



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Estimación de matrices O-D del autotransporte de carga basada en cartas porte

Eric Moreno Quintero
Elizabeth De la Torre Romero
Jared Piña Barcenas

Publicación Técnica No. 639
Sanfandila, Qro.
2021

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Transporte Integrado y Logística del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Eric Moreno Quintero, la Dra. Elizabeth De la Torre y el M. en C. Jared Piña Barcenás.

La investigación es el producto final del proyecto de investigación interna TI-12-20 “Estimación de matrices O-D del autotransporte de carga basada en cartas porte”.

Contenido

	Página
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	vii
Sinopsis.....	ix
Abstract.....	xi
Resumen Ejecutivo	xiii
Introducción.....	1
1 La carta de porte en el autotransporte de carga	3
2 Matrices O-D en el transporte carretero	15
2.1 Características de las matrices O-D	16
3 Análisis estadístico de origen y destino.....	25
3.1 Líneas de deseo	29
3.2 Las distancias recorridas	34
3.3 La representatividad y el tamaño de la base de datos	36
4 Metodología de matrices O-D	41
4.1 Métodos básicos de estimación	42
4.2 Estimación con factores de crecimiento	43
4.3 El modelo gravitacional	48
Conclusiones.....	55
Bibliografía	57

Índice de figuras

Figura 1.1. Serie de tiempo de la variable tkm promedio mensual (miles), 2009 – 2018	5
Figura 1.2. Intervalo de confianza al 95% para la variable tkm promedio mensual (miles)	6
Figura 1.3. Gráfica que compara los valores actuales contra el promedio móvil de orden 3	6
Figura 1.4. Pantalla de acceso al Sistema de Información de Cartas de Porte del Autotransporte Federal de carga.....	7
Figura 1.5. Salida gráfica del SICaP-IMT a la consulta de principales tipos de carga en toneladas totales	8
Figura 1.6. Gráficas generadas por el SICaP-IMT	9
Figura 1.7. Estacionalidad en el movimiento de maíz de acuerdo a la fecha de salida de los embarques registrados en la muestra 2018	11
Figura 1.8. Mapa con principales pares O-D con origen en E.U.A. y destino en México.....	12
Figura 2.1. Estructura de la matriz origen-destino.....	15
Figura 3.1. Cartas de porte colectadas en 2010 – 2018.....	25
Figura 3.2. Número de pares O-D interestatales 2010 – 2018.....	26
Figura 3.3. Pares O-D con origen y con destino interestatal 2010 – 2018	28
Figura 3.4. Pares O-D viajes interestatales 2010.....	30
Figura 3.5 Pares O-D viajes interestatales 2013.....	30
Figura 3.6. Pares O-D viajes interestatales 2010 – 2018.....	31
Figura 3.7. Pares O-D viajes de importación EUA a México 2010 –2018	32
Figura 3.8. Pares O-D viajes de exportación EUA a México 2010 –2018	32
Figura 3.9. Pares O-D viajes intermunicipales en 2018	33

Figura 3.10. Pares O-D interestatales. Tonelajes movidos en 2018	34
Figura 3.11. Distribución de distancias recorridas en pares O-D 2017 y 2018..	35
Figura 3.12. Distribución de toneladas movidas en pares O-D 2018	36
Figura 3.13. Número de viajes que genera cada estado. 2010 –2018.....	37
Figura 3.14. Número de viajes que atrae cada estado. 2010 –2018.....	36
Figura 4.1. Ejemplos de funciones de disuasión	50
Figura 4.2. Distribución de los tiempos de recorrido en la muestra y con el modelo gravitacional.	53

Índice de tablas

Tabla 2.1. Matriz O-D para número de viajes entre Querétaro y estados colindantes. Datos de la muestra 2010 de cartas porte	16
Tabla 2.2a. Matriz O-D viajes interestatales 2018 1ª. parte	17
Tabla 2.2b. Matriz O-D viajes interestatales 2018 2ª. parte	18
Tabla 2.3. Matriz O-D viajes con destino en el extranjero 2010 –2018	19
Tabla 2.4. Matriz O-D viajes con origen en el extranjero 2010 –2018.....	20
Tabla 2.5a. Matriz O-D interestatal. 1ª. parte. Tonelajes movidos en 2018	20
Tabla 2.5b. Matriz O-D interestatal. 2ª. parte. Tonelajes movidos en 2018	21
Tabla 2.5c. Matriz O-D interestatal. 3ª. parte. Tonelajes movidos en 2018.....	22
Tabla 3.1. Totales de cartas porte, número de pares O-D y promedio de cartas por par O-D en el periodo 2010 –2018.....	27
Tabla 3.2. Pares O-D con origen y con destino interestatal 2010 –2018	28
Tabla 3.3 Características básicas. Bases de datos. Cartas porte vs EECAN ...	39
Tabla 4.1. Matriz O-D estimada del modelo gravitacional con la función de disuasión exponencial $e^{-0.145d_{ij}}$	52

Sinopsis

La matriz origen-destino (matriz O-D), que registra los viajes circulando entre cada par origen –destino de la red carretera, es un insumo esencial para los modelos de asignación de tráfico que estiman las rutas utilizadas. Una matriz O-D puede construirse a partir de encuestas para identificar orígenes, destinos y número de vehículos que circulan. Alternativamente, conteos vehiculares en puntos particulares de la red pueden ayudar a construir la matriz O-D.

Este trabajo explora una fuente de datos distinta a las anteriores y que puede ser útil para construir matrices O-D. Se trata de la carta de porte, que es un documento que se elabora con cada embarque que mueve un camión y contiene al menos origen, destino, tipo de carga, peso y flete cobrado.

La disponibilidad de cartas porte surgió de un estudio del IMT para la Dirección General de Autotransporte Federal, que ha integrado una base de datos con muestras de cartas porte del autotransporte federal por varios años.

En este trabajo, se revisa el concepto de matriz O-D, sus características, y métodos de estimación, y se muestran los primeros ejercicios de integración de matrices usando la información de la base de datos de cartas porte que resguarda el IMT.

Abstract

The origin-destination matrix (O-D matrix), registering trips going among each origin-destination pair in the road network, is an essential input to traffic assignment models that estimate the used routes. It is possible to build an O-D matrix from surveys in order to identify origins, destinations and number of vehicles circulating. Alternatively, vehicle counts on particular points in the network can help to build the matrix.

This work explores a source distinct from previous ones, and that can be useful to build O-D matrices. It is about the bill of lading, a document prepared with each truck shipment, containing at least origin, destination, freight type, weight and haul charge.

The availability of bills of lading arose from an IMT study prepared for the General Direction for Federal Road Transportation, which has integrated a database with samples of bill of lading from several years.

In this work, the concept of the O-D matrix, its characteristics, and estimation methods are reviewed, and the first matrix integration exercises are shown using the information from the bills of lading database kept by the IMT.

Resumen ejecutivo

En la planeación del sistema carretero, tener matrices origen–destino confiables, es esencial para utilizar los modelos de asignación de tráfico que permiten pronosticar las rutas utilizadas en la red carretera.

La construcción de una matriz O-D puede estar basada en información colectada en encuestas de camino, encuestas a transportistas o en conteos vehiculares (aforos) realizados en puntos estratégicos de la red. Estas formas de conseguir la información suelen tener costos asociados, que cuando se enfrentan restricciones presupuestales, limitan los alcances de la información obtenida.

En algunos trabajos del IMT, se han obtenido matrices O-D con datos del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional (EECAN) del IMT, basado en el estudio anual Origen y Destino que fue publicado por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT entre 2005 y 2017. Desafortunadamente, este estudio se suspendió en 2018 debido a restricciones presupuestales, y no ha resurgido al menos, hasta el primer semestre de 2020.

Por otra parte, el IMT inició en 2010 un estudio anual de cartas porte para la Dirección General de Autotransporte Federal (DGAF), quien provee la información, para caracterizar el desempeño del autotransporte de carga y apoyar la planeación del subsector. El antecedente de la suspensión del estudio origen – destino de la DGST planteó al IMT la oportunidad de usar datos de cartas de porte del autotransporte federal como insumo básico para generar las matrices O-D para el autotransporte de carga.

El objetivo central de este trabajo es explorar una metodología basada en la información de las cartas de porte del autotransporte federal, que permita generar matrices O-D que sirvan para los procesos de planeación del sistema carretero.

En el capítulo 1 se describe el origen de la carta porte en el autotransporte federal, con los requisitos de información que debe cumplir de acuerdo al Reglamento de Autotransporte Federal y Servicios Auxiliares. También se menciona allí la aprobación del uso de carta porte en formato de Comprobante para Amparar el Transporte de Mercancías Digital por Internet (CFDI) publicada en el Diario Oficial de la Federación en diciembre de 2015, lo que ha motivado al IMT a buscar conjuntamente con la DGAF, negociaciones con el Servicio de Administración Tributaria (SAT) para tener acceso a los archivos digitales de cartas porte que recibe el SAT de los transportistas.

Continúa el capítulo describiendo los indicadores que se han obtenido del estudio de cartas porte mencionado, y que han apoyado las tareas de planeación en la

DGAF. La información de cartas porte se ha estructurado en el Sistema de Información de Cartas Porte (SICaP) que procesa las muestras de cartas que proporciona la DGAF, permite generar varios reportes con algunos indicadores de interés y se mantiene en resguardo por el IMT.

En el capítulo 2 se revisa el concepto de matriz origen – destino comúnmente conocido en la literatura de transporte, con las características esperadas en la información que debe contener. Se muestran breves ejemplos ilustrativos de la información que puede obtenerse del SICaP para generar matrices O-D, como son: el número de viajes entre cada par O-D en agregaciones estatal y municipal, el número de viajes con destinos en el extranjero, entre los cuales se detectaron Belize, Canadá, El Salvador, Guatemala y Estados Unidos. Análogamente, el número de viajes con origen extranjero, los cuales se detectaron provenientes de Canadá, Guatemala y Estados Unidos. En los pares O-D involucrados con origen o destino extranjero, se observa la gran mayoría relacionada con Estados Unidos.

En el capítulo 3 se hace un análisis estadístico de la información de la base de datos de cartas porte, donde se observa la evolución de las muestras obtenidas en el periodo 2010 – 2018, con tendencia decreciente desde 2014. Se describe también el número de pares O-D encontrados en cada año, y se muestra la distribución estatal de pares que inician y pares que llegan en los estados.

En esta distribución interestatal, destacan: Morelos que es origen de 31 pares O-D y destino de 19 pares, indicando mayor generación que atracción de viajes. Quintana Roo, que es origen de 13 pares y destino de 23, así como Tabasco que es origen de 14 pares y destino de 26, indicando una mayor atracción que generación de viajes.

En este capítulo también se muestran mapas con las líneas de deseo que se observan de los pares O-D detectados en cada año de la base de datos. Las líneas de deseo muestran los mayores flujos de viajes en los pares Michoacán – Guerrero y Chiapas –Quintana Roo. Entre las líneas de menor volumen se observan enlaces entre puntos del interior del país como Tlaxcala, Puebla y Zacatecas, con Yucatán en el sureste.

En cuanto a nivel de agregación, además de los pares O-D interestatales se muestra a nivel inter-municipal el ejemplo de líneas de deseo con número de viajes entre municipios del año 2018, donde la densidad de líneas aumenta notablemente, y muestra mayor detalle de los movimientos en el mapa.

Otros mapas con líneas de deseo que se muestran son los relacionados a orígenes en el extranjero, principalmente de Estados Unidos con destinos en Chihuahua, Sonora y Nuevo León, y líneas de deseo con destino en el extranjero, también con predominio de exportaciones a Estados Unidos principalmente desde Chihuahua, Sonora y Michoacán. Mapas de líneas de deseo con datos de tonelajes movidos entre cada par O-D, también se muestran, ya que ese valor también está en la base de datos.

Luego de comentar las líneas de deseo, el capítulo 3 comenta la cuestión de las distancias recorridas estimadas para los pares O-D encontrados en la base de datos. La distribución de las distancias recorridas es un elemento de interés en la evaluación de una matriz O-D, ya que cuando la matriz es usada como insumo de un modelo de asignación de tráfico, la aproximación que se logre de la distribución de distancias recorridas que pronostique el modelo de asignación con la distribución observada en el año base determina qué tan adecuada es la matriz O-D usada en el proceso.

Finalmente, el capítulo 3 termina mostrando dos mapas de calor ilustrando la distribución de orígenes y de destinos en el periodo 2010 – 2018, donde se destaca la región central del país, y se nota una escasa representación de las zonas industriales del norte y de los puertos importantes, lo que refleja la necesidad de mejorar la representatividad de las muestras de cartas porte en futuras colectas de datos.

En el capítulo 4 se revisan las consideraciones básicas sobre la estructura que debe tener una matriz O-D, y se comenta su importancia para el modelado de asignación de tráfico, donde es un insumo necesario para pronosticar las rutas utilizadas en la red de transporte.

Considerando que la obtención de una matriz O-D derivada de algún muestreo o encuesta inicial es el primer paso para ajustar una matriz O-D que tenga la cobertura completa de la región de interés, en el capítulo 4 se revisan las dos técnicas básicas de estimación utilizadas para tal propósito:

- a) Método con factor de crecimiento para actualizar una matriz O-D con información previa.
- b) El modelo gravitacional, que estima los viajes entre cada par O-D considerando características de los orígenes y destinos, más una medida del costo del viaje ya sea por tiempo, distancia o costo monetario asociado.

Para el método de factor de crecimiento, se muestran los tres casos comúnmente usados en la práctica: 1) factor de crecimiento uniforme, 2) factor de crecimiento con una restricción, ya sea origen o destino y 3) factor de crecimiento con dos restricciones, tanto en origen como en destino.

Los problemas de ajuste con el factor uniforme y con una restricción son de aplicación directa y no tienen complicaciones. Los ajustes de factores con dos restricciones plantean un sistema de ecuaciones no-lineales que puede resolverse con técnicas de programación no-lineal. El ejemplo mostrado en el capítulo 4 se resuelve con el algoritmo Solver de Excel que usa el método GRG de gradiente reducido generalizado. En la práctica, sin embargo, es común usar un procedimiento de aproximaciones sucesivas (método de Fratar o de Furness) alternando entre el ajuste de la restricción en orígenes con el ajuste en destinos, cuyos pasos se muestran al final del ejemplo citado.

El capítulo 4 prosigue describiendo el Modelo Gravitacional, para estimaciones de mayor alcance que las obtenidas por métodos de factores de crecimiento, y se destaca la importancia de la función de disuasión (deterrence function) para el modelo. Esta función de disuasión es un modelo de la impedancia que hay para realizar un viaje entre un origen y un destino; es una función matemática continua y decreciente que representa el desaliento a la intención de viajar conforme aumenta el costo generalizado del viaje entre origen y destino. Como costo generalizado se suele usar el tiempo de viaje, la distancia o algún costo generalizado que incluya esos dos factores más costos monetarios asociados.

Las tres principales formas analíticas usadas para función de disuasión comentadas son:

a) Función exponencial: $f(d_{ij}) = e^{-c(d_{ij})}$, $c > 0$

b) Función potencia: $f(d_{ij}) = d_{ij}^{-b}$, $b > 0$

c) Función combinada (función de Tanner)

$$f(d_{ij}) = a(d_{ij}^{-b})e^{-c(d_{ij})}, a > 0, c \geq 0$$

Donde d_{ij} es un elemento de costo generalizado del viaje entre origen y destino.

Las funciones de disuasión son importantes para la estimación de un modelo gravitacional. El proceso de calibración de los parámetros de la función de disuasión se hace de modo que el modelo gravitacional produzca una distribución de viajes lo más aproximada a la distribución que se observa en la zona de estudio. También es común que se prueben parámetros generados en estudios previos o en estudios a nivel nacional o regional del mismo tipo.

El capítulo 4 concluye mostrando un ejemplo de la distribución de los tiempos de recorrido de una muestra de pares O-D interestatal derivada de la base de datos de cartas porte y la correspondiente de un modelo gravitacional ajustado con una función de disuasión exponencial que se probó para ese efecto. Se termina observando que en la práctica los ajustes se suelen hacer empleando software especializado de planeación del transporte como TransCAD o Visum.

El capítulo 5 resume las conclusiones de este trabajo, haciendo notar que luego de la revisión del concepto de matriz O-D, sus requerimientos y características, se puede ver que la información de las cartas porte, efectivamente es adecuada para generar una matriz O-D para el autotransporte de carga.

Los métodos de factor de crecimiento, aunque ignoran datos de la red de transporte o de los cambios en la infraestructura, dan estimaciones razonables en el corto plazo, para iniciar una matriz de año base.

Para horizontes de planeación más amplios, conviene usar el modelo gravitacional, con una estimación adecuada de la función de disuasión que reproduzca aproximadamente las distribuciones de las distancias o los tiempos de los recorridos observados en la matriz inicial.

Queda, sin embargo, la limitación de la cantidad de información de las bases de datos, que hasta finales de 2020 sólo cubría el periodo 2010 – 2018, y la cuestión de la representatividad de las muestras de cartas porte que la han conformado.

Para abordar estos puntos, el IMT solicitó a la DGAF, reiniciar la colecta de muestras de cartas porte para 2019, 2020 y los sucesivos. Con esta información se ampliará la base de datos y se podrá mejorar la estimación de pares O-D.

Los pasos a seguir que consideramos para mejorar la información de cartas porte, son: continuar con el acopio, por lo pronto con los años atrasados de 2019 y 2020, asegurar las colectas de los años futuros, y utilizar el esquema de muestreo estratificado con los estratos considerando las flotas vehiculares estatales, propuesto por el IMT para el manejo de las cartas porte.

La implementación del muestreo estratificado como procedimiento regular en la colecta anual, así como la oportunidad de obtener grandes cantidades de cartas de porte electrónicas con el apoyo que brinde el SAT permitirá un mejor manejo de las bases de datos y en consecuencia mejores estimaciones de matrices O-D para el autotransporte de carga.

Este muestreo estratificado mejorará la representatividad de las cartas porte al tomar en cuenta las diferencias de generación y atracción de viajes en los estados, que reflejan en cierto modo los distintos grados de industrialización, flujos de comercio exterior y facilidades portuarias en todo el país.

Introducción

El movimiento de carga terrestre en México, de innegable valor para la actividad económica, fluye principalmente por el sistema carretero. Este hecho enfatiza la exigencia de que el sistema carretero nacional opere con eficiencia y seguridad para el traslado de la carga, y señala la necesidad de planear el desarrollo, la conservación y el mantenimiento de nuestra red carretera.

La planeación del sistema carretero requiere de información sobre los movimientos de carga para identificar las rutas más usadas, los cuellos de botella, la necesidad de ampliar o modernizar algunos tramos y, en general, las características del flujo vehicular que reclaman atención para mejorar la operación de la red carretera.

Una forma útil de organizar la información de los viajes de camiones de carga en la red carretera, es la Matriz origen-destino (matriz O-D), que es un arreglo tabular en el que cada casilla de la tabla registra el número de viajes de camiones de carga o en su defecto, las toneladas que se mueven entre el origen identificado en la fila y el destino identificado en la columna.

Algunas matrices O-D se han obtenido a partir de la serie del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional (EECAN) del IMT, el cual se ha basado en los estudios Origen y Destino publicados por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT entre 2005 y 2017. Esta serie de estudios origen-destino, sin embargo, se suspendió en 2018 debido a restricciones presupuestales, y no ha resurgido al menos, hasta el primer semestre de 2020.

Ante esta situación, buscar información de los flujos carreteros de carga de otras fuentes se vuelve relevante, y es allí donde se tiene la oportunidad de usar datos de cartas de porte del autotransporte federal como insumo básico para generar las matrices OD para el autotransporte de carga.

El objetivo central de este trabajo es explorar una metodología basada en cartas de porte del autotransporte federal, que permita generar matrices O-D que sean de utilidad en los procesos de planeación del sistema carretero.

En el contexto del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024 (PSCyT), este trabajo representa un apoyo para el:

OBJETIVO PRIORITARIO 2: Contribuir al desarrollo del país mediante el fortalecimiento del transporte con visión de largo plazo, enfoque regional, multimodal y sustentable, para que la población, en particular en las regiones de menor crecimiento, cuente con servicios de transporte seguros, de calidad y cobertura nacional. (SCT, 2020)

En el cual se señala una carencia en la que este trabajo puede contribuir a corregir:

La ausencia de una adecuada planeación en el sector transporte y la falta de inversión en proyectos estratégicos han ocasionado un crecimiento desordenado y desigual de la red de transporte que limita las oportunidades de inserción de las regiones sur y sureste, y de la población que habita en zonas marginadas.

En los capítulos siguientes se examinan los detalles necesarios para desarrollar una metodología de construcción de matrices O-D a partir de datos de cartas de porte del autotransporte federal.

1. La carta de porte en el autotransporte de carga

En el autotransporte de carga, la carta porte es el documento oficial de conocimiento de embarque para cualquier movimiento de carga en carretera. El Reglamento de Autotransporte Federal y Servicios Auxiliares en su Artículo 74, establece la obligación de los transportistas de emitir una carta de porte por cada embarque, que además de cumplir los requisitos fiscales vigentes, contenga al menos:

- I. Denominación social o nombre del autotransportista y del expedidor y sus domicilios;*
- II. Nombre y domicilio del destinatario;*
- III. Designación de la mercancía con expresión de su calidad genérica, peso y marcas o signos exteriores de los bultos o embalaje en que se contengan y en su caso, el valor declarado de los mismos;*
- IV. Precio del transporte y de cualquier otro cobro derivado del mismo;*
- V. Fecha en que se efectúa la expedición;*
- VI. Lugar de recepción de la mercancía por el autotransportista, y*
- VII. Lugar y fecha o plazo en que habrá de hacerse la entrega al destinatario. (SCT 2020a).*

La información contenida en las cartas porte del autotransporte resulta entonces de gran valor para fines de planeación del subsector; su conocimiento a nivel nacional tiene el potencial de revelar los pares origen-destino más relevantes según tipo de producto o por regiones del territorio nacional, así como el comportamiento de los fletes y las variaciones estacionales de los movimientos de carga. Esta información adecuadamente manejada, también podría auxiliar para estimar las principales rutas utilizadas, y así identificar la infraestructura carretera de mayor importancia y sus requerimientos de mejora y mantenimiento.

El 15 de diciembre de 2015, el Diario Oficial de la Federación, emitió la circular por la que se aprueban los modelos de Carta de Porte-Traslado o Comprobante para Amparar el Transporte de Mercancías pre-impresa y Carta de Porte o Comprobante para Amparar el Transporte de Mercancías Digital por Internet (CFDI).

“La carta porte es el título legal del contrato entre el transportista y el expedidor o usuario que contrata el servicio por cuyo contenido se decidirán las cuestiones que ocurran sobre su ejecución y cumplimiento, será el instrumento comprobatorio de la recepción o entrega de las mercancías, de su legal posesión, traslado o transporte en el servicio de carga del

autotransporte federal y que el transportista está obligado a emitir cubriendo los requisitos de la legislación de esta materia y los que corresponden al Servicio de Administración Tributaria para los efectos fiscales” (DOF: 15/12/2015).

En el año 2009 la Dirección General de Autotransporte Federal (DGAF) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, identificó la necesidad de disponer de información estadística referente a los movimientos de carga por carretera y sus características en el territorio de México; para hacer esto posible, solicitó al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) analizar las fuentes de información disponibles e identificar indicadores que pudieran construirse con la información disponible.

Este requerimiento impulsó el desarrollo de indicadores económicos para evaluar a este subsector; en este sentido, el IMT realizó el estudio “Indicadores Económicos en el Autotransporte de Federal de Carga” (Moreno E., De la Torre M.E., 2010).

De dicho estudio, se identificó que las cartas de porte a diferencia de otras fuentes¹, era el único documento con datos específicos por embarque como: flete cobrado por el servicio, descripción de la mercancía, toneladas, origen y destino, etc., considerándose como una excelente fuente de información para la generación de indicadores del movimiento de mercancías por autotransporte.

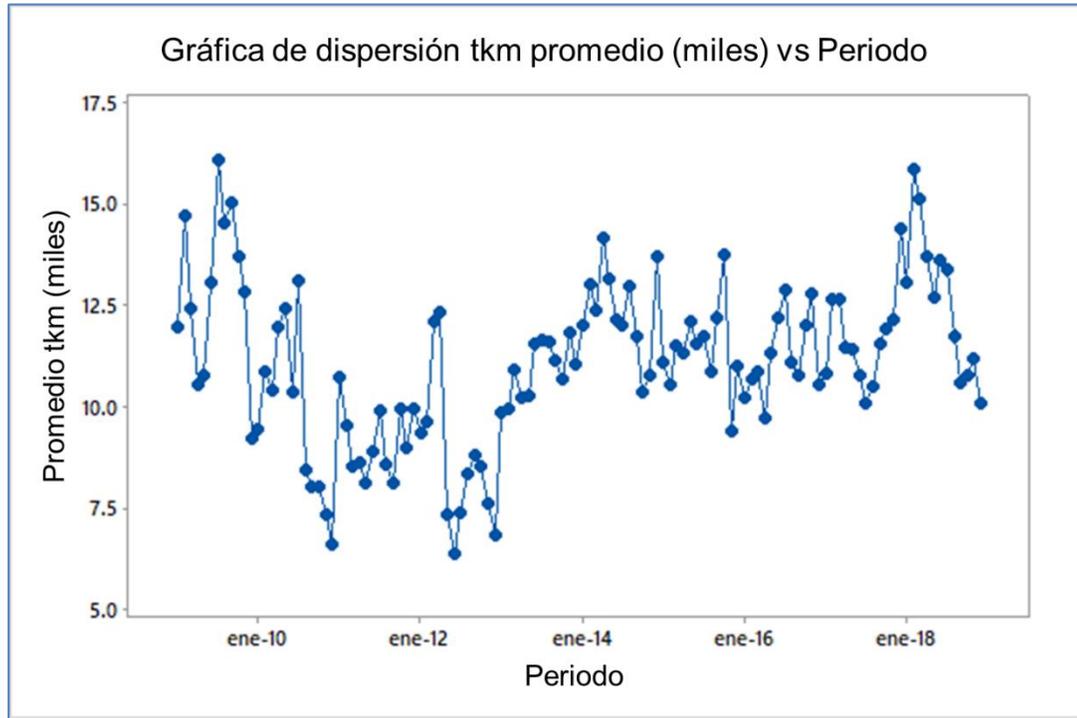
Este hallazgo dio origen al desarrollo de una serie de proyectos en la línea de investigación Análisis Estadístico de Cartas de Porte de Autotransporte Federal de Carga, que se ha llevado a cabo desde el 2009 hasta el 2018, consolidándose como una fuente de información, que año con año ha proporcionado indicadores relacionados con el movimiento de mercancías, como:

- Toneladas–kilómetro promedio por mes a nivel nacional,
- Flete tonelada-kilómetro promedio por estado origen,
- Flete tonelada-kilómetro promedio por tipo de carga,
- Toneladas promedio por tipo de carga,
- Toneladas promedio por origen,
- Principales flujos origen-destino por tipo de mercancía,
- Distancia promedio por origen,
- Distancia promedio por tipo de mercancía.

Estos indicadores, entre otros, han permitido dar seguimiento a los cambios y las tendencias del autotransporte de carga en el país, como se observa en la siguiente serie de figuras.

¹ DGAF, DGST, Inegi, Canacar, Anpact, USA-BTS.

La Figura 1.1 muestra la serie de tiempo 2009-2018 con datos de cartas porte. La variable es el promedio (en miles) de toneladas-kilómetro (tkm) del mes respectivo.

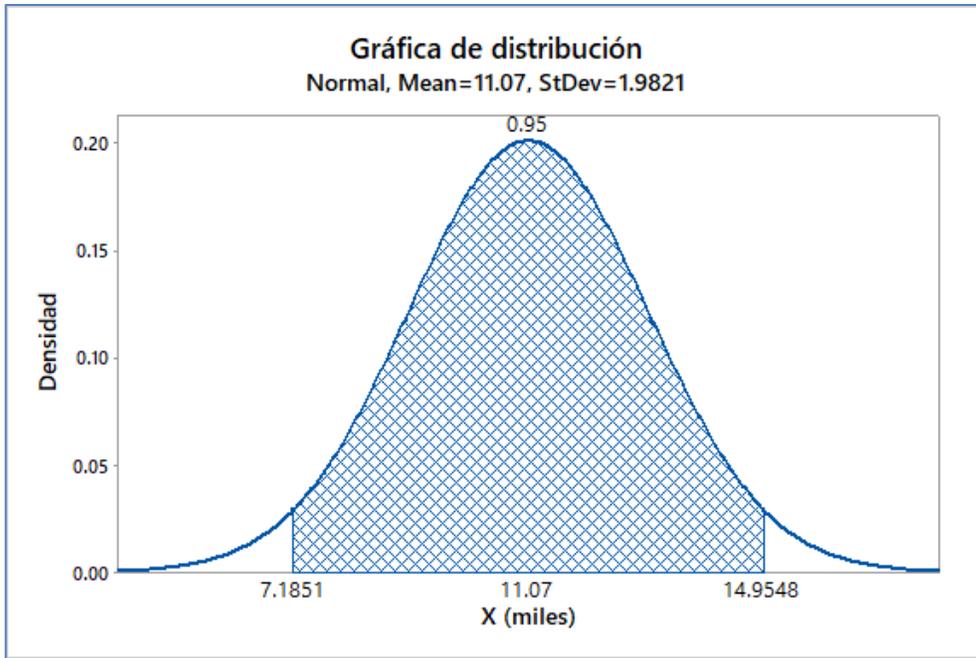


Fuente: Elaboración propia con MINITAB con datos de Cartas de Porte.

Figura 1.1. Serie de tiempo de la variable tkm promedio mensual (miles), 2009-2018

La Figura 1.2 corresponde a la función de densidad de probabilidad estimada de la variable tkm promedio, que resulta una distribución Normal tal como prevé la teoría estadística para la distribución de una media.

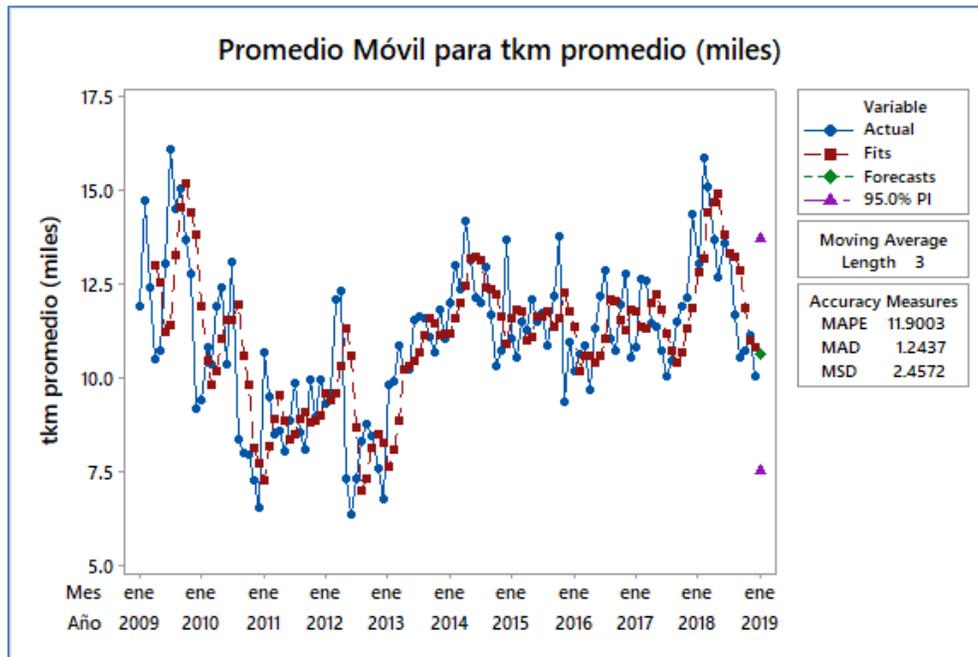
El intervalo de confianza mostrado indica que la tkm promedio mensual se encuentra entre 7.1851 y 14.9548 en el 95% de las veces.



Fuente: Elaboración propia con datos de Cartas de Porte.

Figura 1.2. Intervalo de confianza al 95%. Tkm promedio mensual (miles)

La Figura 1.3 -muestra un análisis de tendencia de la variable toneladas-kilómetro (tkm) utilizando un promedio móvil de orden 3; el software usado es Minitab.



Fuente: Elaboración propia con datos de cartas de porte

Figura 1.3. Gráfica que compara los valores actuales contra el promedio móvil de orden 3.

Fuente: elaboración propia con datos de cartas de Porte.

El método de promedio móvil amortigua las fluctuaciones aleatorias de la serie de tiempo; el promedio móvil de orden 3 en este caso corresponde, a una ponderación trimestral de los datos.

Para facilitar la consulta de los indicadores se desarrolló una herramienta informática para dar acceso a la DGAF y a los Centros SCT (representaciones de la SCT en los estados), a consultas en línea de estos indicadores, así como a información adicional generada con los datos obtenidos de cartas porte. La herramienta informática ha generado el Sistema de Información de Cartas Porte del autotransporte federal (SiCaP-IMT).

A continuación, se muestran algunas capturas de pantalla del Sistema de información de Cartas Porte SiCaP-IMT.

En la Figura 1.4 se presenta una captura de pantalla donde se observa el menú y el despliegue de la información que arroja la consulta, El sistema permite elegir el año y el indicador a graficar dentro del periodo de 2010 a 2018, donde pueden consultarse los indicadores mencionados previamente.



Fuente: Fuente: Sistema de información de Cartas Porte SiCaP-IMT

Figura 1.4. Pantalla de acceso al Sistema de Información de Cartas de Porte del Autotransporte Federal de carga

La Figura 1.5 muestra una captura de pantalla con el menú y el despliegue de la información de la consulta; se puede elegir el año y el indicador a graficar dentro del periodo de 2010 a 2018, y pueden consultarse los indicadores mencionados previamente con dos opciones de gráfica: de barras y de líneas. En la Figura 1.5 la consulta mostrada corresponde a los principales tipos de carga según toneladas transportadas para el año 2018.

Como se ve en la Figura 1.6 el sistema permite descargar la información resultado de la consulta como una gráfica, sin embargo, también se tiene la opción de descargar la información en una hoja de cálculo, lo cual presenta una gran oportunidad en términos de desarrollo de estudios estadísticos del transporte de carga.

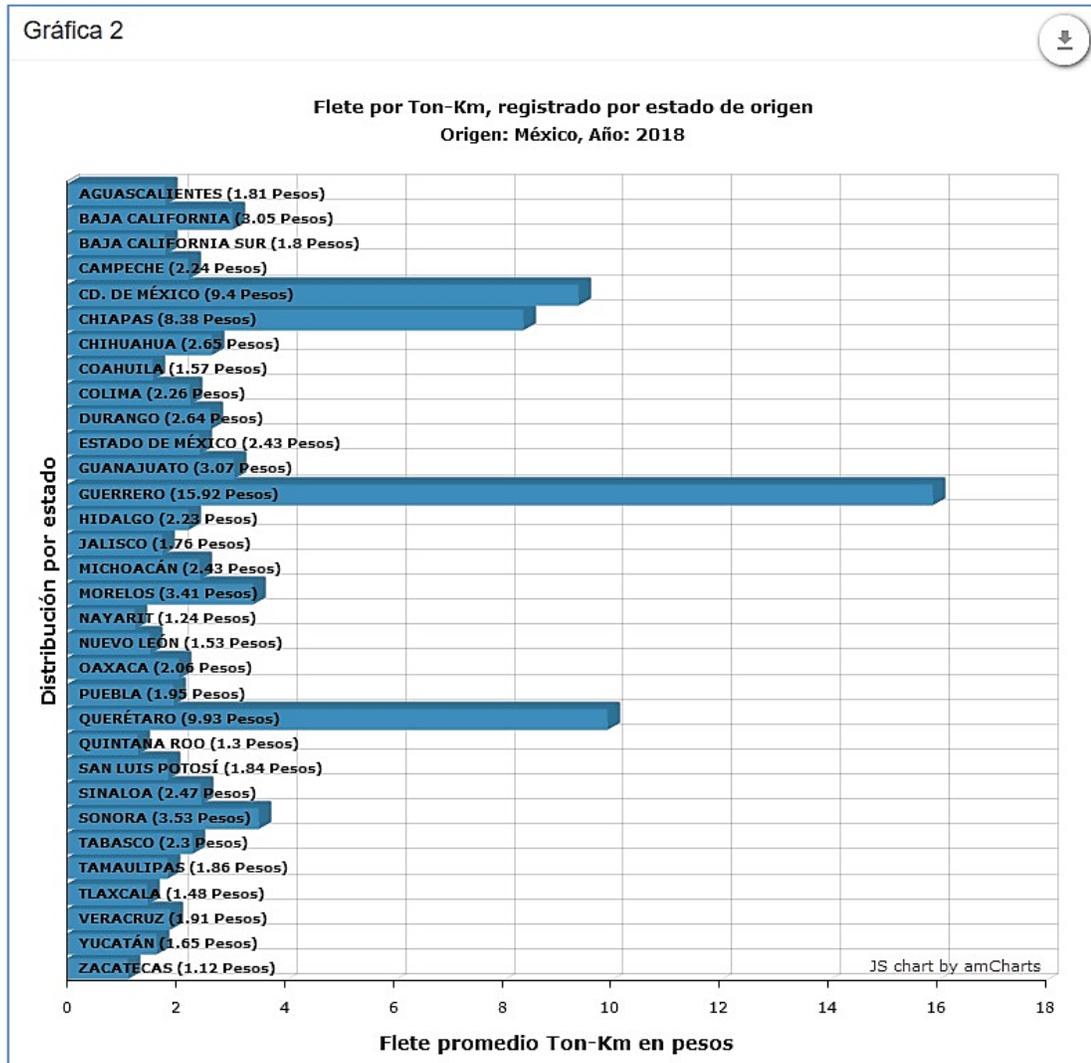


Fuente: Sistema de información de Cartas Porte SiCaP-IMT

Figura 1.5. Salida gráfica del SiCaP-IMT a la consulta de principales tipos de carga en toneladas totales

La información generada por este proyecto ha servido como insumo de diversos análisis exploratorios que tienen como finalidad identificar posibles aplicaciones y aprovechar al máximo el potencial de la información.

Un ejemplo de ello son los estudios de cohorte y los ensayos para la construcción de matrices origen destino, las cuales representan un apoyo importante para la planeación del transporte de carga.



Fuente: Sistema de información de Cartas Porte SiCaP-IMT

Figura 1.6. Gráficas generadas por el SiCaP-IMT

El aprovechamiento de la información de cartas de porte, para la realización de los estudios estadísticos ya referidos, se ha logrado gracias al acopio de muestras de cartas porte que la DGAF ha solicitado a los Centros SCT. Estas cartas de porte que se han utilizado en los estudios, son documentos originales en papel, a los que hay que revisar, depurar, corregir datos donde ha sido posible y cargar en una base de datos para permitir su manejo. Este proceso, si bien ha permitido generar los primeros resultados, es lento y requiere de recursos como personal de captura, áreas de almacenamiento de los lotes de cartas, transporte de los lotes y personal de apoyo en análisis estadístico.

En la búsqueda de soluciones más ágiles para el manejo de cartas porte, desde el año 2019, se ha realizado un esfuerzo de trabajo en conjunto del IMT con la DGAF y el Servicio de Administración Tributaria (SAT) para lograr obtener cartas porte en formato electrónico, e incluir un mayor número de cartas en el análisis estadístico, y así, poder caracterizar en mejor medida al autotransporte de carga en México.

Este proyecto representa varios retos, como es la creación de una carta porte en la cual se incluyan obligatoriamente datos como la configuración vehicular, el peso de la carga y la descripción específica de la misma con base en un catálogo establecido, ya que actualmente una gran proporción de las cartas obtenidas en las muestras carecen de esta información.

Adicionalmente, se requiere diseñar mecanismos que faciliten la identificación del origen y el destino, ya que las cartas actuales con frecuencia no son específicas en este punto y solo mencionan la localidad; desafortunadamente, es común que existan localidades con nombres repetidos, por lo cual se propone incluir como dato obligatorio el código postal tanto del origen como del destino para disponer de datos georreferenciados a través del código postal, permitiendo mayor detalle y veracidad en la información.

Las cartas porte no son la única fuente de información sobre el movimiento de carga en la red carretera nacional, una importante fuente de información proviene de los registros de Datos Viales que publica la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT, básicamente datos del Tránsito Diario Promedio Anual registrado en las principales carreteras, con detalles de la distribución porcentual de los vehículos y la identificación de los tramos que componen cada carretera.

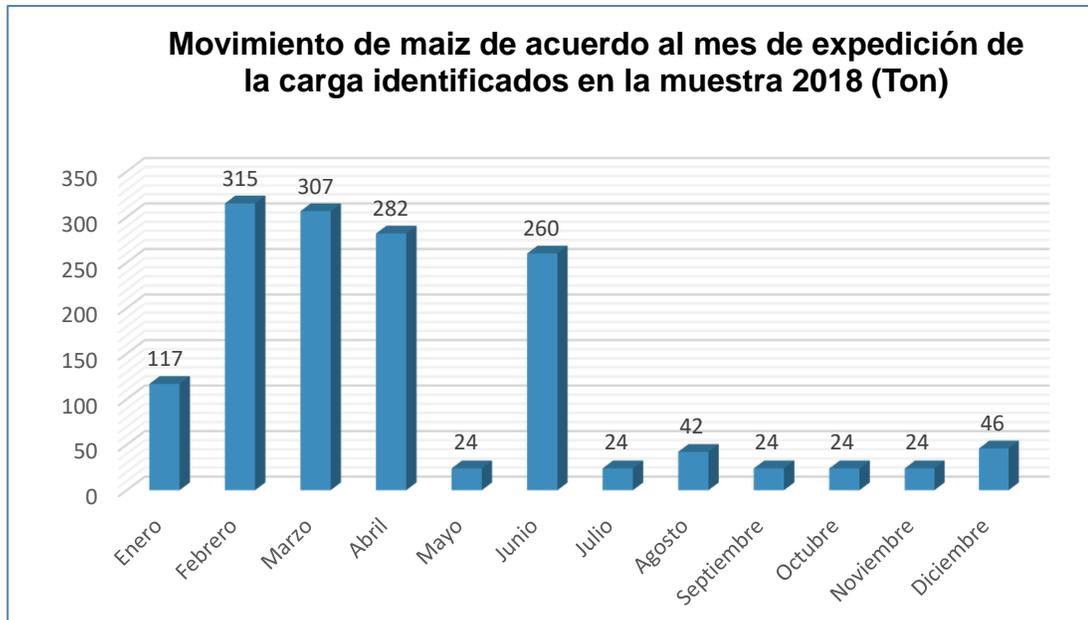
Datos más detallados de movimientos de carga se obtuvieron por varios años en la serie de estudios Origen Destino, realizados también por la DGST, donde se tenía información de encuestas de camino aplicadas a los vehículos cruzando por las estaciones de encuesta colocadas en áreas determinadas de la red carretera, las cuales se cambiaban cada año. Esta información, con bastante detalle de los movimientos presentaba el inconveniente de tener un alto costo por lo que solo se levantaba información en un número muy limitado de estaciones, las cuales recolectaban datos por tres días y no era posible llevar seguimiento preciso a través del tiempo, pues la localización de las estaciones cambiaba año con año.

Construir una base con la información de las estaciones levantadas implica reunir en una misma base datos correspondientes a diferentes años y diferentes puntos de recolección, adicionalmente, la temporalidad es un problema serio a resolver en estos casos, ya que al proyectar de manera anualizada los datos observados en un corto lapso de tiempo, estos pueden dar como resultado estimaciones alejadas de la realidad, pues el movimiento de carga tiene un comportamiento diferente a lo largo del año.

Ejemplo de ello son las temporadas de cosecha de productos agrícolas o la producción de artículos de temporada; el movimiento de carga se puede cambiar de

acuerdo al día de la semana; por ejemplo, es diferente el movimiento que se observa un lunes con respecto a un sábado, etc. Una ventaja de la información que se registra en la carta porte es que incluye la fecha en que el embarque sale de su origen, lo cual, con un volumen de información suficiente, permitiría dar seguimiento muy preciso a las variaciones en el movimiento de carga a través del año.

En la Figura 1.7 se presenta el movimiento de maíz de acuerdo a su fecha de expedición del embarque, en este caso, agrupado por mes para facilitar su análisis.



Fuente: Sistema de información de Cartas Porte (SICAP-IMT)

Figura 1.7. Estacionalidad en el movimiento de maíz de acuerdo a la fecha de salida de los embarques registrados en la muestra 2018

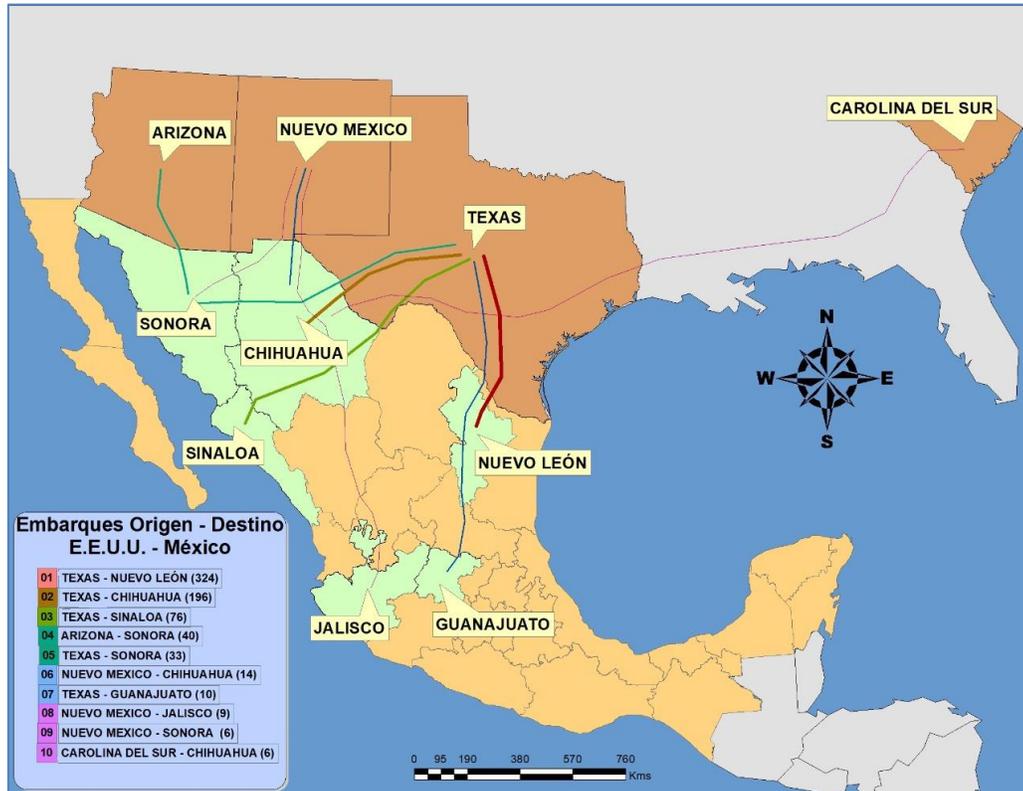
Se puede observar cierta estacionalidad en los movimientos de carga; a medida que la muestra sea más grande y se cumpla con los criterios establecidos en el diseño muestral, la información obtenida de estos análisis será muy valiosa para la identificación de patrones y la previsión de la demanda de unidades de carga.

Desafortunadamente, las restricciones presupuestales para la DGST, llevaron a suspender estas encuestas de camino en el año 2017, y hasta el primer semestre de 2020 no se ha tenido noticia de un posible reinicio.

Esta circunstancia destaca el relevante papel que tiene el SICaP-IMT como fuente de información y consulta del desempeño del autotransporte en México, y el enorme potencial que tiene la posibilidad de tener acceso a cartas porte electrónicas dentro del proyecto de colaboración IMT-DGAF-SAT ya citado.

Las matrices OD

Los ejemplos de indicadores obtenidos con el SICaP-IMT, ilustran el uso de esta información para describir y observar el desempeño del autotransporte de carga. La cuestión fundamental de conocer los orígenes y destinos, permiten de inmediato determinar las líneas de deseo del movimiento de carga, donde se revelan las importancias relativas de los pares O-D.



Fuente: Sistema de información de Cartas Porte

Figura 1.8. Mapa con principales pares O-D con origen en E.U.A. y destino en México

En un paso más adelante del proceso de planeación, conocer los orígenes y destinos permite integrar matrices origen-destino, conocidas como matrices OD, las cuales contienen en cada una de sus entradas el número de vehículos o de toneladas que se mueven entre el origen indicado por la fila de la casilla y el destino indicado por su columna.

Con estas matrices OD entonces, se pueden realizar ejercicios de asignación de tráfico, que son modelos matemático-computacionales que consideran las capacidades de la infraestructura, las características de la congestión carretera y los tipos vehiculares, para calcular las rutas específicas que seguirán los movimientos de carga, y su caracterización en tiempos de recorrido óptimos,

distancias, distribución porcentual de los tipos vehiculares, y otras medidas de interés para la planeación.

En el contexto descrito, orientado a la búsqueda de herramientas de apoyo a la planeación del sistema carretero nacional, el SICaP-IMT representa una muy buena oportunidad para estimar matrices origen-destino de los movimientos de carga del autotransporte, y es este desarrollo el que se presenta en los siguientes capítulos.

2. Matrices O-D en el transporte carretero

En la planeación del autotransporte de carga, estimar las magnitudes de los flujos de camiones que circulan por la red carretera es esencial para detectar posibles mejoras a la infraestructura, niveles de congestión, rutas para productos específicos, y otros datos para generar acciones y políticas para la conservación y mantenimiento sostenible del sistema carretero.

Realizar las tareas de planeación requiere matrices origen-destino, que son arreglos tabulares donde las filas de la tabla representan las zonas de origen, las columnas representan las zonas de destino, y el valor en cada casilla indica el número de viajes o camiones que se mueven del origen de la fila al destino de la columna. Alternativamente al número de viajes o de camiones registrados en la matriz O-D, también puede utilizarse la cantidad de toneladas movidas entre origen y destino.

La Figura 2.1 muestra la estructura de una matriz O-D, donde V_{ij} indica el número de viajes entre el origen i y el destino j ; O_i es el número de viajes que se generan en el origen i y D_j es el número de viajes que se llegan al origen j .

		Destino					
Origen		1	2	3	...	n	$\sum_j V_{ij}$ ↓
1		V_{11}	V_{12}	V_{13}	...	V_{1n}	O_1
2		V_{21}	V_{22}	V_{23}	...	V_{2n}	O_2
3		V_{31}	V_{32}	V_{33}	...	V_{3n}	O_3
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n		V_{n1}	V_{n2}	V_{n3}	...	V_{nn}	O_n
	$\sum_i V_{ij} \rightarrow$	D_1	D_2	D_3	...	D_n	$\sum_{i,j} V_{ij}$

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.1 Estructura de la matriz origen-destino

Para que una matriz O-D sea consistente es necesario que la suma de viajes generados en los orígenes O_1, O_2, \dots, O_n iguale a la suma de viajes atraídos a los destinos D_1, D_2, \dots, D_n que también es el total de viajes en la red carretera: $\sum_{i,j} V_{ij}$.

En el desarrollo del presente trabajo, se ha utilizado la información de cartas porte que se ha recopilado en el periodo 2009 –2018, en un trabajo conjunto entre el IMT y la Dirección General de Autotransporte Federal, y que se encuentra bajo resguardo en el sistema de información de cartas porte SICaP descrito en el capítulo anterior.

2.1 Características de las matrices O-D

La tabla 2.1 ejemplifica una matriz O-D con datos de la muestra de cartas porte de 2010, para los movimientos interestatales entre Querétaro y sus estados colindantes: Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Michoacán y San Luis Potosí.

La matriz indica un total de 22 viajes con origen Querétaro, de los cuales 2 son a Estado de México, 2 a Hidalgo, 9 a Michoacán y 9 a San Luis Potosí. Igualmente se ve que el destino al que llegaron más viajes es Michoacán con 536 y el origen que generó más viajes fue San Luis Potosí con 492. La diagonal de la matriz tiene cero en todas sus casillas, indicando que no hubo movimientos con origen y destino en el mismo estado. El acumulado de suma de filas iguala al acumulado de suma de columnas, dando un total de 1,012 viajes.

Tabla 2.1 Matriz O-D para número de viajes entre Querétaro y estados colindantes. Datos de la muestra 2010 de cartas porte

Origen	EdoMEX	GTO	HGO	MICH	QRO	SLP	Suma fila
EdoMEX	0	48	12	168	10	15	253
GTO	5	0	0	15	1	10	31
HGO	47	15	0	9	34	18	123
MICH	34	45	5	0	7	0	91
QRO	2	0	2	9	0	9	22
SLP	75	43	15	335	24	0	492
Suma col.	163	151	34	536	76	52	1012

Fuente: Elaboración propia.

La matriz de la tabla 2.1 muestra el conteo de viajes ocurridos entre los pares O-D indicados. Esta información básica presupone que cada viaje se corresponde con una carta porte, y no considera por ahora el caso de vehículos que mueven carga consolidada y que pudieran representarse con más de una carta porte. Con esta primera aproximación se puede generar una matriz que cubra la totalidad de orígenes y destinos recopilados en los años observados para emplearla en un proceso de ajuste y luego utilizarla en un modelo de asignación de tráfico que permita pronosticar el uso de las rutas que se deriva de esta matriz O-D.

De la información que se tiene en la base de datos de cartas porte, para el horizonte observado 2010–2018, se ha podido generar algunas matrices O-D en varios niveles de agregación.

La clasificación más agregada de la matriz O-D es a nivel estatal, con 32 orígenes y 32 destinos (los estados del país). Esta matriz de 32x32 tiene 1,024 casillas que cubrirían el total de pares O-D posibles entre los estados del país. Para ejemplificar, las tablas 2.2a y 2.2b muestran la matriz O-D a nivel estatal para el año 2018 en dos partes, ya que dado el tamaño de esta matriz no es práctico escribirla completa.

Los números en la base de cada columna suman los viajes de la columna, que son viajes atraídos al correspondiente destino. En la tabla 2.2b los números al final de cada fila son sumas de viajes a lo largo de la fila, que son los viajes generados en el correspondiente origen. Ambas sumas dan 6,010 viajes interestatales en 2018.

Tabla 2.2a Matriz O-D viajes interestatales 2018 1ª. parte

	AGS	BC	BCS	CAMP	CDMX	CHIH	CHIS	COAH	COL	DGO	GRO	GTO	HGO	JAL	MEX	MICH	MOR
AGS							3							3			
BC		4	7		3	2		1	1			1		2	2	2	
BCS		3	28		1								1	5			
CAMP				163													3
CDMX							1	4				2	2	1	3		29
CHIH		4		1	8	132		52	5	15		57	1	2	13	2	2
CHIS				1			18										
COAH	1		6		1	10		13	1	8		2	1	5	11		
COL	2							1	3			3		10		3	1
DGO						12		10	1	24	1			1	3		
GRO					14						230			4	9	1	32
GTO		4			3	8	2	5		2		11	4	4	6		44
HGO	3				2		3	2			4	18	39	6	15	1	1
JAL		7			2	9	1	2	6	1	1	5	3	13	8	2	9
MEX	3			4	2	64	5		2		39	1	23	5	11		120
MICH		1						4			68				1		
MOR	1	1			35	2	1	4	1	1	120	13	5	23	111	3	177
NL	2	2	2		15	41	1	7	10	16		6	3	6	64	8	9
OAX					13		22				9		10		7		
PUE	24	1			10	2	1	4	2		24	12	16	5	24		35
Q ROO																	1
QRO	1	4	1		3	11		3			9	18	8	5	15	6	16
SIN		12	9		3	69		20	4	16		8	3	216	1	1	
SLP	8				4	6		7		2		18	6	11	17	91	1
SON		12	9		6	9		1		1		2		12	2		1
TAB							1										
TAMPS						2		6	1	1		1	1	1			
TLAX	18			1							4	1	5		8		
VER				4	3	107	18				124	3	20	1	4	1	12
YUC				8			1										
ZAC	2	1			5	1		52	35	2		1		7		1	
	65	56	62	182	133	487	78	198	72	89	633	183	151	348	335	123	492

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.2b Matriz O-D viajes interestatales 2018 2ª. parte

	MAY	NL	OAX	PUE	Q ROO	QRO	SIN	SLP	SON	TAB	TAMP	TLAX	VER	YUC	ZAC	
AGS	1			3		2		2								14
BC	1				1	2	6		13							48
BCS							3		1							42
CAMP					23					7			1	15		212
CDMX	1	1	1			3	7	7		2						64
CHIH		76		37		89	50	10	7		11	3		4	4	585
CHIS														1		20
COAH		15				1	17	2	4		4				29	131
COL		3		4		3	2	3							2	40
DGO		12		3				4	2		3				1	77
GRO			3	3												296
GTO		3	3	10	1	6	19	12	2		3	2	2	1	6	163
HGO		4	5	15		16		13			3		19		1	170
JAL	58	2		5		2	45	3	6	1		2	4		4	201
MEX		5	72	12	1	11	14	14		8		1	15	25	1	458
MICH							2						1			77
MOR	2	8	25	17		5	3	11	5		5	2	1	4	1	587
NL				20		22	20	3	5		18	7	5		2	294
OAX		17	46	11		1				1			25			162
PUE		11	31	24		2	5	1	1			3				238
Q ROO										2						3
QRO	1	12	1	7		18		7	1		1		3		2	153
SIN	49	14		1		2	233	1	75		20		8		3	768
SLP	2	19		6		35	3	37			25		1		4	303
SON		2					30		69				1			157
TAB					4	1				1				10		17
TAMP		9					2	4			2					30
TLAX										3	1					41
VER	4	3	112	12	7	22	7			7			33	1		505
YUC					3								6	5		23
ZAC			1			4	14				1		1		3	131
	119	216	300	190	40	247	482	134	191	32	97	20	126	66	63	6010

Fuente: Elaboración propia.

Entre los datos que se han colectado en las muestras de cartas porte, aunque en menor cantidad, están también orígenes y destinos extranjeros, por lo que se puede saber algo sobre exportaciones e importaciones.

En la tabla 2.3 se muestra la información de viajes detectados con destino extranjero en la base de datos de cartas porte, para el periodo 2020 –2018. El predominio del destino Estados Unidos (E.U.A.) es claramente notorio, con Chihuahua, Michoacán, Sinaloa y Sonora como los principales orígenes.

Tabla 2.3 Matriz O-D viajes con destino en el extranjero 2010 –2018

	Belize	Canadá	El Salvador	Guatemala	Honduras	E. U. A.	Sumas
AGS						4	4
BC						23	23
BCS						4	4
CDMX						12	12
CHIH						9,734	9,734
CHIS						13	13
COAH						90	90
COL						122	122
DGO						210	210
GRO						1	1
GTO						72	72
HGO						5	5
JAL						505	505
MEX						21	21
MICH			1	1	1	2,898	2,901
MOR						73	73
NAY						19	19
NL						54	54
OAX						20	20
PUE						2	2
QRO						58	58
SIN		7				2,980	2,987
SLP						16	16
SON						2,617	2,617
TAMPS						27	27
VER						31	31
YUC	14						14
ZAC						41	41
Sumas	14	7	1	1	1	19,652	19,676

Fuente: Elaboración propia.

Análogamente, la tabla 2.4 muestra la situación encontrada para los viajes con origen en el extranjero; se presenta en dos partes, pues resulta demasiado larga para el ancho de página.

En esta matriz se aprecia nuevamente a Estados Unidos como principal origen extranjero, siendo sus destinos más importantes Chihuahua, Sonora, Nuevo León y Sinaloa, en orden de número de viajes recibidos.

Tabla 2.4 Matriz O-D viajes con origen en el extranjero 2010 –2018

	AGS	BC	BCS	CDMX	CHIH	COAH	COL	DGO	GRO	GTO	HGO	JAL	MEX	MICH	MOR
Canada															
Guatemala														2	
E. U. A.	20	182	2	862	12,315	300	4	343	1	389	55	531	249	17	2
Sumas	20	182	2	862	12,315	300	4	343	1	389	55	531	249	19	2

	NAY	NL	OAX	PUE	QRO	SIN	SLP	SON	TAB	TAMPS	TLAX	VER	YUC	ZAC	Sumas
Canada								2							2
Guatemala													33		35
E. U. A.	2	2,992	1	59	53	2,051	30	5,490	5	46	3	8		32	26,044
Sumas	2	2,992	1	59	53	2,051	30	5,492	5	46	3	8	33	32	26,081

Fuente: Elaboración propia.

Las matrices O-D de carga también se expresan con los tonelajes movidos entre los pares O-D. La información para movimientos interestatales 2018 se muestra en las tablas 2.5a, 2.5b y 2.5c, en tres partes, dado el tamaño de la matriz que resulta.

Tabla 2.5a Matriz O-D interestatal.1ª.parte. Tonelajes movidos en 2018

	AGS	BC	BCS	CAMP	CDMX	CHIH	CHIS	COAH	COL	DGO	GRO
AGS							60				
BC		53	164		76	26		31	28		
BCS		83	706		29						
CAMP				3,542							
CDMX							40	60			
CHIH		45		25	194	1,151		735	94	252	
CHIS				25			134				
COAH	15		176		33	82		283	35	144	
COL	33							23	35		
DGO						260		209	35	507	1
GRO					277						5,573
GTO		91			33	41	52	60		38	
HGO	97				29		34	48			111
JAL		124			40	180	8	30	79	18	12
MEX	44			57	27	1,556	129		42		962
MICH		25						43			1,561
MOR	5	28			708	24	8	26	40	6	3,435
NL	29	34	32		417	632	52	113	186	332	
OAX					225		419				175
PUE	693	27			321	63	15	115	42		210
Q ROO											
QRO	10	110	39		17	169		50			243
SIN		316	157		101	1,230		227	96	303	
SLP	220				127	95		134		40	
SON		215	52		155	90		35		30	
TAB							8				
TAMPS						19		138	33	24	
TLAX	531			41							81
VER				144	72	2,548	674				3,716
YUC				253			48				
ZAC	65	30			145	8		509	1,264	45	
Sumas	1,743	1,181	1,326	4,087	3,026	8,172	1,681	2,870	2,007	1,739	16,079

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.5b Matriz O-D interestatal. 2ª. parte. Tonelajes movidos en 2018

	GTO	HGO	JAL	MEX	MICH	MOR	NAY	NL	OAX	PUE	Q ROO
AGS			126				50			31	
BC	5		39	50	42		22				20
BCS		25	92								
CAMP						76					562
CDMX	30	85	15	62		388	15	23	5		
CHIH	798	26	31	334	30	45		1,437		920	
CHIS											
COAH	70	33	144	270				490			
COL	141		368		51	12		71		40	
DGO			22	75				265		82	
GRO			59	211	25	670			52	50	
GTO	102	125	101	89		619		61	61	309	32
HGO	655	919	162	424	36	50		88	145	428	
JAL	118	148	341	90	18	75	878	57		87	
MEX	22	486	30	211		1,890		100	1,630	130	23
MICH				68							
MOR	271	85	322	2,291	65	4,590	48	158	775	244	
NL	146	86	156	1,687	249	210				488	
OAX		171		101				364	1,289	206	
PUE	328	485	226	708		949		329	1,168	611	
Q ROO					22						
QRO	333	113	45	243	154	184	5	145	34	101	
SIN	196	69	4,208	24	25		892	305		40	
SLP	324	192	233	413	2,929	16	30	444		154	
SON	41		303	37		18		52			
TAB											85
TAMPS	33	5	16					279			
TLAX	30	180		225							
VER	77	869	29	76	48	214	92	92	2,690	394	265
YUC											105
ZAC	50		211		14				6		
Sumas	3,768	4,103	7,280	7,689	3,709	10,005	2,031	4,759	7,855	4,316	1,091

Fuente: Elaboración propia.

Las entradas en las tablas 2.5a -2.5c indican los tonelajes movidos entre cada par O-D registrado en 2018.

Las sumas de columnas muestran que los destinos que mayores tonelajes atrajeron fueron Guerrero (16,079), Sinaloa (10,307) y Morelos (10,005).

En cuanto a origen, los que tuvieron los mayores tonelajes generados fueron Sinaloa (15,815), Veracruz (14,246) y Morelos (13,686).

Tabla 2.5c Matriz O-D interestatal. 3ª. parte.Tonelajes movidos en 2018

	QRO	SIN	SLP	SON	TAB	TAMPS	TLAX	VER	YUC	ZAC	Sumas
AGS	26		91								384
BC	56	127		280							1,019
BCS		64		25							1,025
CAMP					164			12	370		4,726
CDMX	40	157	220		36						1,175
CHIH	1,327	643	185	130		89	48		100	23	8,660
CHIS									27		186
COAH	33	126	40	123		96				130	2,322
COL	54	44	58							32	961
DGO			101	28		82				29	1,696
GRO											6,918
GTO	176	799	145	40		66	47	69	35	186	3,376
HGO	571		538			43		582		52	5,014
JAL	75	1,262	23	136	8		23	30		131	3,989
MEX	246	322	260		163		12	330	365	32	9,067
MICH		60						30			1,786
MOR	101	42	101	104		24	29	8	99	50	13,686
NL	631	317	60	131		324	190	87		73	6,661
OAX	15				15			312			3,293
PUE	78	115	16	49			85				6,632
Q ROO					28						50
QRO	280		106	10		24		49		66	2,531
SIN	47	5,157	40	1,744		392		184		63	15,815
SLP	755	51	930			919		34		140	8,178
SON		759		2,021				28			3,838
TAB	37				20				225		375
TAMPS		36	156			79					819
TLAX					75	20					1,183
VER	637	155			248			1,153	52		14,246
YUC								270	168		844
ZAC	81	72				8		33		110	2,651
Sumas	5,266	10,307	3,070	4,821	757	2,165	434	3,212	1,441	1,115	133,107

Fuente: Elaboración propia.

El segundo nivel de agregación posible es para movimientos entre municipios. Para el año 2018, se encontraron 269 orígenes con 394 destinos, que representa una matriz de $269 \times 394 = 105,986$ casillas. La agregación puede extenderse a nivel de localidad, lo que aumenta el tamaño de la matriz.

Estas consideraciones son de importancia para la etapa de adaptación de la matriz O-D usada en los modelos de asignación de tráfico, los cuales usualmente requieren de alguna homologación con la información geográfica disponible en algún mapa georreferenciado.

Las matrices O-D pueden mostrar la información en términos del número de viajes entre cada par O-D, o también pueden mostrar las toneladas que se mueven entre cada par.

Se puede desagregar la información de los movimientos de carga a nivel mensual, anual, por tipo de producto movido, por clase de vehículo usado o por alguna otra

clasificación que sea de interés para la planeación (p. ej. movimiento de contenedores o de materiales peligrosos).

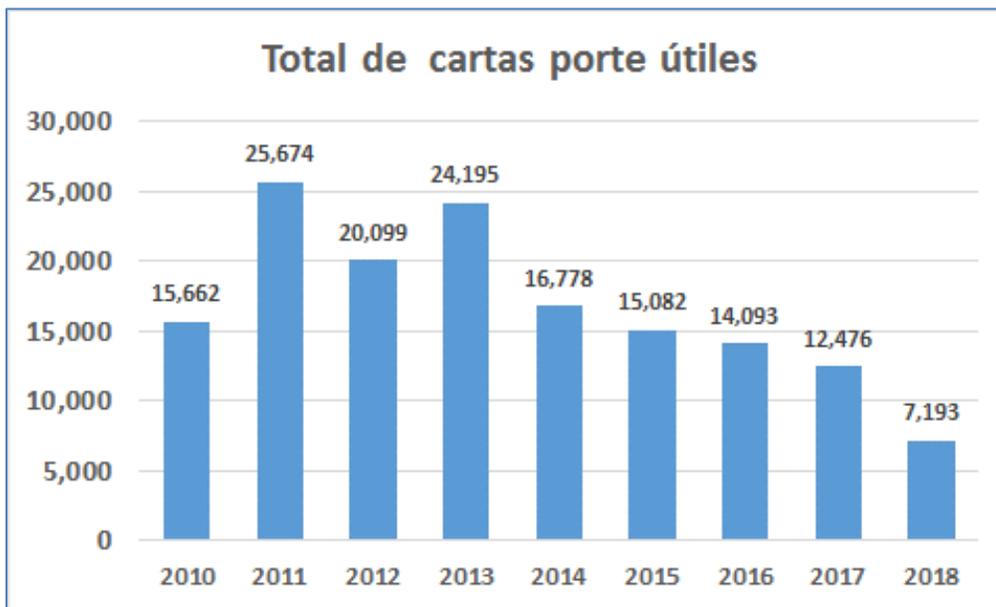
Las matrices O-D, en general, cambian con el tiempo, debido a la evolución del transporte de carga carretero el cual, particularmente, ha mostrado tendencia creciente en los primeros años del siglo XXI; por esa razón las matrices deben actualizarse cada cierto tiempo para poder usarlas en los procesos de planeación de manera confiable. En el capítulo 4 se comentan los detalles que se requieren para la estimación de estas matrices.

3. Análisis estadístico de origen y destino

El proyecto de investigación Análisis Estadístico de Cartas de Porte de Autotransporte Federal de Carga que el IMT ha realizado desde el año 2009 con apoyo de la Dirección General de Autotransporte Federal, ha permitido capturar información al menos hasta el año 2018, y durante 2020 se ha promovido la continuación de la recolección de cartas porte para los años siguientes.

La cantidad de cartas de porte conteniendo información útil que se colectaron en el periodo 2010 – 2018 son en total 151,252 registros. No se incluyeron las del 2009, pues ese año se inició como prueba piloto y sirvió para detectar errores y malas prácticas en el llenado de las cartas que permitieron mejorar la eficiencia de la captura de información en los años siguientes.

En la Figura3.1 se muestra la distribución de estos 151,252 registros en el periodo 2010 – 2018.



Fuente: Elaboración propia.

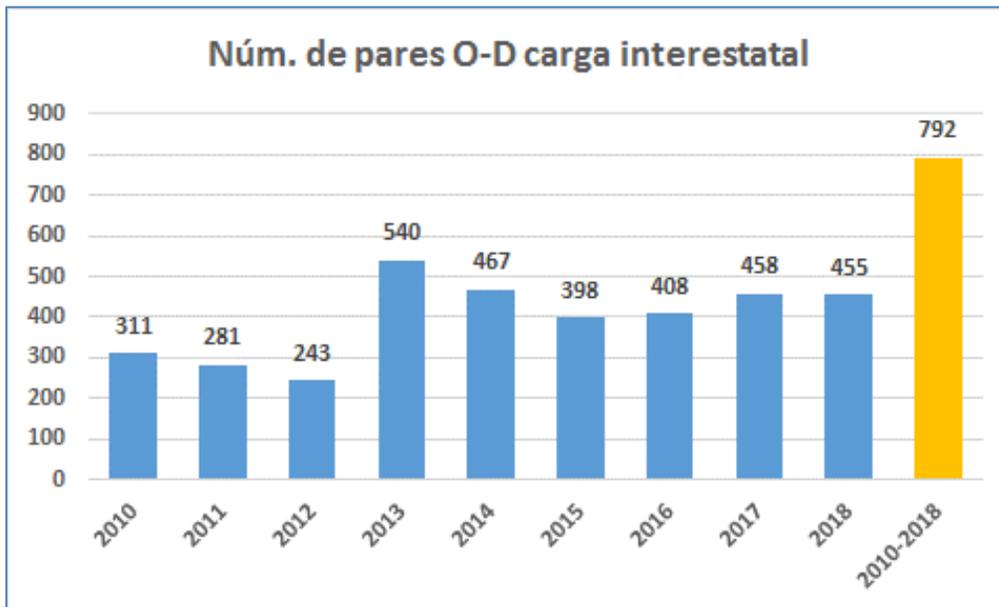
Figura 3.1 Cartas de porte colectadas en 2010 – 2018

La figura 3.1 muestra desde de 2014 una reducción constante en la colecta de cartas porte útiles. En parte esto se ha debido a una falta de estandarización en el llenado de las cartas porte que hacen las empresas transportistas y lo que ha

generado que muchos de los documentos recibidos sean inutilizables para integrarse a la base de datos de cartas porte.

Para corregir esta situación, el IMTyA ha planteado conjuntamente con la DGAF una estrategia para capacitar a las personas encargadas del llenado de las cartas que se entregan para la muestra anual, a fin de que se llenen los datos completos y sin errores para su uso estadístico.

Para los movimientos de carga interestatal, la Figura 3.2 muestra el número de pares O—D encontrados en cada año del periodo 2010 –2018, donde se incluye el total en dicho periodo en la última barra.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2 Número de pares O-D interestatales 2010 – 2018

La tabla 3.1 resume la información de número de cartas, número de pares O-D en cada año y el promedio de cartas por par O-D en el periodo 2010 –2018.

En esta tabla se aprecia también una gran variación en el promedio de cartas por par O-D en los distintos años, siendo 2018 el año con el promedio más bajo y 2011 con el más alto. En el periodo completo, el promedio es de 191 cartas por par O-D, en un total de 792 pares.

Tabla 3.1 Totales de cartas porte, número de pares O-D y promedio de cartas por par O-D en el periodo 2010 – 2018

Periodo	Total cartas	#ParesOD	Prom. cartas/par
2010	15,662	311	50.4
2011	25,674	281	91.4
2012	20,099	243	82.7
2013	24,195	540	44.8
2014	16,778	467	35.9
2015	15,082	398	37.9
2016	14,093	408	34.5
2017	12,476	458	27.2
2018	7,193	455	15.8
2010-2018	151,252	792	191.0

Fuente: Elaboración propia.

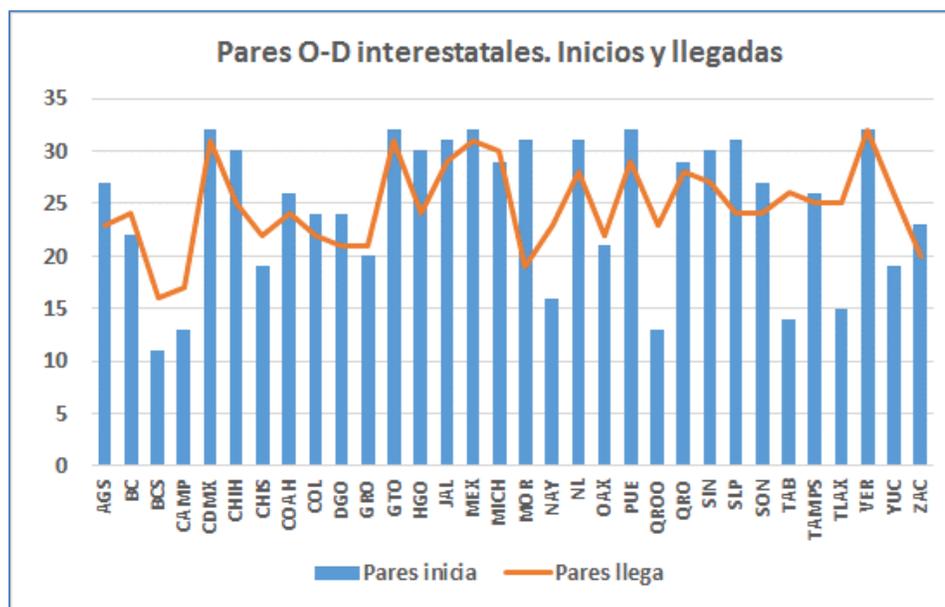
En una primera aproximación, en este trabajo suponemos que cada registro de carta porte corresponde a un viaje realizado con un vehículo para realizar la entrega; no consideramos el caso de embarques consolidados aún.

De la información que contienen las cartas porte, los datos de origen y destino básicamente sirven para determinar los pares O-D utilizados en el movimiento de carga, y en primera instancia determinar los viajes realizados en cada par O-D.

Las cartas de porte también contienen la información del peso de la carga llevada, lo cual permite determinar los flujos de carga en toneladas que se mueven en cada par O-D. Ambos datos, número de vehículos y toneladas movidas que transitan en cada par O-D son muy relevantes en la modelación de flujos en la red carretera en el proceso de asignación de tráfico para determinar las rutas utilizadas en los movimientos de carga.

En el análisis de los movimientos interestatales de cartas porte, cada estado tiene pares O-D que inician allí y también pares O-D que llegan al estado. Las diferencias de los movimientos que entran al estado y los que salen de él se pueden apreciar en la Figura 3.3. En esta figura las barras azules indican el número de pares O-D que tienen por origen el estado, y la línea poligonal anaranjada indica el número de pares O-D que tienen por destino ese estado.

La tabla 3.2 muestra el detalle de los números de pares O-D que son origen y los que son destino en cada estado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3 Pares O-D con origen y con destino interestatal 2010 – 2018

Tabla 3.2 Pares O-D con origen y con destino interestatal 2010 –2018

Estado	Pares O-D		Estado	Pares O-D	
	es origen	es destino		es origen	es destino
AGS	27	23	MOR	31	19
BC	22	24	NAY	16	23
BCS	11	16	NL	31	28
CAMP	13	17	OAX	21	22
CDMX	32	31	PUE	32	29
CHIH	30	25	QROO	13	23
CHIS	19	22	QRO	29	28
COAH	26	24	SIN	30	27
COL	24	22	SLP	31	24
DGO	24	21	SON	27	24
GRO	20	21	TAB	14	26
GTO	32	31	TAMPS	26	25
HGO	30	24	TLAX	15	25
JAL	31	29	VER	32	32
MEX	32	31	YUC	19	26
MICH	29	30	ZAC	23	20

Fuente: Elaboración propia.

Las mayores diferencias que se observan en la tabla 3.2 son de los estados Morelos, Quintana Roo y Tabasco, marcados con amarillo claro en la tabla.

Morelos es origen de 31 pares O-D y es destino de 19 pares, indicando mayor generación que atracción de viajes. Quintana Roo, que es origen de 13 pares y destino de 23, así como Tabasco que es origen de 14 pares y destino de 26, indican una mayor atracción que generación de viajes.

Estas características se observarán claramente en los mapas de líneas de deseo que visualizan la estructura que tienen los pares O-D en el movimiento interestatal de carga.

3.1 Líneas de deseo

Las líneas de deseo son visualizaciones de la información de los pares O-D que se grafican en un mapa y permiten apreciar claramente la estructura de los pares, los tamaños relativos del número de viajes o de toneladas que representa cada par, y se pueden construir con facilidad empleando las rutinas gráficas de los sistemas de información geográfica, o con software especializado como TransCAD.

En su concepción original, las líneas de deseo muestran sobre un mapa los flujos de pasajeros o de carga entre orígenes y destinos, usando la información disponible en una matriz O-D. El ancho de cada línea de deseo indica el volumen del flujo correspondiente en el par O-D que representa (Caliper, 2018a).

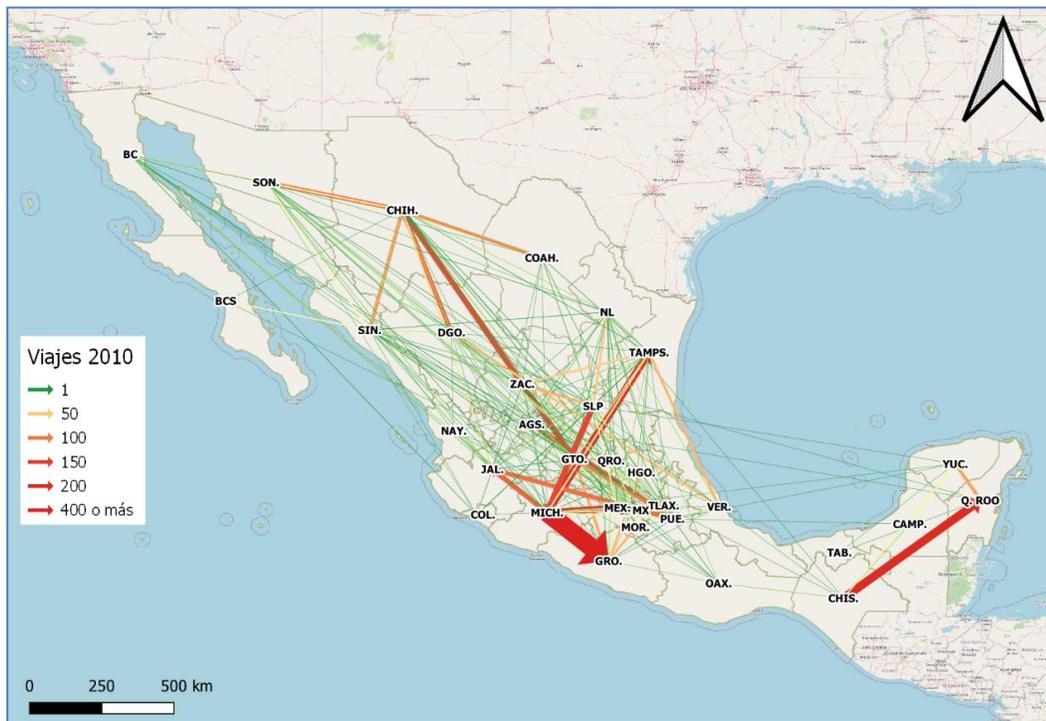
Para los movimientos interestatales registrados con cartas porte en el periodo 2010-2018, el uso de líneas de deseo se ilustra en los mapas siguientes.

En la Figura 3.4 se ven las líneas de deseo para los datos de cartas porte de 2010. En ese año se tuvieron 15,662 registros con 311 pares O-D, que es el mínimo encontrado en la serie 2010–2018.

El mapa muestra los flujos de viajes más grandes en los pares Michoacán – Guerrero y Chiapas – Quintana Roo. Entre las líneas de menor volumen se observan enlaces entre puntos del interior del país como Tlaxcala, Puebla y Zacatecas, con Yucatán en el sureste.

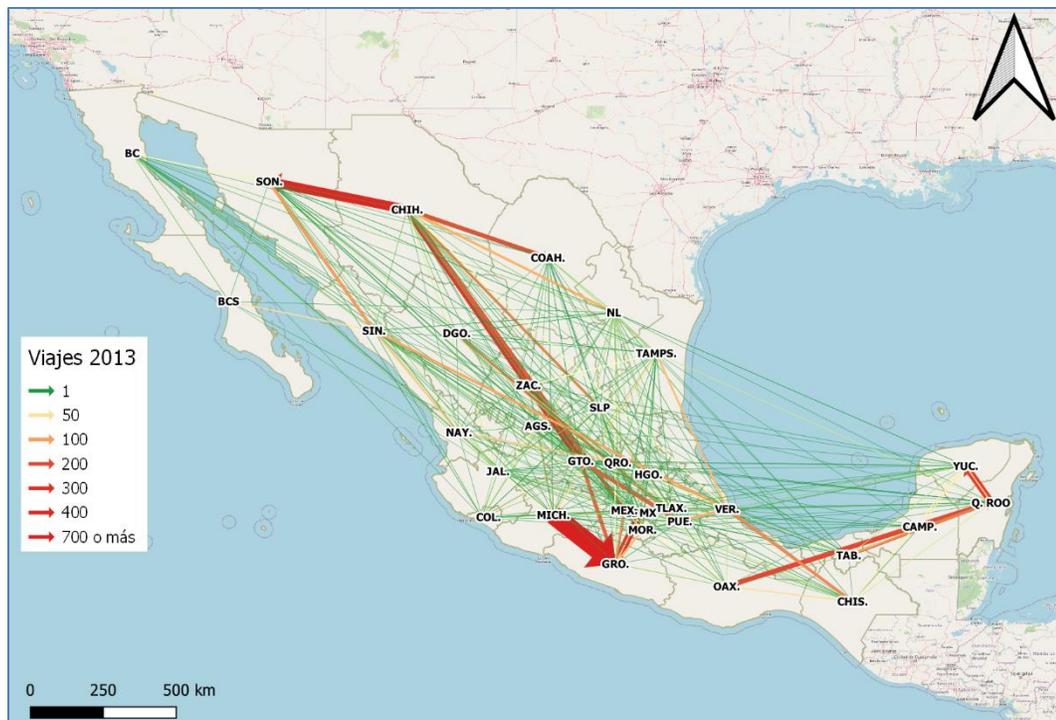
La Figura 3.5 muestra las líneas de deseo para los datos 2013, que tuvo 24,195 registros y el máximo de pares O-D, con 540 en total en la serie 2010–2018.

En este mapa se ve nuevamente un flujo importante en el par Michoacán – Guerrero, y aunque pareciera ser lo mismo que en 2010, la escala en este mapa ya llega hasta 700 viajes. Se observan también aumentos en los pares Sonora–Chihuahua y Chihuahua –Guanajuato, en comparación con la situación descrita en 2010.



Fuente: Elaboración propia.

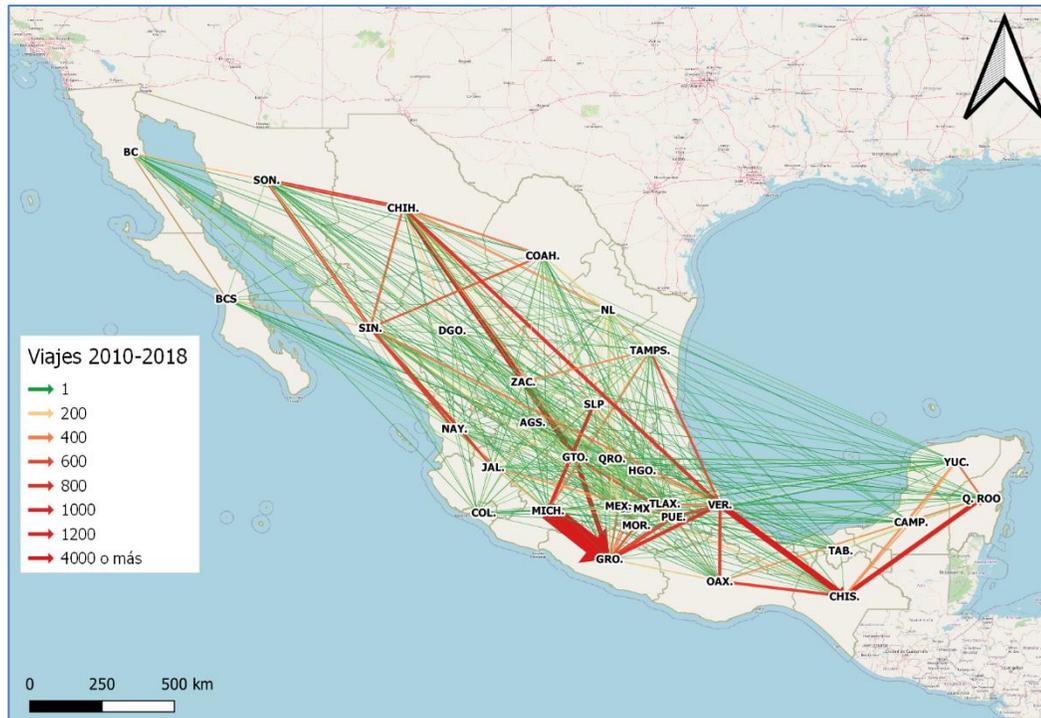
Figura 3.4 Pares O-D viajes interestatales 2010



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5 Pares O-D viajes interestatales 2013

La Figura 3.6 muestra las líneas de deseo para el horizonte completo 2010 –2018. La escala de número de viajes en este mapa llega hasta 4,000 en el límite superior. Se nota como en los mapas previos importantes movimientos el par Michoacán – Guerrero, y de menor nivel en los pares Sinaloa –Sonora, Sinaloa –Nayarit, Veracruz –Chiapas y Chiapas –Quintana Roo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6 Pares O-D viajes interestatales 2010 –2018

Dentro de los orígenes y destinos que se manejan en la base de datos de cartas porte, se han encontrado casos de ubicación fuera del país. Estos casos se pueden observar como importaciones o como exportaciones, dependiendo del sentido del par O-D.

En la Figura 3.7 se muestra la información de movimientos originados en los EUA con destino a México en el periodo 2010–2018, donde se observan flujos importantes que llegan desde Texas, principalmente a Chihuahua y en menor grado a Sonora, Sinaloa y Nuevo León.

De modo análogo, la Figura 3.8 muestra los movimientos con destino en EUA en el mismo periodo, observándose también flujos importantes hacia Texas, principalmente de Chihuahua y en menor grado de Sonora, Sinaloa y Michoacán.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.7 Pares O-D viajes de importación EUA a México 2010–2018



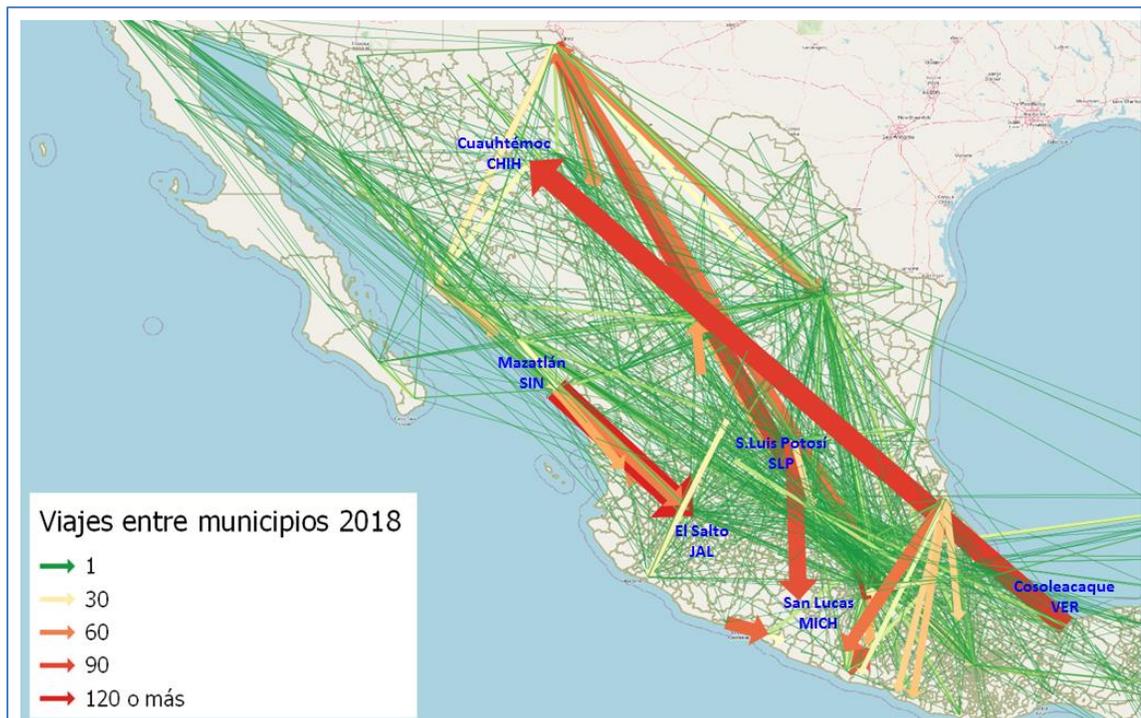
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.8 Pares O-D viajes de exportación México a EUA 2010–2018

La información de orígenes y destinos de las cartas porte en la base de datos contiene además de la localidad geográfica, el municipio y el estado donde se encuentra. A medida que se busca en niveles más desagregados, el número de pares O-D que se obtiene es cada vez mayor.

En la Figura 3.9 se muestran los pares O-D del año 2018 considerando los movimientos de carga entre municipios del país.

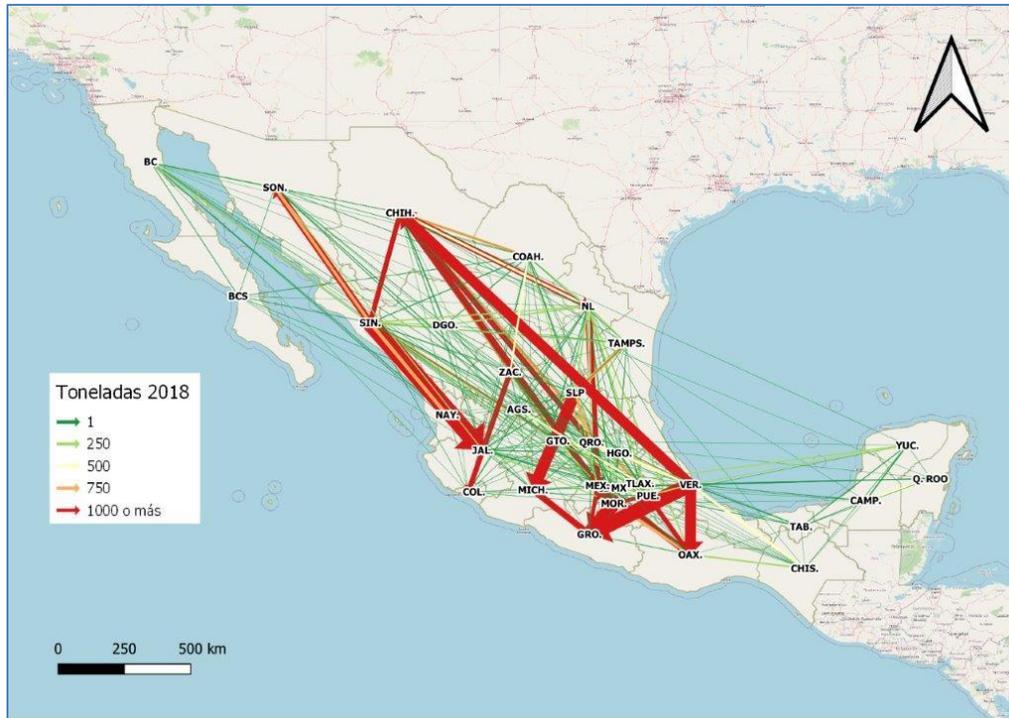
En este mapa se obtienen en total 1,574 pares O-D que corresponden a las líneas de deseo en el mapa. Donde se observan los principales pares O-D intermunicipales de mayor volumen: Cosoleacaque, Ver. – Cuauhtémoc, Chih; Mazatlán, Sin. – El Salto, Jal. y San Luis Potosí, S.L.P. – San Lucas, Mich.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9 Pares O-D viajes intermunicipales en 2018

En relación con la información de toneladas movidos entre pares O-D, en la Figura 3.10 se muestran las líneas de deseo para las cargas registradas en el año 2018.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.10 Pares O-D interestatales. Tonelajes movidos en 2018

Los tonelajes que se ilustran en la Figura 3.10 destacan movimientos importantes desde Veracruz hacia Guerrero, Chihuahua y Oaxaca, así como en los pares Sinaloa –Jalisco, San Luis Potosí – Michoacán y Michoacán– Guerrero.

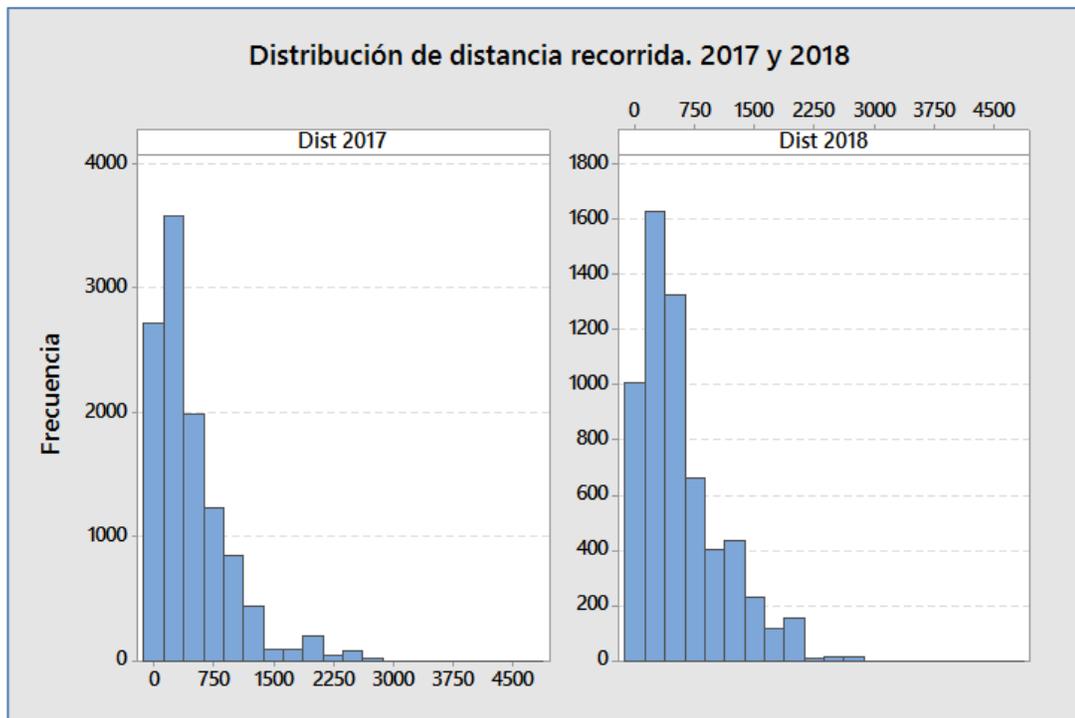
3.2 Las distancias recorridas

Las distancias recorridas por los movimientos de carga no se conocen directamente de las cartas de porte, pues no es un requisito que se solicite en su llenado. Estas distancias son estimadas utilizando software de ruteo que busca la mejor ruta probable, y ese dato se asocia a cada registro

El dato de las distancias recorridas es de interés particularmente para compararlo con las rutas que se pronostican en los modelos de asignación de tráfico, por una parte, y en el comportamiento esperado de la distribución de estas distancias conforme se ha reportado en la literatura de transporte.

En los estudios de transporte de pasajeros, se ha reportado que las distancias recorridas observadas en encuestas de origen – destino generalmente tienen colas más largas hacia la derecha, es decir, tienen el coeficiente de asimetría positivo, y en algunos casos se ha propuesto la distribución Gamma como modelo para la variable distancia recorrida (Ortúzar, 2011, Suprayitno, 2018).

La Figura 3.9 muestra el histograma de las distancias recorridas que se estimaron para las cartas porte de 2017 y 2018.

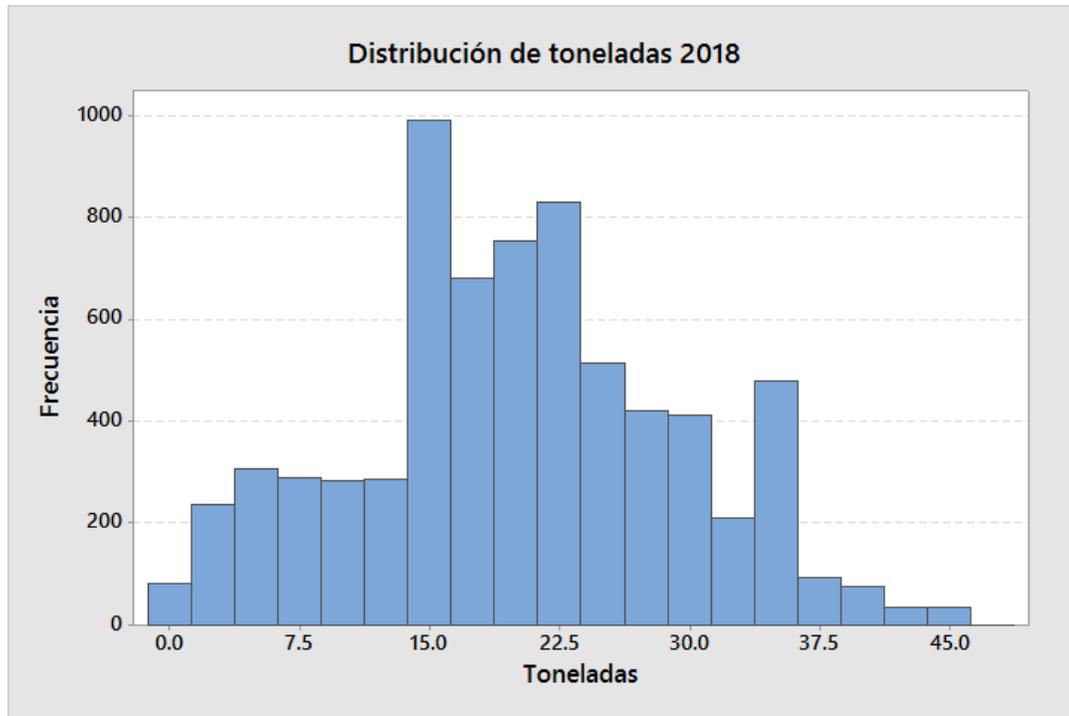


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.11 Distribución de distancias recorridas en pares O-D 2017 y 2018

Los dos histogramas de distancia recorrida en la Figura 3.9 muestran asimetría positiva con una cola larga a la derecha de la distribución. Esta característica resulta consistente con lo observado en tráficos urbanos, donde se tienen algunos recorridos cortos, seguidos de un mayor número de recorridos de distancias medias a medida que aumenta la distancia del viaje, para finalmente observar que el número de viajes a grandes distancia se reduce notablemente, con sólo algunos viajes en los recorridos más largos (Ortúzar, 2011).

En contraste con las distancias recorridas, los tonelajes movidos en los camiones muestran una distribución más simétrica, como se observa en la Figura 3.10 para los tonelajes registrados de 2018. En esta gráfica se observa un número reducido de tonelajes pequeños, seguido de un mayor número de tonelajes medios y luego otra vez un número menor de tonelajes grandes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.12 Distribución de toneladas movidas en pares O-D 2018

La relevancia de la distribución de las distancias de recorrido derivadas una matriz O-D está en que en el proceso de calibración de la función de disuasión utilizada en el ajuste de la matriz, el objetivo es estimar los parámetros de esta función de manera que los resultados de la matriz ajustada con ese modelo de disuasión reproduzcan tan aproximadamente como sea posible, la distribución de las distancias de recorrido observadas en la matriz inicial del proceso (Ortúzar, 2011). Los métodos de ajuste de las matrices O-D se tratan en el capítulo cuatro.

3.3 La representatividad y el tamaño de la base de datos

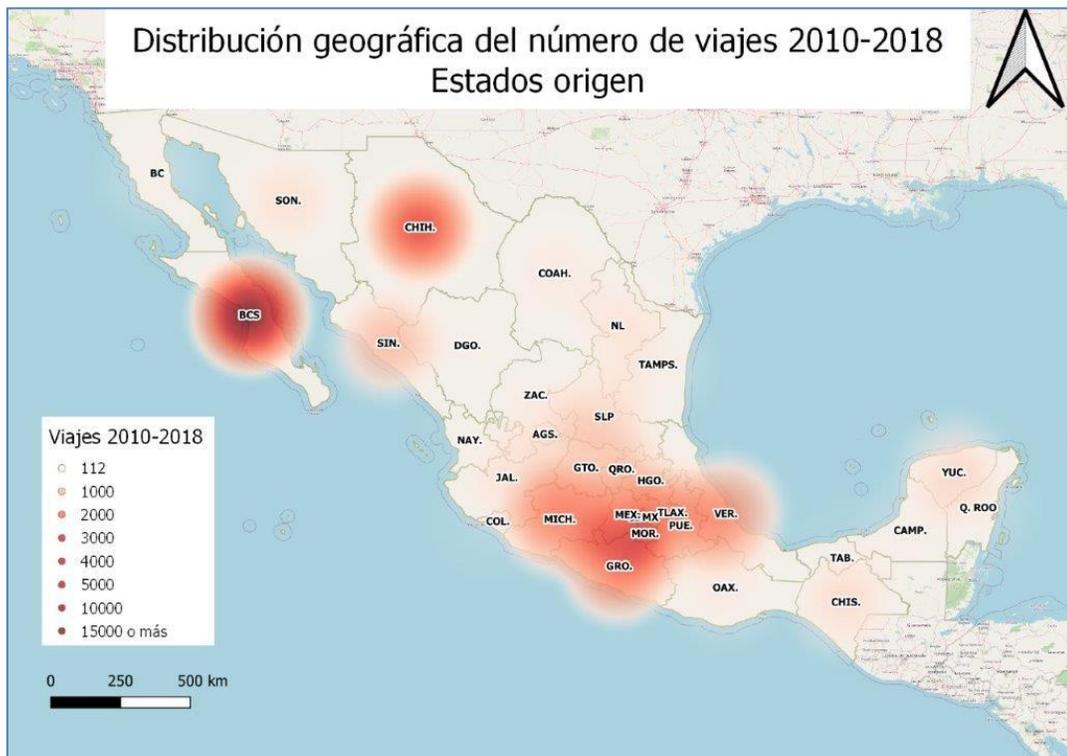
Las muestras de cartas porte que han integrado la base de datos 2010 – 2018 han sido en su mayoría aportaciones voluntarias de transportistas que ha gestionado la DGAF para los estudios estadísticos. Estas muestras han permitido elaborar un primer panorama de la distribución de los orígenes y los destinos de la carga que se mueve por autotransporte, como se ha visto en las secciones anteriores.

Sin embargo, las muestras colectadas por aportaciones voluntarias distan de ser representativas del universo de movimientos del autotransporte de carga. Para

generar muestras con mayor representatividad estadística, el IMT propuso un esquema de muestreo aleatorio estratificado que ha tenido ya algunas pruebas piloto para su implementación con ayuda de la propia DGAF y los Centros SCT en todo el país.

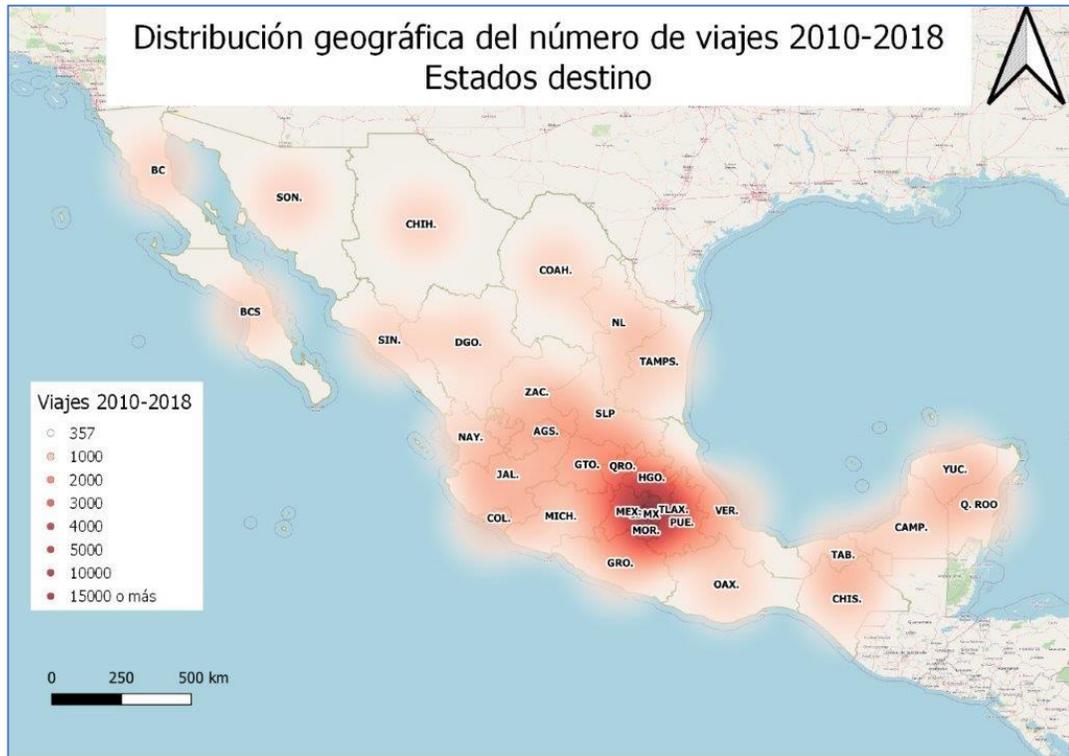
Si se observan los mapas de líneas de deseo mostrados en la sección anterior, por ejemplo en la Figura 3.10 que ilustra toneladas movidos, se puede notar que aunque se resaltan flujos importantes, no se destacan todas las zonas industriales o portuarias importantes.

Las figuras 3.13 y 3.14 muestran mapas de calor para los números de viajes que se originan y que llegan, respectivamente, a cada estado de la República.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.13. Número de viajes que genera cada estado. 2010 –2018



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.14 Número de viajes que atrae cada estado. 2010 –2018

Las figuras 3.13 y 3.14 muestran una concentración importante de orígenes y de destinos en el centro del país, alrededor de Ciudad de México y estados vecinos, donde hay bastante actividad industrial. En cuanto a origen, aparecen como relevantes Baja California Sur y Chihuahua, lo que pudiera relacionarse con el número de cartas registradas en esos estados.

Tanto en origen como en destino, sin embargo, no destaca la zona industrial de Nuevo León, ni los puertos importantes como Veracruz y Manzanillo, lo que en cierto modo refleja una representatividad limitada de las muestras de cartas porte.

Comparaciones con los datos EECAN

En el periodo 2010 – 2018, la base de cartas porte ha reunido un total de 151,252 registros (cartas porte), que son consideradas embarques individuales; comparativamente, en el periodo 2010 – 2017, las bases de datos del EECAN acumularon un total de 858,318 camiones encuestados, cuya información en la encuesta es equiparable al contenido de una carta porte.

La cantidad de pares O-D detectados con cartas porte en 2017 fueron 458, mientras que en el mismo año, las encuestas EECAN detectaron 1,076 pares en las seis

estaciones de muestreo instaladas en ese año en puntos cercanos a la costa en Guerrero, Oaxaca y Veracruz.

Si bien los registros de EECAN son mucho más numerosos, y contienen información sobre la configuración vehicular, misma que las cartas porte no contienen, la cobertura de cada año de encuesta es solamente en una pequeña zona de encuesta que no abarca la totalidad del país.

Por su parte, las cartas porte, aunque no contienen datos sobre la configuración vehicular utilizada en el embarque, sí contienen información del flete cobrado, y del valor de la carga transportada. La cobertura de la base de datos de cartas porte, además, es de todo el país. La tabla 3.3 resume las diferencias básicas de información contenida en cartas porte y en las encuestas EECAN.

Tabla 3.3 Características básicas. Bases de datos. Cartas porte vs EECAN

	Carta porte	Encuesta EECAN
Origen y destino	Sí	Sí
Fecha de movimiento	Sí	Sí
Peso de la carga	Sí	Más bien, PBV
Tipo de carga	Sí	Sí
Valor de la carga	Sí	Sí
Configuración vehicular	No	Sí
Flete cobrado	Sí	No
Cobertura	Todo el país	Zona de estaciones de muestreo
Disponibilidad	2010-2018 y más	2000-2017 solamente

Fuente: Elaboración propia.

Las bases de datos EECAN se han utilizado ya en algunos trabajos del IMT para estimar matrices O-D del autotransporte de carga. La cancelación de los estudios O-D que daban origen a las ediciones anuales del EECAN, limitan seriamente el uso de esta información para horizontes más allá de 2017.

Las cartas de porte, con sus primeras muestras que han integrado la base de datos 2010 – 2018, con una cobertura nacional, tienen una buena oportunidad de continuar con el acopio anual de información; además, con el esquema de muestreo estratificado que se ha propuesto, se podrá mejorar la representatividad de las muestras para tener mejor calidad estadística de sus contenidos.

4. Metodología de matrices O–D

El conocimiento y análisis del movimiento carretero de carga requiere tener información del comportamiento de los flujos vehiculares asociados, sus orígenes, sus destinos y las rutas utilizadas. Una buena aproximación a esta información es de gran relevancia para la planeación y control del sistema carretero, como es determinar las rutas más utilizadas, los principales productos movidos y sus toneladas, o los tramos que presentan congestión.

La organización de la información origen-destino de los movimientos de carga, en general, pueden abordarse de dos maneras (Ortúzar y Willumsen, 2011):

- 1) Con una matriz de viajes, que es un arreglo tabular que registra los viajes hechos de un origen a un destino en un periodo temporal específico. Este arreglo tabular es lo que se conoce como matriz origen-destino (matriz O-D) y es un ingrediente necesario en todo modelo de asignación de tráfico para estimar las rutas utilizadas y su nivel de ocupación.
- 2) Considerando los factores que determinan la generación de viajes en los orígenes de la carga, y la atracción de estos viajes en los correspondientes destinos. Así, por ejemplo, los movimientos de autotanques que transportan combustible pueden originarse en una refinería, con destino a instalaciones industriales o de venta al público. La información relativa a la generación-atracción de viajes suele tomarse en intervalos de tiempo más extensos que los de las matrices O-D.

Para tener una matriz O-D de utilidad en las tareas de planeación del sistema carretero, el control o los pronósticos de tráfico, se necesita información suficiente de los movimientos de carga en la carretera.

La obtención de datos de tráfico carretero puede hacerse con encuestas de camino, con datos de aforos vehiculares realizados en ciertos tramos de la red y también con datos de registros administrativos como es el caso de las cartas porte. Ninguno de estos métodos puede realizar una colecta exhaustiva de todos los posibles movimientos de carga en la red, y la matriz O-D que se pudiera obtener sería una matriz O-D parcial que muy probablemente omite varios pares origen-destino presentes en la red carretera. La estimación de una matriz O-D que represente aproximadamente el total de movimientos necesita utilizar algún tipo de modelación.

Cuando se dispone de una matriz O-D con datos de periodos previos recientes, la información de esta matriz puede considerarse descriptiva de la situación media del tráfico; es por eso que las matrices O-D deben ajustarse periódicamente para reflejar mejor el estado vigente de los movimientos de carga.

La construcción de una matriz O-D consiste en estimar una matriz con la información de los movimientos de carga tal que, al utilizarla en un modelo de asignación de tráfico, se generen flujos vehiculares (camiones) o de carga (toneladas) cuyos valores sean razonablemente cercanos a los que se observan en la red carretera.

Es común que en modelos de asignación de tráfico se requiera algún tipo de información acerca de las magnitudes del tráfico en el nivel de demanda del periodo anterior al estudiado para cada par O-D de interés, es decir, se requiere una matriz base llamada también matriz semilla. Esta matriz semilla contiene datos antiguos y se puede actualizar utilizando factores de crecimiento acordes a la evolución del transporte carretero de carga o por procedimientos sintéticos para generar matrices de distribución de viajes.

El problema de estimar una matriz O-D que reproduzca con buena aproximación valores de flujo vehicular observado en algunos tramos de la red, es en cierto modo el inverso del problema de asignación de flujo a la red. Sin embargo, hay ciertas consideraciones que complican la estimación de la matriz.

Primeramente, los flujos que pueden observarse en tramos de la red en general no la cubren por completo, y aunque esto fuera posible, p. ej. si la red no es grande, siempre hay errores de medición e inconsistencias. (Petersen, 2007).

Por otra parte, si la matriz O-D es de dimensión $n \times n$, hay n^2 entradas que calcular, y sólo se tienen $n + n = 2n$ condiciones a cumplir con las sumas en los n orígenes y las sumas en los n destinos, así que el sistema de ecuaciones lineales tiene más variables (las entradas de la matriz) que ecuaciones, y resulta de solución múltiple; es decir, habría muchas matrices distintas que podrían ajustar sus entradas a una muestra de flujos observados. Por esa razón se elige tener una matriz semilla para iniciar un proceso de estimación. En las secciones siguientes se muestran aspectos de la estimación de las matrices OD

4.1 Métodos de estimación

Dada una matriz O-D, sumando las entradas en una fila, se obtiene el total de viajes que salen de la zona que representa esa fila; análogamente, sumando las entradas en una columna, se obtiene el total de viajes que llegan a la correspondiente zona. Si V_{ij} es el número de viajes que van del origen i al destino j se cumplen las condiciones siguientes:

$$\sum_j V_{ij} = O_i; \quad \sum_i V_{ij} = D_j \quad \dots (1)$$

Donde O_i es el total de viajes generados en el origen i , mientras que D_j es el total de viajes que llegan al destino j .

Cuando se dispone de información confiable sobre la generación de viajes en los orígenes O_i y también sobre la atracción de viajes en los destinos D_j entonces es deseable que el modelo para estimar la matriz cumpla con las dos condiciones anteriores; se dice entonces que se tiene un modelo doblemente restringido. Cuando se tiene información solamente de una de las restricciones, ya sea los orígenes o los destinos, se tiene un modelo de una sola restricción; es así que se pueden tener modelos de generación de viajes conociendo la información de los orígenes O_i o un modelo de atracción de viajes, conociendo la información de los destinos D_j .

Los modelos que permiten estimar la matriz O-D suelen tratarse en la etapa de distribución del paradigma de las cuatro etapas en modelación del transporte. Esta etapa busca determinar el número de viajes que se realizan entre cada par origen-destino viable en la red carretera, con base en la información disponible en los orígenes y/o en los destinos.

Los dos modelos más comunes para estimar una matriz O-D son:

1. Método con factor de crecimiento para actualizar una matriz O-D que esté disponible con información previa.
2. El modelo gravitacional, que estima los viajes entre cada par origen-destino considerando las características de los puntos de origen y destino, así como una medida del costo de realizar el viaje ya sea por tiempo, distancia o algún costo monetario asociado.

4.2 Estimación con factores de crecimiento.

Este método usualmente se aplica cuando se dispone de una matriz O-D de estudios previos y se quiere ponerla al día o estimarla para un horizonte de unos cuantos años a futuro.

El método aplica un factor de crecimiento, que suele ser un porcentaje estimado de crecimiento, para corregir las entradas de la matriz y actualizarla. Puede ser de utilidad cuando no se tiene información de la infraestructura carretera, sus tiempos de traslado o sus niveles de congestión.

El método de factor de crecimiento, aunque es sencillo de implementar, está limitado al no considerar la información de la infraestructura carretera, y por tanto no poder estimar los impactos de modificaciones o creación de nuevos tramos. No obstante, para actualizar una matriz base para manejo en el corto plazo puede funcionar, permitiendo aplicar métodos de ajuste a esa matriz actualizada para refinar su estimación con información de tráfico reciente.

La aplicación del factor de crecimiento para actualizar una matriz O-D suele hacerse de tres maneras:

- a) **Factor de crecimiento f uniforme.** Aplicable a toda la matriz O-D; se usa cuando se tiene una estimación básica del crecimiento esperado del tráfico en el horizonte de planeación.

Entonces, si V_{ij} es el número de viajes del origen i al destino j en la matriz O-D original, y V'_{ij} es el correspondiente actualizado, se tiene:

$$V'_{ij} = fV_{ij}$$

Considerando la matriz ejemplificada en la tabla 2.1 del capítulo 2:

Origen	EdoMEX	GTO	HGO	MICH	QRO	SLP	Suma fila
EdoMEX	0	48	12	168	10	15	253
GTO	5	0	0	15	1	10	31
HGO	47	15	0	9	34	18	123
MICH	34	45	5	0	7	0	91
QRO	2	0	2	9	0	9	22
SLP	75	43	15	335	24	0	492
Suma col.	163	151	34	536	76	52	1012

Al aplicar un factor de crecimiento del 2.4% único a toda la matriz se tiene

$$V'_{ij} = 1.024V_{ij}$$

Y la matriz actualizada (redondeada a enteros) queda como sigue:

Origen	EdoMEX	GTO	HGO	MICH	QRO	SLP	Suma fila
EdoMEX	0	49	12	172	10	15	259
GTO	5	0	0	15	1	10	32
HGO	48	15	0	9	35	18	126
MICH	35	46	5	0	7	0	93
QRO	2	0	2	9	0	9	23
SLP	77	44	15	343	25	0	504
Suma col.	167	155	35	549	78	53	1036

El número total de viajes actualizado es $1,036 \approx 1.024 \times 1,012$.

- b) **Factor de crecimiento con una restricción.** Se puede tener un factor f_o de crecimiento esperado en los orígenes, o un factor f_D de crecimiento esperado en los destinos. Es el caso cuando se dispone de estimaciones del crecimiento del número de viajes en los orígenes o cuando se tiene alternativamente la estimación para los destinos.

A partir del crecimiento esperado en cada uno de los orígenes (destinos) se calcula el factor correspondiente a cada origen (cada destino) y se aplica a cada elemento de la fila (columna) para actualizar la matriz.

Por ejemplo, considerando la matriz O-D del ejemplo previo con los aumentos esperados que se muestran en los destinos (marcado en amarillo):

Origen	Destino					
	EdoMEX	GTO	HGO	MICH	QRO	SLP
EdoMEX	0	48	12	168	10	15
GTO	5	0	0	15	1	10
HGO	47	15	0	9	34	18
MICH	34	45	5	0	7	0
QRO	2	0	2	9	0	9
SLP	75	43	15	335	24	0
Suma col.	163	151	34	536	76	52
Aumento	175	195	50	600	85	60

El factor para el destino EdoMEX es $175/163 \approx 1.074$, mientras que el factor para el destino GTO es $195/151 \approx 1.291$. De este modo la columna de EdoMEX se multiplica por 1.074 y la de GTO se multiplica por 1.291. Procediendo igualmente con las otras columnas se obtiene la matriz actualizada siguiente:

Origen	Destino						Suma fila
	EdoMEX	GTO	HGO	MICH	QRO	SLP	
EdoMEX	0.0	62.0	17.6	188.1	11.2	17.3	296.2
GTO	5.4	0.0	0.0	16.8	1.1	11.5	34.8
HGO	50.5	19.4	0.0	10.1	38.0	20.8	138.7
MICH	36.5	58.1	7.4	0.0	7.8	0.0	109.8
QRO	2.1	0.0	2.9	10.1	0.0	10.4	25.5
SLP	80.5	55.5	22.1	375.0	26.8	0.0	560.0
Suma col.	175.0	195.0	50.0	600.0	85.0	60.0	1165.0

En esta matriz se tienen los aumentos esperados en los destinos, y en los orígenes los aumentos correspondientes que permiten igualar las sumas de filas con las sumas de columnas que dan el nuevo total de 1,165 viajes.

- c) **Factor de crecimiento con dos restricciones.** En este caso, se tienen estimaciones de los crecimientos en viajes tanto en los orígenes como en los destinos. Las cantidades de viajes esperados en los orígenes O_i' y en los destinos D_j' en principio generan los factores a_i para aplicar en las filas de la matriz, y los factores b_j para aplicar en las columnas.

De este modo, cada elemento de la matriz está multiplicado por un factor de crecimiento en el origen y uno de crecimiento en el destino:

$$V_{ij}' = a_i b_j V_{ij}$$

Estos factores deben cumplir las dos restricciones de crecimiento en orígenes y en destinos, descritas en el sistema de $2n$ ecuaciones siguiente.

$$\begin{aligned}
 a_1 b_1 V_{11} + a_1 b_2 V_{12} + \dots + a_1 b_n V_{1n} &= O_1' \\
 a_2 b_1 V_{21} + a_2 b_2 V_{22} + \dots + a_2 b_n V_{2n} &= O_2' \\
 &\vdots \\
 a_n b_1 V_{n1} + a_n b_2 V_{n2} + \dots + a_n b_n V_{nn} &= O_n' \\
 b_1 a_1 V_{11} + b_1 a_2 V_{21} + \dots + b_1 a_n V_{n1} &= D_1' \\
 b_2 a_1 V_{11} + b_2 a_2 V_{21} + \dots + b_2 a_n V_{n1} &= D_2' \\
 &\vdots \\
 b_n a_1 V_{11} + b_n a_2 V_{21} + \dots + b_n a_n V_{n1} &= D_n'
 \end{aligned}$$

Donde O_1', O_2', \dots, O_n' son los crecimientos esperados en los orígenes y D_1', D_2', \dots, D_n' son los crecimientos esperados en los destinos.

Las restricciones forman un sistema de $2n$ ecuaciones no-lineales simultáneas en las $2n$ variables a_i, b_j ; su solución puede hallarse con algoritmos de programación no-lineal, aunque hay procedimientos de aproximación sucesiva que en general se emplean más en la práctica.

Como ejemplo, enseguida se muestra la matriz O-D del primer ejemplo con los aumentos esperados en orígenes y destinos marcados en amarillo.

Origen	Destino						Suma fila	Aumento
	EdoMEX	GTO	HGO	MICH	QRO	SLP		
EdoMEX	0	48	12	168	10	15	253	302
GTO	5	0	0	15	1	10	31	45
HGO	47	15	0	9	34	18	123	160
MICH	34	45	5	0	7	0	91	132
QRO	2	0	2	9	0	9	22	40
SLP	75	43	15	335	24	0	492	510
Suma col.	163	151	34	536	76	52	1012	
Aumento	175	200	100	550	100	64		1189

El sistema de ecuaciones para este ejemplo se resolvió con el complemento Solver de Excel, que usa el algoritmo de gradiente reducido generalizado (GRG), dando la matriz actualizada siguiente luego de ocho iteraciones.

Origen	Destino						Suma fila
	EdoMEX	GTO	HGO	MICH	QRO	SLP	
EdoMEX	0.0	61.4	34.9	178.3	12.3	15.1	302.0
GTO	7.1	0.0	0.0	22.2	1.7	14.0	45.0
HGO	55.9	22.5	0.0	11.2	49.1	21.2	160.0
MICH	39.5	65.9	16.6	0.0	9.9	0.0	132.0
QRO	3.1	0.0	8.8	14.4	0.0	13.7	40.0
SLP	69.4	50.1	39.7	323.9	26.9	0.0	510.0
Suma col.	175.0	200.0	100.0	550.0	100.0	64.0	1189.0

En la práctica lo más habitual utilizar algoritmos de aproximación sucesiva, por la sencillez de su aplicación. El origen de estos métodos se encuentra en los trabajos de T.J. Fratar (1954) y en un trabajo de K.P. Furness de 1965.

Los métodos de aproximación calculan primeramente un grupo de coeficientes, p. ej los correspondientes a orígenes (filas de la matriz) para luego comparar el resultado que se tiene en el otro grupo de coeficientes contra sus estimaciones correspondientes.

Si resultan diferencias importantes, se generan nuevos coeficientes en el primer grupo y se repite el proceso hasta que se tengan diferencias aceptables.

El proceso iterativo de ajuste de la matriz O-D es como sigue (Ortúzar, 2011).

1. Hacer todos los factores de ajuste de columnas iguales a uno (para valor objetivo de destinos) $b_j = 1; j = 1, 2, \dots, n$.
2. Calcular los factores de filas $a_j, j = 1, 2, \dots, n$ para ajustar las sumas de filas a los valores objetivos de los orígenes.
3. Con la matriz ajustada por los factores a_j , calcular nuevos factores de columnas b_j para ajustar las sumas de columnas a los valores objetivos de los destinos.
4. Con la matriz ajustada, verificar las discrepancias con objetivos en filas y columnas. Si están dentro de tolerancia se tiene la matriz actualizada. En caso contrario repetir los pasos 2 y 3 hasta lograr la tolerancia esperada.

Con el ejemplo anterior, iniciando con la matriz de doble restricción, con los objetivos de crecimiento marcados en amarillo, se tiene el siguiente cálculo.

Origen	Destino						Suma fila	Aumento
	EdoMEX	GTO	HGO	MICH	QRO	SLP		
EdoMEX	0	48	12	168	10	15	253	302
GTO	5	0	0	15	1	10	31	45
HGO	47	15	0	9	34	18	123	160
MICH	34	45	5	0	7	0	91	132
QRO	2	0	2	9	0	9	22	40
SLP	75	43	15	335	24	0	492	510
Suma col.	163	151	34	536	76	52	1012	
Aumento	175	200	100	550	100	64		1189

El método de aproximaciones genera en la tercera iteración la siguiente matriz ajustada. Las diferencias contra los valores objetivos en los destinos son menores al 2.5% y podrían ser consideradas aceptables en la práctica.

Origen	Destino						Suma fila	Diferencias
	EdoMEX	GTO	HGO	MICH	QRO	SLP		
EdoMEX	0.0	59.8	34.3	179.9	12.6	15.5	302.0	
GTO	7.0	0.0	0.0	22.1	1.7	14.2	45.0	
HGO	55.9	21.7	0.0	11.2	49.6	21.6	160.0	
MICH	40.3	65.0	16.5	0.0	10.2	0.0	132.0	
QRO	3.1	0.0	8.6	14.5	0.0	13.9	40.0	
SLP	69.6	48.6	38.9	325.5	27.4	0.0	510.0	
Suma col.	175.9	195.2	98.2	553.1	101.4	65.1	1189.0	
Diferencias	0.5%	-2.4%	-1.8%	0.6%	1.4%	1.8%		

Las ventajas de los factores de crecimiento, es que son fáciles de utilizar, los paquetes de software especializado de planeación del transporte como TransCAD o Visum los incluyen y para valoraciones en el corto plazo, son consistentes con la información de crecimiento estimada.

Las limitaciones de estos métodos son que no emplean información de la infraestructura carretera en uso ni de sus modificaciones, ni pueden usar datos de costos en las rutas ni de la congestión, por lo que no son de mucha utilidad para estimaciones en el mediano o en el largo plazo.

4.3 El Modelo Gravitacional

Este modelo se basa en el supuesto de que el número de viajes V_{ij} entre un origen i y un destino j está influenciado por factores externos como la distancia, los tamaños de las poblaciones o los viajes generados y atraídos en origen y en destino.

Ortúzar (2014) cita el modelo de Casey (1955) como una de las primeras analogías con la ley de atracción gravitacional de Newton de la Física, donde el número de

viajes V_{ij} entre un origen i y un destino j es proporcional al producto de las poblaciones en origen y destino, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, considerada elemento de disuasión para viajar:

$$V_{ij} = k \frac{P_i P_j}{d_{ij}^2}$$

Donde:

P_i = tamaño de población del origen i ;

P_j = tamaño de población del destino j .

d_{ij} = distancia entre origen i y destino j ;

k = constante del modelo para calibrar.

Este modelo llevó a definir uno más general, en el que se reemplazan los tamaños de las poblaciones en el origen y en destino por los viajes generados y atraídos en el par origen–destino, mientras que la distancia origen–destino se reemplaza por funciones de carácter más general que permitan representar otros aspectos que desalientan el viaje además de la distancia, como es el tiempo de recorrido o algún costo generalizado.

Estas funciones se conocen como *funciones de disuasión* (*deterrence functions* en inglés), y sus formulaciones buscan que sean funciones decrecientes de la distancia entre origen y destino o de algún costo generalizado que represente la inconveniencia del viaje. Entre las funciones de uso más común para el modelo gravitacional están:

d) Función exponencial: $f(d_{ij}) = e^{-c(d_{ij})}$, $c > 0$

e) Función potencia: $f(d_{ij}) = d_{ij}^{-b}$, $b > 0$

f) Función combinada (función de Tanner)

$$f(d_{ij}) = a(d_{ij}^{-b})e^{-c(d_{ij})}, a > 0, c \geq 0$$

Donde d_{ij} es un elemento de costo generalizado del viaje entre origen y destino.

De esta manera, el modelo más general resulta entonces:

$$V_{ij} = kO_i D_j f(d_{ij})$$

Donde:

O_i = núm. de viajes generados en destino i

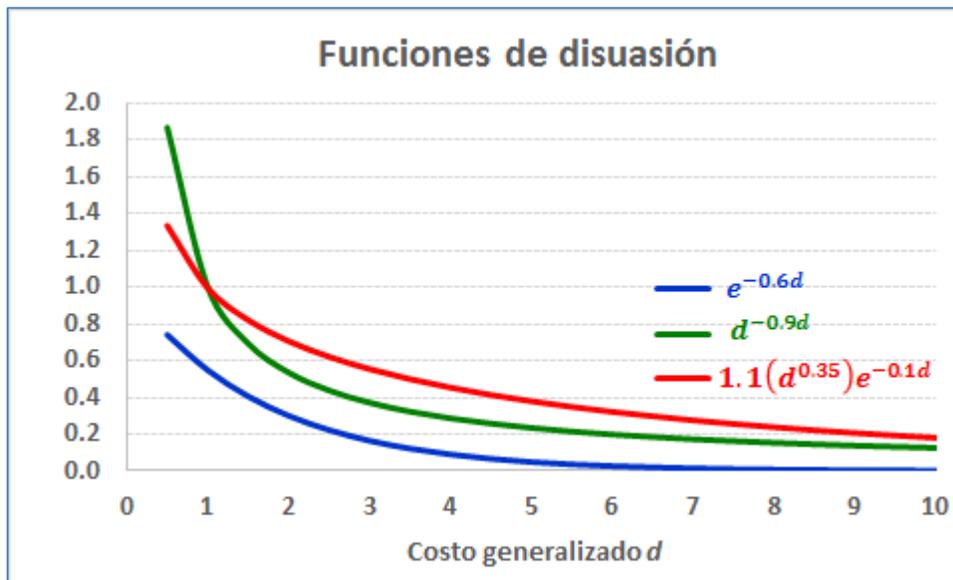
D_j = núm. de viajes atraídos al destino j .

d_{ij} = costo generalizado del par $i - j$.

k = constante del modelo para calibrar.

$f(d_{ij})$ = función de disuasión.

La Figura 4.1 muestra algunos ejemplos de funciones de disuasión con los parámetros que se indican. Estas funciones son decrecientes, representando la disuasión a viajar a medida que aumenta el costo generalizado d .



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1 Ejemplos de funciones de disuasión

El proceso de calibrar los parámetros de las funciones de disuasión, trata de encontrar valores numéricos que hacen que el modelo gravitacional genere una distribución de viajes lo más cercana a la distribución real de los mismos que se observan en la zona de estudio. También es común que se prueben parámetros generados en estudios previos o en estudios a nivel nacional o regional del mismo tipo.

A fin de que en el modelo gravitacional se respeten las ecuaciones (1), se introducen dos juegos de parámetros a_i, b_j de manera semejante al manejo de los factores de crecimiento en el caso de doble restricción con el método de Furness, de modo que el número de viajes entre el par (i, j) cumpla la condición siguiente:

$$V_{ij} = a_i b_j O_i D_j f(d_{ij})$$

El sistema de ecuaciones que resulta es como sigue

$$\begin{aligned}
 a_1 b_1 O_1 D_1 f(d_{11}) + a_1 b_2 O_1 D_2 f(d_{12}) + \dots + a_1 b_n O_1 D_n f(d_{1n}) &= O_1 \\
 a_2 b_1 O_2 D_1 f(d_{21}) + a_2 b_2 O_2 D_2 f(d_{22}) + \dots + a_2 b_n O_2 D_n f(d_{2n}) &= O_2 \\
 &\vdots \\
 a_n b_1 O_n D_1 f(d_{n1}) + a_n b_2 O_n D_2 f(d_{n2}) + \dots + a_n b_n O_n D_n f(d_{nn}) &= O_n \\
 b_1 a_1 O_1 D_1 f(d_{11}) + b_1 a_2 O_2 D_1 f(d_{21}) + \dots + b_1 a_n O_n D_1 f(d_{n1}) &= D_1 \\
 b_2 a_1 O_1 D_2 f(d_{11}) + b_2 a_2 O_2 D_2 f(d_{21}) + \dots + b_2 a_n O_n D_2 f(d_{n1}) &= D_2 \\
 &\vdots \\
 b_n a_1 O_1 D_n f(d_{11}) + b_n a_2 O_2 D_n f(d_{21}) + \dots + b_n a_n O_n D_n f(d_{n1}) &= D_n
 \end{aligned}$$

Donde O_1, O_2, \dots, O_n son los viajes generados estimados en los orígenes y D_1, D_2, \dots, D_n son los viajes atraídos que estimados en los destinos.

Eliminando los factores comunes de viajes en origen en las primeras n ecuaciones y correspondientes a viajes en destino en las últimas n ecuaciones, y factorizando los parámetros resulta el siguiente sistema de $2n$ ecuaciones no-lineales:

$$\begin{aligned}
 a_1 [b_1 D_1 f(d_{11}) + b_2 D_2 f(d_{12}) + \dots + b_n D_n f(d_{1n})] &= 1 \\
 a_2 [b_1 D_1 f(d_{21}) + b_2 D_2 f(d_{22}) + \dots + b_n D_n f(d_{2n})] &= 1 \\
 &\vdots \\
 a_n [b_1 D_1 f(d_{n1}) + b_2 D_2 f(d_{n2}) + \dots + b_n D_n f(d_{nn})] &= 1 \\
 b_1 [a_1 O_1 f(d_{11}) + a_2 O_2 f(d_{21}) + \dots + a_n O_n f(d_{n1})] &= 1 \\
 b_2 [a_1 O_1 f(d_{11}) + a_2 O_2 f(d_{21}) + \dots + a_n O_n f(d_{n1})] &= 1 \\
 &\vdots \\
 b_n [a_1 O_1 f(d_{11}) + a_2 O_2 f(d_{21}) + \dots + a_n O_n f(d_{n1})] &= 1
 \end{aligned}$$

Este sistema se puede resolver por aproximaciones sucesivas como se hace con el método Furness para factores de crecimiento o se puede resolver con algún algoritmo de programación no-lineal, como puede ser el método de Newton-Raphson. En la práctica el ajuste de un modelo gravitacional se puede hacer empleando software especializado en planeación de transporte como TransCAD o Visum.

Para ejemplificar la aplicación del modelo gravitacional, se resolvió el sistema de ecuaciones no-lineales con los datos de viajes en origen O_i y datos en destino D_j de la tabla 2.1 mostrada en el capítulo 2, que se reproduce enseguida, y se utilizó la función de disuasión $f(d_{ij}) = e^{-0.145d_{ij}}$ donde d_{ij} es la distancia entre capitales estatales estimada con Google Maps.

Origen	EdoMEX	GTO	HGO	MICH	QRO	SLP	Suma fila
EdoMEX	0	48	12	168	10	15	253
GTO	5	0	0	15	1	10	31
HGO	47	15	0	9	34	18	123
MICH	34	45	5	0	7	0	91
QRO	2	0	2	9	0	9	22
SLP	75	43	15	335	24	0	492
Suma col.	163	151	34	536	76	52	1012

La solución se obtuvo con Solver de Excel usando el algoritmo GRG; la matriz O-D resultante del modelo se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Matriz O-D estimada del modelo gravitacional con la función de disuasión exponencial $e^{-0.145d_{ij}}$

Origen	Destino						Suma fila
	EdoMEX	GTO	HGO	MICH	QRO	SLP	
EdoMEX	0.0	42.2	9.8	153.6	20.5	26.9	253.0
GTO	6.8	0.0	1.2	17.7	2.4	3.0	31.0
HGO	22.5	17.3	0.0	63.8	8.4	11.0	123.0
MICH	33.3	23.9	6.1	0.0	12.1	15.7	91.0
QRO	4.3	3.1	0.8	11.8	0.0	2.0	22.0
SLP	99.9	69.6	17.9	269.3	35.3	0.0	492.0
Suma col.	166.8	156.0	35.8	516.2	78.6	58.6	1012.0

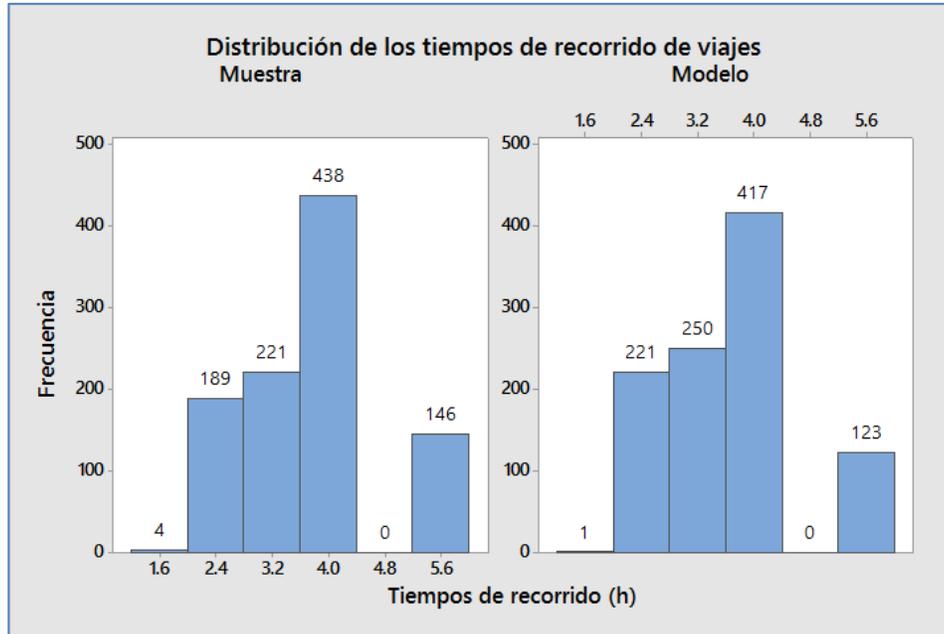
Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que la matriz O-D estimada con el modelo gravitacional tiene diferencias con la matriz original que se muestra arriba, sin embargo coincide en las sumas de filas, sumas de columnas y total de viajes.

Para la calibración de un modelo gravitacional, una estrategia común es buscar la mejor coincidencia posible entre la distribución estadística de los tiempos de recorrido de la muestra de viajes observados con la correspondiente distribución estimada por el modelo. Esta estrategia es la que se recomienda en el software especializado en planeación del transporte TransCAD:

“El objetivo es seleccionar una función de impedancia y sus respectivos parámetros de manera que el modelo gravitacional reproduzca la distribución de duración de viajes del área de estudio. [...] Todos los procesos de calibración usan la matriz OD del año base y la matriz de impedancias para generar la distribución de duración de viajes observada, con la intención de calibrar el modelo para que esta distribución sea reproducida tan aproximada como sea posible” (Caliper, 2018).

La Figura 4.2 muestra los histogramas de estas distribuciones de tiempos de recorrido para la muestra O-D interestatal de la tabla usada en el ejercicio de calibración y para la correspondiente a la estimación generada por el modelo gravitacional.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2 Distribución de los tiempos de recorrido en la muestra y con el modelo gravitacional

Las formas de los histogramas de la Figura 4.2 son semejantes, aunque con diferencias numéricas en la aproximación lograda por el modelo gravitacional.

Para mejorar la estimación se puede buscar afinar el parámetro de la función exponencial y las distancias de recorrido entre orígenes y destinos.

En la práctica, con el manejo de matrices O-D del año base de dimensiones grandes, es conveniente utilizar algún software especializado como TransCAD o Visum, que ofrecen rutinas con la metodología ya señalada y contienen otros procedimientos de ajuste para mejorar las estimaciones de la matriz O-D.

Conclusiones

En la planeación del transporte carretero de carga, la información sobre el origen y el destino de los flujos de camiones es esencial para conocer el comportamiento del autotransporte de carga. La información básica del flujo de carga puede organizarse en una matriz origen–destino llamada matriz O-D que contiene datos del número de viajes que se observan o que se estima que ocurren entre cada origen y cada destino relevante en la red carretera; alternativamente puede tenerse la suma de toneladas que se mueven entre cada origen y cada destino.

Los modelos de asignación de tráfico usan como insumo principal una matriz O-D para pronosticar las rutas usadas por los flujos de carga, y así estimar los niveles de desgaste de la infraestructura, la congestión vial esperada, los tiempos promedio de traslado, y otros rasgos para determinar el desempeño del subsector.

Para construir una matriz O-D que represente los movimientos de carga en una región, se pueden coleccionar datos de encuestas de camino, o datos obtenidos en encuestas a transportistas o datos de aforos vehiculares realizados en puntos estratégicos de la red. Estas fuentes tienen diversos costos asociados, que ante restricciones presupuestales, limitan los alcances de la información obtenida.

En algunos trabajos de investigación del IMT, se han utilizado matrices O-D a partir de datos del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional (EECAN) del IMT, basado en el estudio Origen y Destino que fue publicado por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT entre 2005 y 2017. Desafortunadamente, esta información se suspendió en 2018 por restricciones presupuestales, y al menos, hasta el primer semestre de 2020 no se ha reiniciado.

La falta de disponibilidad de información de las encuestas EECAN a partir de 2018, aun cuando su estructura de datos es equiparable con la información de las cartas porte, limita seriamente su uso para años venideros.

En otro contexto, el IMT inició en 2010 un estudio de cartas porte para la Dirección General de Autotransporte Federal, con el objetivo de estimar el desempeño del autotransporte de carga y apoyar la planeación del subsector. Ya que la carta porte contiene como elementos básicos: origen, destino, tipo de carga, peso y flete cobrado en cada embarque del autotransporte, el IMT planteó como oportunidad el uso de datos de cartas de porte del autotransporte federal como solución al problema de la suspensión de los estudios Origen y Destino de la DGST.

Esta iniciativa además ha considerado aprovechar la aprobación por la SCT del uso del Comprobante para Amparar el Transporte de Mercancías Digital por Internet (CFDI) como equivalente de carta porte, por lo que se han iniciado negociaciones

con el Servicio de Administración Tributaria (SAT) para tener acceso a esta información que recibe el SAT de los transportistas.

De la revisión de la metodología para integrar matrices O-D expuesta en este trabajo, se concluye que la información de cartas porte es adecuada para construir una matriz O-D para el autotransporte de carga, utilizando los métodos convencionales de ajuste de matrices O-D.

Los métodos de factor de crecimiento, si bien no consideran datos de la red de transporte ni perciben los cambios en la infraestructura, permiten obtener estimaciones razonables en el corto plazo, para iniciar una matriz de año base.

Para horizontes de planeación más amplios, es conveniente usar el modelo gravitacional, el cual necesita de una estimación razonable de la función de disuasión, para reproducir aproximadamente las distribuciones de las longitudes de los recorridos observados en la matriz inicial.

Afortunadamente, ambas tareas se pueden realizar con facilidad con los paquetes de software de planeación del transporte como TransCAD o Visum.

Quedan pendientes: ampliar la cantidad de información disponible en las bases de datos, que a finales de 2020 sólo cubría el periodo 2010 – 2018, y la cuestión de la representatividad de las muestras de cartas porte que han conformado esa base de datos. Sobre el horizonte de la base de datos, el IMT solicitó a la DGAF, reiniciar el acopio de cartas porte para 2019, 2020 y los años sucesivos. Con esta información se ampliará la base de datos y se podrá mejorar la estimación de pares O-D.

Sobre a la representatividad de las muestras de cartas porte, el IMT ya también solicitó a la DGAF implementar un muestreo estratificado, con los estratos considerados como las flotas vehiculares estatales, con un procedimiento elaborado por el propio IMT. Este muestreo estratificado mejorará la representatividad de las cartas porte al tomar en cuenta las diferencias de generación y atracción de viajes en los estados, que reflejan en cierto modo los distintos grados de industrialización, flujos de comercio exterior y facilidades portuarias en todo el país.

Los pasos a seguir que consideramos para mejorar la información de cartas porte, son: continuar con el acopio, por lo pronto con los años atrasados de 2019 y 2020, y asegurar las colectas futuras. Y enseguida, emprender la implementación del muestreo estratificado como procedimiento regular en la colecta anual.

Con el apoyo del SAT para obtener cartas porte en formato digital se tendrá la oportunidad de obtener grandes cantidades de cartas de porte electrónicas para un mejor manejo de las bases de datos y en consecuencia tener mejores estimaciones de matrices O-D para el autotransporte de carga.

Bibliografía

Caliper. (2018). *Travel Demand Modeling with TransCAD 8.0. User's Guide*.

Caliper. (2018a). *TransCAD 8.0. User's Guide. Chapter 14 "Working with matrices"*.

De la Torre, et al (2020). *Análisis Estadístico de Cartas de Porte del Autotransporte Federal de Carga 2019 (Datos 2018)* Informe de investigación para la DGAF. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

DOF. (2015). Diario Oficial de la Federación. *CIRCULAR por la que se aprueban los modelos de Carta de Porte-Traslado o Comprobante para Amparar el Transporte de Mercancías pre-impresa y Carta de Porte o Comprobante para Amparar el Transporte de Mercancías Digital por Internet (CFDI) que autoriza el servicio de autotransporte federal de carga en los caminos y puentes de jurisdicción federal, así como indicaciones generales, formato e instructivo de requisitos y condiciones de transporte y anexos.* Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5419975&fecha=15/12/2015

Gutiérrez, J.L., Soria, V. J. y Dorado, M. L. (2018). *Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional. Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 2017.* Documento técnico No.75. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Moreno Quintero E., De la Torre Romero M. E. (2010). *Indicadores Económicos en el Autotransporte Federal de Carga.* Publicación técnica No.344. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Ortúzar, J. D. and Willumsen, L.G. (2011). *Transport Modelling.* 4th Edition. John Wiley & Sons. UK.

Peterson, A. (2007). *The Origin–Destination Matrix Estimation Problem — Analysis and Computations.* Linköping Studies in Science and Technology. Dissertations. No. 1102. Disponible en: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:23558/FULLTEXT01.pdf&sa=U&ei=uolnU9-4MYfP8wG83ICICA&ved=0CDEQFjAE&usq=AFQjCNGgV9n0MBGUxQjUaLuuL5dAPNt39Q>.

STC. (2020). *PROGRAMA SECTORIAL DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES 2020-2024.* En línea. Disponible en: <https://www.gob.mx/sct/documentos/programa-sectorial-de-comunicaciones-y-transportes-2020-2024>.

STC. (2020a). *REGLAMENTO DE AUTOTRANSPORTE FEDERAL Y SERVICIOS AUXILIARES*. En línea (recuperado el 11/sep/2020); disponible en: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/migrated/content/uploads/10_Reglamento_de_Autotransporte_Federal_y_Servicios_Aux.pdf

Suprayitno, H. (2018). "Searching the Correct and Appropriate Deterrence Function General Formula for Calculating Gravity Trip Distribution Model". *IPTEK, The Journal of Engineering*, Vol. 4, No. 3, 2018(eISSN: 2337-8530). Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/290093434.pdf>.

T. J. Fratar. (1954) "Vehicular trip distributions by successive approximations". *Traff. Q.*, 8 (1954), 53–64. En: <https://trid.trb.org/view/692385>.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



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

publicaciones@imt.mx

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