

# Un enfoque multicriterio para el diseño de una red para el transporte de embarques internacionales

Fecha de recepción: 07.01.2013

Fecha de aceptación: 21.02.2013

*Christopher Mejía*

*Argueta*

Tecnológico de Monterrey,  
campus Toluca  
christopher.mejia@itesm.mx

*Juan Gaytán Iniestra*

Universidad Autónoma del  
Estado de México  
jgi@uaemex.mx

*María del Pilar Ester*

*Arroyo López*

Tecnológico de Monterrey,  
campus Toluca  
pilar.arroyo@itesm.mx

## Resumen

Un reto importante para los fabricantes de autopartes es coordinar el abastecimiento desde las diversas zonas geográficas en donde están ubicados sus proveedores. El objetivo de esta investigación fue el diseño de una red para el servicio de transporte donde se consideren tanto el tiempo que los embarques están detenidos en aduanas y puntos de transbordo, como las posibles demoras en la cadena de transporte debido al uso de distintos modos de transporte. Para asegurar el mejor desempeño de la red se formuló un modelo de optimización que considera dos criterios: costo y tiempo, cuya solución fue la estructura de la cadena de transporte para una armadora ubicada en la zona industrial de Toluca que importa autopartes de Estados Unidos de Norteamérica (E.E.U.U.) para comercializarlas entre diversos fabricantes de automóviles que operan en México. Se aprovechó la estructura del problema de optimización para obtener problemas separables y resolverlo usando relajación Lagrangiana. Se identificó un conjunto de posibles soluciones para la estructura de la cadena de transporte usando los métodos de las ponderaciones y de la  $\epsilon$ -restricción; las soluciones obtenidas representan el conjunto de las mejores alternativas a partir de las cuales la gerencia de logística de la empresa puede elegir la que mejor empata con las necesidades y metas de desempeño logístico de la empresa.

Palabras clave: red para el servicio de transporte, transporte intermodal, abasto internacional, optimización con múltiples criterios

## **A multicriteria approach for the design of international freight transportation networks**

### **Abstract**

One of the important challenges for manufacturers and distributors of autoparts is the coordination of multiple sourcing areas where their international suppliers are located. The objective of this research is the design of a service transportation network that takes into account the time shipments are held at customs and transshipment terminals, as well as the possible delays due to the use of different transportation modes. To assure the best performance of the whole transportation network, a bi-criteria optimization model was formulated, the two criteria considered were cost and time. The solution to the model was the structure of the transportation network to be used by a manufacturer of auto parts located in the Toluca industrial zone; this firm imports auto parts produced by suppliers located in the United States (E.E.U.U.) and commercializes them among multiple automakers. The structure of the optimization problem was analyzed to obtain a convenient separable arrangement and then the problem was solved by using Lagrangian relaxation. A set of possible efficient solutions for the structure of the transportation network was generated by using the weighting method and the  $\epsilon$ -constraint method; the resulting solutions represent the set of best alternatives from which the logistics managers may choose the service network that best attends the needs and logistics performance goals of the firm.

**Keywords:** service transportation network, intermodal transportation, international sourcing, multicriteria optimization

### **Introducción**

El concepto de administración de la cadena de suministro se ha extendido durante las últimas décadas hacia diferentes ámbitos y sectores de actividad económica debido a la importancia estratégica que representa la administración efectiva del abasto y la demanda hacia dentro de la empresa y con otros integrantes de la cadena, ya sean proveedores, clientes, intermediarios o empresas externas proveedoras de servicios (Supply Chain Council, 2012). De acuerdo con el Supply Chain Council la administración de la cadena de suministro (SCM, por sus siglas en inglés, Supply Chain Management) se refiere a todos aquellos esfuerzos involucrados en la producción y entrega de productos o servicios finales, desde el proveedor del proveedor hasta el cliente del cliente. La administración de la cadena de suministro implica alinear el abasto con la demanda, el suministro de materias primas y partes, la planeación y ejecución de actividades de manufactura y ensamble, el

almacenaje y rastreo de inventarios, la recepción y administración de órdenes, así como la distribución de productos a través de todos los canales hasta su entrega al consumidor final.

Entre los varios factores que han contribuido a la complejidad de las cadenas de suministro actuales está el abasto internacional, el cual se refiere a la adquisición de bienes de proveedores localizados en cualquier parte del mundo, fuera del área geográfica donde se ubica la empresa compradora (Trent y Monckza, 2005). El incremento del abasto internacional se asocia, entre otros elementos, al surgimiento de nuevas políticas para el comercio internacional (acuerdos, cambios en aranceles, acceso a mercados); el avance en difusión y alcance de las tecnologías de información y comunicación que facilitan las transacciones comerciales y la comunicación con proveedores geográficamente dispersos; la industrialización de nuevas regiones mundiales y el desarrollo en materia de transporte en lo referente tanto a la confiabilidad como a la velocidad de los modos de transporte, tanto en los segmentos de recorrido como en los puntos de transferencia (Hummels, 2007).

Para las empresas que realizan abasto internacional, el transporte de bienes se erige como una actividad esencial ya que permite el cambio de ubicación espacial de los productos desde los sitios de producción a los de consumo. El transporte resulta ser una actividad de alto valor agregado dentro de la cadena de suministro ya que es una de las que más contribuyen a los costos de logística (se estima que de uno a dos tercios de los costos totales en logística se asocian al transporte de bienes), a la duración del ciclo de surtido para una orden (alrededor del 40% de la longitud del ciclo) y a los requerimientos de inventario en cada uno de los eslabones de la cadena, ya que el tiempo de respuesta para el resurtido está influido por el modo de transporte empleado (Caplice y Sheffi, 2011; Federal Highway Administration, 2005).

Las cadenas de suministro globales hacen un uso intensivo del transporte no únicamente por la dispersión geográfica de sus integrantes (proveedores y consumidores), sino también debido a otros factores como la producción justo a tiempo, la necesidad de decrecer los niveles de inventario debido a las altas tasas de interés de su administración y la posibilidad de rastrear en tiempo real los pedidos en tránsito, gracias al uso de tecnologías de información y comunicación (TIC). Las desregulaciones ocurridas entre México y Estados Unidos de Norteamérica (EE.UU.) en cuanto al transporte aéreo, terrestre y ferroviario, han fomentado la competencia entre modos y proveedores del servicio. Gracias a ello, las empresas ubicadas en México cuentan con una amplia gama de opciones para la elección de servicios de

transporte que contribuyan a la reducción del costo de las actividades logísticas y garanticen un buen servicio al cliente. Estas opciones no se limitan a la elección de un modo único de transporte; la combinación de varios modos de transporte, denominado transporte multimodal, es también una alternativa de elección que ofrece ventajas en cuanto a flexibilidad, confiabilidad y capacidad para el manejo de envíos pequeños y frecuentes de productos.

El transporte multimodal resulta preferible al unimodal porque reúne las ventajas relativas de cada modo; por ejemplo, la gran capacidad para el manejo de carga y el bajo costo del transporte ferroviario con la rapidez y conectividad intercontinental del modo aéreo. Al evaluar la opción de transporte multimodal resulta muy importante considerar no únicamente los costos de los modos de transporte usados, sino también el costo y la duración de las transferencias entre modos —incluyendo los realizados en las terminales, las aduanas y pasos fronterizos entre países— ya que los beneficios particulares relacionados con los segmentos modales en cada trayecto pudieran no compensar los costos y duración de las transferencias en terminales o puntos con alta congestión o capacidad tecnológica y física limitada (Murphy y Hall, 1995; Crainic y Florian, 2008).

El transporte multimodal implica el movimiento de mercancías trabajando cada modo de transporte de manera separada, debido a esto las unidades de carga utilizadas requieren de una manipulación especial cuando llegan a los puntos de intercambio modal. Pero gracias a la unión de los transportistas, el apoyo del gobierno y de la iniciativa privada, el transporte multimodal ha evolucionado al concepto de transporte intermodal, el cual se define como el transporte de bienes en una misma unidad de carga o vehículo utilizando sucesivamente al menos dos modos de transporte. Este tipo de transporte se caracteriza tanto por la integración de múltiples modos de transporte como por la colaboración que se da entre agentes transportistas con el propósito de facilitar la transferencia de mercancías gracias al uso de unidades de carga estandarizada como contenedores o remolques (Puetzman y Stadtler, 2010; Cranic y Florian, 2008). La idea fundamental de este esquema de transporte es la explotación de economías de escala, economías de densidad y la reducción de la mano de obra por tonelada movida para así aumentar la eficiencia del transporte en recorridos largos, mientras se siguen aprovechando las ventajas que implica la combinación modal en diferentes segmentos.

El objetivo de esta investigación fue mostrar cómo las técnicas de la investigación operativa (IO) pueden aplicarse para diseñar una red de transporte intermodal que

facilite a las empresas que realizan abasto internacional, el transportar los productos que surten proveedores ubicados en EE.UU.; además de estudiar cómo las aplicaciones de IO apoyan la toma de decisiones en cuanto a transporte a varios niveles —estratégico, táctico y operativo—, lo cual demuestra la conveniencia de utilizar un enfoque cuantitativo para el diseño de una red de transporte eficiente para el caso particular de una empresa dedicada a la comercialización de autopartes que opera en la zona industrial de la ciudad de Toluca, capital del Estado de México. Esta organización, al igual que otras manufactureras que operan en la zona, requiere de transportar regularmente embarques de productos importados hacia sus diversas localizaciones (centros de distribución, almacenes y plantas). Para mantener su competitividad, la empresa en cuestión requiere operar una red de transporte intermodal de bajo costo que además garantice tiempos cortos en el traslado de los bienes que le permitan cumplir sus metas de servicio al cliente y evitar paros en la producción.

Este trabajo está organizado de la siguiente forma: se analiza el concepto de transporte intermodal y se hace una revisión de la literatura del diseño de redes de transporte intermodal empleando métodos de investigación de operaciones; más adelante se define el problema bajo estudio; después se detalla la metodología utilizada para abordar la problemática señalada anteriormente; posteriormente, se analiza y discute los resultados alcanzados; finalmente, se presenta las conclusiones y el trabajo futuro que puede desarrollarse a partir de las ideas planteadas en esta investigación.

## **Revisión de la literatura**

### *Sistemas de transporte intermodal*

El abasto global es la forma más avanzada de abasto internacional y se define como la integración y coordinación proactiva de materiales, componentes, procesos, tecnologías, diseños e instalaciones en el nivel mundial (Trent y Monczka, 2005). Este esquema avanzado de abasto contribuye a la ventaja competitiva de aquellas organizaciones con la capacidad de administrar efectivamente la producción y los flujos de bienes en la cadena de suministro global. Una condición para asegurar el flujo continuo y eficiente de productos es contar con un sistema de transporte donde distintos participantes de la cadena de suministros —proveedores, plantas, almacenes y zonas de demanda— se integren físicamente gracias al uso de varios modos de transporte: autotransporte terrestre (consolidado y no consolidado),

ferrocarril, marítimo y aéreo. El movimiento de productos con frecuencia se realiza combinando varios modos de transporte: carretera y ferrocarril, y transporte marítimo combinado con terrestre (ya sea carretera o ferrocarril) son las combinaciones más utilizadas. El transporte intermodal involucra diversas operaciones, aparte del traslado de los bienes, tales como administración de la infraestructura de telecomunicaciones, manejo de carga en terminales más operaciones informáticas, comerciales y de distribución (Cambra Fierro y Ruiz Benítez, 2009). Si bien estas operaciones incrementan la complejidad del diseño y coordinación de las redes intermodales, también contribuyen a incrementar su flexibilidad para movilizar embarques y la distancia cubierta, permitiendo entregas de puerta a puerta a precios competitivos.

En una red de transporte intervienen los siguientes actores (Crainic y Florian, 2008; Bektas y Crainic, 2007):

- a) Las empresas privadas (*shippers*), que son las generadoras de demanda y quienes toman las decisiones de dónde, cuánto y cuándo enviar de un producto basados en su producción y red de clientes, y cómo hacer los envíos a partir de la elección de los modos de transporte por usar. Las decisiones de estos actores afectan el sistema de transporte y pueden influir en las decisiones sobre infraestructura o política pública en cuanto al transporte.
- b) El gobierno, que proporciona la infraestructura y servicios necesarios para habilitar el transporte. Resulta importante remarcar que la inversión en infraestructura de transporte contribuye al desarrollo regional y genera servicios adicionales, por lo cual la construcción de corredores y terminales intermodales puede estar asociada a las características demográficas y socioeconómicas de una región; por ejemplo, la decisión de expandir la infraestructura de transporte puede responder a las demandas de las empresas de una zona altamente industrializada o bien a la necesidad de activar una economía local deprimida. Además de la infraestructura, el gobierno es quien establece las políticas y regulaciones para el transporte contribuyendo con esto a facilitar el comercio internacional e incrementar el atractivo de una red de transporte.
- c) Proveedores de servicios de transporte (*carriers*) que incluye tanto a los transportistas que consolidan la carga de varios clientes como a transportistas que tropicalizan u ofrecen servicios exclusivos a un cliente según sus

requerimientos. Las empresas que consolidan envíos son un elemento esencial de las redes de transporte intermodal porque la integración que hacen de la carga genera economías de escala y permite a los clientes que manejan volúmenes bajos, el acceso a sistemas intermodales. Estos agentes, ya sean transportistas terrestres que mueven pequeños volúmenes (Less Than Truckload o LTL carriers), navieras, ferrocarriles o servicios de paquetería, operan principalmente transportando materiales entre puntos origen-destino específicos; una vez que los embarques arriban a estos puntos pueden transferirse a centros de consolidación antes de ser entregados al cliente en terminales determinadas o transportados en vehículos más pequeños hasta las instalaciones del cliente.

Entre las empresas que han derivado ventajas competitivas al utilizar las plataformas intermodales está el grupo Inditex, uno de los distribuidores de ropa y accesorios de moda más importantes mundialmente, con 3 914 tiendas en 70 países donde distribuye marcas reconocidas como Zara, Bershka y Massimo Dutti. Para apoyar su estrategia de negocios, basada en la innovación y la flexibilidad, Inditex opera una red de transporte intermodal desde la Plataforma Logística de Zaragoza (Plaza), la cual permite el acceso a importantes redes carreteras y de ferrocarril, a aeropuertos importantes como el de Zaragoza en España. El centro de distribución de Inditex en Plaza, habilitado con tecnología avanzada para la logística, tiene capacidad para enviar hasta 80 mil artículos por hora hacia las tiendas Zara localizadas en Europa, América y la región Asia-Pacífico. Alrededor de un 80% de la distribución dentro de Europa se realiza por carretera mientras que la distribución hacia la zona Asia-Pacífico se hace vía aérea. La cadena de suministro de Zara está impulsada por la demanda del producto y requiere de una gran coordinación entre los proveedores de fibras y textiles, los fabricantes de prendas y los centros de consumo ubicados en múltiples regiones; la integración entre estos actores es facilitada, entre otros elementos, por el sistema de transporte intermodal que representa Plaza (Cambrá Fierro y Ruiz Benítez, 2009). Otras empresas que han derivado ventajas competitivas del transporte intermodal son Wal-Mart, Nestlé y Mercedes Benz, quienes reportan un menor tiempo de respuesta a los clientes, mejores niveles de servicio y mayor eficiencia operativa (por ejemplo en términos de rotación y costo del inventario) gracias a la efectividad de sus sistemas de transporte.

### *La investigación de operaciones aplicada al transporte intermodal*

Una amplia variedad de problemas de decisión asociados con la administración de una red de transporte intermodal han sido abordados por la investigación de operaciones, entre ellos figuran: la selección de transportistas, la elección del modo o combinación de modos de transporte por utilizar en varios pares origen-destino, la asignación de embarques a los diferentes modos, la consolidación óptima de los embarques, la determinación de itinerarios específicos para la carga, la administración de contenedores, el diseño de terminales, la planeación de tareas en las terminales y el diseño de sistemas de transporte intermodal a nivel empresa, regional o nacional. De acuerdo con Crainic y Florian (2008), los anteriores problemas se pueden estudiar desde una perspectiva de demanda; esto es qué destinos, requisitos de servicio y objetivos de desempeño tienen las empresas o *shippers* para el transporte de sus productos; o de oferta, cómo las capacidades y recursos de los transportistas o *carriers* (vehículos, rutas, portafolio de servicios) y las características de las instalaciones intermodales (capacidad, congestión, tecnología disponible); todas ellas afectan el desempeño de la red intermodal.

Las revisiones de Caris *et al.* (2008), Bektas y Crainic (2007) y Macharis y Bontekoning (2004) ilustran la variedad de aplicaciones de la investigación operativa para el diseño de la red de transporte intermodal y la optimización de actividades en la red. En estas revisiones, los problemas de decisión en transporte intermodal se catalogaron como estratégicos, tácticos y operativos. En el nivel estratégico los problemas implican decisiones en cuanto a la infraestructura de la red, la localización de centros de consolidación (*hubs*) y terminales intermodales; en el nivel táctico se busca diseñar los servicios (frecuencia para la recolección de la carga, asignación de embarques a modos de transporte y definición de rutas), realizar la consolidación de flujos y definir precios, mientras que al nivel operativo la problemática se orienta hacia la asignación de tareas, equipo, *trailers* y contenedores. La revisión que se presenta a continuación se hace únicamente desde la perspectiva de los operadores intermodales; esto es, de los usuarios de la infraestructura y servicios de la red intermodal, dada la naturaleza del problema de investigación que se atiende.

El problema estratégico de diseñar la red intermodal se abordó inicialmente empleando modelos de equilibrio espacial y de precios. Aprovechando el desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG), Southworth y Peterson (2000) detallaron todas las operaciones de transporte multimodal y determinaron su costo



para después minimizar el costo global de las operaciones empleando simulación y el algoritmo de la ruta más corta. Otros autores como Macharis y Verbeke (1999) han atendido el problema más específico de evaluación de proyectos para la localización de terminales empleando un análisis multicriterio a través del método PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations). Por su parte, Tan *et al.* (2004) utilizaron modelos de simulación discreta para analizar el movimiento de trenes, camiones y barcos; más los movimientos de la carga en las estaciones de transbordo para demostrar cómo las interacciones entre los distintos modos, desde distintas políticas intermodales, contribuyen a agilizar el transporte bajo; mientras que Robinson y Bookbinder (2007) desarrollaron un modelo de programación lineal entera mixta para el diseño de la red de transporte entre países de Norteamérica (Canadá, EE.UU. y México) que aproveche los bajos costos de mano de obra mexicana. Para ello, fue necesario optimizar los costos totales del sistema de distribución desde un escenario base que considera un esquema bimodal (ferrocarril y autotransporte), a partir del cual se desarrollan otros escenarios que consideran variaciones en las capacidades y alta disponibilidad de información. La aplicación al caso de una manufacturera de productos de energía llevó a determinar la ubicación de proveedores, maquiladoras, fábricas que hacen el acabado del producto, centros de distribución y mercados atendidos; la red de distribución diseñada representó ahorros promedio del 10% en los costos anuales.

Un enfoque más avanzado para el diseño y optimización de una red de transporte intermodal de amplia cobertura fue propuesto por el Centro de Investigación sobre Transporte (CRT) de Montreal, Canadá (Crainic y Florian, 2008). Los investigadores del centro representaron los modos de transporte, *hubs*, nodos de enlace y posibles transferencias intermodales para una red en la cual múltiples productos son transportados en vehículos y convoyes específicos entre puntos origen-destino, con un costo general resultante de integrar varios criterios, siendo los más importantes el costo y el tiempo de traslado (Crainic y Florian, 2008). Un algoritmo especial y *software* interactivo-gráfico fueron desarrollados para resolver el modelo y apoyar la toma de decisiones estratégicas. El proyecto multidisciplinario de Análisis Estratégico del Transporte (Strategic Transportation Analysis, STAN por sus siglas en inglés) generado por el grupo de investigación canadiense es muy flexible y general como para utilizarse en diversos contextos, incluyendo el diseño de una red nacional y de políticas de inversión. El *software* STAN continúa en desarrollo con el apoyo de varias universidades y ha sido aplicado en países como Finlandia, Suiza, Noruega, Italia, España, Alemania, Reino Unido, China y México.

En el nivel estratégico otra decisión importante es cómo sincronizar las decisiones de los diferentes *carriers* que participan en la red y alinear sus objetivos dado que transportistas, navieras, compañías de ferrocarril y otros actores compiten entre sí por recursos y clientes. Este problema también ha sido estudiado desde una perspectiva cuantitativa por autores como Andersen *et al.* (2009), quienes modelan el caso de una red en la cual las decisiones están centralizadas; Puettman y Stadtler (2010) asumen un escenario en el cual todos los participantes controlan la planeación de sus actividades e intercambian información no crítica. Las propuestas desarrolladas demuestran que la calidad de las interacciones y la colaboración de los participantes en la red intermodal resultan en ahorros en los costos totales del transporte.

En el un nivel táctico, Bookbinder y Fox (1998) determinaron las rutas óptimas para el transporte intermodal de contenedores desde Canadá hasta México tomando en cuenta las condiciones de infraestructura existente (vías terrestres, férreas y marinas) y los acuerdos del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). Estos autores compararon varias alternativas de transporte intermodal desde las principales ciudades de Canadá hasta las principales ciudades mexicanas (Monterrey, Guadalajara y Distrito Federal); su propuesta intermodal para mover productos desde Canadá a México representó un ahorro en costos del 5%. Mientras que Lin y Cheng (2004) utilizaron programación entera para formular el problema de determinar a un mínimo costo de operación, el tamaño de las flotillas, rutas y frecuencia en una red de transporte que utiliza dos modos, aéreo y autotransporte. Por su parte, Banomyong y Beresford (2001) propusieron un modelo cuantitativo para encontrar las rutas más competitivas en términos de costos, su esquema de rutas conlleva un decremento del 7% en costos con respecto a las rutas originalmente utilizadas, además de una administración más eficiente de los inventarios en las redes de transporte rediseñadas.

Finalmente, en el nivel operativo, Min (1991) propuso un modelo de programación por metas que considera los costos de distribución, las fechas de entrega comprometidas y la variabilidad del tiempo en tránsito para combinar lo mejor posible los modos de transporte y mantener un flujo continuo de productos durante las transferencias intermodales. El modelo resultó en mejoras promedio de 10%, derivadas de la consideración de varios criterios aparte del costo, como la cobertura del mercado, la velocidad y el riesgo de daños. Barnhart y Ratliff (1993) se enfocaron también en un problema operativo para el transporte bimodal ferrocarril-carretera: la definición de las rutas de menor costo para un embarque tomando en considera-

ción el costo total de su transporte, incluyendo costos de arrastre y de inventario en tránsito. Los autores consideraron como primera opción que el ferrocarril cobre al *shipper* por trailer y, como segunda, que el cargo sea por vagón-plancha (*flatcar*); restricciones no-monetarias como la configuración del vagón-plancha también fueron incluidas en el modelado. Más recientemente Powell y Topaloglu (2005) utilizaron la programación dinámica estocástica para resolver el problema de optimizar el número de contenedores y *flatcars* para ferrocarriles que son requeridos en operaciones intermodales.

La revisión anterior muestra que en el diseño de una red de transporte intermodal, aparte del costo del servicio, se tiene expectativas en cuanto a velocidad, confiabilidad y disponibilidad. La mayoría de los estudios revisados considera como único criterio el costo; sin embargo, hay otros criterios relevantes para el tomador de decisiones además del costo, entre ellos la confiabilidad (medida en términos del tiempo de entrega y su variabilidad), los tiempos en tránsito, el riesgo de daño o pérdida del embarque y las características del mercado de transportistas (calidad del servicio, posición en el mercado del transportista, su reputación y disponibilidad, y el equipo con que cuenta). La tendencia hacia el abasto global ha contribuido a que las empresas incluyan otros criterios como la confiabilidad y flexibilidad en sus decisiones (Bektas y Crainic, 2007); esto amerita trabajar los problemas de transporte intermodal desde un enfoque multicriterio. Varios de los estudios revisados han considerado una función de costo global que incluye además del costo de transporte los de manejo de materiales, inventario y retrasos, mientras que otros han optimizado más de un criterio; sin embargo, ninguno de ellos ha determinado un conjunto de alternativas económicamente eficientes para que el tomador de decisiones elija la más conveniente en términos del desempeño esperado para la red de transporte intermodal.

### *Transporte intermodal en México*

A lo largo de los años, México ha consolidado su posición como un país importante para el movimiento de mercancías, tanto en el nivel regional como mundial. Esto no obedece únicamente a su posición geográfica privilegiada —cerca de uno de los mercados de consumo más grandes del mundo y con salida hacia dos océanos—, sino también a que se han favorecido las conexiones modales y la creación de corredores intermodales con EE.UU., el principal país importador de bienes mexicanos. A pesar de que México se ha caracterizado históricamente por hacer un uso intenso del transporte de carga, primordialmente a través de autotransporte,

el desarrollo de algunos tramos ferroviarios más la apertura o fortalecimiento de algunas administraciones portuarias como la de Manzanillo en Colima, Lázaro Cárdenas en Michoacán, Altamira en Tamaulipas y el puerto de Veracruz en el estado del mismo nombre, han propiciado que el envío de bienes se realice empleando otros modos de transporte o combinando modos. Las rutas multimodales con mayor potencial son las que unen a Manzanillo y Lázaro Cárdenas con los puntos fronterizos de Ciudad Juárez, Piedras Negras, Colombia y Nuevo Laredo, y la reciente ruta Mazatlán-Durango-Piedras Negras, que se ha vuelto viable gracias a la fuerte inversión en la reciente autopista que cruza la sierra entre Sinaloa y Durango. El desarrollo de estos corredores permitiría captar el comercio exterior del este de Asia y del centro y este de EE.UU., pues el corredor Los Ángeles-Long Beach-Houston está saturado (Calderón, 2011; Ruiz-Olmedo, 2009).

El buen funcionamiento de los corredores multimodales depende de que se logre un flujo ininterrumpido de la carga gracias a la conectividad de puertos, fronteras, carreteras y vías ferroviarias dentro de México. Esto demanda inversiones importantes y modificaciones en los marcos jurídicos y de comercio internacional. En cuanto al impulso para el transporte marítimo, se tuvo que durante enero-noviembre de 2010 los puertos de México movieron 248 millones 398 mil 976 toneladas de carga, esta cifra fue 12.8% mayor en comparación con el mismo periodo de 2009. Los puertos con mayor movimiento fueron Ensenada, Lázaro Cárdenas y Manzanillo con crecimientos de 27.2, 36.8 y 37.1 por ciento, respectivamente en 2010 (Comunidad Portuaria de México, 2010). De los tres puertos, Lázaro Cárdenas figura en el primer lugar nacional con un 14.8% del total nacional, posición que se apoya con inversiones como la de la empresa filipina concesionaria Container Terminal Services en una nueva central de contenedores. La inversión en equipo y la simplificación de maniobras en este puerto ha resultado en reducciones significativas del tiempo de estancia, el cual se reporta 12 horas más rápido respecto a Los Ángeles-Long Beach. En relación a los ferrocarriles que conforman el siguiente eslabón de los corredores multimodales, el gobierno mexicano ha reconocido la necesidad de modernizarlos, por lo cual ha concesionado el servicio a empresas como Kansas City Southern de México quien mueve el 40% de la carga ferroviaria del país y ha realizado inversiones del orden de 121 millones de dólares para mejorar las vías y el equipo ferroviario (Calderón, 2011).

En cuanto a corredores intermodales, en el 2009 había 12 en operación, lo que representó un incremento del 20% con respecto al 2007; los más destacados son el de Lázaro Cárdenas-México (Pantaco)-Nuevo Laredo, el Mexicali-Guadalaja-

ra-Querétaro-México (Pantaco), Manzanillo-México (Pantaco)-Altamira y Lázaro Cárdenas-Veracruz (Ruiz-Olmedo, 2009). Todos estos corredores no son simples carreteras o vías férreas sino rutas logísticas con infraestructura que cuentan con terminales multimodales, las cuales facilitan el transporte. De acuerdo con el director del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), el flujo de carga intermodal a través de estas terminales creció con un promedio anual del 12% entre 2001 y 2011, por lo que de mantener esta tendencia se podría triplicar la carga movida durante la próxima década (Juárez, 2012). También el número de operadores de transporte multimodal (OTM) se ha incrementado, en el 2009 había 18 OTM en servicio (Ruiz-Olmedo, 2009). El gobierno federal ha fijado un marco legal que especifica los requisitos, obligaciones y responsabilidades para estas OTM además de normas que las obliga a coordinarse, todo esto con el propósito de atraer más tráfico internacional al país. Falta aún atender el tema de inspección a contenedores que además de retrasar los flujos de bienes en tránsito incrementa el riesgo de robo y daños a los productos con el consecuente impacto en costos. En el Plan Nacional de Desarrollo se tiene contemplada la promoción de 10 corredores multimodales, 15 puertos secos y la construcción de nuevos tramos carreteros y ferroviarios, lo cual se espera contribuya a mejorar la coordinación logística y atraer más tráfico internacional a México (Maldonado, 2008).

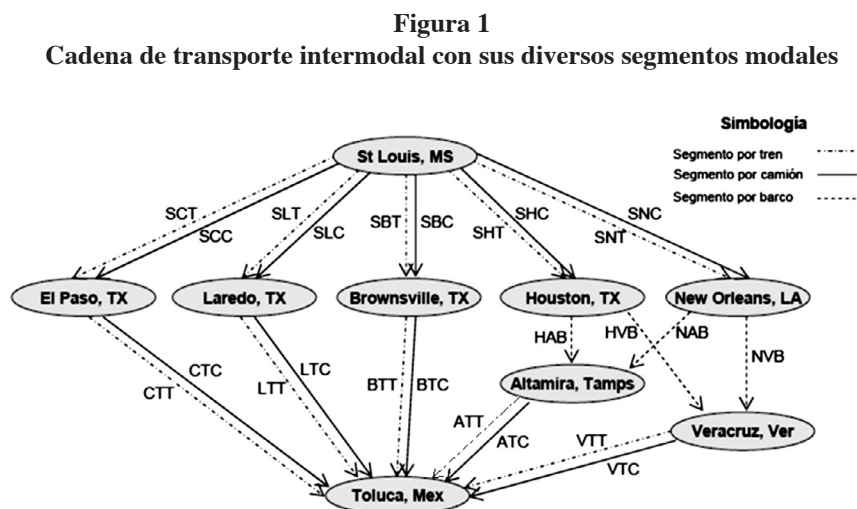
## **Identificación del problema**

En la zona industrial de Toluca operan múltiples empresas del sector automotriz, varias de ellas no únicamente manufacturan componentes y autopartes, sino que además actúan como comercializadoras o distribuidoras de productos importados. La comercialización de autopartes es una de las actividades principales de la empresa cuya red de transporte intermodal es la unidad de análisis de esta investigación; a través de la red, la empresa mueve alrededor de 100 000 SKU's, surtidos por proveedores ubicados principalmente en el sur de Canadá y el Noreste de los Estados Unidos. En el año 2003, la empresa administradora de la red inició un programa de suministro con proveedores directos con el propósito de reducir costos, ya que anteriormente los materiales se surtían a través de un centro de distribución en EE.UU. que era administrado por el corporativo de la empresa, ubicado en ese país. Para apoyar el programa de abasto directo se adoptó un plan de transporte en el cual cada uno de los productos era recolectado en las instalaciones del proveedor para después consolidar la carga en el cruce fronterizo de Laredo, Texas, y desde ahí trasladarla hasta el almacén de la empresa en Toluca, México. Este plan tiene los inconvenientes de cargas pequeñas con recorridos largos, una alta frecuencia

de envíos y el uso de un único modo de transporte. El problema de decisión en el nivel táctico del diseño de una red del servicio de transporte surgió como una alternativa para neutralizar estos inconvenientes, identificándose la necesidad de especificar tanto la ruta como el modo de transporte por utilizar tomando en cuenta las características de las redes de transporte y los servicios disponibles, ya que al ser la empresa únicamente una usuaria de los sistemas de transporte en el país no está en posibilidad de invertir o influir sobre la infraestructura o características (modos de transporte y frecuencia) de los servicios existentes.

El diagrama de la figura 1 presenta la red de transporte, cuyo desempeño se busca optimizar, la cual está conformada por nueve puntos de transbordo, 24 segmentos modales utilizando los modos transporte terrestre, ferroviario y marítimo y cinco puntos de cruce fronterizo México-Estados Unidos. El objetivo general del presente estudio se planteó como:

*Rediseñar la cadena de transporte intermodal de una empresa comercializadora de autopartes mediante la construcción de un modelo matemático que optimice el costo y tiempo para el transporte de autopartes surtidas por proveedores estadounidenses, tomando en consideración las características de las rutas intermodales disponibles.*



Dado que los criterios costo y tiempo se contraponen, se propuso encontrar un conjunto de soluciones posibles para el modelo de optimización bicriterio que permi-

tieran, al decisor final, la gerencia de tráfico de la empresa; es decir, elegir de entre varias soluciones eficientes que representan las mejores opciones para cada una de las combinaciones de los criterios, aquella alternativa que atienda mejor las necesidades de la empresa. Esta investigación es una extensión del trabajo realizado por Gaytán *et al.* (2007), quienes formularon un modelo matemático para el diseño de una red de transporte intermodal genérica sin considerar aspectos que frenan el flujo de los productos como los horarios de atención en los puntos de transferencia (ejemplo horarios de aduanas) y la congestión de tráfico en ciertos nodos de la red (ejemplo cruces fronterizos).

## **Metodología**

La primera etapa de la metodología consistió en la descripción de las posibles alternativas modales y los puntos geográficos de transbordo, obteniéndose estructuras para la red mostrada en la figura 1. El siguiente paso fue determinar los costos y tiempos de transporte de los productos en cada opción de diseño para la red. Estos datos fueron proporcionados por las empresas de transporte especializadas que ofertan cada uno de los modos de transporte en las zonas y regiones de cobertura, dichas empresas fueron: Union Pacific y Ferrocarriles Nacionales para el modo ferrocarril, Schneider Logistics and Monroe para el modo terrestre (autotransporte) y TMM Lines para el modo marítimo. También fue necesario definir las ventanas de tiempo que señalan los horarios de atención en los nodos de transbordo, así como las penalizaciones que aplican en caso de violación para estas ventanas de tiempo. Para ello, se analizaron los puntos de transbordo que incluyen los itinerarios programados y se recopiló información en revistas especializadas sobre el tiempo y costo asociados al transbordo en los nodos para cada modo de transporte.

La siguiente fase consistió en la formulación del modelo bicriterio, el cual utilizó como entradas la información recolectada en la primera fase. El modelo indica y evalúa todas las rutas de transporte que incluyen segmentos modales y puntos de transferencia factibles, tomando en consideración que hay que respetar los horarios de atención en los puntos de transbordo, por lo que se penaliza con un costo fijo la llegada antes del periodo de atención así como la llegada posterior. Aquí se establece que llegar antes del periodo predeterminado de atención representa un costo mucho menor que llegar después, ya que una llegada fuera del horario de atención implica retrasos tan graves como el paro de la línea de producción o ensamble y un servicio deficiente para el cliente. El modelo también considera la congestión que puede darse en los puntos de transbordo, así como restricciones de *justo a tiempo*



que por política de la empresa penalizan el no tener en el lugar y tiempo requerido la materia prima; así como los productos en proceso y terminados.

En el planteamiento del modelo se tomaron en cuenta los supuestos siguientes:

- La planeación se realiza por periodo mensual ya que la planeación del abasto y transporte que aplica la empresa es por mes.
- El tiempo programado de salida, así como las cotas inferiores y superiores que definen las ventanas de tiempo, se midió a partir de la salida del origen en la ciudad de Saint Louis Missouri.
- El acuerdo internacional empleado es el Incoterm EXWORKS, bajo el cual el *shipper* paga al transportista por transportar toda la carga desde el origen hasta el destino, ningún trámite en aduana o durante la transferencia queda a cargo de la empresa que transporta.
- Las penalizaciones por rebasar la ventana de tiempo son más grandes que las penalizaciones por llegar antes de la ventana de tiempo.
- Se asume que un incremento en la velocidad de transporte de los productos implica un *menor tiempo de tránsito* y un *mayor costo*, por lo que ambos criterios costo y tiempo están en conflicto, el mejor costo se alcanza con un peor tiempo.

### Modelo de optimización bicriterio

Para mostrar matemáticamente la red de transporte intermodal podemos denotar como  $i$  a un nodo origen, como  $j$  al nodo destino y como  $m$  al modo de transporte utilizado entre nodos. Podemos entonces definir a  $A$  como el conjunto de arcos o segmentos modales y como  $N$  al conjunto de nodos o localizaciones para la red o gráfica  $G = (N, A)$ .

Las variables de decisión del modelo son:

$$X_{ijm} = \begin{cases} 1, & \text{si el segmento modal } m \text{ de un origen } i \text{ a un destino } j \text{ es utilizado} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \forall (i, j, m) \in A$$

$$Y_{jm_1m_2} = \begin{cases} 1, & \text{si en el destino } j \text{ se transborda del modo } m_1 \text{ al modo } m_2 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \forall j \in N, m_1, m_2 = 1, 2, 3$$

$$z_{im} = \text{Hora de salida del origen } i \text{ a través del modo de transporte } m \quad \forall j \in N, m = 1, 2, 3$$



$s_{jm}$  = Hora de arribo al destino  $j$  a través del modo de transporte  $m \forall j \in N, m = 1, 2, 3$

$$W_{jm} = \begin{cases} 1, & \text{si el tiempo de arribo } s_{ijm} \text{ excede el límite superior } U_{ijm} \text{ del inte;} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$R_{jm} = \begin{cases} 1, & \text{si el tiempo de arribo } s_{ijm} \text{ es menor al límite inferior } L_{ijm} \text{ del inte;} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

La información o parámetros de entrada para el modelo son:

- El tiempo  $t_{ijm}$  y el costo de recorrido  $C_{i,j,m}$  para un segmento modal  $m$  planteado de un origen  $i$  a un destino  $j$  dado
- El tiempo  $T_{j,m_1,m_2}$  y el costo  $k_{j,m_1,m_2}$  requerido en las operaciones de transbordo en una localización determinada como destino  $j$  de un modo de transporte  $m_1$  a otro  $m_2$
- Los tiempos predeterminados que denotan la ventana de tiempo  $[L_{j,m}; U_{j,m}]$  en cierta localización para un modo de transporte determinado
- El costo por llegar antes del tiempo predeterminado inferior en la ventana de tiempo denotado por  $UC_{jm}$
- El costo por llegar después del tiempo predeterminado superior en la ventana de tiempo denotado por  $OC_{jm}$
- El conjunto de localizaciones predecesoras  $P(i)$  y sucesoras  $S(i)$  a una localización en particular
- El tiempo de salida programado  $D_{j,m_1}$  en cierta localización  $j$  a través de cierto modo  $m_1$ , que es conocido por los itinerarios de cada naviera, transportista o grupo ferroviario

El modelo matemático que se formuló tiene los siguientes dos objetivos o criterios simultáneos:

- Minimizar la suma de los costos totales (costos de recorrido, costos de transbordo y penalizaciones, llegada temprana y tardía, por violaciones en los tiempos predeterminados en las ventanas de tiempo), y
- Minimizar la suma de los tiempos totales (tiempos de recorrido y tiempos de transbordo)

Las funciones que describen cada uno de los objetivos anteriores son las siguientes:

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_{(ijm) \in A} C_{ijm} X_{ijm} + \sum_{j \in N} \sum_{m_1=1}^3 \sum_{m_2=1}^3 K_{jm_1 m_2} Y_{jm_1 m_2} \\ & \quad + \sum_{(j m)} UC_{jm} R_{jm} + \sum_{(j m)} OC_{jm} W_{jm} \\ & \text{Min } \sum_{(ijm) \in A} t_{ijm} X_{ijm} + \sum_{j \in N} \sum_{m_1=1}^3 \sum_{m_2=1}^3 T_{jm_1 m_2} Y_{jm_1 m_2} \end{aligned}$$

El conjunto de restricciones para el modelo son:

1. Conservación de flujo, la cual garantiza que cualquier contenedor sale del origen y llega a su destino sin pérdidas en las localizaciones intermedias

$$\sum_{m=1}^3 \sum_{j \in S(i)} X_{ijm} - \sum_{m=1}^3 \sum_{j \in P(i)} X_{jim} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = \text{origen} \\ 0 & \text{if } i \neq \text{origen, destino} \\ -1 & \text{if } i = \text{destino} \end{cases} \quad \forall i \in N$$

2. Entrada y salida de los nodos de transferencia, estas restricciones aseguran que se ingresa a un nodo de transferencia a través de algún modo de transporte y se sale de un nodo de transferencia también a través de algún modo de transporte.

$$\begin{aligned} X_{ijm_1} &\leq \sum_{m_2=1}^3 Y_{jm_1 m_2} & \forall (i, j, m_1) \in A, j \neq \text{destino} \\ \sum_{m_1=1}^3 Y_{jm_1 m_2} &\leq X_{jkm_2} & \forall (j, k, m_2) \in A \end{aligned}$$

3. Los tiempos de llegada al destino son la suma de los tiempos de salida del origen más el tiempo de viaje, si es que se utiliza dicho segmento modal origen-destino.

$$z_{im} + t_{ijm} - M(1 - X_{ijm}) \leq s_{jm} \quad \forall (i, j, m) \in A$$

4. El tiempo de salida de un nodo origen se establece como el máximo entre el tiempo de salida programado en un itinerario definido y conocido, o como la suma del tiempo de llegada a dicho destino más el tiempo de transbordo.

$$z_{jm_2} = \max\{D_{jm_2}, s_{jm_1} + T_{jm_1, m_2} Y_{jm_1, m_2}\} \quad \forall j \in N, m_1, m_2 = 1, 2, 3$$

5. Ventanas de tiempo, estas restricciones consideran las violaciones al periodo predeterminado en que se debe llegar al nodo de transferencia. Hay dos restricciones ya que la penalización difiere dependiendo de si se llegó antes del periodo establecido (llegada temprana) o posterior a éste (llegada tardía).

$$s_{jm} + MW_{jm} \leq U_{ijm} \quad \forall (j, m) \quad (\text{Llegada temprana})$$

$$s_{jm} - MR_{jm} \geq L_{ijm} \quad \forall (j, m) \quad (\text{Llegada tardía})$$

### *Solución para el modelo de optimización*

El modelo presentado en la sección anterior es uno de programación entera mixta con dos criterios. El modelo formulado para resolver el problema identificado consta de 166 variables y de 151 restricciones en total, por lo cual resolverlo directamente resulta difícil e ineficiente; por tanto, se planteó la necesidad de utilizar herramientas de investigación de operaciones para simplificarlo y resolverlo de forma eficiente aprovechando su estructura. La relajación Lagrangiana fue identificada como la mejor alternativa, ya que la estructura subyacente del problema permite separarlo fácilmente en una serie de subproblemas más sencillos de resolver. Este método permite, además, obtener cotas para la solución del problema original, ya que algunas de las restricciones en el modelo completo se introducen a los criterios mediante procedimientos bien establecidos. Una vez resueltos los subproblemas, el conjunto de soluciones se construyó reuniendo las soluciones y haciendo una suma para obtener el valor de los criterios de tiempo y de costos que corresponden a las funciones objetivo; para ello, se utilizó el método del subgradiente. Si bien el análisis de la estructura del problema llevó en este caso a elegir la relajación Lagrangiana como forma de solución, se cuenta también con otro tipo de técnicas multicriterio que no hacen uso de la estructura del problema completo para descomponerlo y que pueden aplicarse para resolver otros problemas relevantes en el contexto de transporte intermodal (Eusébio y Figueira 2009; Eusébio, 2009).

Los tres subproblemas en que se dividió el problema original fueron:

- a) *Subproblema 1*, que es dependiente sólo de los costos y tiempos de recorrido/transferencia; la solución a este subproblema indica si un segmento modal es utilizado y si en un punto de transferencia hay que realizar un transbordo. Este subproblema tiene propiedades importantes que permiten garantizar la obtención de soluciones enteras si los parámetros son enteros y ofrece al decisor una visión sobre los arcos y nodos que serán recorridos durante el transporte.
- b) *Subproblema 2*, el cual depende únicamente de las variables que determinan si hubo violaciones al intervalo de tiempo predefinido. La solución a este subproblema complementa la información sobre la ruta que seguirán los productos al proporcionar los tiempos de arribo a cada nodo y la ocurrencia de violaciones.
- c) *Subproblema 3*, que es dependiente sólo del tiempo de salida de un sitio; este último subproblema está determinado por los resultados obtenidos del subproblema 1 y del subproblema 2. A partir de su solución el decisor completa toda la información sobre los itinerarios de transporte.

La ventaja que ofrece el uso de la relajación Lagrangiana para resolver el modelo planteado es computacional porque son de dos tipos:

- a) Ventajas computacionales, ya que la generación del conjunto de soluciones eficientes para el modelo completo toma en promedio 154% más tiempo que su solución a partir de la separación en los tres subproblemas descritos.
- b) Ventajas administrativas en cuanto al nivel de detalle sobre rutas, nodos visitados, tiempos de arribo y salida e impacto del congestionamiento; aunque esta información podría proporcionarse al área de transporte a partir del modelo completo, podría ser de mayor complejidad la interpretación de su solución. En contraste, la división en subproblemas ofrece a los decisores información para monitorear cada variable y plantear dinámicamente los cambios que sean necesarios de una manera más práctica.

Como se mencionó en la definición del problema, lo que se buscó fue generar el conjunto de soluciones eficientes o frontera eficiente para que el decisor tenga op-

ciones de elección. A partir del espacio objetivo, en el cual se representan las dos funciones objetivos asociadas a los criterios que se desea optimizar, se deduce la función matemática denominada frontera eficiente o de Pareto, la cual es propia de la optimización multicriterio y en donde se caracterizan los puntos con sus combinaciones de costo y tiempo que resultan Pareto-óptimos. Cuando se optimizan dos criterios que están en conflicto, como es el caso del problema formulado en esta investigación, un punto se define como óptimo-Pareto cuando no existe otro punto diferente que represente un estricto decremento (incremento en el caso de maximización) en al menos un valor de la función objetivo; de donde cada punto eficiente representa un compromiso (*tradeoff*) o selección aceptable entre los dos criterios evaluados.

Dado lo anterior, es importante obtener tanta información como sea posible sobre el conjunto de puntos que representan la solución del problema, lo que implica resolver una familia de problemas con una sola función objetivo en muchos casos. Para la construcción del conjunto de soluciones o frontera eficiente existen diversos métodos, tanto exactos (método de las ponderaciones, simplex multifase, etc.) como metaheurísticos (algoritmos evolutivos, etc.). En este trabajo se empleó el *método de las ponderaciones combinado con el método de la  $\varepsilon$ -restricción*, los cuales, además de eficientes, son de fácil implementación; sin embargo, no generan el conjunto completo de puntos, a menos que como en el caso bajo estudio se tenga un rango conocido, delimitado y numerable en forma finita para alguno de los criterios planteados.

En la práctica, cuando el conjunto de soluciones no dominadas es identificado, el tomador de decisiones puede elegir la solución final de entre estos puntos. Cuando el conjunto de soluciones no se identifica o resulta difícil encontrarlo, el tomador de decisiones debe interactuar con el analista para identificar una solución o una región preferida o cercana al óptimo Pareto. Para realizar este análisis *tradeoff*, en el cual el decisor acepta mejorar en algún criterio a costa de que otro(s) empeore(n), es frecuente que se haga una ponderación para cada criterio bajo consideración. Ésta es la base de la estrategia de solución aplicada en este trabajo. Realizar la serie de ponderaciones en los criterios considerados resulta en ocasiones insuficiente, por lo cual es conveniente utilizar otros métodos como el de la  $\varepsilon$ -restricción que permiten una búsqueda más detallada de soluciones eficientes al limitar un extremo del rango conocido de uno de los criterios, para así encontrar nuevos puntos que no pueden ser identificados con otros métodos.

## Resultados y discusión

El conjunto de soluciones para el problema de optimización bicriterio, obtenido a través del método de las ponderaciones, se reporta en el cuadro 1. Al analizar los resultados se observa que el conjunto de soluciones eficientes está delimitado en cuanto al costo al rango de 2 311 a 3 779 unidades monetarias y en cuanto al tiempo al rango de cuatro a siete días. Esto significa que para los puntos eficientes, los valores de los criterios están dentro de los rangos anteriores.

**Cuadro 1**  
**Resultados para la frontera eficiente completa,**  
**con sus respectivos arcos y nodos de transbordo**

| Cadena completa              | Transbordo en localización intermedia | Criterios      |               |
|------------------------------|---------------------------------------|----------------|---------------|
|                              |                                       | Costo (\$ USD) | Tiempo (días) |
| St. Louis-Laredo-Toluca      | Tren-tren                             | 2311           | 7             |
| St. Louis-Brownsville-Toluca | Tren-tren                             | 2384           | 6             |
| St. Louis-Brownsville-Toluca | Tren-camión                           | 2665           | 5             |
| St. Louis-Laredo-Toluca      | Camión-camión                         | 3779           | 4             |

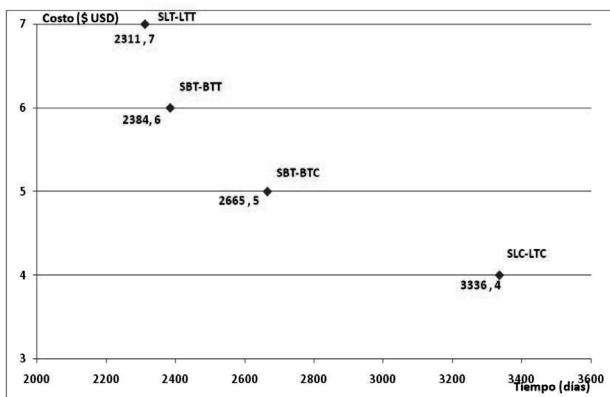
Es importante observar también que el primer punto corresponde al menor costo posible (conocido como punto ideal del costo), pero al mayor tiempo posible (anti-ideal del tiempo) con respecto a cualquier otro punto eficiente; mientras que el último de los puntos resulta en el mayor de los costos (anti-ideal de los costos totales), pero brinda el menor de los tiempos (ideal del tiempo). Claramente, se observa que existe un *tradeoff* para los criterios planteados, lo cual se manifiesta en mayor medida al analizar el segundo y tercer puntos eficientes para los que las compensaciones que realiza la combinación de pesos en la función objetivo nos llevó a obtener dos alternativas interesantes con relación a los casos extremos o ideales.

Los resultados anteriores comprueban que la combinación del método de las ponderaciones y de la  $\epsilon$ -restricción permite la construcción de la frontera eficiente de manera práctica y sencilla mediante la asignación de pesos entre cero y uno para los valores de cada criterio, más la búsqueda profunda en el rango de uno de los criterios considerados. El análisis detallado de los resultados obtenidos para el conjunto de soluciones eficientes permite observar que en los puntos ideales se

favoreció la cadena de Saint Louis, Missouri, hasta Toluca pasando por Laredo, Texas. Esto se debe a que el uso del autotransporte (camión) la hace más rápida (menor tiempo de transporte), pero también más cara; mientras que el uso exclusivo de trayectos ferroviarios lleva el costo al mínimo posible (punto ideal de costo), pero con un deterioro en el criterio de tiempo de tránsito, el cual se incrementa en un día. Algo similar sucede para los puntos eficientes 2 y 3, cuya cadena de transporte es la misma, de Saint Louis, Missouri, hasta Toluca pasando por Brownsville, Texas. Resulta interesante notar que en las soluciones identificadas la estructura de la cadena se mantenga y cambie únicamente el modo de transporte por usar, favoreciéndose en general el uso de un único modo de transporte, lo cual es contrario a lo esperado, dadas las ventajas descritas en la literatura para el uso de múltiples modos de transporte. Esto se debe a que el modelo formulado reconoce que hay una baja integración entre modos de transporte en los corredores mexicanos, lo cual incrementa el costo y tiempo del movimiento de los bienes de un modo a otro, haciendo menos atractiva la opción tren-camión en tres de las cuatro alternativas eficientes.

Los puntos no dominados y/o eficientes se representan gráficamente en la figura 2. De entre los puntos eficientes obtenidos, el tomador de decisiones podrá elegir aquella alternativa que de acuerdo con su experiencia sobre los esquemas de transporte intermodal apoyen mejor la estrategia de abasto organizacional. Para la empresa en cuestión, fue el gerente de la comercializadora de autopartes quien tomó la decisión final después de que el gerente de tráfico presentó los resultados obtenidos en esta investigación.

**Figura 2**  
**Frontera y puntos eficientes en el espacio objetivo**



La política de transporte que se había utilizado anteriormente hacía que la compañía gastara ocho días de tránsito y transbordo para las autopartes incurriéndose en costos por \$2 459.00 USD; esta política corresponde claramente a un punto dominado o no-eficiente porque cualquiera de los puntos en la figura 2 mejora el tiempo y dos puntos más mejoran el costo total. Si bien para la gerencia es estratégico reducir el tiempo de traslado de los bienes, no puede incurrir en costos superiores a \$3 000.00 USD, por lo que las primeras tres alternativas descritas en el cuadro 1 son las candidatas aceptables. Para elegir entre estas alternativas, el gerente empleó su experiencia y expresó que el almacén cuenta con 45 días de inventario en Toluca, México; esta disponibilidad de inventario les permite incrementar al menos en un día el tiempo de traslado, por lo cual la ruta elegida es aquella asociada al segundo punto eficiente, esto es:

*Saint-Louis, Missouri – Brownsville, TX – Toluca, México empleando el tren en todo el trayecto incurriéndose un costo de \$2 384.00 USD y un tiempo de seis días.*

La solución elegida representa un ahorro del 18% en el costo total anual del transporte de los bienes sin demérito importante sobre el tiempo. Esta solución no se habría generado sin la construcción del modelo bi-criterio porque la consideración única del costo no habría permitido evaluar el efecto de la decisión sobre el tiempo total de transporte de los bienes.

## **Conclusiones**

Las revisiones disponibles en la literatura, y que se integran en este trabajo, muestran cómo la aplicación de técnicas de investigación operativa ha contribuido a la resolución de problemas de transporte intermodal. El tipo, dimensión y complejidad de los problemas de decisión ha requerido del desarrollo de nuevos métodos de IO y de algoritmos específicos al problema intermodal que se atiende, generándose así una sinergia que favorece tanto al área de transporte como a la de IO.

Desde el ambiente de negocios actual, altamente competitivo y globalizado, el uso de más de un modo de transporte ofrece ventajas para movilizar embarques en recorridos largos con la opción de entregas puerta a puerta a precios competitivos. El transporte intermodal implica no únicamente la utilización de más de un modo de transporte, sino también la colaboración de distintos actores (transportistas, gobierno y empresas privadas) para facilitar los intercambios de la carga en distintos puntos de transferencia. Las empresas que optan por el transporte intermodal



requieren de especificar las rutas, modos e itinerarios específicos que seguirá la carga, tales decisiones se sustentan mejor al aplicar métodos de investigación operativa.

Para asegurar que no habrá interrupciones del flujo de bienes en la cadena de suministros, el desempeño de la actividad de transporte no se mide ya exclusivamente en términos de costo, sino empleando criterios adicionales como el tiempo, la confiabilidad y seguridad del transporte. El empleo de más de un criterio incrementa la complejidad en la toma de decisiones y requiere del uso de la optimización multicriterio. En esta investigación se utilizó este enfoque para diseñar la cadena de transporte intermodal que optimice el costo y tiempo total de movimiento de productos importados de EE.UU. que comercializa una empresa de autopartes que opera en la zona industrial de la capital del estado de México. El diseño de la cadena de transporte intermodal consideró la infraestructura actual disponible para mover los productos desde EE.UU. hasta la ciudad de Toluca, así como los horarios y posible congestión en los puntos de transferencia. Para determinar el diseño o estructura de la cadena de transporte se formuló un modelo de programación entera mixta en dos criterios (costo y tiempo); el análisis de la estructura del problema y el conocimiento sobre métodos de IO resultó esencial para resolver el problema de forma eficiente empleando relajación Lagrangiana.

Con el propósito de ofrecer al tomador de decisiones más de una alternativa para el diseño de la red que cubra las necesidades económicas y administrativas de la empresa, fue conveniente generar varios puntos de la frontera eficiente empleando el método de las ponderaciones combinado con la  $\varepsilon$ -restricción. Este método es relativamente simple pero efectivo, lo que lo hace atractivo para utilizarse en la práctica e incentivar a las empresas por realizar más aplicaciones de la optimización bi-criterio; sin embargo, esto no descarta la aplicación de otros métodos más eficientes, los cuales representan opciones tanto en el avance de la optimización multicriterio como en la solución de problemas de transporte intermodal. A partir de los puntos óptimos-Pareto generados, la gerencia de la empresa que planteó el problema de diseño de la cadena intermodal pudo analizar opciones adicionales de transporte que no habrían podido ser identificadas sin la aplicación de la IO; entre ellas el uso de un único medio de transporte cuando se pensaba que la combinación de modos (camión-tren) siempre sería más eficiente. La alternativa para el transporte internacional seleccionada por la gerencia resultó en ahorros anuales por aproximadamente 18% tan sólo en transporte, aparte de ahorros adicionales, no cuantificados explícitamente, derivados de una reducción del inventario en tránsito

y el tiempo total de transporte. La metodología propuesta puede extenderse a otros casos de empresas que realizan abasto global e importan insumos y productos de EE.UU. y Canadá.

Entre las extensiones para esta investigación está el uso de métodos interactivos para mejorar la búsqueda de alternativas de diseño para la red intermodal al descartar alternativas de poco valor para el tomador de decisiones; considerar múltiples periodos para la planeación del transporte e incluir otros criterios relevantes para medir el desempeño de la red de transporte intermodal. Todas estas extensiones corresponden a problemas interesantes que enfrentan las empresas cuando deciden modificar sus esquemas de transporte para tomar provecho de la infraestructura de transporte disponible, las ofertas de servicio de los operadores intermodales y las recientes políticas gubernamentales en cuanto a transporte y comercio internacional.

## Referencias

- Andersen J., T. G. Crainic y M. Christiansen (2009). Service network design with management and coordination of multiple fleets. *European Journal of Operational Research* 193 (2): 377-389.
- Banomyong, R. y A. Beresford (2001). Multimodal transport: the case of Laotian garment exporters, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 31(9): 651-673.
- Barnhart, C. y H. Ratliff (1993). Modelling intermodal routing. *Journal of Business Logistics* 14: 205-223.
- Bektas, T. y T. G. Crainic (2007). *A brief overview of intermodal transportation*. Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT).
- Bookbinder, J. y N. Fox, (1998) Intermodal Routing of Canada-Mexico shipments under NAFTA. *Logistics and Transportation* 34 (4): 289-303.
- Cambra-Fierro, J. y R. Ruiz-Benítez (2009). Advantages of intermodal logistics platforms: insights from a Spanish platform. *Supply Chain Management: An International Journal* 14 (6): 418-421.

- Caplice, C. and Y. Sheffi (2011). *Optimization-based procurement for transportation services*. Disponible en: DOI: 10.1002/j.2158-1592.2003.tb00048.x. Fecha de consulta: 10 de mayo de 2011.
- Calderón, F. R. (2011). *Corredores multimodales del transporte*. Agendas. Disponible en: <http://www.fundacionpreciado.org.mx/biencomun/bc189-190/F-Calderon.pdf>. Fecha de consulta: 13 de diciembre 2012.
- Caris, A., C. Macharis y G. Janssens (2008). Planning problems in intermodal freight transport: accomplishments and prospects. *Transportation Planning and Technology* 31 (3) Disponible en: DOI: 10.1080/03081060802086397 (<http://dx.doi.org/10.1080/03081060802086397>).
- Comunidad Portuaria de México (jueves 30 diciembre, 2010). Incrementó en 2010 128% movimiento de mercancías por los puertos de México. *MéxicoXport*. Disponible en: <http://www.mexicoxport.com/noticias/1198/empresas.php?bt=4>. Fecha de consulta: 1º. de octubre, 2012
- Crainic, T. G. y M. Florian (2008). National planning models and instruments. *INFOR* 46 (4): 299-308.
- Eusébio, A. y J. R. Figueira (2009). Finding non-dominated solutions in biobjective integer network flow problems. *Computers and Operations Research* 36 (9): 400-416.
- Eusébio, A. (2009). A branch and bound algorithm for the multicriteria network flow problems. Tesis de doctorado no publicada, Instituto Politécnico de Leiria, Technical University of Lisbon, Porto Salvo, Portugal.
- Federal Highway Administration, Department of Transportation (2005). *Logistics costs and the US Gross Domestic Product*. Washington, D. C.: MacroSys Research and Technology.
- Gaytán, J., J. Pérez y J. García (2007). A multicriteria decision framework for the transportation network redesign for an auto parts company under an evolutionary approach, *Memorias del RED-M 2007*, Culiacán, Sin. México.

- Hummels, D. (2007). Transportation costs and international trade in the second era of globalization. *Journal of Economic Perspectives* 21 (3): 131-154.
- Juárez, P. (2012). Se triplicará transporte intermodal en la próxima década, IMT. *Revista T21*. Disponible en: <http://t21.com.mx/ferroviario/2012/10/24/se-triplicara-transporte-intermodal-proxima-decada-imt> Fecha de consulta: 4 de enero de 2013.
- Lin, C. C. y S. H. Cheng (2004). The hierarchical network design problem for time-definite express common carriers. *Transportation Research Part B* 38: 271-283.
- Macharis, C. y Y. M. Bontekoning (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: a review. *European Journal of Operational Research* 153: 400-416.
- Macharis, C. y A. Verbeke (1999). Een multicriteria-analyse methode voor de evaluatie van intermodale terminals. *Tijdschrift Vervoerswetenschap* 4: 323-352.
- Maldonado, A. G. (2008). La multimodalidad en México. *Comercio Exterior* 58 (10): 720-730. Disponible en: [http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/119/5/730\\_Multimodal\\_Mex.pdf](http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/119/5/730_Multimodal_Mex.pdf) Fecha de consulta: 13 de diciembre de 2012
- Min, H. (1991). International intermodal choices via chance-constrained goal programming. *Transportation Research Part A* 25 (6): 351-362.
- Murphy, P. R. y P. K. Hall (1995). The relative importance of cost and service in freight transportation choice before and after deregulation: an update. *Transportation Journal* 35 (1): 30-38.
- Powell, W. B. y H. Topaloglu (2005). Fleet management. En S. Wallace y W. Ziemba, (eds.) *Applications of Stochastic Programming*. Philadelphia: Mathematical Programming Society-SIAM Series in Optimization: 185-216.
- Puettman, C. y H. Stadtler (2010). A collaborative planning approach for intermodal freight transportation. *OR Spectrum* 32: 809-830.

- Robinson, A. G. y J. H. Bookbinder (2007). NAFTA supply chains: facilities location and logistics. *International Transactions in Operational Research* 14: 179-199.
- Ruiz-Olmedo, S. A. (2009). México y los corredores intermodales del mundo. *Énfasis Logística* 26 (febrero). Disponible en: <http://www.logisticamx.enfasis.com/notas/12166-mexico-y-los-corredores-intermodales-del-mundo> Fecha de consulta: 13 de diciembre de 2012
- Southworth, F. y B. E. Peterson (2000). Intermodal and international freight network modeling. *Transportation Research C* 8: 147-166.
- Supply Chain Council (2012). *CSCMP Supply Chain Management*. Disponible en: <http://cscmp.org/about-us/supply-chain-management-definitions> Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2012
- Tan, A, R. Bowden y Y. Zhang (2004). Virtual Simulation of Statewide Intermodal Freight Traffic. *Transportation Research Record* 1873: 53-63.
- Trent, R. J. y R. M. Monczka (2005). Achieving excellence in global sourcing. *MIT Sloan Management Review* 47 (1): 24-32. 