizar la Red Nacional de Caminos, comentada en la sección 1.2 de este documento.

“La RNC es una red vial modelada a gran detalle y estructurada de acuerdo con la norma *ISO 14825:2011 Intelligent Transport Systems -- Geographic Data Files -- GDF5.0*, para determinar rutas en sistemas de información geográfica, orientado al análisis de redes de transporte. Además de integrar los diversos elementos que conforman las vías de comunicación (carreteras, terracerías, brechas, principales vialidades en las áreas urbanas) que permiten el tránsito de vehículos automotores, esta red incorpora infraestructura asociada (túneles, puentes, plazas de cobro, marcas de kilometraje), así como medios o instalaciones de transporte transbordadores, aeropuertos, puertos, estaciones de ferrocarril y destinos diversos, entro otros, sitios de interés para el turismo.

Asimismo, se estructuró con topología de redes geométricas para atender métodos de ruteo y tiene como fin apoyar la localización de destinos y facilitar el conocimiento de las vías de comunicación a través de la red vial, además de incorporar diversos elementos que son importantes en la planeación de viajes como son la estaciones de abastecimiento de combustible.” (INEGI, 2015).

El estándar ISO 14825:2011 especifica el modelo conceptual y lógico para los datos así como los formatos físicos de codificación para bases de datos geográficas usadas en aplicaciones y servicios fundamentados en Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, por sus siglas en inglés). Incluye una especificación de contenidos potenciales para estas bases de datos (diccionario de datos para Características, Atributos y Relaciones), una especificación de cómo estos contenidos se presentarán y de cómo la información relevante sobre la base de datos en sí puede ser especificada (metadatos).

El enfoque del estándar ISO 14825:2011 es hacia aplicaciones y servicios basados en ITS, y enfatiza la información relativa a los caminos. Las aplicaciones y servicios basados en ITS, sin embargo, requieren información adicional a aquella relacionada con los caminos. Las aplicaciones y servicios con base en ITS que típicamente considera el estándar ISO 14825:2011 son las usadas en sistemas de navegación en los vehículos o en dispositivos móviles, centros de administración de tráfico, o servicios asociados a sistemas de administración de carreteras y vialidades, incluidos los sistemas de transporte público (ISO, 2015).

En su versión original completa, la RNC importada al software TransCAD mostró una estructura de 550,076 nodos y 619,680 arcos; esta estructura no se pudo manejar en el software Visum, ya que la licencia en uso en el IMT permite a lo más redes con 375,000 arcos. Para tener un manejo adecuado de la RNC con el propósito de modelar flujos de carga interurbanos, se hicieron ajustes de modo que se consideraran solamente los arcos utilizados efectivamente por el autotransporte de carga, es decir, la totalidad de la red federal y gran parte de la red pavimentada, evitando los caminos estatales y municipales con especificaciones menores.

La red ferroviaria es una red georeferenciada obtenida de información oficial del INEGI (Mapa Digital de México) en formato Shape. Esta red se cambió a una proyección CCL, siguiendo las mismas especificaciones de la red carretera, para asegurar el ajuste entre las dos capas. La red ferroviaria contiene 3,430 arcos, 3,357 nodos y 1404 centroides. Su longitud total cubre 21,066.27 kilómetros y dispone de los atributos: distancia, velocidad máxima de operación y tiempo de viaje (en minutos).

La figura 3.1 muestra el mapa con las redes carretera y ferroviaria desplegado con TransCAD. En la figura 3.2 se muestra la misma información ya en el ambiente del software Visum.

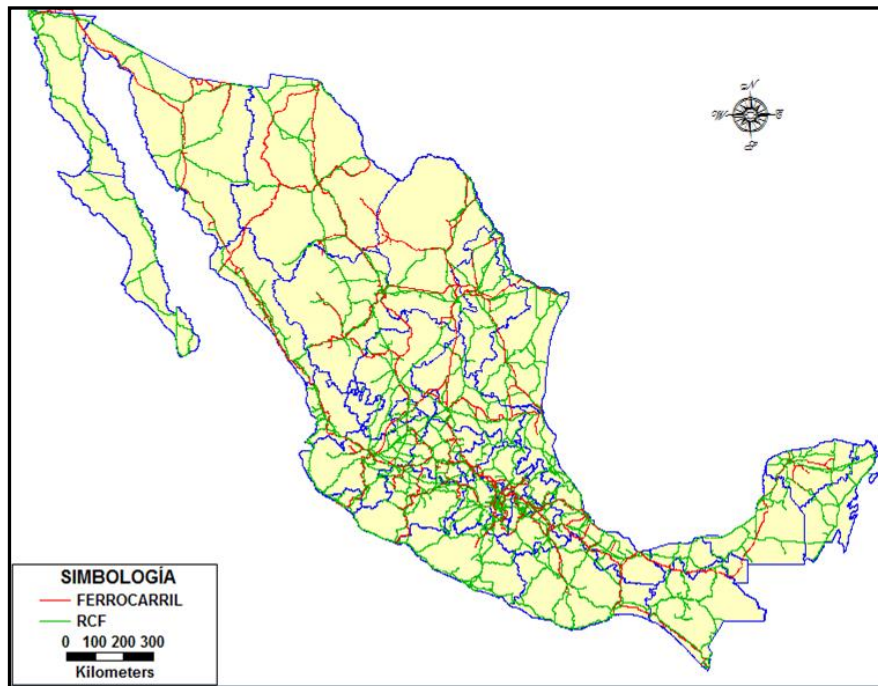


Figura 3.1. Redes carretera y ferroviaria representadas con TransCAD (fuente: elaboración propia).

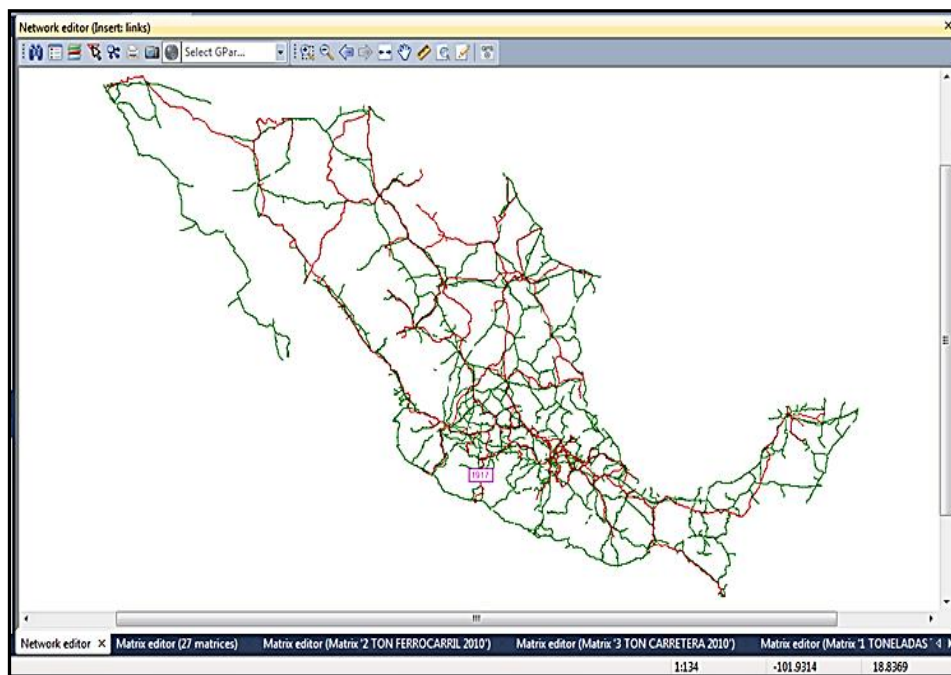


Figura 3.2. Redes carretera y ferroviaria migradas a ambiente Visum (fuente: elaboración propia).

3.2 Integración de la red bimodal

Ya con los ajustes descritos incorporados a las estructuras de las redes carretera y ferroviaria con el propósito de lograr una congruencia en sus representaciones, se integró una sola red bimodal con estas dos redes agregando los nodos de transferencia en los cuales es posible mover carga desde el modo carretero al ferroviario y viceversa.

Estos nodos se identificaron principalmente con estaciones de transferencia intermodal y con estaciones ferroviarias donde ocurren este tipo de cambios de modo aun cuando no sean terminales intermodales diseñadas con ese fin particular.

La red bimodal resultante se muestra en la figura 3.3.

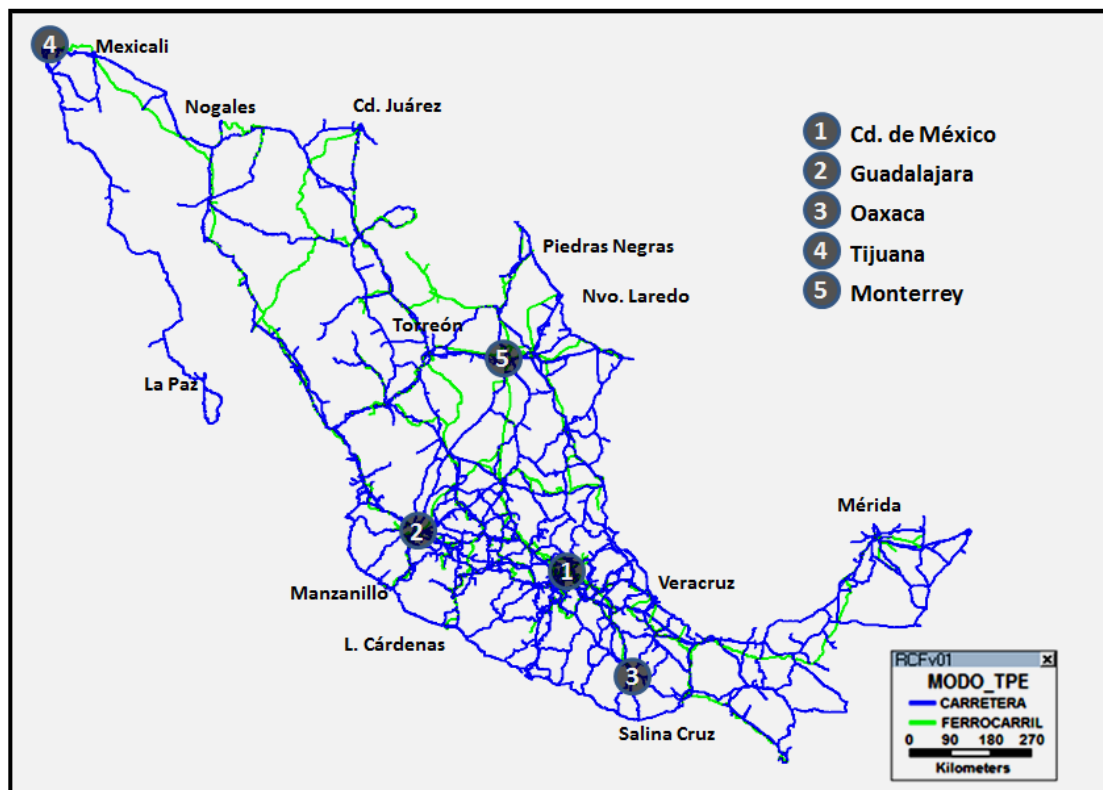


Figura 3.3. Red bimodal carretera-ferrocarril (*fuentes: elaboración propia*).

Los puntos de transferencia intermodal considerados en el modelado se enlistan en la tabla 3.1, y en la figura 3.4. se muestra un mapa de ubicaciones de estas terminales.

Tabla 3.1. Terminales intermodales de transferencia de carga entre el autotransporte y el ferrocarril (fuente: elaboración propia con datos de la SCT-UNAM/2012).

No	Nombre de la terminal	No	Nombre de la terminal
1	Terminal Intermodal Mexicali	23	Terminal de Carga de Irapuato
2	Terminal Intermodal Hermosillo	24	Sylo, S.A. de C.V., Querétaro
3	Terminal de Cross dock Hermosillo	25	Terminal de Cross dock Viborillas
4	Terminal de Cross dock Ciudad Obregón	26	Terminal Intermodal Puerta México
5	Terminal Intermodal Chihuahua	27	Terminal Intermodal Maclovio Herrera
6	Terminal Intermodal Torreón	28	Terminal Intermodal Tacuba
7	Ferrogranos México, S.A. de C.V	29	Terminal Intermodal de Pantaco
8	Servicios Integrales y Especializados de Coahuila, SAPI de C.V.	30	Terminal Intermodal Plasgranel
9	Terminal Multimodal de Altamira	31	Terminal de Trasvase Cuautitlán
10	T.I Interpuerto San Luis de Potosí	32	Terminal Automotriz Toluca
11	Bulkmatic de México, S de R.L. de C.V., San Luis de Potosí	33	Distribución y Servicios Logísticos, S.A. de C.V.
12	Siderúrgica de San Luis S.A. de C.V.	34	Bulkmatic de México, S de R.L. de C.V., Atitalaquia
13	Tracomex, S.A. de C.V.	35	Terminal Intermodal Puebla
14	Jalmex Empresarial, S.A. de C.V.	36	Almacenes y Maniobras Integrales del Golfo, S.A. de C.V.
15	Silos Tysa, S.A. de C.V., Guadalajara (SOL)	37	Intl. De Contenedores Asociados de Veracruz (ICAVE)
16	Silos Tysa, S.A. de C.V., Guadalajara (LIQ)	38	Terminal Intermodal Veracruz
17	Bulkmatic de México, S de R.L. de C.V, Guadalajara	39	Terminal Intermodal Coatzacoalcos
18	Terminal de Combustible Lázaro Cárdenas	40	Terminal de Cross dock Ciudad Juárez
19	Debruce Grain de México S.A. de C.V.	41	Terminal Intermodal Monterrey
20	Terminal de Trasvase San Francisco del Rincón	42	Ferrotolvas, S.A. de C.V.
21	Terminal de Cross dock León	43	Terminal Intermodal Manzanillo
22	Terminal Intermodal Silao		

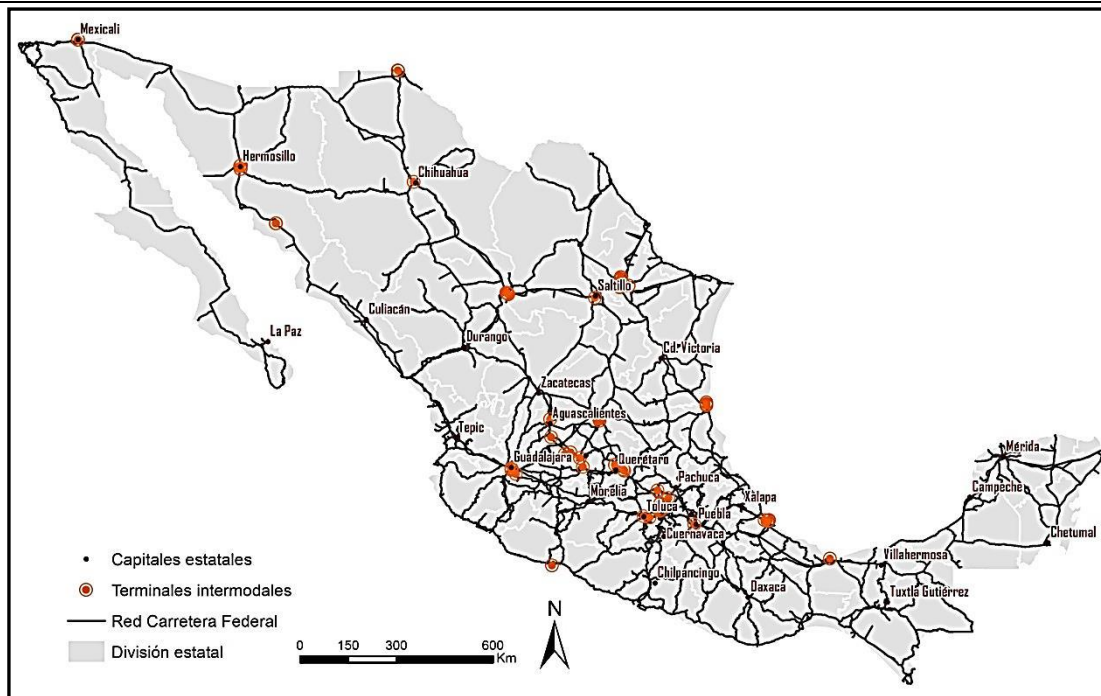


Figura 3.4. Puntos de transferencia intermodal (fuente: elaboración propia con datos de la SCT-UNAM/2012).

La figura 3.5 muestra la red bimodal donde se observa continuidad con los trazos carreteros y ferroviarios de las redes norteamericanas.

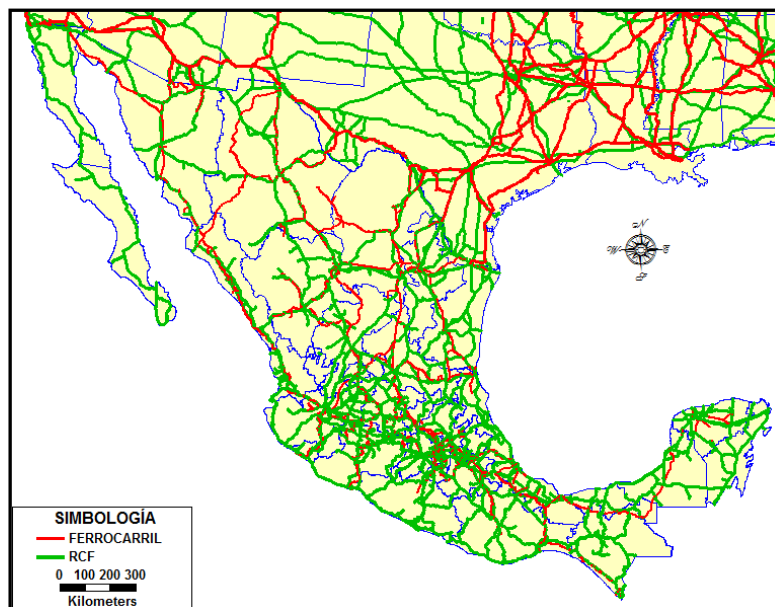


Figura 3.5. Red bimodal carretera-ferrocarril en ambiente TransCAD y puntos de contacto en la frontera norte (fuente: elaboración propia).

La figura 3.6 ilustra algunos de los puntos de transferencia modelados en la zona norte del Valle de México, alrededor de la terminal intermodal de Pantaco. En la figura aparecen las vías de ferrocarril en rojo y la red carretera federal en verde. Los puntos de transferencia aparecen como nodos en verde y las estaciones de ferrocarril aparecen como nodos en azul.

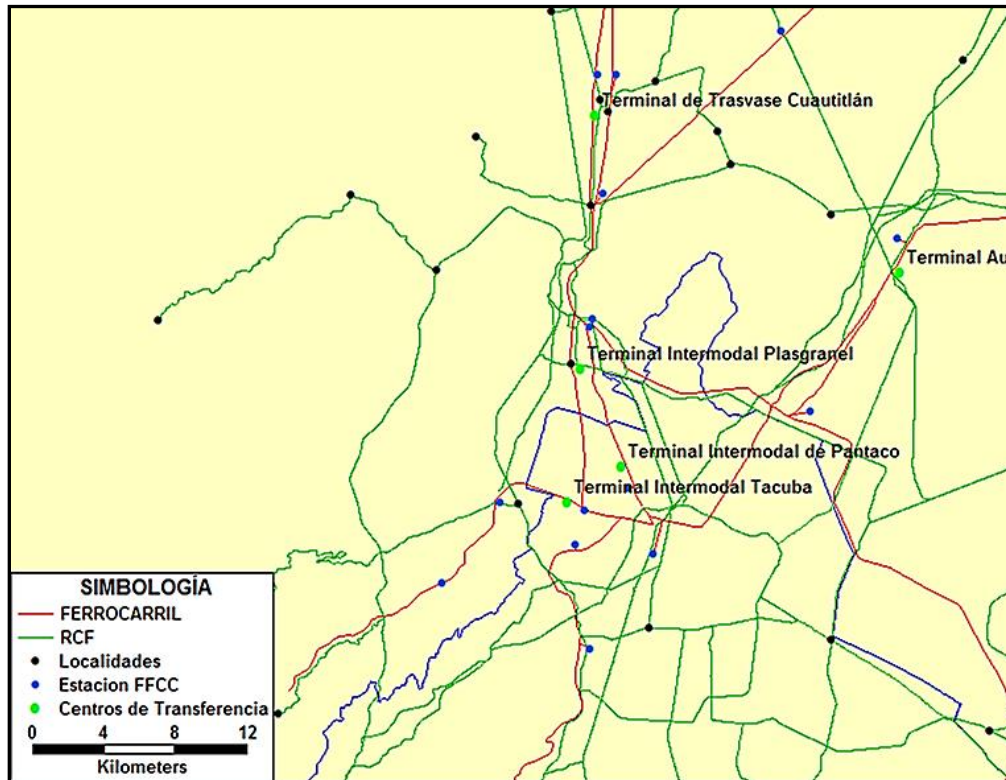


Figura 3.6. Nodos de transferencia intermodal en la zona norte de la CDMX (fuente: elaboración propia).

En las siguientes etapas de modelación se espera agregar más información sobre terminales intermodales para tener una representación más completa del sistema ferroviario y sus interacciones con el autotransporte de carga.

4. Modelación de flujos de carga terrestre

La modelación de flujos de carga terrestre estima los flujos vehiculares que se producirán en la red de transporte como respuesta a la demanda de movilidad conocida en esa red en un periodo de tiempo dado. Esta demanda se expresa usualmente en una matriz origen-destino (matriz OD) en la que cada entrada indica la cantidad de vehículos que desean ir del origen correspondiente a la fila al destino correspondiente a la columna.

El modelo que pronostica los flujos resultantes usa un procedimiento de asignación de flujos a las distintas rutas posibles en la red, considerando las características de las rutas como tiempo de recorrido, congestión debida a la presencia de otros vehículos en la ruta y costos operativos de los vehículos. La representación matemática de las condiciones de circulación en la red de transporte se hace por medio de funciones volumen-demora que modelan la congestión y permiten al modelo de asignación elegir la mejor ruta según distintos criterios, como pueden ser rutas de costo mínimo o pudiendo considerar también los efectos de congestión (usualmente sólo en los movimientos carreteros).

Las secciones siguientes detallan este proceso de modelación.

4.1 El modelo de asignación

El modelo de asignación permite pronosticar los flujos vehiculares que se producirán en una red de transporte una vez que se conoce la demanda de transporte especificada en una matriz origen-destino (matriz OD). De esta manera, se obtiene una representación adecuada de la red de transporte con sus características de longitud, tiempos de tránsito y capacidades en los arcos, entre otros factores, y se dispone de funciones de volumen-demora (o funciones de impedancia) que representan matemáticamente el aumento en el tiempo de recorrido en las rutas como función de la cantidad de vehículos presentes en ellas.

En una descripción muy general, el modelo de asignación trabaja sobre una red de transporte (como se muestra en la figura 4.1), a la cual se asocia una matriz origen-destino de los movimientos deseados de transporte (como se muestra parcialmente en la figura 4.2). Con estos datos de entrada, el modelo de asignación genera el pronóstico de los flujos que circularán por las redes de transporte (como se muestra en la figura 4.3), donde el ancho de las líneas es proporcional al flujo que circula. El resultado de la asignación permite así: analizar los patrones de flujo, estimar el reparto entre modo carretero y ferroviario, e identificar rutas congestionadas y otras mediciones de utilidad para la planeación del sistema de transporte.

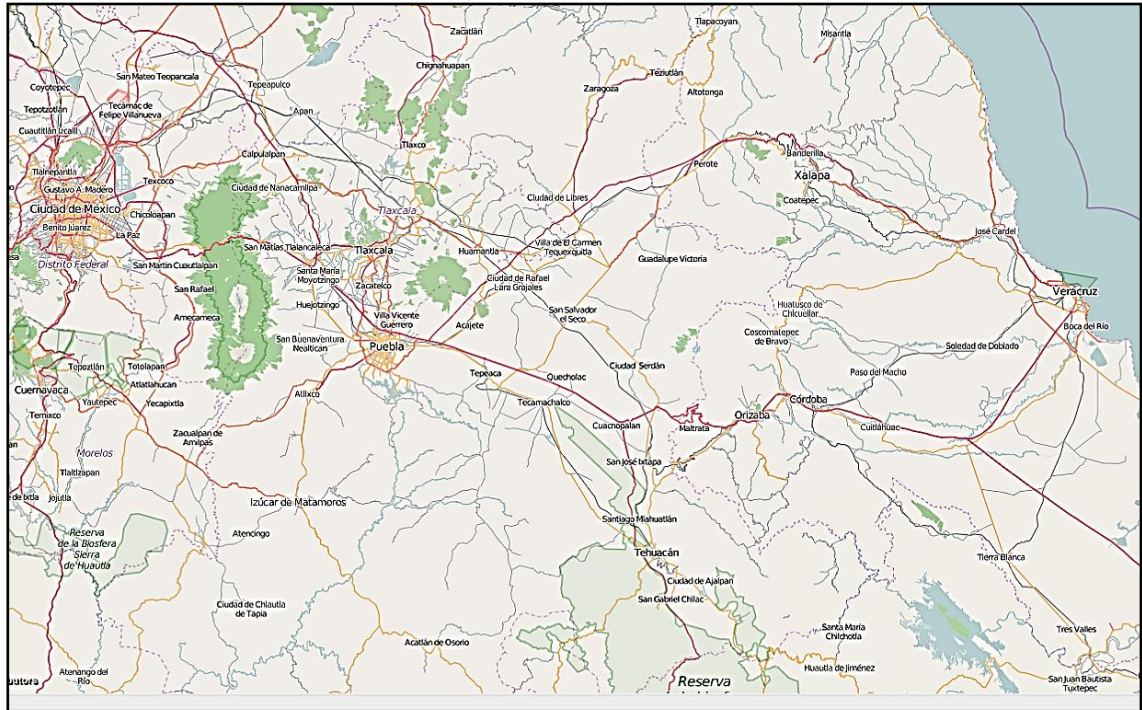


Figura 4.1. Red de transporte terrestre de la Cd. de México a Veracruz (fuente: <https://www.openstreetmap.org/>).

Matrix editor (Matrix 18 CARR GRANELES MINERALES)		13319	13330	13534	13623	13667	13754	13797	13804	13821	13849	13893	13911	13913	13929	13942	13944	13955
	Name	Sum	0.00	0.00	0.00	360912.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36208.00	0.00	0.00	838624.00
19075		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19078		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19117		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19126		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19172		162352.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	101616.00
19182		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19183		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19189		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19192		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19194		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19197		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19199		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19217		605024.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	106288.00
19237		461360.00	0.00	0.00	0.00	234768.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19287		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19407		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19527		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19530		121472.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	121472.00
19636		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19834		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19898		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19987		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20182		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20227		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20313		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20446		1168.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20537		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20569		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20684		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20694		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 4.2. Matriz OD de transporte carretero de minerales (fragmento) (fuente: elaboración propia).

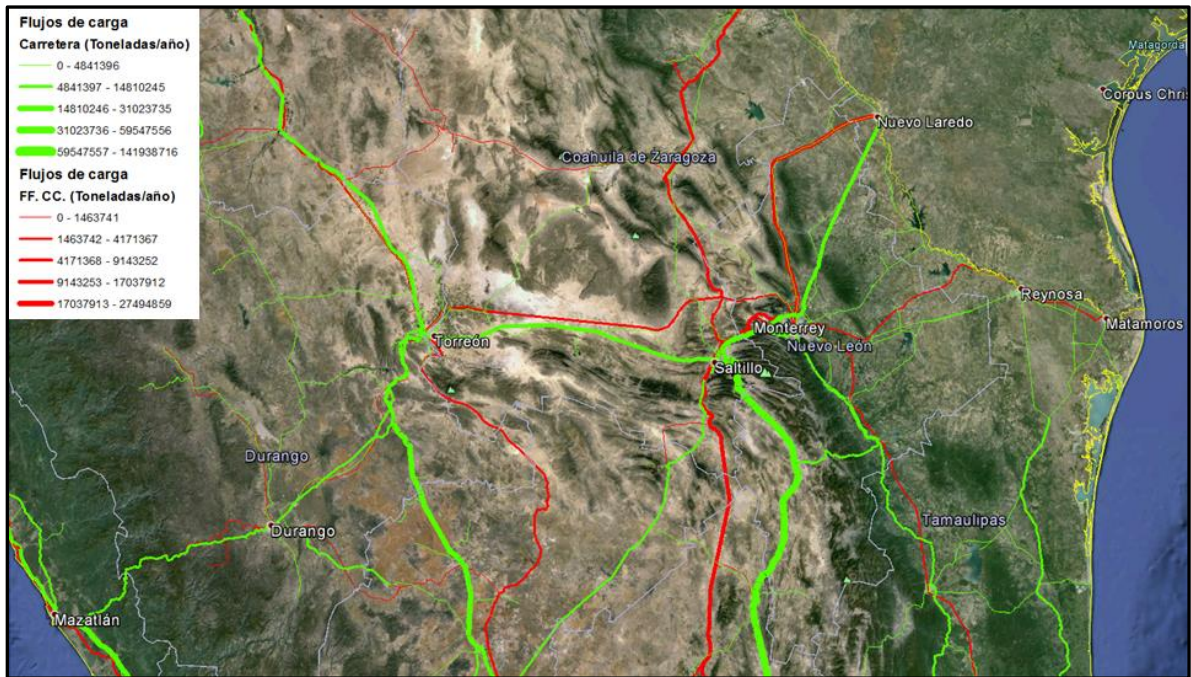


Figura 4.3. Flujos resultantes del modelo de asignación. Carretera (verde) y ferrocarril (rojo). Ruta Mazatlán-Nuevo Laredo. El grosor de línea es proporcional al flujo circulante. Fuente: elaboración propia.

Los pronósticos de flujos vehiculares que genera el modelo de asignación se utilizan para generar indicadores de desempeño de la red de transporte representada (Willumsen, 2000).

Los objetivos del modelo son los siguientes, con una orientación para mejorar los procesos de planeación del transporte y apoyar la toma de decisiones en el diseño de políticas de transporte aplicables a la red estudiada.

Objetivos principales:

- a. Obtener buenas mediciones agregadas del tráfico en la red, como: flujos totales que la usan, ingresos totales por peaje, reparto modal entre carretera y ferrocarril, etc.
- b. Obtener buenas estimaciones de los costos y los tiempos de viaje entre las zonas que representa la red de transporte para un nivel dado de demanda.
- c. Alcanzar pronósticos razonables de los flujos en los tramos de la red e identificar aquellos que están fuertemente congestionados.

Objetivos secundarios:

- a. Pronosticar las rutas que usará cada par origen-destino.
- b. Analizar cuáles pares OD utilizan un tramo o una ruta particular.
- c. Pronosticar los movimientos de vuelta en los entronques para auxiliar la planeación de infraestructura futura.

Las etapas que sigue el modelo de asignación se resumen en tres tareas principales:

1. Se identifica un conjunto de rutas atractivo para los usuarios de la red; estas rutas se identifican y almacenan en una estructura de datos llamada *árbol*, por lo que esta primera etapa se conoce como *etapa de construcción del árbol de rutas*.
2. Se asignan proporciones adecuadas de la matriz OD a las rutas del árbol con lo cual se construye el patrón de flujos en la red de transporte.
3. Se verifica la convergencia del proceso. En este paso se modela la posibilidad de que los usuarios cambien de ruta para optimizar sus tiempos y/o costos para llegar a sus destinos. El proceso generalmente utiliza un algoritmo iterativo que basa la decisión en algún criterio como puede ser: el equilibrio del usuario, el equilibrio del sistema o el criterio todo-o-nada. La convergencia debe estimarse con alguna regla de decisión que considera en qué momento el algoritmo se detiene con una solución satisfactoria.

Los elementos necesarios para modelar la asignación de flujos son los siguientes:

- La oferta representada por una red de nodos y arcos.
- Además de la conectividad, los siguientes atributos de los arcos son importantes para el modelo: 1) longitud; 2) costo que en su forma básica es el tiempo de recorrido pero en general combina tiempo, distancia y costo de operación vehicular (COV), y 3) capacidad: el máximo flujo posible.
- Los nodos de la red pueden representar instalaciones físicas específicas (estaciones ferroviarias, patios de empresas, puertos, etc.) o zonas que representan niveles de agregación. Los orígenes y destinos siempre se representan por un centroide, que a su vez se conecta a nodos internos por conectores del centroide.
- Las unidades de flujo pueden ser vehículos o medidas de movimiento de carga como toneladas, contenedores, etc. La capacidad de los arcos es el valor límite del tráfico que puede cruzar por ellos. Así, por ejemplo, un valor típico para una carretera de 3.5 m de corona en buenas condiciones es de 1,800 pasajeros-auto/h, considerando el movimiento de automóviles. En el caso de movimientos de camiones de carga, se utiliza una conversión a

unidades equivalentes de pasajeros (*Passenger Car Unit*, PCU). Así, un camión de carga puede representar de dos a cuatro PCU dependiendo de su tamaño (Willumsen, L., 2000).

- La asignación de tráfico a los tramos de la red pudiera requerir la desagregación de los usuarios (tipos vehiculares) o tipos de carga en subgrupos con características distintas, como distintos tiempos de recorrido y/o costos de operación. Estos subgrupos son las *clases de usuarios*, con distintas características vehiculares (autos, autobuses, camiones, articulados, etc.) y distintos niveles de tiempos, costos, seguridad, etc. De igual modo, se puede modelar el acceso a los distintos tramos de la red por las distintas clases de usuarios (por ejemplo, tráfico de carga que no pueden usar algunos tramos).
- La calidad del servicio de cada tramo de la red no es constante, y depende del número de vehículos que lo usan. En la mayoría de las redes de transporte, el tiempo de recorrido por unidad de distancia aumenta de forma no-lineal; cuando el flujo en un tramo se aproxima a su capacidad, las unidades adicionales de flujo tienen un impacto más marcado en el nivel de servicio que las unidades de flujo que entraron antes al tramo. Cuando el tráfico vehicular presiona para entrar a un tramo en cantidades que superan su capacidad, se generan colas; en la modelación es importante considerar la capacidad de cola que tiene un tramo dado para “almacenar” vehículos que quieren usar el tramo. Cuando la capacidad de la cola en un tramo es excedida por el flujo entrante, éste se dispersa hacia tramos vecinos, y con frecuencia se produce congestión y bloqueos en los nodos que unen estos tramos. Para una adecuada modelación de esta congestión, es necesario contar con representaciones adecuadas de las curvas de flujo-velocidad o de volumen-demora que permitan pronosticar el comportamiento del tiempo de recorrido del tramo conforme el volumen de vehículos que lo usan aumenta hasta la saturación.

Criterios de asignación en la modelación

La asignación de flujos en la red puede hacerse con base en distintos criterios que representan las condiciones del movimiento vehicular en la red. Tres de los más comunes son: a) Criterio Todo o Nada, b) Equilibrio del Usuario y c) Equilibrio del sistema.

Criterio Todo o Nada: Con este enfoque, los flujos vehiculares se asignan a la red eligiendo siempre la ruta más corta (puede ser en distancia o en tiempo) para unir un origen a un destino. Se trata del modelo básico de ruta más corta que se aborda en Teoría de Gráficas, y para el cual existen algoritmos de solución bastante eficientes. Considerando una red que tiene n nodos, el criterio Todo o Nada corresponde al siguiente problema básico de optimización:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \\ \text{sujeto a: } \sum_{j=1}^n X_{ij} - \sum_{k=1}^n X_{ki} &= \begin{cases} 1 & \text{para } i = 1 \\ 0 & \text{para } i \neq 1 \text{ ó } i = n \\ -1 & \text{para } i = n \end{cases} \\ X_{ij} &\in \{0, 1\} \quad i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \end{aligned}$$

donde Z es el costo total (distancia o tiempo) de ir del nodo 1 al nodo n , C_{ij} es el costo de cruzar el arco que va del nodo i al j , y X_{ij} es una variable binaria que vale 1 cuando el arco es utilizado en la ruta y 0 en caso contrario.

Las restricciones del problema indican el equilibrio de flujo en los nodos, que representa el flujo de una unidad vehicular saliendo del nodo origen (flujo saliente = 1), y llegando al nodo final n (flujo entrante -1); para los nodos intermedios, el flujo que entra es el que sale (flujo 0). En este modelo los costos C_{ij} son fijos, lo que supone que la ruta óptima siempre requiere el mismo tiempo para recorrerse.

Este problema de optimización se resuelve eficientemente con el algoritmo de Dijkstra, que permite encontrar todas las rutas más cortas desde el nodo inicial 1 hacia todos los demás nodos de la red. Una generalización de este proceso es el algoritmo de Floyd-Warshall que encuentra todas las rutas más cortas entre cualquier par de nodos de la red de transporte.

El criterio Todo o Nada es poco realista para usarse en general en las redes carreteras, ya que no considera los aumentos en los tiempos de traslado debido a la congestión vehicular. Sin embargo, su uso se justifica en redes que tienen bajos niveles de tráfico en los que no hay congestión o en redes de transporte donde la operación vehicular está muy controlada, como ocurre en el transporte ferroviario. Éste es el criterio usado en el modelo para los flujos ferroviarios.

A diferencia del criterio todo o nada, en los criterios de equilibrio, se considera que los tiempos de recorrido en las rutas aumentan a medida que hay más vehículos circulando en la red; de esta manera, se modela el efecto de la congestión.

La idea de equilibrio del tráfico fue propuesta por J.G. Wardrop en la década de los años 1950, y tiene dos enfoques:

- a) el Equilibrio del Usuario y
- b) el Equilibrio del Sistema, como se describe a continuación.

Equilibrio del Usuario (EU): Corresponde al comportamiento de vehículos en la red que eligen con libertad sus rutas buscando los mejores tiempos de recorrido; no hay acuerdo entre ellos ni con el administrador de la red. Es el estado del tráfico en el que ningún usuario adquiere ventaja si decide cambiar su ruta, pues la

congestión presente se ha generalizado en la red. Se utiliza ampliamente para modelar la congestión en redes viales.

En este enfoque, ya que los usuarios eligen individualmente sus mejores rutas, éstas empiezan a ocuparse a medida que el tráfico aumenta, provocando aumentos en los tiempos de traslado y uso de rutas alternas, hasta llegar a un punto de equilibrio en el que el tiempo de recorrido para cualquier par origen-destino sea prácticamente el mismo en cualquiera de las rutas usadas.

Los principios de equilibrio fueron presentados por Wardrop en 1952, y en 1956 Beckman, McGuire y Winsten dieron una formulación matemática precisa en forma de problema de optimización. En esta formulación, se muestra que los flujos vehiculares que satisfacen el EU son únicos, y minimizan la siguiente función objetivo Z :

$$\begin{aligned} \text{Min } Z\{T_{ijr}\} &= \sum_a \int_0^{V_a} f_a(u) du \\ \text{s. a. } \sum_r T_{ijr} &= T_{ij} \\ T_{ij} &\geq 0 \end{aligned}$$

Donde el argumento de la función objetivo Z es el conjunto $\{T_{ijr}\}$ de los flujos que representan el total de viajes que van del origen i al destino j utilizando la ruta r . V_a es el flujo circulante en el tramo a , y $f_a(x)$ es la función volumen-demora que caracteriza el comportamiento del flujo en el tramo correspondiente. T_{ij} es el total de viajes que van del origen i al destino j considerando todas las rutas posibles (Ortúzar and Willumsen, 2011).

Equilibrio del Sistema (ES): Corresponde al comportamiento de vehículos en la red de transporte que de alguna manera acuerdan entre sí o aceptan sugerencias del administrador de la red para elegir sus rutas. Es el estado del tráfico en el que el tiempo total de todos los recorridos o el tiempo promedio de recorridos es mínimo.

La formulación matemática de este criterio es semejante a la del EU, con una función objetivo que minimiza el costo total de los flujos que usan la red de transporte. Las restricciones son las mismas que utiliza el EU. El planteamiento del ES es como sigue:

$$\text{Min } Z\{T_{ijr}\} = \sum_a V_a f_a(u)$$

$$\text{s. a. } \sum_r T_{ijr} = T_{ij}$$

$$T_{ij} \geq 0$$

El criterio ES representa la perspectiva del administrador de la red interesado en que el consumo de combustible y el desgaste de la infraestructura, aproximadamente proporcionales al tiempo de recorrido de los vehículos, resulten minimizados.

En un asignación de flujos con el criterio ES, en principio se plantea la necesidad de convencer o motivar a algunos de los usuarios de la red para que utilicen ciertas rutas que no serían precisamente las mejores para sus tiempos, a fin de obtener el objetivo global de minimizar el costo total de los recorridos. En este tipo de equilibrio, la congestión se reduciría siempre que los usuarios de la red sean informados de las rutas que deberían usar.

La aplicación práctica de este enfoque requiere de medidas externas implantadas por el administrador de la red. Una medida comúnmente sugerida es la tarificación de algunas rutas, lo cual tiene el efecto de disuadir a algunos usuarios a no utilizarlas, con el consiguiente impacto social que puede ser debatible en foros de políticas públicas.

Otro enfoque es emplear técnicas de sistemas de transporte inteligente (ITS) que aporten en tiempo real información sobre las condiciones de circulación en la red, a fin de que los usuarios se reacomoden y cooperen para reducir los efectos de la congestión.

Las funciones de volumen-demora en la modelación

Los criterios de equilibrio ya mencionados utilizan en sus formulaciones matemáticas funciones de costo $f_a(u)$ que miden los aumentos en el tiempo de viaje, a medida que el volumen de vehículos u que usan la ruta aumenta, logrando así una representación de la congestión en la red. Estas funciones se conocen como *funciones volumen-demora (FVD)* o *funciones de impedancia*.

La asignación de flujos que pronostica cualquiera de los modelos de equilibrio mencionados depende de la función de volumen-demora utilizada para representar el comportamiento del tráfico en la red. Para tener una representación realista de la congestión en una red vial, estas FVD se diseñan para que cumplan las características siguientes.

1. El argumento u de la función debe ser ≥ 0 , para representar el volumen vehicular en el tramo. Alternativamente u puede ser el porcentaje de la capacidad máxima del tramo, con valores entre 0 y 1.
2. $f(u)$ debe ser ≥ 0 , monótona continua y acotada en su dominio, pues representa el tiempo de viaje, que sólo puede aumentar con el tráfico, y al llegar al flujo de saturación, el tiempo resultante es finito.
3. Conviene que $f(u)$ tenga una fórmula analítica sencilla para facilitar los cálculos y su transferibilidad a distintas plataformas de cómputo.
4. Como el tiempo de viaje generalmente aumenta sin brusquedad, conviene que $f(u)$ tenga derivadas de al menos hasta 2º. orden, para asegurar una curva suave y además posibilitar análisis de costo marginal.

Tres de las funciones de volumen-demora más utilizadas en los modelos de asignación de flujos son las siguientes, donde $f(u)$ se expresa como el tiempo de viaje en un tramo determinado de la red vial:

- La función del Bureau of Public Roads (BPR) norteamericano (1962), ampliamente usada en ejercicios de planeación del transporte:

$$t(V) = t_0 [1 + \alpha(V/Q)^\beta]$$

donde t es el tiempo de viaje, t_0 es el tiempo de viaje para flujo libre, V es el flujo vehicular y Q es la capacidad del tramo; α y β son parámetros para calibrarse (Ortúzar, Willumsen, 2011).

- La función Cónica de volumen-demora:

$$t(V) = t_0 \left[2 + \sqrt{\alpha^2 \left(1 - \frac{V}{C}\right)^2 + \beta^2} - \alpha \left(1 - \frac{V}{C}\right) - \beta \right]$$

donde t es el tiempo de viaje, t_0 es tiempo para flujo libre; V es flujo en el tramo; C es la capacidad del tramo; $\alpha > 1$ el parámetro de calibración, y $\beta = \frac{2\alpha-1}{2\alpha-2}$ (Spiess, 1990).

- La función de Akcelik:

$$t(x) = t_0 + 0.25T \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{16 \cdot J \cdot L^2 x}{T^2}} \right]$$

donde t es el tiempo de viaje, t_0 es el tiempo para flujo libre; T = duración esperada de la demanda; L = longitud del tramo; J = parámetro de calibración, y x = razón flujo-capacidad (Caliper, 2013).

La tabla 4.1 muestra un resumen de las formas analíticas de estas funciones y su comportamiento en los valores extremos de sus dominios: para el caso de flujo libre (no hay congestión, el camino está libre) y para el valor de saturación (el camino opera a capacidad máxima).

Tabla 4.1. Comportamiento de FVDs en sus valores mínimo y máximo
(fuente: elaboración propia)

Función	Fórmula	Valor inicial	Valor en saturación
BPR	$t(V) = t_0[1 + \alpha(V/Q)^\beta]$	$t(0) = t_0$	$t(Q) = t_0[1 + \alpha]$
Cónica	$t(V) = t_0 \left[2 + \sqrt{\alpha^2 \left(1 - \frac{V}{C}\right)^2 + \beta^2} - \alpha \left(1 - \frac{V}{C}\right) - \beta \right]$	$t(0) = t_0$	$t(C) = 2t_0$
Akcelik	$t(x) = t_0 + 0.25T \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{16 \cdot J \cdot L^2 x}{T^2}} \right]$	$t(0) = t_0$	$t(1) = t_0 + L\sqrt{J}$

La tabla 4.1 muestra que las FVD calculan bien el tiempo t_0 para flujo libre, pero dan distintas estimaciones para el aumento del tiempo en saturación.

- Con la función BPR el factor de aumento es $[1 + \alpha]$.
- Con la función Cónica, el factor de aumento es 2; esto corresponde a una regla práctica en estudios de tráfico, el cual supone que en caso de saturación, el tiempo de recorrido casi se duplica.
- Con la función de Akcelik, el aumento del tiempo de viaje no aparece como factor, sino como un sumando igual a $L\sqrt{J}$.

De las funciones anteriores, la BPR es tal vez la más utilizada en la práctica por los profesionales de la planeación del transporte, en parte por su sencilla formulación analítica y en parte también porque en la literatura se encuentran publicados algunos valores de sus parámetros α y β para distintos tipos de camino.

En la modelación de asignación de flujos de autotransporte en este trabajo, se aplicó el criterio de Equilibrio del Usuario usando una función BPR.

Para los parámetros α y β usados se tomaron como referencia valores publicados para carreteras estadounidenses con características de diseño semejantes al sistema de carreteras federales troncales en México, examinados en la Publicación técnica núm. 427 del IMT. En la tabla 4.2 enseguida, se muestran los valores α y β usados en la modelación:

Tabla 4.2. Parámetros α y β tentativos para la función BPR en carreteras federales mexicanas (Moreno, E.; Rico, O. y Bustos, A., 2014).

	Autopistas		Carreteras multicarril	
Coefficiente	100 km/h	100 km/h	80 km/h	80 km/h
α	0.83	0.83	0.71	
β	5.5	2.7	2.1	

La figura 4.4 muestra las funciones BPR propuestas para las carreteras federales, para un tiempo de flujo libre $t_0 = 1$. Se observa en el 80% de saturación, correspondiente al nivel de servicio "C", cómo en las autopistas el tiempo aumenta en 25%, mientras que en las carreteras multicarril ese tiempo aumenta un 50%. En el nivel de saturación, las autopistas llegan a un aumento máximo de 71%, y las multicarril llegan hasta el 83%, lo modela razonablemente estos caminos.

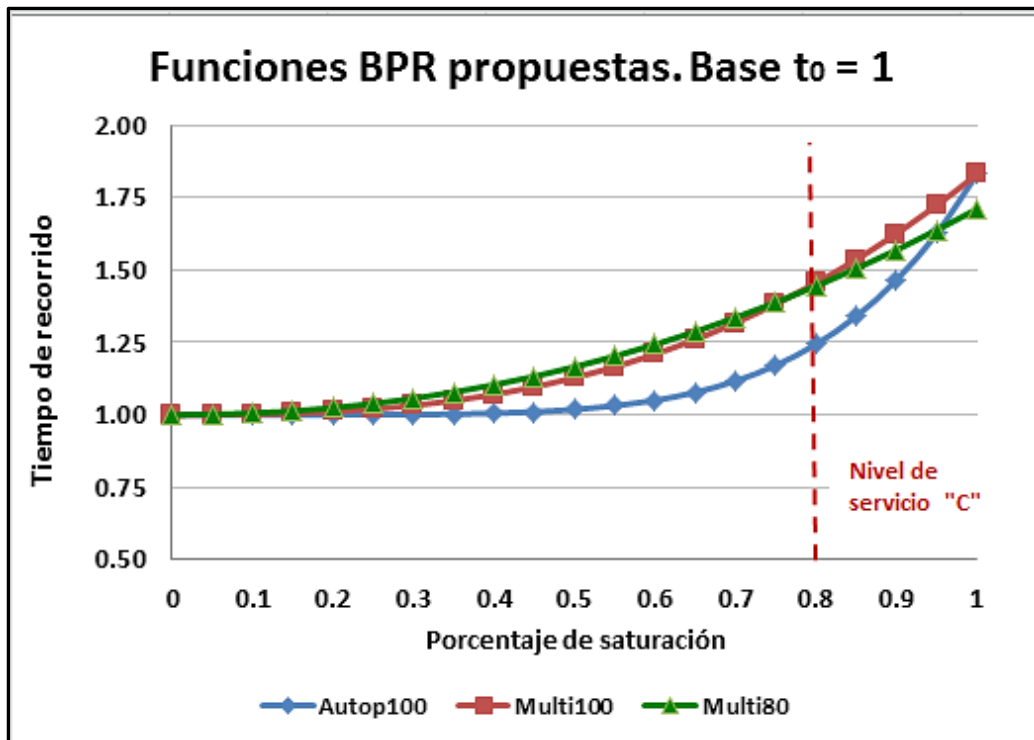


Figura 4.4. Funciones BPR propuestas para modelación de flujos en la red carretera federal (fuente: elaboración propia).

La figura 4.5 muestra el comportamiento esperado de las velocidades de circulación para las curvas BPR propuestas en la figura 4.4.

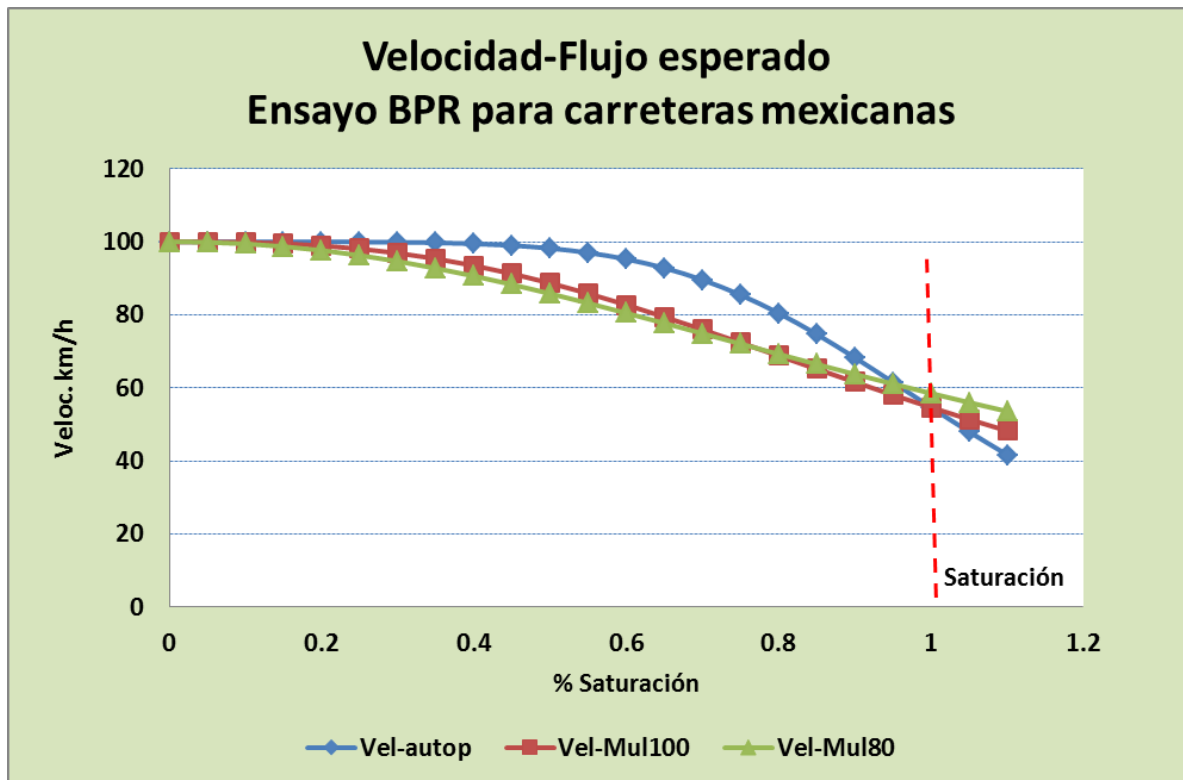


Figura 4.5. Funciones BPR propuestas para modelación de flujos en la red carretera federal (fuente: elaboración propia).

Las correspondientes reducciones de velocidad en el punto de saturación se encuentran entre 57 y 60 km/h, lo que parece un supuesto razonable para el comportamiento vehicular en esas condiciones.

Algoritmos de solución para criterios de equilibrio

Las representaciones matemáticas de los problemas de equilibrio, tanto del usuario como del sistema, representan problemas de optimización no-lineales con restricciones asociadas a los flujos que circulan en la red.

El método de solución más utilizado para estos problemas es el algoritmo de Frank-Wolfe. De un modo muy general, este algoritmo procede hacia la solución con los siguientes pasos (Willumsen, L., 2000):

1. Se selecciona un conjunto inicial de costos C_a en los tramos a de la red, generalmente correspondiendo a los tiempos de flujo libre, $C_a(0)$. Se da valor inicial cero a todos los flujos V_a en los tramos a de la red, y se fija el contador de iteraciones en $n = 0$.
2. Se genera el conjunto de árboles de costo mínimo usando los costos C_a , y se añade una iteración al contador $n \equiv n + 1$.

3. Se carga la matriz **T** de origen-destino, todo-o nada, al conjunto de árboles minimales y se obtiene un conjunto de flujos auxiliares F_a en los tramos a de la red.
4. Se actualiza el flujo V_a^n (iteración n) en la red como: $V_a^n = (1 - \phi)V_a^{n-1} + \phi F_a$ donde ϕ se elige de modo que minimice la función objetivo de equilibrio.
5. Se calcula un nuevo conjunto de costos C_a en los tramos a de la red con base en los últimos flujos calculados V_a^n (que ya incluyen los aumentos de tiempo por el aumento del volumen vehicular en los tramos). Si los flujos actualizados (o los costos en los tramos) no cambian significativamente en dos iteraciones consecutivas, se termina el proceso; en caso contrario, se procede al paso 2 del algoritmo.

El algoritmo de Frank-Wolfe, o alguna variante del mismo, es de uso común en el software comercial de planeación del transporte y ha mostrado buenas propiedades de convergencia. Tanto TransCAD como Visum ofrecen el manejo de este algoritmo en la solución de problemas de asignación de tráfico.

4.2 Escenarios con base tiempo y congestión

En esta primera fase, ya con las matrices OD adecuadas para la red bimodal, y con la propuesta de la función BPR para el sistema de carreteras federales del sistema nacional, se plantearon escenarios en los que la asignación de flujos se generó con base en los tiempos de recorrido tanto para el modo carretero como para el ferroviario.

En este esquema de modelación, si bien aún no se consideran costos operativos para los modos, sí se toma en cuenta el efecto de la congestión en los movimientos carreteros modelada con la función BPR ya referida.

La modelación se efectuó considerando los flujos en cada modo por separado (sin transferencia de carga entre modos) y considerando los flujos en la red bimodal, a fin de comparar los resultados y estimar las transferencias de carga resultantes entre los dos modos.

En la figura 4.6 se muestra el resultado del modelo de asignación con datos 2014 para los flujos por carretera exclusivamente (veh/día). En la figura 4.7 se aprecia el detalle de la asignación de flujos en la ruta México-Veracruz.



Figura 4.6. Asignación de flujo en la red carretera federal: datos 2014 (fuente: elaboración propia).



Figura 4.7. Asignación de flujo por carretera: datos 2014 México-Veracruz (fuente: elaboración propia).

Los resultados del modelo de asignación en las figuras 4.6 y 4.7 confirman la relevancia del corredor hacia Nuevo Laredo, que es la principal ruta del movimiento intermodal hacia los Estados Unidos, así como la importancia de los flujos en la ruta México-Puebla, que a su vez, alimenta movimientos hacia el puerto de Veracruz.

En el caso de la asignación por ambos modos, la figura 4.8 muestra un detalle de la distribución de flujos (ton/año) por carretera en verde y por ferrocarril en rojo en la misma zona de la ruta México-Veracruz, donde se muestra la mayor participación del autotransporte en los movimientos del centro al puerto de Veracruz.

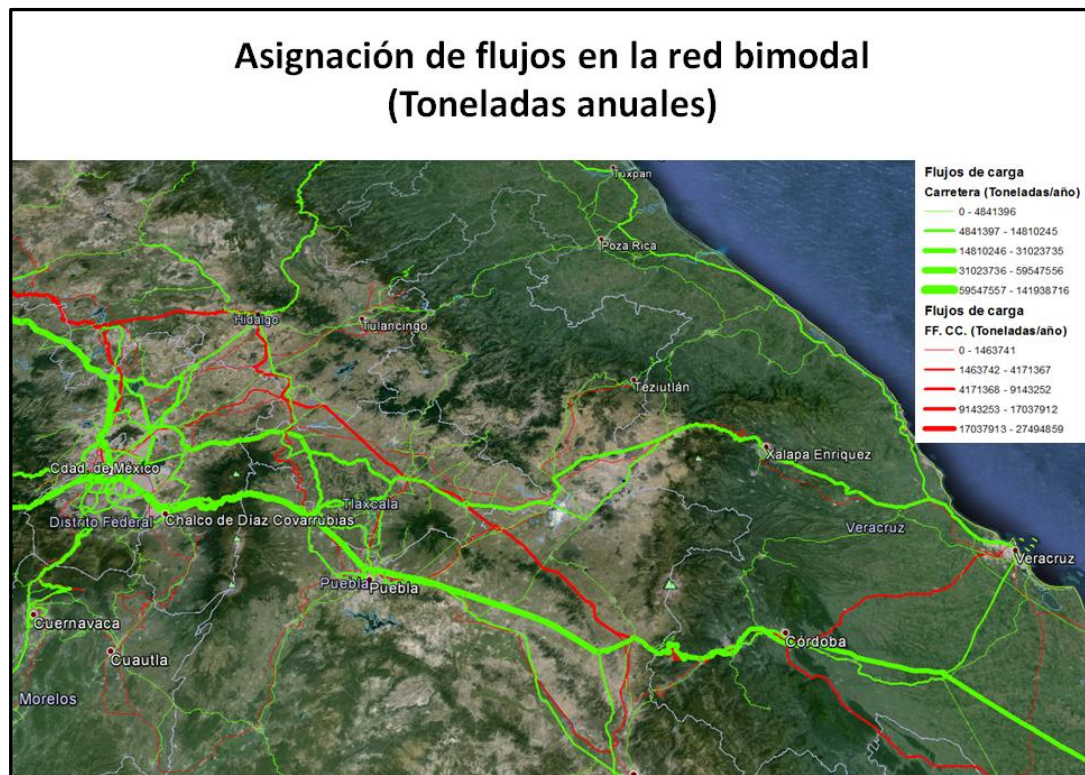


Figura 4.8. Asignación de flujo por carretera: datos originales 2010 México-Veracruz (fuente: elaboración propia).

Los flujos ejemplificados consideran solamente los tiempos de traslado, y aunque no se han incluido aún los costos de operación vehicular, los resultados obtenidos verifican la validez del modelo, ya que estos resultados son consistentes respecto al criterio de los tiempos de traslado.

4.3 Modelación en corredores seleccionados

Tres corredores fueron seleccionados para examinar el modelo de asignación de flujos, considerando sus importancias relativas en los movimientos intermodales en el país: 1) Corredor Manzanillo-Frontera Norte; 2) Corredor Veracruz-México y 3) Corredor México-Nuevo Laredo. Las corridas del modelo de asignación se hicieron considerando las redes carretera y ferroviaria por separado y luego considerando la red bimodal que permite el intercambio de carga. El criterio de optimización de flujos en cada modo corresponde al tiempo de tránsito en las rutas.

1) Corredor Manzanillo-Frontera Norte

Entre los corredores de carga actualmente ya estructurados, se encuentra el Asia-Manzanillo/Lázaro Cárdenas-Estados Unidos. Las toneladas movidas en contenedor por el litoral mexicano del Pacífico en 2013 y 2014 fueron de 25'929,855 y 26'380,098, respectivamente, de las cuales Manzanillo movilizó el 62.9% y el 68.2% respectivamente, lo que refleja su importancia en ese litoral (SCT-CGPMM, 2015).

Este corredor multimodal internacional pretende enlazar flujos de contenedores entre el sudeste asiático, concentrados en Singapur y el centro de los Estados Unidos, principalmente en Missouri, Tennessee e Illinois, utilizando los puertos de Manzanillo o Lázaro Cárdenas y la frontera norte, que fungiría como una vía complementaria a los puentes terrestres estadounidenses articulados desde los puertos de Long Beach y Los Ángeles en la costa norteamericana del Pacífico. En este modo de internación de contenedores a los Estados Unidos se maneja el movimiento en las dos modalidades: carretera y ferroviaria.

La figura 4.9 muestra el efecto de los flujos en los tramos principales del corredor carretero de Manzanillo a Tampico para los dos casos: sin intercambio de carga entre modos y permitiendo la transferencia de cargas. En casi todos los tramos del corredor mostrado, los flujos vehiculares se muestran aumentados para el caso en el que se permite transferencia de carga entre carretera y ferrocarril. Esta respuesta del modelo parece razonable, ya que siendo el criterio de optimización de los flujos las rutas de tiempo mínimo, los mejores tiempos en carretera compiten con los correspondientes tiempos en la red ferroviaria y, por tanto, atraen carga hacia el autotransporte.

En la figura 4.10 se muestra el correspondiente resultado de estimación de los flujos ferroviarios en los tramos principales de la misma ruta Manzanillo-Tampico. La gráfica confirma la reducción de los flujos ferroviarios en favor del autotransporte en casi todos los tramos. La excepción es el tramo de Armería, en el cual sucede lo opuesto, con un aumento de flujo ferroviario atraído del autotransporte. Este hecho pudiera relacionarse con el movimiento de contenedores desde Manzanillo, pero será necesario investigarlo cuando se agreguen costos operativos al modelo.

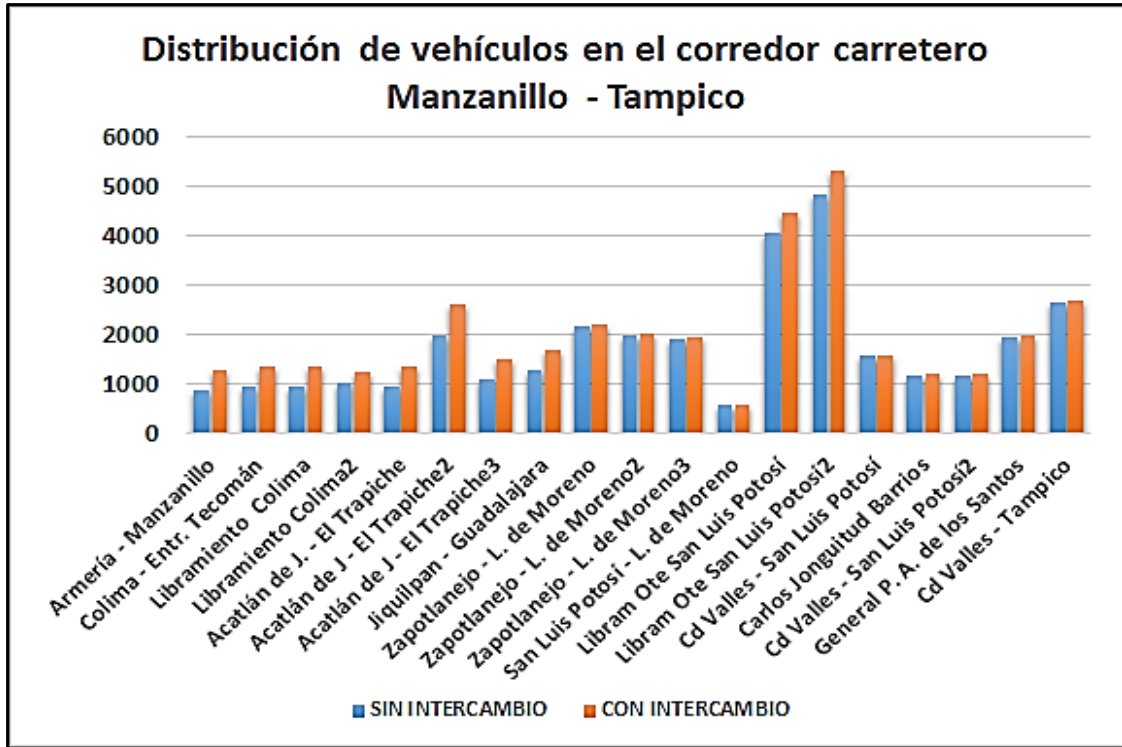


Figura 4.9. Flujos carreteros estimados en la ruta Manzanillo-Tampico (fuente: elaboración propia).

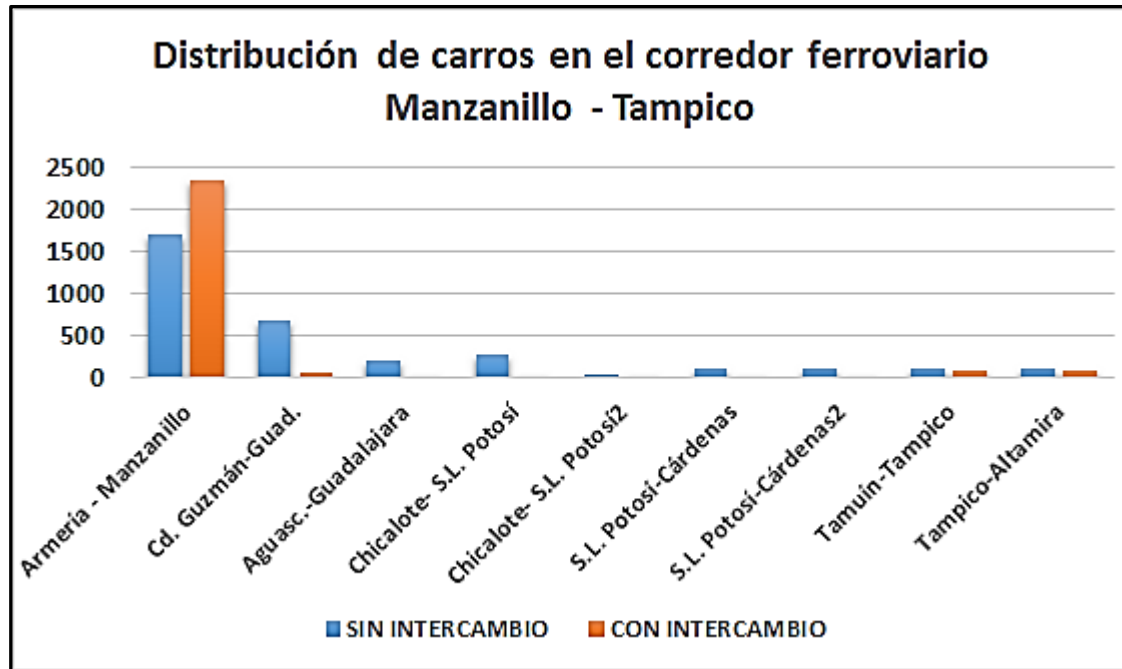


Figura 4.10. Flujos ferroviarios estimados. Ruta Manzanillo-Tampico (fuente: elaboración propia).

2) Corredor Veracruz-México

La mayor parte del movimiento de contenedores que transitan por la costa del Golfo de México entra por el puerto de Veracruz. Los tonelajes movidos en contenedores en el litoral Golfo-Caribe en 2013 y 2014 fueron de 13'856,868 y 14'286,158, respectivamente, de los cuales el puerto de Veracruz participó con el 58.7% en 2013 y el 59.1% en 2014, lo cual muestra su relevancia en el movimiento intermodal en el país (SCT-CGPMM, 2015).

La figura 4.11 muestra el resultado de flujos carreteros en la ruta México-Veracruz. Puede notarse que al permitir intercambio de carga el flujo vehicular aumenta ligeramente, a diferencia de los cambios observados en el corredor Manzanillo-Tampico.

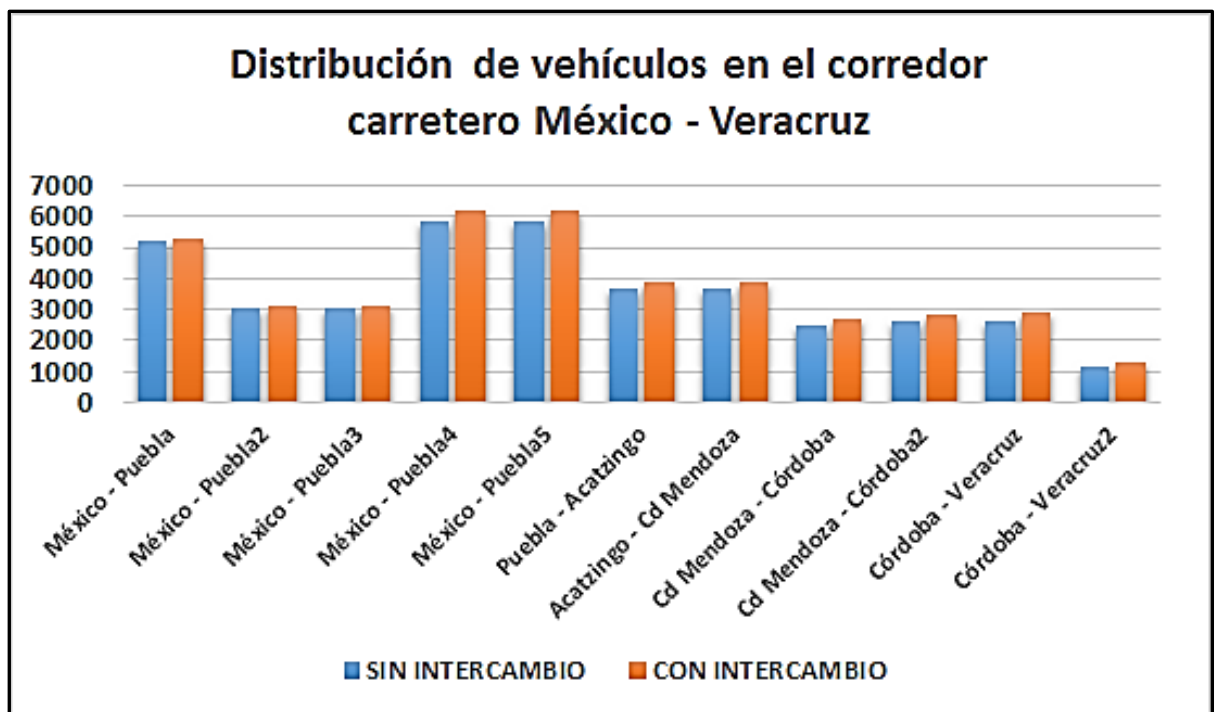


Figura 4.11. Flujos carreteros estimados en la ruta México-Veracruz (fuente: elaboración propia).

Los resultados para el correspondiente flujo ferroviario en esta ruta se muestran en la figura 4.12. Este resultado muestra una fuerte reducción del tráfico ferroviario en la ruta cuando se permite intercambio de carga, la cual aparentemente se desvía hacia la carretera. Siendo el criterio de optimización de flujos el mínimo tiempo de traslado, parece consistente el desvío de flujos ferroviarios hacia la carretera, pero el efecto observado en la figura 4.11 es limitado, por lo que habrá que examinar posibles desvíos de carga hacia otras rutas y verificar con el modelo mejorado una vez que se tengan costos de operación.

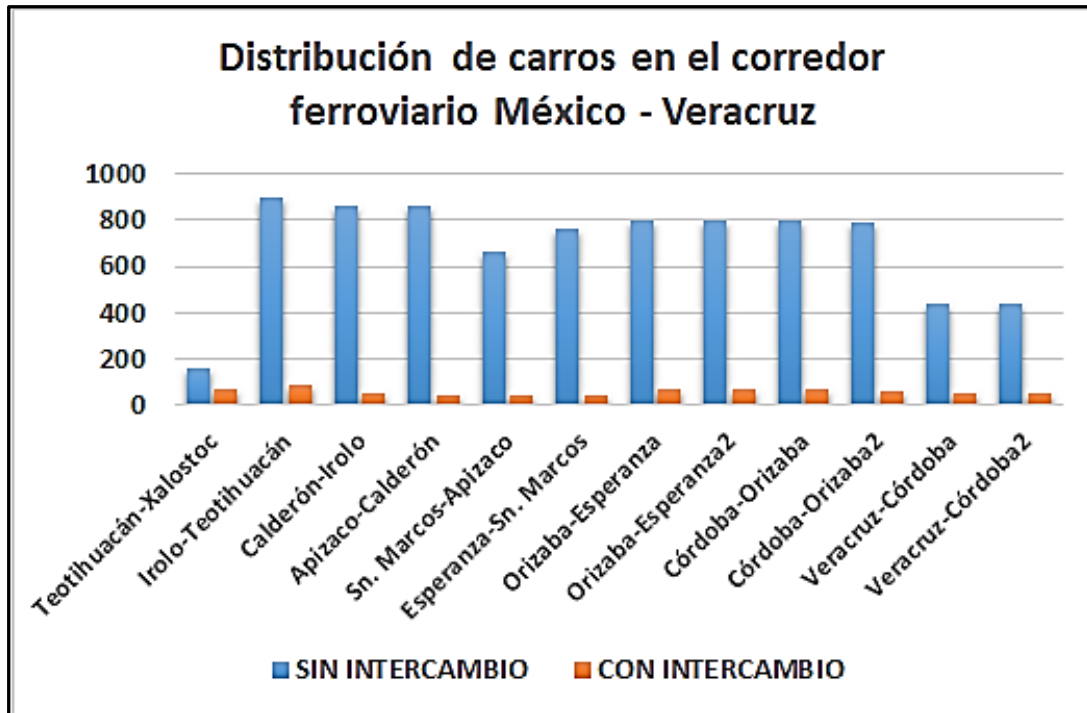


Figura 4.12. Flujos ferroviarios estimados. Ruta México-Veracruz (fuente: elaboración propia).

3) Corredor México-Nuevo Laredo

Según un estudio del Colegio de la Frontera Norte (Del Castillo *et al.*, 2007), los cuatro principales puertos de entrada entre México y Estados Unidos son Tijuana-San Diego, Nogales--Nogales, Ciudad Juárez-El Paso y Nuevo Laredo-Laredo.

En el cruce Laredo-Nuevo Laredo, se localizan los puertos de entrada más dinámicos entre Estados Unidos y México, en términos del valor de los bienes que se transportan a través de este puerto. Nuevo Laredo registra el mayor número de cruces de camiones de transporte comercial en comparación con cualquier otro puerto terrestre a todo lo largo de la frontera entre Estados Unidos y México.

En 2006, se registraron más cruces de camiones de transporte comercial hacia el norte en Nuevo Laredo que el número registrado en Mesa de Otay, en Baja California y en Ciudad Juárez combinados. Nuevo Laredo también es un puerto de entrada muy importante para el tráfico ferroviario, ya que despacha un estimado de 50 por ciento del total del tráfico ferroviario entre Estados Unidos y México, el cual es muy utilizado por la industria automotriz.

La figura 4.13 muestra la estimación de flujos carreteros en el corredor México-Nuevo Laredo.

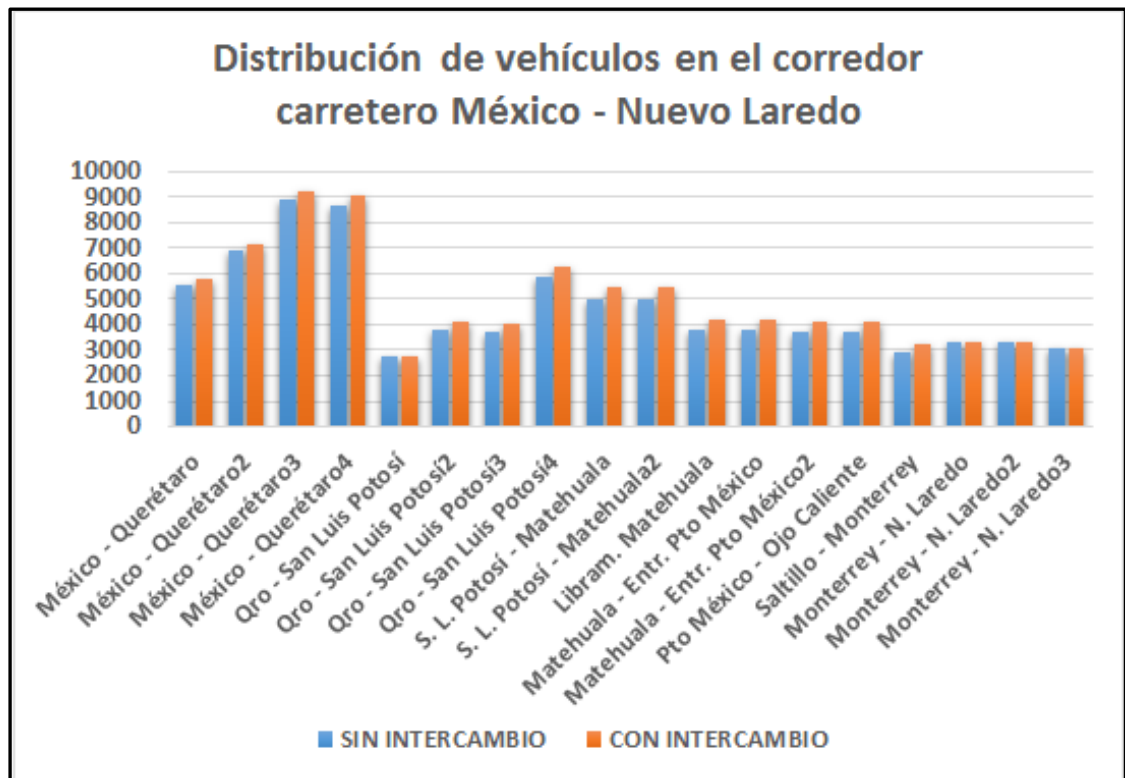


Figura 4.13. Flujos carreteros estimados en la ruta México-Nuevo Laredo (fuente: elaboración propia).

Los flujos carreteros mostrados en la figura 4.13 indican un ligero aumento cuando se permite intercambio de carga, aparentemente atraída de las cargas ferroviarias. Unos cuantos tramos como Querétaro-San Luis Potosí y la conexión final Monterrey-Nuevo Laredo no muestran cambios antes y después de permitir el intercambio modal de carga.

En la figura 4.14 se muestran los correspondientes flujos ferroviarios en la misma ruta. La gráfica muestra una fuerte reducción del flujo ferroviario aparentemente en favor del movimiento carretero en casi todos los tramos de la ruta. Resalta el último tramo de la conexión Monterrey-Nuevo Laredo que no muestra prácticamente ningún cambio antes y después de modelarse el intercambio de carga.



Figura 4.14. Flujos ferroviarios estimados. Ruta México-Veracruz (fuente: elaboración propia).

Los resultados mostrados indican que el modelo responde consistentemente con los supuestos de optimización en las rutas, que para estos ejercicios fue solamente el tiempo de traslado, el cual en general, resulta mejor para el transporte carretero que para el ferroviario.

Todas las observaciones comentadas en las gráficas mostradas deben verificarse en la versión mejorada del modelo que incluirá costos de operación en ambos modos, a fin de verificar el comportamiento de los flujos.

5.Revisión de resultados de la modelación

Los escenarios modelados en los ejercicios de asignación fueron con base en los tiempos de recorrido en la red bimodal, pero considerando el efecto de la congestión que se da en el transporte carretero. Aún no se dispone de escenarios que consideren los costos de operación vehicular para esta primera etapa del modelo, desarrollo que se prevé para una segunda etapa de este proyecto.

Los primeros resultados obtenidos se compararon con los valores de TDPA registrados por la SCT, como una primera medida del grado de aproximación del modelo. Estas comparaciones, junto con las estimaciones de sensibilidad a cambios en los parámetros del modelo, se muestran en las secciones siguientes.

5.1 Validación de flujos pronosticados

El modelo de asignación de flujos utiliza la información origen-destino de los movimientos para determinar las rutas que cumplen con el criterio de optimización adoptado: equilibrio del usuario en el caso carretero y la asignación todo-o-nada en el caso ferroviario.

La matriz OD de movimientos ferroviarios se construye con datos obtenidos directamente de la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal de la SCT, a través de un convenio de colaboración con las empresas ferroviarias que estipula disposiciones de confidencialidad. Con esta matriz OD ferroviaria, se encuentran las rutas optimales (ruta más corta) en la red ferroviaria, dado que la circulación vehicular en esa red está bastante controlada y no tiene la versatilidad de rutas alternas que se tiene en una carretera.

La matriz OD de movimientos carreteros se obtuvo de estudios previos de reparto modal óptimo realizados por el IMT, y en una primera versión correspondieron a estimaciones del año 2010. Con esta matriz inicial se generan los primeros patrones de flujo carretero, los cuales suelen compararse con los flujos estimados que se obtienen de conteos vehiculares en las carreteras. Estos conteos o aforos vehiculares se obtienen de los Datos Viales que publica regularmente la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT y contienen la información del tránsito diario promedio anual (TDPA) en la red carretera nacional.

Los flujos estimados por el modelo Y se comparan con los flujos estimados de los aforos del TDPA X con una comparación directa entre las variables. La relación que se busca es una lineal del tipo: $Y = mX$, donde se espera que la pendiente de la recta sea cercana a uno y la dispersión de los puntos alrededor de la recta ideal $Y = X$ sea razonablemente pequeña.

El procedimiento de ajuste de una matriz OD de movimientos carreteros respecto a los aforos vehiculares en la red se hace con el método de Nielsen. Este método considera los aforos vehiculares como variables aleatorias y puede manejarse con cualquier criterio de asignación (equilibrio del usuario, del sistema, todo-o-nada, etc.), por lo que resulta adecuado para la modelación. La rutina de ajuste por el método de Nielsen se encuentra disponible en TransCAD (Caliper, 2013).

El método se implementa en un algoritmo iterativo que hace los ajustes en las entradas de la matriz OD original hasta que se llega a un punto en el que las diferencias entre los flujos que se pronostican con la matriz ajustada y los flujos que se esperan con base en los aforos vehiculares en la red son razonablemente pequeñas (Nielsen, 1998).

En la modelación de los flujos carreteros se aprovechó la desagregación de la información original por tipo vehicular para hacer las comparaciones entre flujos generados por el modelo y flujos estimados con el TDPA en la red carretera.

En las figuras a continuación se muestran los diagramas de dispersión de los flujos estimados con el modelo y los correspondientes a conteos vehiculares para las cinco principales configuraciones de carga en carretera: C2, C3, T3S2, T3S3 y T3S2R4 con datos de 2014. En todos los casos se muestra la ecuación de regresión estimada y el valor del coeficiente de determinación R^2 .

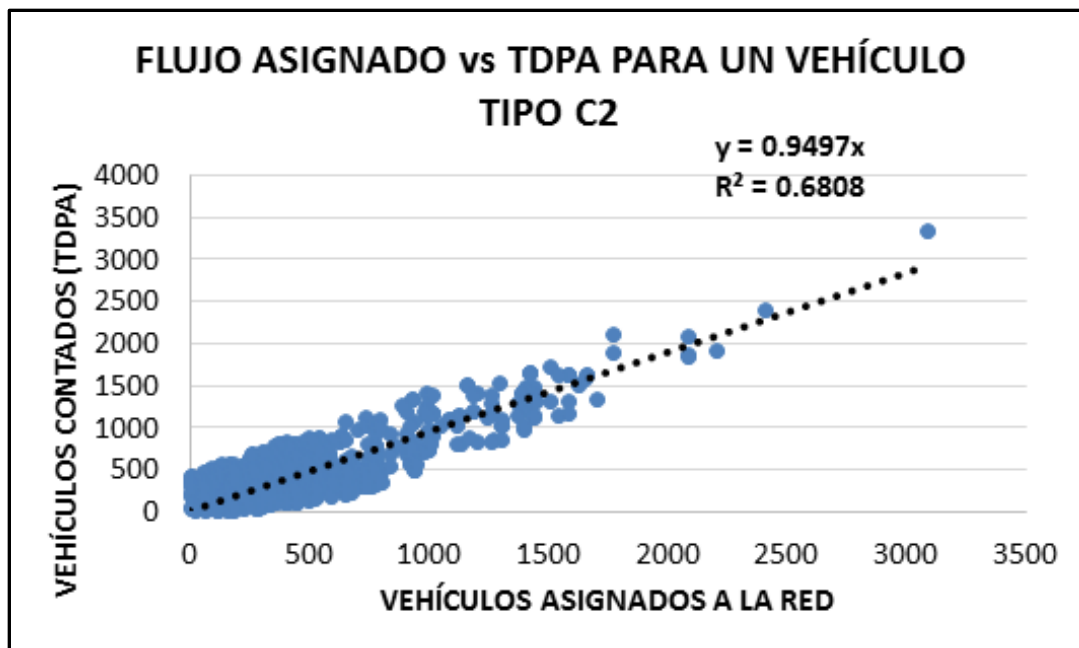


Figura 5.1. Flujos modelados vs aforos vehiculares para camiones C2; datos 2014 (fuente: elaboración propia).

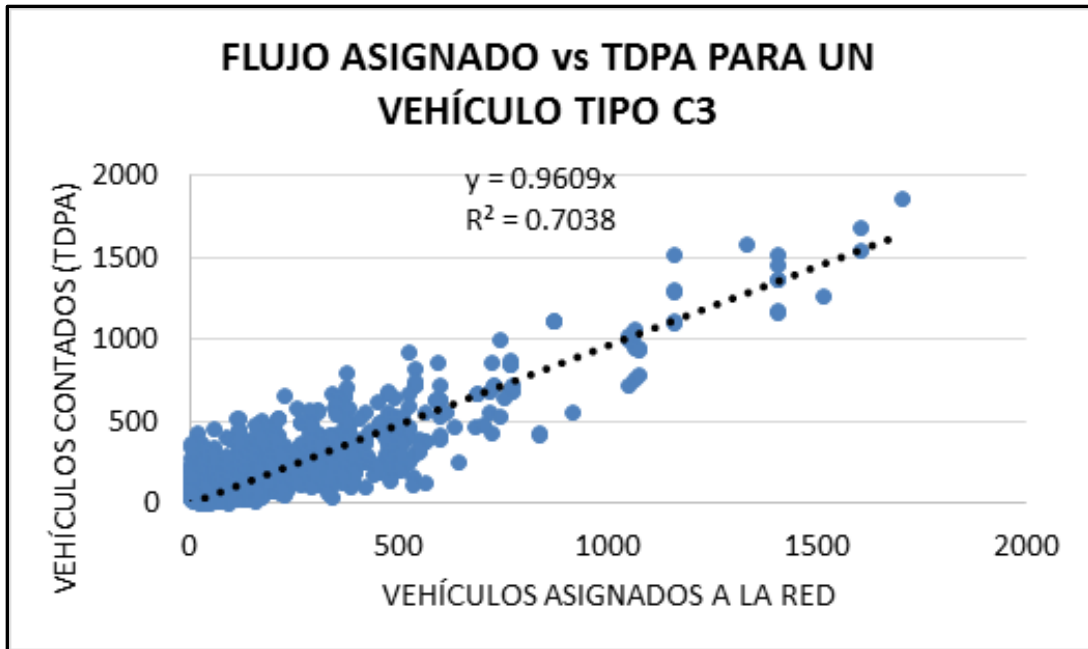


Figura 5.2. Flujos modelados vs aforos vehiculares para camiones C3 (fuente: elaboración propia).

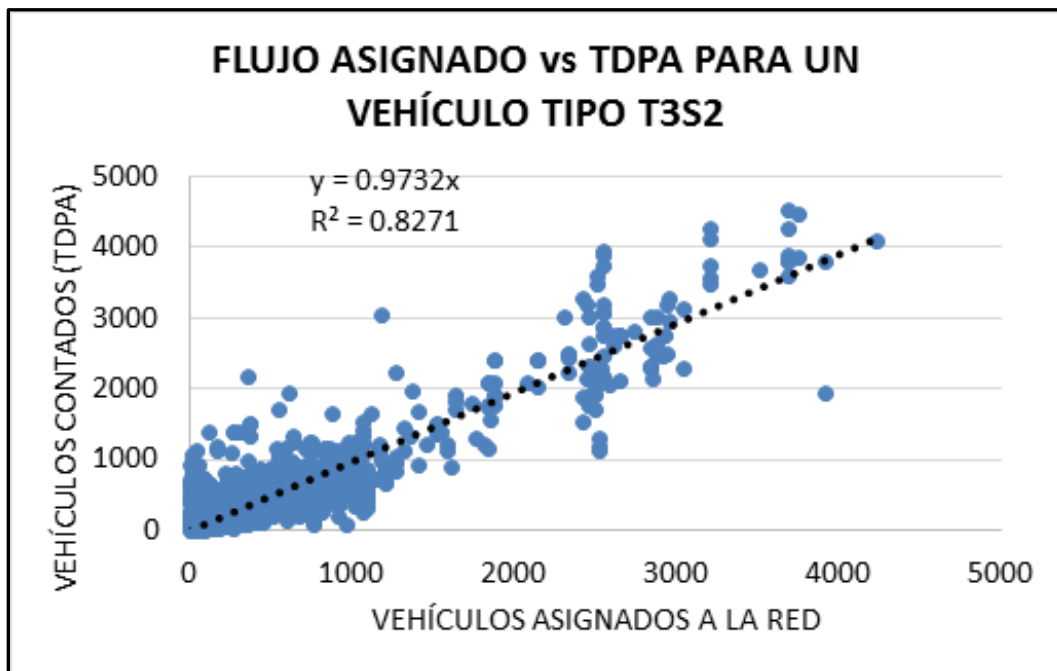


Figura 5.3. Flujos modelados vs aforos vehiculares para camiones T3S2; datos 2014 (fuente: elaboración propia).

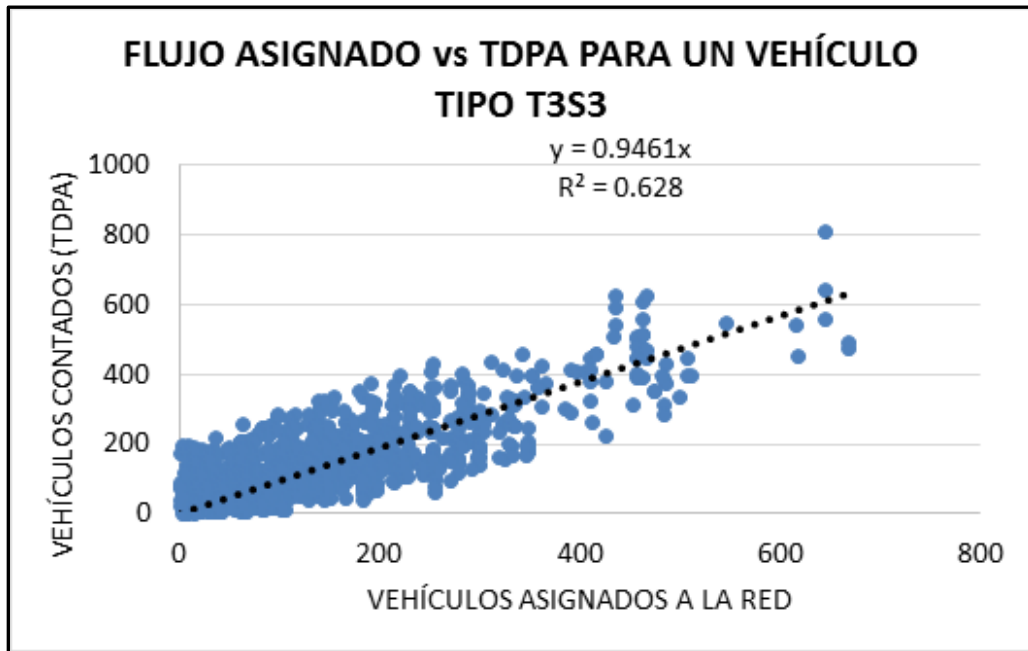


Figura 5.4. Flujos modelados vs aforos vehiculares para camiones T3S3; datos 2014 (fuente: elaboración propia).

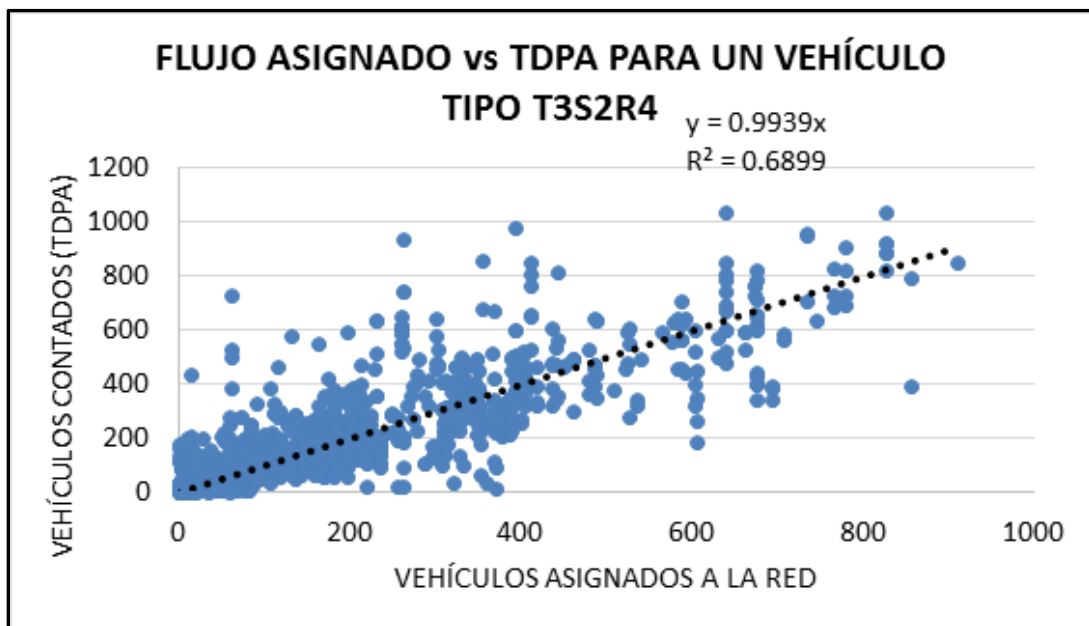


Figura 5.4. Flujos modelados vs aforos vehiculares para camiones T3S2R4; datos 2014 (fuente: elaboración propia).

En las gráficas mostradas puede verse que la densidad de la nube de puntos es en general mucho mayor en el rango bajo de los volúmenes vehiculares, y que los puntos más dispersos corresponden a valores altos de los flujos.

Esta disposición puede tener alguna relación con algunos inconvenientes en el uso de la función de volumen-demora BPR, que la literatura ha reportado. Consiste básicamente en que, según los valores de alfa y beta utilizados, es posible generar en algunos tramos de la red volúmenes considerablemente grandes, aun cuando sólo sea en unos cuantos casos. Este comportamiento de la función BPR ha llevado a proponer alternativas para las funciones volumen-demora, entre ellas, el uso de la función Cónica o la de Akcelik para representar la congestión, comentadas en la sección 4.1.

La tabla 5.1 enseguida resume las características de los ajustes para cada tipo vehicular. En la tabla, las pendientes de las relaciones lineales entre el flujo modelado y el flujo de los aforos resultaron bastante cercanas a uno. Los coeficientes de determinación R^2 resultaron en general con valores moderados, siendo el menor 0.628 para la configuración vehicular T3S3.

Tabla 5.1. Caracterización del ajuste de la matriz OD carretera por tipo vehicular (fuente: elaboración propia).

Tipo vehicular	Con Matriz original		Con Matriz Ajustada	
	Ecuación $Y = X$	Coef. R^2	Ecuación $Y = X$	Coef. R^2
C2	$Y = 0.0824X$	0.3470	$Y = 0.9497X$	0.6808
C3	$Y = 0.2558X$	0.3577	$Y = 0.9609X$	0.7038
T3S2	$Y = 0.4071X$	0.3458	$Y = 0.9732X$	0.8271
T3S3	$Y = 0.2816X$	0.1464	$Y = 0.9461X$	0.628
T3S2R4	$Y = 0.2721X$	0.3098	$Y = 0.9939X$	0.6899

En una segunda etapa de desarrollo del modelo de asignación se espera ensayar el uso de estas funciones y comparar los resultados de los ajustes para la matriz OD carretera, a fin de mejorar estas representaciones.

5.2 Un ejemplo de análisis de caso

El modelo de asignación en la red bimodal puede usarse para estimar flujos con base en distintos criterios de optimización a partir de la información origen-destino disponible. Una ventaja de tener el modelo bien ajustado es que con los supuestos operativos en función del modo, la información O-D de cada uno y las funciones de volumen-demora usadas se pueden agregar a la red tramos de prueba que aún no se construyen en proyectos de infraestructura de interés para la planeación.

Un ejemplo de esto es el tramo corto Guadalajara-Aguascalientes, anunciado por la DGTFM en julio de 2014 en el marco de la vigésima edición de la Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres, celebrada en Acapulco, Gro. (Quintana, M. T21 2014). En el evento, se ofreció como primera estimación de los beneficios esperados un ahorro de 16 horas en el trayecto original y una posible demanda de nueve millones 600 mil toneladas anuales. Este acortamiento forma parte de la cartera de proyectos de infraestructura de la actual administración.

Aun cuando no fue posible conseguir el trazo detallado del proyecto de construcción, se agregó una posible ruta en la red bimodal para representar este proyecto y se corrió el modelo de asignación de flujos para estimar el potencial de flujo resultante en ese nuevo tramo. En la figura 5.5 se muestra el resultado del modelo de asignación considerando este nuevo tramo.

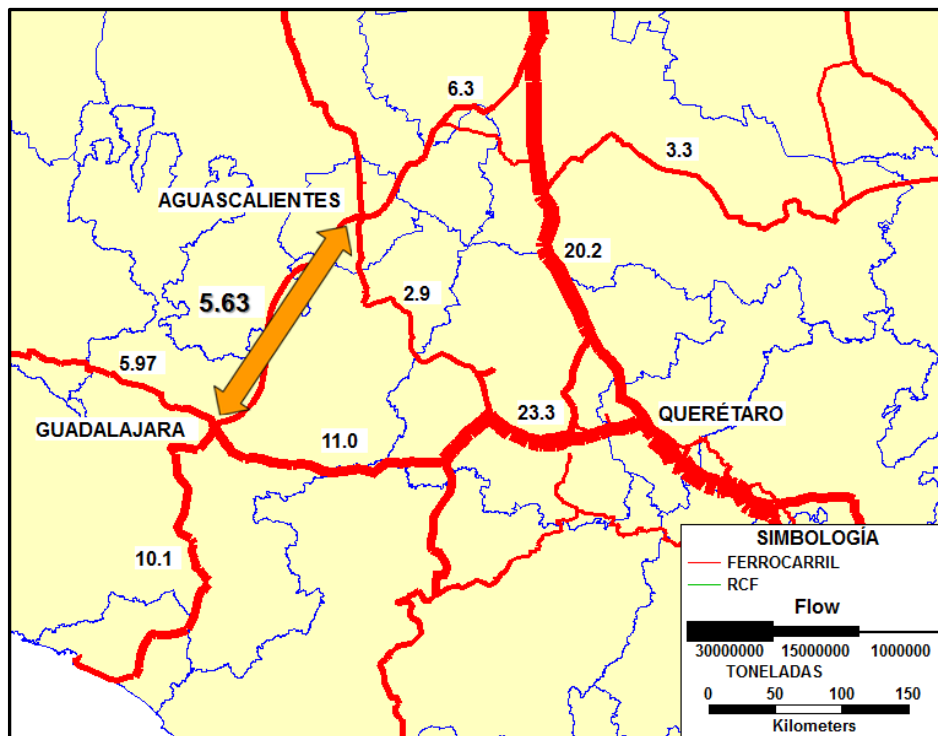


Figura 5.5. Modelado del flujo potencial en el tramo corto Guadalajara-Aguascalientes (*fuentes: elaboración propia*).

Para el tramo agregado a la red, ya que la información oficial de trazado es aún confidencial, se consideraron aspectos de pendiente del terreno y obstáculos geográficos para su diseño, el cual resultó de 209 km, aproximadamente un 11% más largo que el valor de 188 km anunciado por la DGTFM en 2014.

El modelado de este nuevo tramo consideró solamente el tiempo de traslado en la red bimodal, que se sabe es mejor en general para el autotransporte. No obstante, la primera estimación del flujo potencial de este nuevo tramo resultó de cinco millones 630 mil toneladas, aproximadamente el 59% del flujo proyectado durante el anuncio oficial del proyecto.

La inclusión de mejoras en el modelo de asignación, particularmente los costos de operación vehicular para los dos modos, y el trazo oficial del tramo proyectado permitirán obtener mejores estimaciones del flujo potencial de carga en este tramo de acortamiento.

El ejercicio mostrado es un ejemplo del uso del modelado de asignación para propósitos de planeación del sistema de transporte terrestre, y se espera que en etapas futuras de desarrollo sea posible considerar otros cambios de infraestructura que sean de interés para el sector.

6. Conclusiones y trabajo futuro

Esta primera etapa de desarrollo del Modelo Nacional de Transporte ha reunido los componentes básicos para continuar el trabajo de actualización de datos de las redes carretera y ferroviaria, así como información más reciente de orígenes y destinos que permiten mejorar los pronósticos del comportamiento de los flujos terrestres de carga en el país.

El modelo actual está compuesto por los elementos principales:

- e) El conjunto de supuestos de comportamiento de los flujos según el tipo de producto y las prácticas operativas de cada modo.
- f) Una red bimodal que representa las redes carretera y ferroviaria operando conjuntamente con interacciones en las terminales intermodales.
- g) Los datos de origen y destino de los movimientos de carga.
- h) Las funciones volumen-demora que replican el fenómeno de la congestión carretera y los criterios de equilibrio, que en esta primera etapa se centran solamente en los tiempos de traslado en la red bimodal.

Con estos elementos, el modelo actual ha generado resultados congruentes, y muestra pronósticos de flujo que privilegian el movimiento por carretera en la mayoría de los casos, debido a los mejores tiempos de traslado en las rutas del autotransporte.

Los ejercicios en los que se modelaron por separado las redes carretera y ferroviaria para contrastar con la modelación en la red bimodal integrada mostraron también congruencia considerando el criterio del tiempo de traslado en las distintas rutas, y sirvieron para verificar las transferencias efectivas de carga entre los dos modos, permitiendo analizar casos particulares de transferencia en algunas estaciones intermodales de interés.

Estos primeros resultados son parte de la validación del modelo, proceso en el que se verifica que las respuestas obtenidas corresponden a lo esperado conforme a los supuestos que se han adoptado. En desarrollos posteriores de la modelación se incluirán estimaciones de los costos operativos de cada modo, y se repetirán los ejercicios de pronóstico de flujos con las redes ferroviaria y carretera por separado contrastando con los pronósticos en la red bimodal completa.

Las matrices OD utilizadas también permitieron afinar la información origen-destino utilizada en el modelo. Para la parte ferroviaria se pudo utilizar información reciente de movimientos ferroviarios obtenida directamente de la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal (DGTFM) gracias a un convenio

de colaboración con el IMT amparado en el marco del Comité Técnico Especializado de Información Económica y Operativa del Sector Transporte (CTE-IEOST) que manejan conjuntamente el INEGI, la SCT y el IMT.

Para la parte carretera, a partir de una matriz OD de 2010, se estableció el procedimiento de ajuste utilizando el método de Nielsen, de amplio uso en la práctica de planeación del transporte y disponible en TransCAD. Este método permite ajustar las entradas de la matriz OD carretera para que las diferencias observadas entre los flujos pronosticados por el modelo con esa matriz y los flujos deducidos de conteos vehiculares en la red (aforos en carreteras) sean mínimas. Los datos de aforos vehiculares en la red carretera federal se obtuvieron de los Datos viales que publicó la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT en su edición más reciente de 2014.

Otro aspecto cubierto en esta primera etapa del Modelo Nacional de Transporte fue el inicio de procesos de migración de trabajos previos desarrollados en TransCAD hacia el software Visum, disponible en el IMT, gracias a un convenio de colaboración tecnológica con la empresa PTV que lo produce. Visum es un software de planeación del transporte ampliamente usado y de reconocido prestigio en el ambiente del transporte, y el IMT cuenta con la versión más reciente en operación para efectuar tareas de modelado.

De esta primera experiencia de modelación del transporte terrestre de carga, se pudieron detectar las principales líneas de acción para mejorar el modelo y afinar los pronósticos que se generarán en el futuro. Entre estas líneas de acción se han considerado las siguientes:

1. Se buscará completar la información de las terminales intermodales aprovechando datos recientes obtenidos de la DGTFM. En el modelo actual se cuenta con información de 43 terminales intermodales operando en el país. La información más reciente indica que se tienen cerca de 69 terminales intermodales o estaciones de transferencia de carga entre carretera y ferrocarril que pueden considerarse para la modelación.
2. Será conveniente actualizar la información de la red ferroviaria con datos recientes de mayor detalle en el trazo de esta red (características geométricas, túneles, puentes, laderos, etc.), obtenidos de la DGTFM como parte de la colaboración entre el IMT y la SCT en el marco del CTE-IEOST.
3. Ya que las redes actuales no tienen la información completa de pendientes y curvatura que se requiere para calcular costos de operación, se buscará completar esta información para la red bimodal, incluidos datos del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) en carreteras para las estimaciones de cálculo de costos de operación vehicular.
4. Una vez completada la información de curvaturas, pendientes y rugosidad en carreteras, se buscará generar las rutinas de cálculo de operación

vehicular tanto para movimientos carreteros con la metodología del Banco Mundial (*Vehicle Operating Cost* del modelo HDM-III) como con datos estimados de costos ferroviarios ajustados al crecimiento nacional de precios con el INPP.

5. Otro objetivo será extender la modelación de flujos vehiculares en la red bimodal con las funciones de impedancia cónica y de Akcelik, como una alternativa para el uso de la función BPR propuesta para México. Esta línea de acción se propone para seguir las recomendaciones de la literatura al respecto, puesto que se señalan algunos inconvenientes de la función BPR para ciertos rangos de valores de sus parámetros α y β que podrían sobreestimar los flujos en algunos tramos de la red, complicando la interpretación de los resultados. Con esta línea de trabajo se busca encontrar también propuestas de parámetros de ajuste para las funciones cónica y de Akcelik para usarse en la red nacional.

Estas líneas de trabajo serán la guía para la segunda etapa de desarrollo del Modelo Nacional de Transporte, en la cual el enfoque se centrará en la actualización de los datos que alimentan al modelo, la mejora en los criterios de asignación de flujos al incluir costos de operación y la exploración de resultados del modelo mejorado en diversos escenarios de planeación que actualmente son de interés en nuestro país.

Bibliografía

Caliper Corporation (2013), *Travel Demand Modeling with TransCAD 6.0: User's Guide*.

Del Castillo, G., Peschard Sverdrup, A. y Arón Fuentes, N. (2007), *Estudio de puertos de entrada México-Estados Unidos: análisis de capacidades y recomendaciones para incrementar su eficiencia*, El Colegio de la Frontera Norte, Tijuana, Baja California, México, disponible en: <http://www.colef.mx/estudiosdecolef/estudio-de-puertos-de-entrada-mexico-estados-unidos-analisis-de-capacidades-y-recomendaciones-para-incrementar-su-eficiencia/>.

ESRI. (1997). *ESRI Shapefile Technical Description*. ESRI White Paper, July 1998. USA.

IMT (2015), *Red Nacional de Caminos*, Instituto Mexicano del Transporte, disponible en: <http://www.imt.mx/micrositios/sistemas-de-informacion-geoespacial/servicios-tecnologicos/red-nacional-de-caminos/acerca-de.html>.

INEGI.(2015). *Red Nacional de Caminos*. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825278724>

International Organization for Standardization-ISO. (2015). *ISO 14825:2011 Intelligent transport systems–Geographic Data Files (GDF)–GDF5.0*. En: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=54610.

Moreno, E., Rico, O., Bustos, A. Martner, C. y Montoya, R. (2014a). *REPARTO MODAL ÓPTIMO DEL TRANSPORTE TERRESTRE DE CARGA EN MÉXICO. 1ª. ETAPA*. Publicación Técnica No. 413. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro. México

Moreno, E., Rico, O., Bustos, A. Martner, C. y Montoya, R. (2014b). *REPARTO MODAL ÓPTIMO DEL TRANSPORTE TERRESTRE DE CARGA EN MÉXICO. SEGUNDA. ETAPA*. Publicación Técnica No. 435. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro. México.

Moreno, E., Rico, O., y Bustos, A.. (2014). *Funciones volumen-demora en la modelación de flujos vehiculares*. Publicación Técnica No. 427. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro. México.

Nielsen, O. A. (1998), "Two New Methods for Estimating Trip Matrices from Traffic Counts", en: *Travel Behaviour Research: Updating the State of Play*, pp. 221-250, J. Ortúzar, D. Hensher y S. Jara Díaz (eds.), Pergamon Press.

Ortúzar, J. D. and Willumsen, L. (2011). *Modelling Transport*. 4th edition. John Wiley. Chichester. UK.

PTV. (2014). *PTV VISUM14 MANUAL*. PTV AG, Karlsruhe, Germany.

Quintana Martí. (2014), "Tramo corto Aguascalientes-Guadalajara acortará trayecto 16 horas", en: Revista T21, disponible en: <http://t21.com.mx/ferroviario/2014/07/31/tramo-corto-aguascalientes-guadalajara-acortara-trayecto-16-horas>.

SCT-CGPMM (2015), *Anuario estadístico de los puertos de México*. Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, disponible en: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/CGPMM/U_DGP/estadisticas/2014/Anuario/Anuario_2014.html.

Speiss, H. (1990), "Conical Volume-Delay Functions", en: *Transportation Science*, vol. 24, núm. 2, ORSA, Baltimore, Estados Unidos.

Willumsen, L. G. (2000), "Travel Networks", en: *Handbook of Transport Modelling*, editado por D. A. Hensher y K. J. Button, Elsevier Science Ltd., Reino Unido.



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

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