



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Requerimientos de insumos para un modelo de asignación de carga utilizando costo generalizado de transporte en la exportación de productos a través de la frontera norte. Primera etapa

Agustín Bustos Rosales
Jorge A. Acha Daza

**Publicación Técnica No. 460
Sanfandila, Qro. 2016**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Requerimientos de insumos para un modelo de asignación de carga utilizando costo generalizado de transporte en la exportación de productos a través de la frontera norte. Primera etapa

Publicación Técnica No. 460
Sanfandila, Qro. 2016

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Integración del Transporte del Instituto Mexicano del Transporte, por Agustín Bustos Rosales y Jorge Artemio Acha Daza, investigadores de esta coordinación.

Contenido

Resumen		iv
Abstract		v
Resumen ejecutivo		vii
Introducción		1
Capítulo 1	Función de costo generalizado de transporte	5
Capítulo 2	Modelo de flujo a costo mínimo	17
Capítulo 3	Ejemplo de cruce fronterizo	23
Capítulo 4	Corrida de flujo a costo mínimo	35
Capítulo 5	Conclusiones	43
Apéndice A	Consideraciones para estimar el valor de embarque	45
Bibliografía		47

Resumen

El gran intercambio comercial entre Estados Unidos y México ha tenido un impacto significativo en el volumen de vehículos de carga que cruzan la frontera. A pesar de la crisis económica en ambos países a partir de 2008, se espera que la expansión del comercio continúe.

Una planeación eficaz de una red de transporte influye en las actividades tácticas y operativas y tiene un gran impacto en los negocios. Dicha planeación típicamente considera múltiples aspectos como los costos variables de transporte, los distintos niveles de atención al cliente que ofrece, la seguridad de los bienes y el tiempo de viaje.

El uso de modelos dentro de la planeación del transporte tiene importancia en la medida en que contribuya a la generación y análisis de alternativas. Los modelos de transporte están basados en minimizar la función de costo generalizado de viaje, la cual se traduce como la suma de todos los costos que asume un usuario para realizar un desplazamiento desde un origen a un destino, convertidos a un valor monetario.

Este trabajo de investigación propone algunas consideraciones para alimentar un modelo de flujo a costo mínimo con un costo generalizado de transporte que incluye el valor del tiempo para un producto de tipo perecedero en el ámbito del comercio internacional. Se utiliza el dinero como unidad común de medida porque permite una comparación más objetiva, aunque implique considerar un mismo valor del tiempo para todos los productos de un mismo tipo.

Palabras clave: optimización multiobjetivo, flujo a costo mínimo, mercancías perecederas, costo generalizado.

Abstract

The big trade between the United States and Mexico has had a significant impact on the volume of cargo vehicles crossing the border. Despite the economic crisis in both countries since 2008, it is expected to continue expanding trade.

Effective planning of a transport network influences the tactical and operational activities and has a great impact on business. Such planning typically considers multiple aspects such as transportation costs variables, different levels of customer service it offers, the safety of goods and travel time.

The use of models in transportation planning is important to the extent that contributes to the generation and analysis of alternatives. Transport models are based on minimizing a generalized cost function of travel, which translates as the sum of all costs assumed by a user to perform a shift from a source to a destination, converted to a monetary value.

This research proposes some considerations for feeding a flow model at minimum cost with a generalized transportation cost which includes the value of time for a perishable product type in the field of international trade. Money is used as a common unit of measure because it allows a more objective comparison, even if it means considering the same time value for all products of the same type.

Keywords: multiobjective optimization, minimum cost flow, perishable goods, generalized cost.

Resumen ejecutivo

En la Meta Nacional IV, México Próspero, se encuentra el Objetivo 4.8 Desarrollar los sectores estratégicos del país y el Objetivo 4.9 Contar con una infraestructura de transporte que se refleje en menores costos para realizar la actividad económica. Dentro de este último se tiene la estrategia 4.9.1 Modernizar, ampliar y conservar la infraestructura de los diferentes modos de transporte, así como mejorar su conectividad bajo criterios estratégicos y de eficiencia. Particularmente, bajo esta estrategia se mencionan en el Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación 2014-2018 (PECiTI) las siguientes líneas de acción para el sector marítimo-portuario, las cuales serían aplicables también en cruces fronterizos terrestres:

- Mejorar la conectividad ferroviaria y carretera.
- Generar condiciones que permitan la logística ágil y moderna en los nodos portuarios, que apoyen el crecimiento de la demanda, la competitividad y la diversificación del comercio exterior y de la economía.
- Reducir los tiempos para el tránsito de carga en las terminales especializadas.

Naturaleza del comercio internacional México-Estados Unidos

La explosión del comercio entre Estados Unidos y México en las últimas dos décadas ha tenido un impacto significativo en el volumen de vehículos de carga que cruzan la frontera. Desde mediados de los ochenta, el tráfico de vehículos de carga de México a los Estados Unidos ha experimentado un crecimiento de más del 400 por ciento. A pesar de una recesión económica en 2001 que resultó en un descenso por primera vez en el comercio de los Estados Unidos-México en más de una década, y a pesar de la crisis económica en la que ambos países se encontraban, se espera que la expansión del comercio continúe.

Naturaleza multiobjetivo del problema

El modelo básico de transporte considera la atención de la demanda en nodos de destino a partir de capacidades de oferta que se encuentra en nodos de origen, haciendo llegar el flujo a través de arcos de tal manera que el costo total por realizarlo sea el mínimo. Sin embargo, dadas las restricciones de capacidad de un arco, una ruta puede no tener capacidad de acomodar todo el flujo por sí sola, por lo que puede ser necesario seleccionar un conjunto de rutas a través de las que se enviaría todo el flujo. Una solución en este contexto, por lo tanto, se compone de un conjunto de rutas y la cantidad correspondiente de flujo para ser enviado a lo largo de cada una de ellas.

Este trabajo de investigación se centra en la construcción de un modelo para encontrar el conjunto de soluciones en problemas en redes de transporte que tienen que ver con la consecución de objetivos múltiples y con atributos de arcos y nodos limitados por su capacidad, aplicado a una red de transporte intermodal de comercio internacional de productos perecederos, por lo que el modelo a desarrollar se catalogaría como un Problema Multiobjetivo de Flujo a Costo Mínimo.

Costo Generalizado de Transporte

El método de costo generalizado de transporte se refiere a la suma del valor monetario de todos los determinantes de la demanda de transporte para un decisor. Se utiliza el dinero como unidad común de medida porque permite una comparación interpersonal más objetiva, aunque implique considerar que todos los individuos comparten una misma valoración de la renta (de Rus, et al, 2003).

El costo generalizado de transporte en (1.1) es la suma de dos elementos. En primer lugar, los costos pecuniarios, P , están relacionados con el precio del servicio de transporte. En segundo lugar, el costo de tiempo es el producto del costo de tiempo por hora, H y tiempo de transporte, T . Se supone que P y T , y por lo tanto también G , se relaciona positivamente con el transporte de distancia medida en kilómetros (km), D , mientras H es independiente de la distancia de transporte.

La definición de costo de transporte generalizado en la ecuación (1.1) incluye los costos importantes pertinentes para el cargador. Desde la perspectiva de la economía del bienestar también deben incluirse los costos externos. Si todos los costes externos se internalizan en la función de costos de transporte generalizado, entonces los costos económicos y asistenciales privados serían iguales y las soluciones de transporte elegido serían óptimas para la sociedad como un todo. Un mayor énfasis en cuestiones ambientales y campañas podría hacer que las empresas de transporte sean más conscientes de los costos que imponen a los demás.

$$G(D) = P(D) + HT(D), \text{ donde } \frac{\partial P}{\partial D}, \frac{\partial T}{\partial D} > 0 \Rightarrow \frac{\partial G}{\partial D} > 0 \quad (1.1)$$

Tiempo de transporte

La relación entre el tiempo para pasar de un punto dado a otro y la distancia a recorrer por ello, es conocida como la velocidad. Sin embargo, en la operación de transporte, es útil distinguir entre dos tipos de velocidades: velocidad física y de negocios. El primero se refiere a las características intrínsecas técnicas de cada modo de transporte. El segundo incluye, además de las restricciones de circulación, como detenciones y obstrucciones por parte de otros vehículos o usuarios del sistema de transporte.

Uno de los objetivos a considerar es minimizar el tiempo total de transporte desde los orígenes hasta los destinos finales. Para esto, los datos de tiempo para los arcos se consideran determinísticos, con excepción de los arcos correspondientes a cruces fronterizos, en los cuales se tendrán tres estados de tiempo que pudieran presentarse (bajo, medio, alto) y las probabilidades de que estos se presenten.

Confiabilidad en el tiempo de transporte

El aumento de las operaciones de fabricación just- in-time (JIT) ha hecho que la confiabilidad en el tiempo de viaje sea más importante que el tiempo de viaje en sí mismo para algunos segmentos de la economía de Estados Unidos. El JIT se basa en un sistema de transporte eficiente para tomar ventaja de los bajos costos laborales y de producción en lugares alejados. Producir componentes en varias plantas y reunirlos en un mismo lugar al mismo tiempo para elaborar el producto final puede reducir los requerimientos de inventario y los costos totales, pero requiere un ambiente controlado para los tiempos de viaje. Si un componente no llega debido a una programación de productos inadecuada, o por retrasos en el tráfico, una cadena de montaje se puede detener, o el espacio de construcción costosa tiene que ser utilizado para el almacenamiento de inventario, en lugar de para operaciones de fabricación o montaje.

Las opciones para las medidas de rendimiento para indicar la fiabilidad en el servicio de transporte se pueden agrupar en tres grandes categorías.

- Rango estadístico. Se suelen utilizar las estadísticas de desviación estándar para presentar una estimación del rango de las condiciones de transporte que puedan ser experimentadas por los viajeros. Las medidas suelen tomar la forma de un valor medio, más o menos un valor que abarca las expectativas de 68% a 95% de los viajes (1 ó 2 desviaciones estándar a cada lado de la media).
- Medidas de tiempo Búfer. Estas medidas indican el efecto de las condiciones irregulares en forma de la cantidad de tiempo extra que debe ser permitido para un viajero de alcanzar su destino en un alto porcentaje de los viajes. La medida podría ser presentada como un porcentaje del tiempo medio de viaje.
- Indicadores de viaje tardío o con retraso. Esta medida utiliza un umbral para identificar una hora de llegada tardía aceptable. El tiempo puede ser un porcentaje del tiempo de viaje, un aumento del tiempo en minutos por encima de la media o de algún valor absoluto en minutos.

Valor del tiempo de transporte

La mayor parte de la literatura referente al valor del tiempo de ahorro de viaje (Value of travel time savings VTTS) se centra en el transporte de pasajeros más que en el transporte de carga (Torres et al. 2012). Para el caso del valor del tiempo de pasajeros se han realizado estimaciones de los costos laborales de los

conductores de vehículos de transporte de mercancías (por ejemplo, los conductores de camiones o ingenieros de locomotoras) y de los costos de operación de vehículos de carga que se verían afectados por los cambios en el tiempo de viaje. Sin embargo, el valor del tiempo de los cargadores (es decir, los propietarios de la carga que se transporta) no puede ser estimado de manera fácil (US-DOT, 2012).

En lo que al transporte de carga se refiere, debido a que la carga en tránsito representa el capital improductivo que incurre en un costo de interés, parte de los beneficios del ahorro de tiempo será proporcional al ahorro de tiempo, la tasa de interés y el valor de la carga. El principal obstáculo para la estimación de este valor se debe probablemente a la heterogeneidad y la incertidumbre de las categorías de carga afectadas por cualquier ahorro de tiempo específico. Por lo tanto cada corredor o modo de transporte requieren una estimación específica de la composición de la carga transportada. El costo del tiempo de transporte de carga también se verá influido por factores independientes del valor, como la rapidez con que los productos se vuelven obsoletos (a causa de la moda o la obsolescencia tecnológica), si los productos se estropean con el tiempo (perecederos) y si algún proceso de producción depende de la entrega a tiempo.

Modelo de flujo a costo mínimo

Los modelos de flujo a costo mínimo (MCF – minimum cost flow), los cuales se pueden considerar como una generalización del SPP, tienen la ventaja de considerar también las capacidades de flujo que se generan en los nodos de origen, la demanda en los nodos de destino y las capacidades de los arcos de la red. Dadas estas ventajas, los MCF son utilizados para enviar el flujo a partir de un conjunto de nodos de suministro, a través de los arcos de una red, a un conjunto de nodos de demanda, a un costo total mínimo, y sin violar los límites inferior y superior sobre los flujos a través de los arcos.

Ejemplo de cruce fronterizo

El Observatorio Estratégico Tecnológico del ITESM, por su parte, identifica los clusters más prometedores para impulsar su desarrollo. Para el Estado de México en el sector agropecuario, en 2004 el sector agrícola mexiquense representaba 4 853 833 miles de pesos (precios de 1993), lo que equivale a 3% del PIB estatal total de ese año y al 5.33% del PIB agropecuario nacional.

En el sector agrícola del Estado de México, el maíz constituye el 60% de la superficie sembrada y aporta el 26.12% de la producción. Una oportunidad se encuentra en la siembra de flores de ornato. La siembra de crisantemo, rosa y clavel en el sur y oriente del estado constituye el 19.33% del valor total de la producción usando solo el 0.38% de la superficie sembrada.

La proximidad de México a los Estados Unidos, el principal comprador de flores de México en el exterior, le da al país una ventaja competitiva en este mercado en relación con sus competidores como Colombia y Ecuador, para permitir mejores

tiempos de viaje por el transporte motorizado y el consiguiente ahorro de costos en comparación con el modo aéreo, condición que sólo puede ser utilizado por los productores nacionales (Martner et al. 2005, Morales y de la Torre, 2006).

Aunque el transporte aéreo es rápido en comparación al transporte de superficie (camión, contenedor marítimo, etc.), la respuesta de las flores y follajes cortados a las temperaturas cálidas conduce a su rápido deterioro, aún durante las relativamente cortas horas de transporte aéreo. Se ha demostrado muchas veces que el transporte de flores por métodos de superficie que permiten mantener una buena cadena de frío produce mejores resultados que el transporte aéreo sin control de temperatura y esto se debe principalmente a la dramática respuesta de las flores al calor. Por esta razón, el transporte aéreo rara vez es el medio elegido cuando existen otras opciones que ofrezcan un buen control de temperatura. El Valor del embarque: 30-80 mil dólares mientras que el tiempo de vida es de 1 semana a 13 días

Reporte de tiempos de espera en cruces fronterizos

El buró de estadísticas de transporte de Estados Unidos (BTS) cuenta con estudios en los que se tienen registrados los tiempos promedios de cruce y su percentil 95 de manera mensual. Las tablas siguientes muestran los registros desde enero de 2011 a marzo de 2012 para el Puente de las Américas (entre El Paso, Tx. y Cd. Juárez, Chih.) y para el cruce Pharr-Reynosa (Rajbhandari et al. 2012).

Por otra parte, la Federal Highway Administration y el Texas Department of Transport en conjunto con el Texas Transport Institute de la Universidad Texas A&M desarrollaron un sistema de información para cruces fronterizos (Border Crossing Information System), en el cual se puede consultar los tiempos de espera y los tiempos de cruce para distintos cruces fronterizos. A continuación se muestran algunos estadísticos y gráficos referentes al mes de septiembre de 2015 para los cruces de Nuevo Laredo, Reynosa y Matamoros. Se eligieron estos cruces por ser los más importantes en la frontera entre Texas y Tamaulipas por lo que son los que se podrían utilizar en algún ejercicio de comercio exterior entre México y la costa Este de los Estados Unidos.

Corrida de flujo a costo mínimo

Existe una amplia gama de rutas que seguiría un embarque de flor desde el Estado de México hacia Estados Unidos. Para simplificar el análisis, se considera un tramo a partir de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, con posibles destinos en New Orleans, Luisiana o en Houston, Texas. Se consideran tres posibles cruces fronterizos: Nuevo Laredo, Reynosa y Matamoros, Tamaulipas.

Al considerar los costos de operación de un camión articulado en terreno plano con un IRI de 4, de acuerdo con Arrollo et al. (2014), el costo de operación

vehicular sería de 15.51 pesos por vehículo-kilómetro, con lo que el resultado del cruce de un vehículo de este tipo daría como resultado los valores de la Tabla 4.3.

Se consideraron dos casos, el primero en que la mercancía es entregada en Monterrey, mientras que el segundo caso la mercancía es entregada en el destino final.

Caso 1

Si se toma como lugar de entrega un punto intermedio (que podría ser incluso el origen), poniendo como ejemplo la ciudad de Monterrey. El valor del embarque va disminuyendo conforme transcurre el tiempo de transporte llegando a ser cero al término de la vida útil del producto. Para esto, se estima para cada ruta, por un lado, el costo de operación vehicular y, por el otro, el tiempo con su consiguiente disminución del valor. Al final se tiene el costo generalizado para cada opción y se puede seleccionar la ruta más corta.

Considerando que un embarque de flores puede tener un valor de hasta 80000 dólares y que su tiempo de vida puede ser de hasta 13 días, se tomó una depreciación lineal por hora, por lo que el valor por hora de un embarque completo sería de 256.41 dólares.

Caso 2

Si se toma como lugar de entrega el destino final, el valor de la mercancía empezaría a disminuir conforme se diera el retraso al tiempo convenido de entrega, la variación horaria del valor del tiempo se da de forma lineal a partir del tiempo convenido, mientras que antes de ese tiempo el valor de la mercancía se mantiene constante.

Al comparar ambos casos, se puede observar que hay una gran diferencia en el costo generalizado siendo mucho mayor en el caso 1. Esta diferencia se debe a que en el caso 1 se toma en cuenta todo el tiempo que transcurre desde el punto de entrega hasta el destino final, mientras que en el caso 2 se considera la diferencia del tiempo de cada ruta con respecto al tiempo convenido.

Esta situación ejemplifica cómo el escoger distintos términos de entrega -como pudieran ser los INCOTERMS- repercute en el costo generalizado en función del valor del tiempo de retraso en la entrega de las mercancías respecto a un plazo convenido.

Introducción

En la Meta Nacional IV, México Próspero, se encuentra el Objetivo 4.8 Desarrollar los sectores estratégicos del país y el Objetivo 4.9 Contar con una infraestructura de transporte que se refleje en menores costos para realizar la actividad económica. Dentro de este último se tiene la estrategia 4.9.1 Modernizar, ampliar y conservar la infraestructura de los diferentes modos de transporte, así como mejorar su conectividad bajo criterios estratégicos y de eficiencia. Particularmente, bajo esta estrategia se mencionan en el Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación 2014-2018 (PECiTI) las siguientes líneas de acción para el sector marítimo-portuario, las cuales serían aplicables también en cruces fronterizos terrestres:

- Mejorar la conectividad ferroviaria y carretera.
- Generar condiciones que permitan la logística ágil y moderna en los nodos portuarios, que apoyen el crecimiento de la demanda, la competitividad y la diversificación del comercio exterior y de la economía.
- Reducir los tiempos para el tránsito de carga en las terminales especializadas.

Estas líneas de acción tendrán gran repercusión en el Programa Sectorial de Relaciones Exteriores, también identificado en el PECiTI, particularmente en la estrategia sectorial 2.6 Contribuir a la atención de los grandes retos al desarrollo en los mecanismos multilaterales, desde una perspectiva integral destacando el enfoque preventivo.

Naturaleza del comercio internacional México-Estados Unidos

La explosión del comercio entre Estados Unidos y México en las últimas dos décadas ha tenido un impacto significativo en el volumen de vehículos de carga que cruzan la frontera. Desde mediados de los ochenta, el tráfico de vehículos de carga de México a los Estados Unidos ha experimentado un crecimiento de más del 400 por ciento. A pesar de una recesión económica en 2001 que resultó en un descenso por primera vez en el comercio de los Estados Unidos-México en más de una década, y a pesar de la crisis económica en la que ambos países se encontraban, se espera que la expansión del comercio continúe.

En 2001, para la gestión de las operaciones de carga, la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA), con el apoyo del Texas Transportation Institute (TTI), llevó a cabo una revisión en siete puntos de la frontera que concentran el 60 por ciento de la carga que se transporta por carretera entre las tres naciones del TLCAN (Texas Transportation Institute, 2007). En dicho estudio

se encontró que el tiempo necesario para procesar los vehículos comerciales que entran en los Estados Unidos es mucho mayor que para aquellos que salen, repitiéndose la misma situación en casi todas las aduanas.

En total, el tiempo promedio para los vehículos que entran a Estados Unidos fue de 26,8 minutos, mientras que para los vehículos que salen fue de 14,2 minutos. Sin embargo, los tiempos de atención son mucho mayores en la frontera con México que en la frontera con Canadá. El promedio de tiempo en la frontera con México fue de 33,8 minutos para los vehículos que entran en los EE.UU. por 17,2 minutos para los vehículos que salen.

Sin embargo, una comparación del tiempo promedio desde el percentil 95 indica que los tiempos de servicio pueden ser mucho mayores, observando tiempos de control de aduana de hasta 70 minutos.

Naturalmente, el número de cabinas de inspección influyen significativamente en la variabilidad del tiempo de transporte y de demora. Hay una clara relación entre el número de puestos de entrada, la demanda y el tiempo de cruce en los puntos de entrada (POE).

En dicho informe se encontró que existe una mayor demanda en la frontera de Estados Unidos con México que en Canadá, situación que se agrava debido a que en la frontera con México existe también una gran variabilidad a lo largo del día en los tiempos de transporte necesarios para el cruce. Situaciones como la preocupación sobre el tráfico de drogas y la inmigración ilegal contribuyen a extender el período de tiempo de la inspección en la frontera México-Estados Unidos. Sin embargo, otras influencias en el tiempo de viaje y demoras son menos evidentes y pueden requerir una atención especial.

El informe menciona que en un estudio anterior, pero de movilidad urbana, llevado a cabo por la Federal Highway Administration (FHWA) y por la Texas A&M Transportation Institute (TTI) indicó que los tiempos de retraso a lo largo de las vías urbanas son más fiables y menos volátiles, respecto a los retrasos en los siete casos de los POE de 2001.

De acuerdo con un informe del Departamento de Transporte de Estados Unidos (Bureau of Transportation Statistics, 2004), la relación entre las agencias gubernamentales y numerosos agentes privados, es complejo, porque las agencias suelen actuar de forma independiente, creando problemas como la incompatibilidad de horarios entre agentes privados y públicos.

En un estudio en el Colegio de la Frontera Norte (El Colegio de la Frontera Norte, 2007), se encontró que "la congestión y el tiempo de espera para los vehículos en puestos de control implican una pérdida monetaria de tal magnitud que genera un gran impacto económico en la producción, ingresos y empleo en la región fronteriza".

Naturaleza multiobjetivo del problema

El modelo básico de transporte considera la atención de la demanda en nodos de destino a partir de capacidades de oferta que se encuentra en nodos de origen, haciendo llegar el flujo a través de arcos de tal manera que el costo total por realizarlo sea el mínimo. Sin embargo, dadas las restricciones de capacidad de un arco, una ruta puede no tener capacidad de acomodar todo el flujo por sí sola, por lo que puede ser necesario seleccionar un conjunto de rutas a través de las que se enviaría todo el flujo. Una solución en este contexto, por lo tanto, se compone de un conjunto de rutas y la cantidad correspondiente de flujo para ser enviado a lo largo de cada una de ellas.

Las decisiones que deben abordar los operadores intermodales implican la elección de rutas y servicios dentro de las opciones disponibles en las actuales redes intermodales. Este tipo de decisión es operativa, porque se refiere a la asignación de carga a las rutas y los transportistas. Esta situación se vuelve más compleja cuando se trata de transporte intermodal.

En diversas aplicaciones en problemas reales de selección de rutas suelen considerarse otros criterios como el tiempo de transporte y su variabilidad, que pueden ser de igual o mayor importancia. Dado que la identificación de una solución única que sea mejor a las demás con respecto a todos los objetivos, es a menudo imposible.

El uso de modelos dentro de la planeación del transporte tiene importancia en la medida en que permita un mejor entendimiento del comportamiento del sistema analizado, y contribuya a la generación y análisis de alternativas. Los modelos de transporte y especialmente los modelos de asignación de demanda, están basados en minimizar la función de costo generalizado de viaje, la cual se traduce como la suma de todos los costos que asume un usuario para realizar un desplazamiento desde un origen a un destino, convertidos a un valor monetario.

Este trabajo de investigación se centra en la construcción de un modelo para encontrar el conjunto de soluciones en problemas en redes de transporte que tienen que ver con la consecución de objetivos múltiples y con atributos de arcos y nodos limitados por su capacidad, aplicado a una red de transporte intermodal de comercio internacional de productos perecederos, por lo que el modelo a desarrollar se catalogaría como un Problema Multiobjetivo de Flujo a Costo Mínimo.

Este problema es más completo que el correspondiente de ruta más corta ya que se puede considerar como una generalización que tiene la ventaja de considerar también las capacidades de flujo que se generan en los nodos de origen, la demanda en los nodos de destino y las capacidades de los arcos de la red.

En el Capítulo 1 se habla acerca del concepto de costo generalizado de transporte y se discuten los conceptos de valor monetario del tiempo, así como las distintas medidas de confiabilidad que pueden afectar el valor del mismo.

En el Capítulo 2 se discute lo relacionado al problema de redes de flujo a costo mínimo, las implicaciones de hacerlo multiobjetivo, así como un ejemplo de aplicación resuelto con el software GAMS.

En el Capítulo 3 se presenta un ejemplo de cruce fronterizo enfocado en el mercado de exportación de flores de ornato. Se muestran los tiempos de cruce de los principales puntos de acceso a Estados Unidos, así como algunas medidas de dispersión en el tiempo.

En el Capítulo 4 se muestran los insumos para una corrida de flujo a costo mínimo ya aplicada en el ejemplo descrito en el Capítulo 3, mostrando el valor total de cruzar los distintos arcos que intervienen en la exportación.

1 Costo generalizado de transporte

Existe una gran variedad de métodos disponibles para resolver los problemas Multiobjetivo (MOO), muchos de ellos implican convertir el problema MOO en una o una serie de problemas de un solo objetivo o SOO (Deb, 2011, Talbi, 2009, Marler, 2004, Rangahia, 2008). Cada uno de estos problemas consiste en la optimización de una función de escalamiento, que es una función de los objetivos iniciales, por un método adecuado para SOO.

El método de costo generalizado de transporte se refiere a la suma del valor monetario de todos los determinantes de la demanda de transporte para un decisor. Se utiliza el dinero como unidad común de medida porque permite una comparación interpersonal más objetiva, aunque implique considerar que todos los individuos comparten una misma valoración de la renta (de Rus, et al, 2003).

Cuando un embarcador de mercancías busca minimizar el costo total de transporte, por lo general busca la solución que represente el menor costo por tonelada al adquirir un servicio de transporte. El costo generalizado de transporte, de acuerdo con Hanssen et al. (2012) se define en la siguiente ecuación.

$$G(D) = P(D) + HT(D), \text{ donde } \frac{\partial P}{\partial D}, \frac{\partial T}{\partial D} > 0 \Rightarrow \frac{\partial G}{\partial D} > 0 \quad (1.1)$$

El costo generalizado de transporte en (1.1) es la suma de dos elementos. En primer lugar, los costos pecuniarios, P, están relacionados con el precio del servicio de transporte. En segundo lugar, el costo de tiempo es el producto del costo de tiempo por hora, H y tiempo de transporte, T. Se supone que P y T, y por lo tanto también G, se relaciona positivamente con el transporte de distancia medida en kilómetros (km), D, mientras H es independiente de la distancia de transporte.

La definición de costo de transporte generalizado en la ecuación (1.1) incluye los costos importantes pertinentes para el dueño de la carga. Desde la perspectiva de la economía del bienestar también deben incluirse los costos externos. Si todos los costes externos se internalizan en la función de costos de transporte generalizado, entonces los costos económicos y asistenciales privados serían iguales y las soluciones de transporte elegido sería óptimo para la sociedad como un todo. Un mayor énfasis en cuestiones ambientales y campañas podría hacer

que las empresas de transporte sean más conscientes de los costos que imponen a los demás.

$$C = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 XD, \text{ donde } \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 > 0 \quad (1.2)$$

Es de esperarse que los costos de una empresa de transporte, C , dependan de la cantidad transportada, X , y de la distancia, D . En (1.2) la influencia de X y D en C están representados por relaciones lineales, que es un ejemplo de una función simple de costos. Sin embargo, se podrían utilizar funciones más avanzadas para capturar mejor la variación en los costos. A pesar de la debilidad de tratar a todos los servicios de transporte como un producto homogéneo, las medidas de salida comunes son toneladas y/o toneladas-kilómetro.

En (1.2) los parámetros α_1 y α_2 representan el aumento marginal en los costos cuando X y XD aumentan en una unidad, respectivamente. Los costos que son independientes de la cantidad y la distancia son dados por el parámetro α_0 . Los costos marginales, $\partial C/\partial X$, hacen que en esta función simple los costos se incrementen linealmente con la distancia de transporte.

1.1 Tiempo de transporte

La relación entre el tiempo para pasar de un punto dado a otro y la distancia a recorrer por ello, es conocida como la velocidad. Sin embargo, en la operación de transporte, es útil distinguir entre dos tipos de velocidades: velocidad física y de negocios. El primero se refiere a las características intrínsecas técnicas de cada modo de transporte. El segundo incluye, además de las restricciones de circulación, como detenciones y obstrucciones por parte de otros vehículos o usuarios del sistema.

Uno de los objetivos a considerar es minimizar el tiempo total de transporte desde los orígenes hasta los destinos finales. Para esto, los datos de tiempo para los arcos se consideran determinísticos, con excepción de los arcos correspondientes a cruces fronterizos, en los cuales se tendrán tres estados de tiempo que pudieran presentarse (bajo, medio, alto) y las probabilidades de que estos se presenten.

Para el atributo de tiempo de recorrido, la ecuación (1.3) correspondiente al objetivo de tiempo quedaría modificada como sigue:

$$\sum_{(i,j) \in P} E[t_{ij}] X_{ij} \quad (1.3)$$

Donde:

$E[t_{ij}]X_{ij}$ Es el valor esperado (considerado como determinístico) del tiempo de cruzar un arco dentro de la red

De acuerdo con Moreno et al. (2014) el flujo en las carreteras modifica la velocidad y, por consiguiente, el tiempo necesario para recorrerlas. En ese mismo estudio se enumeran algunas funciones de volumen-demora que se utilizan en la modelación de las asignaciones de flujos vehiculares a partir de dos modelos basados en el equilibrio en las redes y uno basado en el criterio de todo o nada.

El equilibrio del usuario. Se refiere al caso en el que los usuarios eligen libremente la mejor ruta para llegar a sus destinos. Sin embargo, dado que la carretera tiene una capacidad limitada, los primeros usuarios eligen generalmente las rutas más cortas a sus destinos pero conforme se congestiona la vía el tiempo de recorrido aumenta, lo que motivará a algunos usuarios a cambiar de ruta para mejorar sus tiempos de recorrido. El equilibrio se alcanza cuando no hay cambios en los tiempos de recorrido para cualquier alternativa de ruta por lo que no conviene cambiar de ruta.

El equilibrio del sistema. Se da cuando los usuarios eligen su ruta de modo que el tiempo total para todos sea mínimo. Como es difícil que los usuarios se pongan de acuerdo, se requiere la intervención del planificador de la red para motivar los flujos resultantes del modelo, ya sea facilitando la circulación en algunas rutas o inhibiendo el acceso en otras a cierto tipo de vehículos o a través de la tarificación del uso de la infraestructura.

Para considerar el efecto de la congestión en el tiempo de viaje se han desarrollado varias funciones, la más usada es la función de tiempo de viaje BPR (Bureau of Public Roads), que fue propuesta por la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos FHWA BPR (Oficina de Caminos Públicos). Fue utilizada inicialmente en la planificación de la red de carreteras y posteriormente en la planificación de la red vial urbana. La expresión matemática es:

$$T_i = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_i}{C_i} \right)^\beta \right] \quad (1.4)$$

donde

T_i es el tiempo de viaje en un segmento de carretera a , (s);

t_0 es el tiempo de viaje a flujo libre en un segmento de carretera a , (s);

x_i es el flujo de tránsito en un segmento de carretera a , (pcu/h);

C_i es la capacidad de tránsito en un segmento de carretera a , (pcu/h);

α , β son parámetros del modelo;

Los valores más utilizados son $\alpha = 0.15$, $\beta = 4$

El criterio de “todo o nada”, por su parte, no considera los efectos de la congestión vehicular y los costos de recorrido en los tramos se consideran fijos. Este criterio se utiliza en redes donde los volúmenes de flujo vehicular son bajos y se puede omitir el efecto de la congestión, o en redes de transporte donde las condiciones de operación vehicular están muy controladas, como es el caso de las redes ferroviarias.

En la práctica, para el caso de una empresa transportista de carga que como usuario busca seleccionar su ruta desde un origen a un destino y una vez seleccionada no puede cambiarla hasta que la ha concluido, se puede tomar en cuenta la congestión histórica para estimar el tiempo promedio de viaje y con este dato conocido proceder con base en el criterio de “todo o nada”, ya que la operación de su flota vehicular puede estar controlada a partir de tecnologías de información.

Un aspecto que impacta significativamente al tiempo de transporte es qué tan confiable es dicho tiempo de transporte. A continuación se presentan algunas consideraciones.

1.2 Confiabilidad en el tiempo de transporte

El aumento de las operaciones de fabricación just-in-time (JIT) ha hecho que la confiabilidad en el tiempo de viaje sea más importante que el tiempo de viaje en sí mismo para algunos segmentos de la economía de Estados Unidos. El JIT se basa en un sistema de transporte eficiente para tomar ventaja de los bajos costos laborales y de producción en lugares alejados. Producir componentes en varias plantas y reunirlos en un mismo lugar al mismo tiempo para elaborar el producto final puede reducir los requerimientos de inventario y los costos totales, pero requiere un ambiente controlado para los tiempos de viaje. Si un componente no llega debido a una programación de productos inadecuada o por retrasos en el tráfico, una cadena de montaje se puede detener o el espacio de construcción costosa tiene que ser utilizado para el almacenamiento de inventario, en lugar de para operaciones de fabricación o montaje.

En el mismo estudio de TTI (1) se incluye una lista de las fuentes de variabilidad en el tiempo de viaje. Estas siete fuentes describen las condiciones subyacentes que cambian con el tiempo y provocan variaciones en el mismo.

En muchas situaciones del "mundo real" estas siete fuentes interactúan, lo que complica aún más la evaluación y predicción de la funcionalidad.

- Incidentes. Colisiones, averías de vehículos y escombros que interrumpen el flujo normal de tráfico, si el evento ocurre en un hombro o en los principales carriles de circulación.

- Zonas de trabajo. Actividades de mantenimiento o construcción.
- Clima. Toda la gama de eventos naturales que afectan la visibilidad, desde la niebla/nieve/llovizna o el brillo del sol en los ojos del conductor; las condiciones de superficie de la calzada que afectan el comportamiento del conductor.
- Fluctuaciones en demanda. Las variaciones de la demanda del día a día las causadas por los cambios en los niveles de actividad.
- Eventos especiales que causan patrones o volumen de viajes drásticamente diferentes en las cercanías del evento.
- Dispositivos de control de tráfico. Señales o eventos de señales periódicas tales como los cruces de ferrocarril o puentes levadizos mal cronometrados.
- Capacidad base inadecuada. Normalmente las carreteras congestionadas son más susceptibles a los efectos de cualquiera de los otros seis factores.

Las opciones para las medidas de rendimiento para indicar la fiabilidad en el servicio de transporte, se pueden agrupar en tres grandes categorías:

- Rango estadístico. Estos representan las medidas más frecuentemente teorizadas o conceptualizadas. Se suelen utilizar las estadísticas de desviación estándar para presentar una estimación del rango de las condiciones de transporte que puedan ser experimentadas por los viajeros. Las medidas suelen tomar la forma de un valor medio, más o menos un valor que abarca las expectativas de 68% a 95% de los viajes (1 ó 2 desviaciones estándar a cada lado de la media). Estos por lo general aparecen como medidas de "variabilidad".
- Medidas de tiempo Buffer. Estas medidas indican el efecto de las condiciones irregulares en forma de la cantidad de tiempo extra que debe ser permitido para un viajero de alcanzar su destino en un alto porcentaje de los viajes. La medida no se refiere necesariamente al tiempo medio de viaje, pero podría ser presentada como un porcentaje del tiempo medio de viaje o un valor en minutos por distancia o minutos de algún viaje típico.
- Indicadores de viaje tardío o con retraso. Esta medida responde a la pregunta ¿con qué frecuencia va a llegar un viajero inaceptablemente tarde? Esta medida tampoco se refiere al tiempo medio de viaje, pero utiliza un umbral para identificar una hora de llegada tardía aceptable. El tiempo puede ser un porcentaje del tiempo de viaje, un aumento del tiempo en minutos por encima de la media o de algún valor absoluto en minutos.

1.2.1 Medidas de rango estadístico

Este tipo de medidas se caracteriza generalmente por la información presentada en un formato relativamente sin procesar. Las medidas se basan en conceptos familiares para los estadísticos.

La desviación estándar representa la cantidad de variación en los datos. El intervalo resultante de sumar y restar la desviación estándar del valor medio contiene aproximadamente el 68% de los valores de los datos. (El percentil 85 utilizado para establecer los límites de velocidad es el valor que contiene todas las velocidades por debajo de un valor de una desviación estándar por encima de la media). Dos desviaciones estándar por encima y por debajo de la media abarcarán aproximadamente el 95% de los datos.

Las distribuciones de tiempo de viaje de una carretera, corredor o zona urbana son típicamente log-normal, donde el valor no es inferior a cero y hay una cola más larga a la derecha (altos tiempos de viaje). La mayor parte de la descripción siguiente se supone una distribución normal para la facilidad de discusión. Las diferencias entre normal y log-normal serán importantes si se utilizan estas medidas.

Ventana en el tiempo de viaje. La desviación estándar del tiempo de viaje o la velocidad de viaje se puede combinar con la media de cualquiera de varias medidas para crear una medida de variación o confiabilidad. Esto tomaría la forma de una expresión de tipo "más o menos" que dará al decisor una idea de lo mucho que el tiempo de viaje variará (Ecuación 1.5). El uso de una desviación estándar abarcará el 68% de los días, las temporadas altas o cualquier período de tiempo que se elija para su análisis.

$$\text{Ventana de tiempo de viaje} = \text{Tiempo medio de viaje} \pm \text{Desviación estándar} \quad (1.5)$$

Se puede aplicar un factor multiplicador al valor de la desviación estándar para aumentar el número de viajes que se describen dentro del rango del intervalo. El concepto de usar el rango intercuartil (la diferencia entre los percentiles 25 y 75) también puede ser utilizado en esta medida. Ésta puede ser usada para cualquier medio de transporte y se puede manejar para una amplia gama de tamaños de la red.

La combinación de distintos segmentos de red o de varios modos diferentes de transporte es un proceso de ponderación de cada segmento por el número de usuarios o la distancia de recorrido en kilómetros-persona.

Variación porcentual. El valor medio y la desviación estándar también se pueden combinar en una proporción para producir un valor que el Plan de Transporte de California de 1998 llama variación porcentual (Ecuación 1.6). Esta es una forma medida estadística del coeficiente de variación. El análisis de los datos de tiempo

de viaje por medio del coeficiente de variación proporciona una imagen más clara de las tendencias y características del rendimiento que la desviación estándar por sí misma sin considerar la duración del tiempo de viaje.

$$\text{Variación porcentual} = \frac{\text{desviación estándar}}{\text{tiempo medio de viaje}} \times 100\% \quad (1.6)$$

Un factor de este tipo proporciona la capacidad de discutir las condiciones de viaje de una variedad de diferentes longitudes de viaje de manera similar a la descripción del índice de tipo de viaje para las condiciones de viaje promedio. Los datos pueden ser presentados por segmentos individuales o por corredores, así como para una combinación de modos de transporte.

Índice de variabilidad. Una vista de la cuestión de la fiabilidad que pueden tener una aplicación más allá de una sola medida se ilustra en el índice de variabilidad. El índice es una relación de la variación de la actividad pico a la de menor actividad en las condiciones de viaje. El índice se calcula como una relación de la diferencia de los intervalos de confianza del 95% superior e inferior entre el período de pico y el período de no-pico (Ecuación 1.7).

$$\text{Índice de variabilidad} = \frac{\text{intervalo de confianza en hora pico} \quad (\text{valor superior 95\%} - \text{valor inferior 95\%})}{\text{intervalo de confianza en hora no - pico} \quad (\text{valor superior 95\%} - \text{valor inferior 95\%})} \quad (1.7)$$

El intervalo de diferencias (que representan 2 desviaciones estándar por encima y por debajo de la media) en los períodos pico son generalmente más grandes que el correspondiente al de fuera de horas pico y por lo tanto el valor del índice variabilidad es mayor que 1,0.

1.2.2 Medidas reguladoras Buffer

El concepto de tiempo de Buffer puede referirse particularmente bien a la forma en que los viajeros toman decisiones. Conceptualmente, las decisiones de viaje proceden de preguntas como ¿hasta dónde es? ¿Cuándo tengo que llegar? ¿Es muy grave el tráfico? ¿Cuánto tiempo tomará el viaje? ¿Cuándo debo partir?. Al considerar el tiempo que tomará realizar un viaje hay una evaluación de cuánto tiempo extra se debería considerar en compensación por la incertidumbre en las condiciones de viaje. Esto incluye el clima, incidentes, zonas de construcción u otros eventos especiales de tráfico o interrupciones de tráfico. La comparación de las condiciones reales de tráfico a las que ocurren en un día promedio o las que ocurren con mayor frecuencia se puede relacionar el efecto de la incertidumbre en la toma de decisiones.

Tiempo de Buffer. Es una medida que utiliza minutos de tiempo de viaje adicional necesaria para permitir que el viajero llegue a tiempo, se puede calcular con relativa facilidad y da una buena idea de la cantidad de incertidumbre. El problema es la definición de un viaje promedio que se debe utilizar como base.

El tiempo de búfer sería la diferencia entre el promedio de tiempo de viaje y el tiempo de viaje percentil 95 calculado a partir del promedio anual, en minutos (Ecuación 1.8).

$$\text{tiempo de buffer} = \text{tiempo de viaje 95 percentil} - \text{tiempo medio de viaje} \quad (1.8)$$

Índice de tiempo Buffer. Utilizando el concepto de tiempo de buffer junto con la velocidad de viaje (en minutos por km), en lugar de tiempo de viaje promedio, pueden abordar los problemas acerca de la identificación de un viaje promedio. La información incluiría un promedio de la variación, sección por sección para un corredor, subárea o área de interés ponderado por la cantidad de viajes en cada segmento. El índice también se podría calcular, sin embargo, con los tiempos de viaje de las secciones de carretera con un tiempo de viaje promedio similar (Ecuación 1.9).

$$\text{índice de tiempo de buffer} = \left(\text{Promedio de todas las secciones} \right) \left[\frac{95 \text{ percentil tasa de viaje } \frac{\text{min}}{\text{km}} - \text{tasa promedio de viaje } \frac{\text{min}}{\text{km}}}{\text{tasa promedio de viaje } \frac{\text{min}}{\text{km}}} \right] \quad (1.9)$$

La medida puede calcularse a partir del tiempo real de datos, ya sea por medio de entronques de carretera combinados en corredores o sólo en los entronques individuales.

Índice de tiempo de planificación. El extremo superior del índice de tiempo Buffer es también una medida útil en algunas situaciones. El índice de 95 percentil de tiempo o tasa de velocidad de viaje (expresado en minutos por km), provee una expectativa del tiempo de viaje y se calcula como parte del proceso del índice de tiempo búfer. También es relativamente fácil de comunicar y podría ser utilizado como una medida de planificación de viajes para los viajes que requieren llegadas a tiempo.

$$\text{Índice de planificación de tiempo} = \text{Índice de 95 percentil del tiempo de viaje (en período pico)} \quad (1.10)$$

1.2.3 Indicadores de viaje retrasado

Mientras las medidas de tiempo de buffer miran los efectos del tiempo del desempeño de un sistema poco fiable, las medidas de viaje retrasado o tardío pueden representar los impactos de la falta de fiabilidad utilizando la cantidad de viajes tardíos o retrasados.

Si los viajeros sólo utilizan el tiempo medio de viaje para sus planes de viaje, van a llegar tarde a la mitad de sus destinos y temprano a la otra mitad (en números redondos). Los viajeros prudentes consideran algún tiempo extra, además del tiempo de viaje promedio por sí las condiciones fluctúan.

Si se elige un valor en minutos o un porcentaje para representar algún intervalo de llegada inaceptablemente tarde, los datos pueden ser analizados por la cantidad o el porcentaje de viajes que sería demasiado tarde con respecto a esas expectativas.

El método Florida de confiabilidad, por ejemplo, se calcula para varios niveles hasta que se realicen más estudios. Unos métodos para elegir el intervalo se describen a continuación.

Método Florida de confiabilidad. La medida Florida usa un porcentaje del tiempo promedio de viaje en hora pico para estimar el límite de tiempo de viaje adicional (Ecuación 1.11). La suma de tiempo de viaje adicional y el tiempo promedio define el tiempo esperado de viaje.

Florida está experimentando con cuatro niveles diferentes para determinar el valor correcto para el tiempo adicional. Los tiempos de viaje más largos que el tiempo esperado se denominan "poco fiables". Un ajuste que pudiera ser necesario para los sistemas de monitoreo en tiempo real es utilizar la tasa en lugar de los tiempos de viaje (Ecuación 1.12).

$$\text{Medida de confiabilidad Florida} = 100\% - (\text{porcentaje de viajes con tiempos mayores a los esperados}) \quad (1.11)$$

$$\text{Medida de confiabilidad Florida} = 100\% - (\text{porcentaje de viajes con tasas mayores al promedio para el periodo de tiempo mas 5\%, 10\% 15\% y 20\% del promedio}) \quad (1.12)$$

Llegadas a tiempo. Un concepto similar al método de Florida utiliza un "umbral de retraso" aceptable de algún porcentaje para indicar el porcentaje de los tiempos de viaje que puede denominarse fiable. Esta medida se utiliza en una variedad de

modos y servicios de viajes y podría ser particularmente útil en las comparaciones entre modos de transporte.

El informe Estudio de Movilidad Urbana "Las Claves para el cálculo de movilidad en medio urbano", sugirió un umbral del 10% más alto que el tiempo de viaje promedio. Este valor no ha sido probado en el mercado, pero una llegada tardía del 10% puede ser relativamente conservador para algunas aplicaciones (Ecuación 1.13).

Existen dos preocupaciones con el valor de aceptable para llegadas a tiempo, 1) no puede variar de forma lineal para todos los viajes, y 2) que no sólo está relacionada con la duración del viaje. El 10% de retraso en un viaje al extranjero de 16 horas puede no ser tan aceptable como 3 minutos tarde para un viaje a la ciudad de 30 minutos. La cantidad de "retraso aceptable" es también una función de la actividad previa y de la utilidad en el lugar de destino. Llegar tarde puede ser más aceptable si el viajero está viniendo de una actividad importante.

*Llegada a tiempo = 100% – porcentaje de viajes con tiempo (1.13)
mayor al 110% del tiempo promedio*

Índice de miseria. El aspecto negativo de la fiabilidad de cada viaje se puede medir como el número promedio de minutos que tardan los peores viajes con respecto al tiempo promedio de viaje. Esto puede ser calculado tomando los datos correspondientes al 20% de los peores tiempos diarios y la velocidad de viaje promedio de todos los viajes.

1.3 Valor del tiempo de transporte

La mayor parte de la literatura referente al valor del tiempo de ahorro de viaje (Value of travel time savings VTTs) se centra en el transporte de pasajeros más que en el transporte de carga (Torres et al. 2012). Para el caso del valor del tiempo de pasajeros se han realizado estimaciones de los costos laborales de los conductores de vehículos de transporte de mercancías (por ejemplo, los conductores de camiones o ingenieros de locomotoras) y de los costos de operación de vehículos de carga que se verían afectados por los cambios en el tiempo de viaje. Sin embargo, el valor del tiempo de los cargadores (es decir, los propietarios de la carga que se transporta) no puede ser estimado de manera fácil (US-DOT, 2011).

En lo que al transporte de carga se refiere, debido a que la carga en tránsito representa el capital improductivo que incurre en un costo de interés, parte de los beneficios será proporcional al ahorro de tiempo, la tasa de interés y el valor de la carga. El principal obstáculo para la estimación de este valor se debe probablemente a la heterogeneidad y la incertidumbre de las categorías de carga afectadas por cualquier ahorro de tiempo específico. Por lo tanto cada corredor o

modo de transporte requieren una estimación específica de la composición de la carga transportada. El costo del tiempo de transporte de carga también se verá influido por factores independientes del valor, como la rapidez con que los productos se vuelven obsoletos (a causa de la moda o la obsolescencia tecnológica), si los productos se estropean con el tiempo (perecederos) y si algún proceso de producción depende de la entrega a tiempo.

El costo en que incurren los cargadores también puede depender de las prácticas comerciales, como la cantidad de inventario mantenido con que se cuenta y la probabilidad de quedarse sin existencias debido a los retrasos de envío. El valor del tiempo en el transporte de mercancías es, pues, mucho más compleja de lo que es el caso de los viajes de pasajeros.

1.4 Enfoques en el estudio del valor del tiempo

El tiempo en línea por carretera se puede obtener de varias funciones que se encuentran en la literatura (Russo, 2005), donde se divide en dos períodos: uno que puede ser definida como el tiempo de viaje en carretera y por las restricciones gubernamentales en horas permitidas para conducir de manera continua. Este tiempo debe ser calculado para cada tipo de carretera, depende también de las condiciones del camino y de la configuración vehicular utilizada (vehículos pesados o ligeros).

1.4.1 Modelos para penalidad por tiempo

En el enfoque de programación de itinerarios, es necesario tener en cuenta las desutilidades que se producen (que pueden ser considerables) entre la hora de llegada programada de la carga a su destino y la hora en que realmente ésta llega. En la literatura, esta diferencia se penaliza por llegada temprana o tardía.

Existen estudios en que el tiempo de penalización se considera como un atributo de utilidad en los modelos de elección de ruta.

La Figura 1.1 muestra la penalización por retraso vehículo y llegadas tempranas. El período de tiempo de una función de penalización define el ancho de la ventana de tiempo en la que se requiere que un vehículo llegue al destino. Si un vehículo llega antes, debe esperar hasta el comienzo de la ventana de tiempo designado por lo que se incurre en un costo durante la espera. Por otra parte, si un vehículo se retrasa, debe pagar una multa proporcional a la cantidad de tiempo que se retrasó. Algunos estudios de este tipo de sanción se desarrollaron para la distribución de mercancías en zonas urbanas (Taniguchi y Ando, 2005).

1.4.2 Modelos para el tiempo objetivo

Se refiere a la opción de hora de salida tomada por los usuarios del transporte para viajar con el objetivo de llegar a un destino determinado en un tiempo de llegada dado (o salir de un origen en una hora de salida dada).

La mayoría de los estudios consideran sólo la demanda de los viajeros para viajar en diferentes momentos del día por un costo de viaje determinado y por lo general se ignoran los efectos y los impactos sobre la congestión y la retroalimentación a la elección después de la asignación.

En el caso del transporte de mercancías se tienen muchos tomadores de decisiones (en cada nivel los diferentes tomadores de decisiones eligen cómo se debe mover la carga), a diferencia del transporte de pasajeros, en que cada decisión la toma el mismo pasajero. En cuanto a las limitaciones, en el caso de los pasajeros, éstas se dan por las mismas actividades de los pasajeros; mientras que en el caso del transporte de mercancías hay varias limitaciones, como pueden ser los requerimientos en un programa de producción, la vida útil del producto, etc.

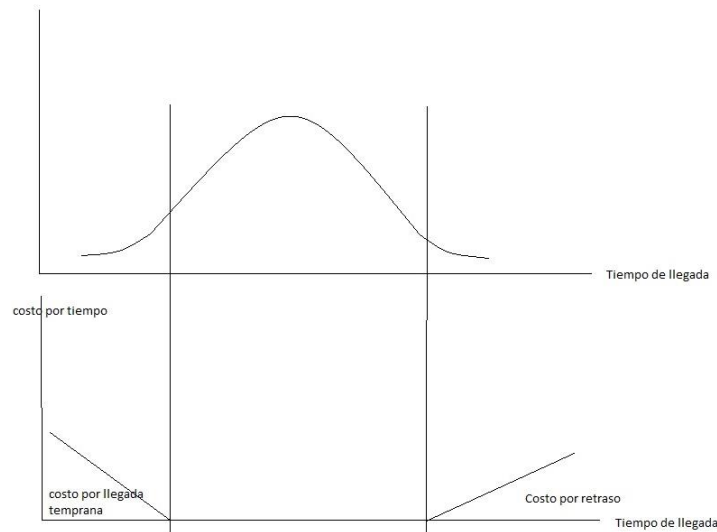


Figura 1.1 comparación de tiempos de llegada programados contra incumplimientos

2 Modelo de flujo a costo mínimo

Los modelos de redes de ruta más corta (SPP–shortest path problem), son los más utilizados en los estudios de transporte (Ahuja et al, 1997, Reinhardt y Pisinger, 2009). Estos modelos son apropiados cuando es necesario determinar una ruta entre cualquier par de nodos a un costo mínimo y tienen la ventaja de que existen diferentes algoritmos para una variedad de problemas de optimización combinatoria, este punto de vista ha sido apoyado en Ahuja et al. (1997) y Bazaraa et al. (2005). Este tipo de problemas sin embargo no comprende adecuaciones tales como: orígenes y destinos múltiples y arcos capacitados. El modelo matemático se muestra a continuación:

$$\min Z = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

s.a.

$$\sum_{j \in N} x_{sj} - \sum_{j \in N} x_{js} = 1 \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{tj} - \sum_{j \in N} x_{jt} = -1 \quad (2.3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} - \sum_{j \in N} x_{ji} = 0 \quad \text{for all } i \in N \setminus \{s, t\} \quad (2.4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A$$

Los modelos de flujo a costo mínimo (MCF–minimum cost flow), los cuales se pueden considerar como una generalización del SPP, tienen la ventaja de considerar también las capacidades de flujo que se generan en los nodos de origen, la demanda en los nodos de destino y las capacidades de los arcos de la red. Dadas estas ventajas, los MCF son utilizados para enviar el flujo a partir de un conjunto de nodos de suministro, a través de los arcos de una red, a un conjunto de nodos de demanda a un costo total mínimo y sin violar los límites inferior y superior sobre los flujos a través de los arcos.

En redes de transporte -como en cualquier otra actividad considerando más de un objetivo- cuando se busca encontrar la mejor solución a un problema en función de distintos objetivos, éstos entran en conflicto frecuentemente, lo que significa que encontrar el óptimo para un objetivo resulta en comprometer uno o más de los objetivos restantes. La optimización multiobjetivo (MOO–multi objective optimization) trata sobre encontrar valores de las variables de decisión que provean de la solución óptima para más de un objetivo. Cuando se emplean modelos de flujo a costo mínimo que buscan encontrar la mejor solución siguiendo

más de un objetivo, el tipo de problema a resolver es flujo a costo mínimo multiobjetivo (MMCF–multi objective minimum cost flow).

Los MMCF son problemas más completos que los MCF, pero aún tienen la desventaja de que no son útiles para trabajar con variaciones en los atributos de arcos y nodos de la red. Hamacher et al. (2007) encontró que la literatura referente al MCF, no ha cubierto suficientemente las variaciones en los atributos de arco. En particular, el problema con atributos variables en los nodos apenas ha sido abordado.

2.1 Problema de flujo a costo mínimo (MCF)

Sea una red dirigida $G = (N, A)$ con un conjunto de nodos N y de arcos A . Sea $n = |N|$ y $m = |A|$. Cada arco $(i, j) \in A$ se asocia con un límite de capacidad inferior no negativo y superior positivo denominado l_{ij} y u_{ij} , respectivamente. Se busca el menor costo de enviar el flujo que satisfaga la demanda de nodos de destino i_d ,

sujeto a la capacidad de nodos de origen i_o , con $i_o, i_d \in N$:

$$\min \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} X_{ij} \quad (2.5)$$

Sea $b \in \mathbb{Z}^n$ un vector de demanda (si $b_i < 0$, $i \in N$) y de oferta (si $b_i > 0$, $i \in N$) que satisfaga $\sum_{i \in N} b_i = 0$. Si $b_i = 0$ para algunos $i \in N$, el nodo i es un nodo de transbordo. Una función de $x: A \rightarrow \mathbb{R}$ se llama un flujo (red) si satisface las restricciones de conservación de flujo:

$$\sum_{(j:(i,j) \in A)} x_{ij} - \sum_{(j:(i,j) \in A)} x_{ji} = b_i \text{ para todo } i \in N \quad (2.6)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij} \text{ para todo } i \in A$$

El conjunto de todos los flujos que satisfacen las restricciones de flujo y capacidad es el flujo de poliedro, denotado como PFlow.

En particular, se pueden aplicar resultados ya conocidos como la relación entre los flujos básicos y árboles, el criterio de optimalidad usando ciclos negativos y el resultante algoritmo de cancelación de ciclo, algoritmos de ruta más corta, las trayectorias de aumento y algoritmos de ruta, el procedimiento out-of-kilter, etc.

2.2 Modelo matemático

Variables

C_{ij} Costo generalizado de transporte en el arco que va del nodo i al nodo j

$\beta_{ij}(D_{ij})$ Unidades monetarias por cruzar el arco ij

$\gamma_{ij}(D_{ij})$ Unidades de tiempo por cruzar el arco ij

φ Tiempo excedente con respecto a un tiempo mínimo posible de traslado

S Valor en unidades monetarias por hora del embarque

Las funciones de costo generalizado quedarían como en (2.7) si es que se considera el caso de valor de tiempo considerado a partir del origen del embarque o como en (2.8) si se considera el valor de tiempo excedente a partir del tiempo más corto.

$$C_{ij} = \beta_i + \beta_{ij}(D_{ij}) + [\gamma_i + \gamma_{ij}(D_{ij})]S_1 \quad (2.7)$$

$$C_{ij} = \beta_i + \beta_{ij}D_{ij} + \varphi S_2 \quad (2.8)$$

La función objetivo a minimizar sería la misma de ruta más corta establecida en las ecuaciones (2.5) y (2.6).

2.3 Programación en GAMS

La siguiente figura muestra el caso típico de una red con un problema de flujo a costo mínimo, en donde se tienen dos orígenes (puntos A y B) con sus respectivas ofertas, dos destinos (puntos D y E) con sus demandas y un punto intermedio C. Posteriormente se muestra el desarrollo del código para resolverlo en GAMS.

En los arcos de la Figura 2.1 se muestra un solo valor, que representa el costo total generalizado C_{ij} por cruzar el arco ij .

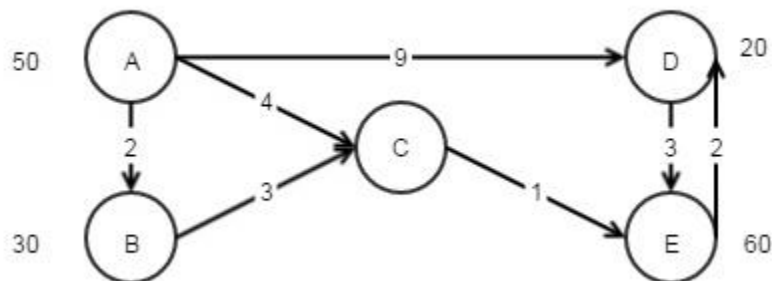


Figura 2.1 Ejemplo de red de transporte

Sets

i /A, B, C, D, E/
 alias (i,j);

Parameters

b(i) capacity of plant i in cases
 / A 50
 B 30
 C 0
 D -20
 E -60/

Table c(i,j) distance in thousands of miles

	A	B	C	D	E
A	9999	2	4	9	9999
B	9999	9999	3	9999	9999
C	9999	9999	9999	9999	1
D	9999	9999	9999	9999	3
E	9999	9999	9999	2	9999;

Table capacity(i,j)

	A	B	C	D	E
A	9999	9999	9999	9999	0
B	0	9999	9999	0	0
C	0	0	9999	0	9999
D	0	0	0	9999	9999
E	0	0	0	9999	9999;

Variables

x(i,j) shipment quantities in cases
 z total transportation costs in 1000s of dollars ;

Positive variable x ;

Equations

cost define objective function
 supply(i) observe supply limit at plant i;
 cost.. z =e= sum((i,j), c(i,j)*x(i,j)) ;
 supply(i) .. sum(j, x(i,j))-sum(j, x(j,i)) =e= b(i) ;
 x.up(i,j) = capacity(i,j);

Model transport /all/ ;
 solve transport using lp minimizing z ;
 display x.l, x.m, z.l ;

En la siguiente figura se muestran los resultados de la corrida.

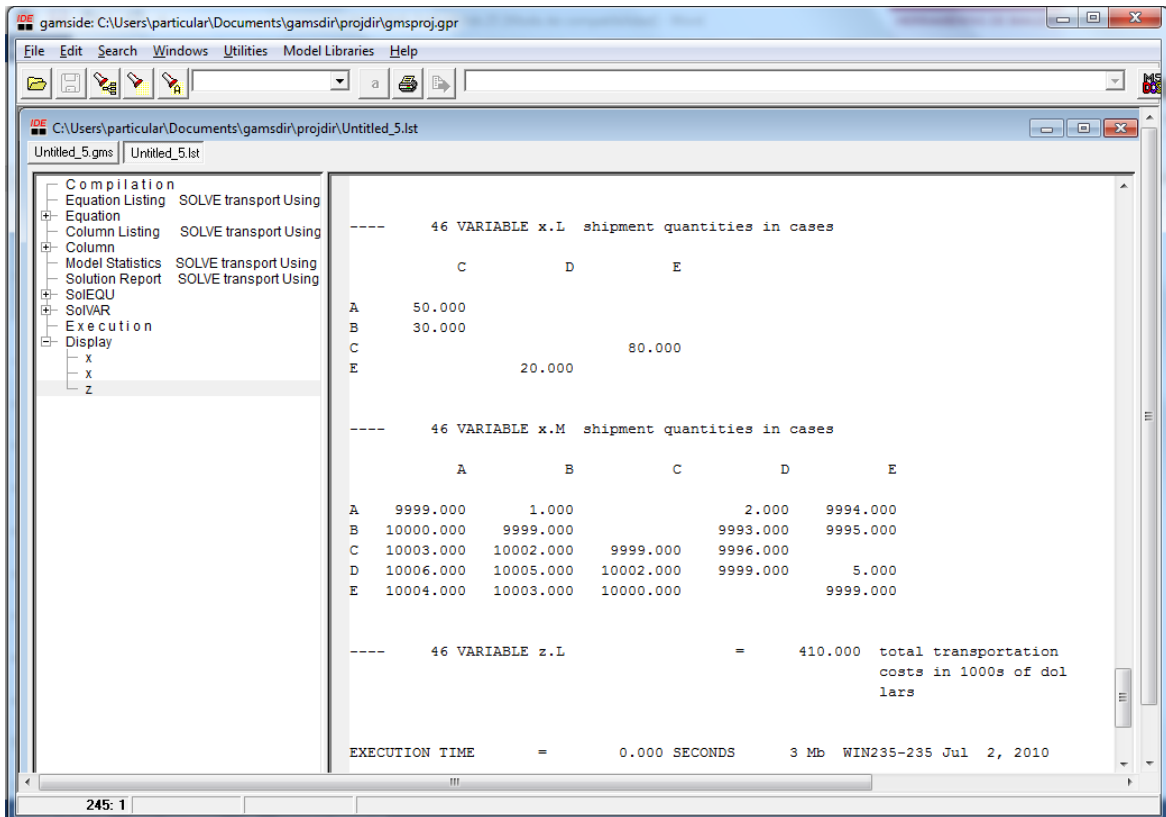


Figura 2.2 Corrida de GAMS de una red de transporte básica

3 Ejemplo de cruce fronterizo de flores de ornato

La multiplicidad de climas de México permite el desarrollo de una variedad de flores. De acuerdo con datos del Consejo Mexicano de la Flor, el país cuenta con cerca de 23 mil hectáreas de cultivos ornamentales, de los cuales aproximadamente el 48% se destina a la producción de corte y follaje, y el 43% para la industria cosmética y de alimentos.

El Observatorio Estratégico Tecnológico del ITESM, por su parte, identifica los clusters más prometedores para impulsar su desarrollo. Para el Estado de México en el sector agropecuario, en 2004 el sector agrícola mexiquense representaba 4 853 833 miles de pesos (precios de 1993), lo que equivale a 3% del PIB estatal total de ese año y al 5.33% del PIB agropecuario nacional.

En el sector agrícola del Estado de México, el maíz constituye el 60% de la superficie sembrada y aporta el 26.12% de la producción. Una oportunidad se encuentra en la siembra de flores de ornato. La siembra de crisantemo, rosa y clavel en el sur y oriente del estado constituye el 19.33% del valor total de la producción usando sólo el 0.38% de la superficie sembrada (Figura 3.1).

De acuerdo con el Observatorio, como entidad, el Estado de México ha mostrado índices de crecimiento inferiores al promedio nacional en los últimos años, aun así, el sector agropecuario presentó un crecimiento promedio anual hasta 2004 de 4.87%, esta tasa es mayor a la que se presentó para ese mismo período en ramas como la industria manufacturera (2.4%) o la construcción (-2.02%). A partir de 2004, el sector agrario mantuvo una tasa de crecimiento medio anual de 3.1% como se aprecia en la Figura 3.2.

Aunque a nivel mundial se reconoce que la calidad de la flor mexicana es excelente, el principal desafío para todos los actores involucrados en la industria de la floricultura es para llevarlos a los hogares y promover el hábito de consumo como un hábito frecuente.

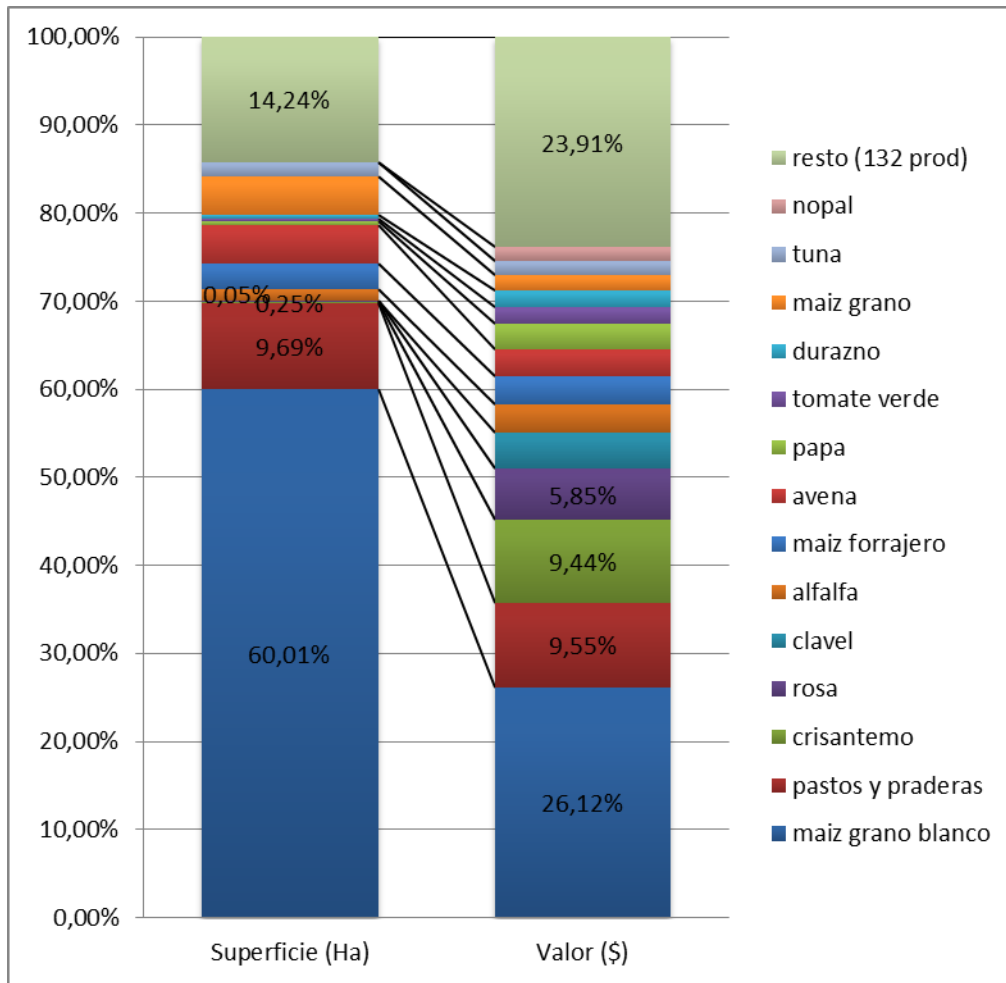


Figura 3.1 Participación por superficie sembrada y por valor de principales productos agrícolas en el Estado de México

Fuente: Observatorio Estratégico Tecnológico. ITESM

La proximidad de México a los Estados Unidos, el principal comprador de flores de México en el exterior, le da al país una ventaja competitiva en este mercado en relación con sus competidores como Colombia y Ecuador, para permitir mejores tiempos de viaje por el transporte motorizado y el consiguiente ahorro de costos en comparación con el modo aéreo, condición que sólo puede ser utilizado por los productores nacionales (Martner et al. 2005, Morales y de la Torre, 2006).

En este sentido, según datos del Consejo Mexicano de la Flor, en el Estado de México se cuenta con 5 547 hectáreas de plantación, donde están creciendo un 80% del valor de la producción nacional de flores ornamentales.

Dentro de la horticultura ornamental que se exporta, se encuentran:

- Flores de corte, que se separan por esta vía de la planta madre: Crisantemo, rosa, clavel, margarita, nardo, nochebuena, orquídea y anturio, entre otras.

- Flores vivas de ornato que se manejan en forma de planta: Nochebuena, hortensia, orquídea, ciclamen y violeta africana, entre otros.
- Plantas ornamentales de interior: Dracenas, amoenas, filodendros y teléfono, entre otras.
- Plantas ornamentales de exterior: Ficus, tujas, crotos, coleos y otras.
- Follajes: Palma comedor, silver dollar, espárragos, tujas y helecho cuero, entre otros.

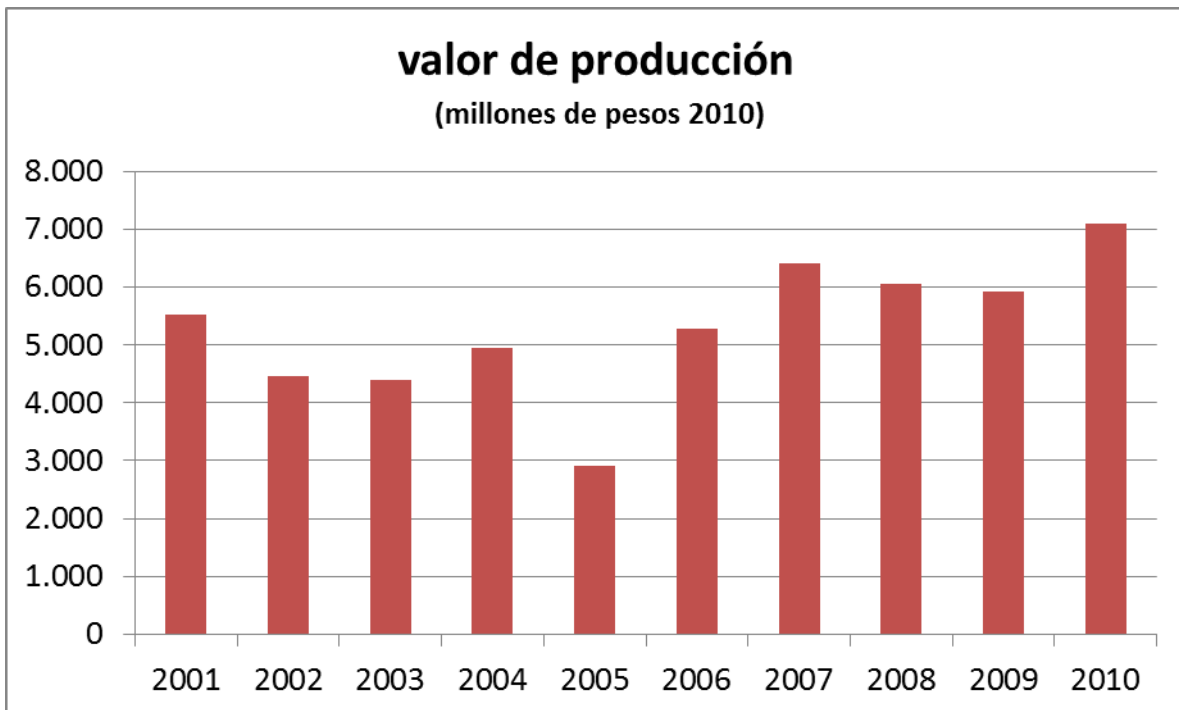


Figura 3.2 Tasa de crecimiento medio anual del sector agrícola en el Estado de México en el período 1994-2004

Fuente: Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México

3.1 Caso de embarque internacional

Se ejemplifica el envío internacional de un embarque de rosas de Tenango, Estado de México a Houston, Texas, utilizando un camión T3S2 refrigerado para conservar las características físicas del embarque.

A continuación se presenta el flujo del proceso productivo a nivel general, referente al producto seleccionado del giro y analizado con más detalle en esta guía. Sin embargo, éste puede ser similar para otros productos, si el proceso productivo es homogéneo o para variantes del mismo. Al respecto, se debe evaluar en cada caso la pertinencia de cada una de las actividades previstas, la naturaleza de la maquinaria y el equipo considerado, el tiempo y tipo de las

operaciones a realizar y las formulaciones o composiciones diferentes que involucra cada producto o variante que se pretenda realizar.

1. Recepción, inspección y almacén de la flor. Se recibe la flor (rosa, clavel, crisantemo) en el almacén refrigerante a 0° C. Se revisa que tengan las características solicitadas de apariencia, frescura, tamaño, grosor, rigidez de tallo y uniformidad en el tamaño de la flor, entre otras.
2. Transporte de la flor al área de clasificación. Se traslada la flor en carritos plataforma hasta las mesas clasificadoras.
3. Clasificación y empaque. Se separa la flor, por tamaño, eliminando la flor dañada, rota, chica o sin frescura, la que se remite al mercado nacional o a la basura. La flor que sí reúne los requisitos de exportación se empaqueta en cajas de cartón o madera ligera (triplay), recubiertas de cera, a prueba de agua. Cada caja tiene cupo para 400 flores en promedio.
4. Transporte a almacén. Las cajas cerradas se trasladan al almacén en carritos de plataforma.
5. Almacenado. Las cajas se almacenan a temperatura de 0° C.
6. Aviso al importador. Se da aviso al cliente importador del número de cajas a remitirse y se fija la fecha de entrega.
7. Cajas de cartón. El camión refrigerante o termo-king de 300 pies cúbicos, se carga con las cajas que se trasladan, acomodándolas para que no se dañen durante el viaje.
8. Envío de la caja a su destino. Salida del camión a su destino.

Nota: El país al que se exporta es Estados Unidos de Norteamérica y las principales ciudades son: Miami, Los Angeles, San Francisco, New York, Houston, Boston, San Antonio y Chicago.

9. El importador/distribuidor cobra una comisión del 15 al 20% más los derechos aduanales estadounidenses, las tasas del departamento de agricultura, los gastos de almacenaje refrigerado. El margen puede parecer elevado pero se trata de un producto sumamente perecedero, caro y difícil de manipular.

El importador/distribuidor normalmente reparte a mayoristas y detallistas.

Al ser un producto perecedero, es importante cumplir con el tiempo de entrega, ya que el tiempo de vida de este tipo de productos va de una semana a trece días. Cabe mencionar que aunque el transporte aéreo es rápido en comparación al transporte de superficie (camión, contenedor marítimo, etc.), la respuesta de las flores y follajes cortados a las temperaturas cálidas conduce a su rápido deterioro, aún durante las relativamente cortas horas de transporte aéreo. Se considera que el transporte de flores por carretera mantiene una buena cadena de frío que produce mejores resultados que el transporte aéreo sin control de temperatura y esto se debe principalmente a la dramática respuesta de las flores al calor. Por

esta razón, el transporte aéreo rara vez es el medio elegido cuando existen otras opciones que ofrezcan un buen control de temperatura.

Para el embarque, en entrevista realizada por Morales et al. (2006) el valor del embarque podría llegar hasta 80 mil dólares. Para el caso de estudio se consideraron los siguientes, mientras que el tiempo de vida es de 1 semana a 13 días.

Tabla 3.1 Consideraciones para el valor del embarque

Valor por procona	50 USD
Tallos por procona	40
Proconas por nivel por pallet	16
Niveles por pallet	4
Pallets por contenedor	26
Valor del embarque	\$83 200,00 USD
	\$1 414 400,00 Pesos
Nota: se considera una paridad de 17 pesos por dólar	

Se consideran tres posibles rutas desde Tenango hasta Houston, las cuales toman un cruce fronterizo respectivo: Nuevo Laredo, Reynosa y Matamoros, los tres en Tamaulipas. Las tres rutas tienen arcos en común hasta San Luis Potosí, a partir de donde se dividen, como se puede ver en la Figura 3.3. Para las carreteras se considera una velocidad constante.

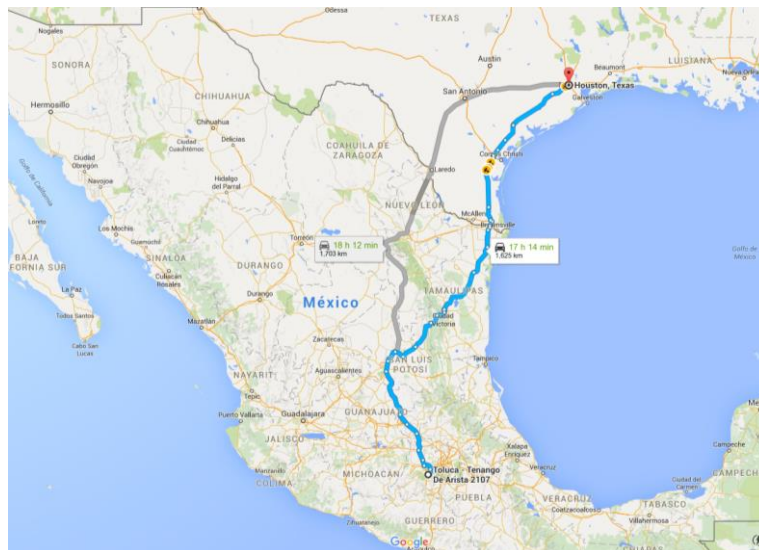


Figura 3.3 Posibles rutas Tenango, Estado de México–Houston, Texas

3.2 Reporte de tiempos de espera en cruces fronterizos

El buró de estadísticas de transporte de Estados Unidos (BTS) cuenta con estudios en los que se tienen registrados los tiempos promedios de cruce y su percentil 95 de manera mensual, las tablas 3.2 y 3.3 a continuación muestran los registros desde enero de 2011 a marzo de 2012 para el Puente de las Américas (entre El Paso, Tx. y Cd. Juárez, Chih.) y para el cruce Pharr-Reynosa (Rajbhandari et al. 2012).

Tabla 3.1 Tiempos de cruce en Puente de las Américas
Puente de las Américas

mes-año	tiempo de cruce promedio	95 percentil en tiempo de cruce	95 - promedio	Buffer Index	Mediana	Tamaño de muestra
	(1)	(2)	(3) = (2)-(1)	(4)=(3)/(1)	(5)	(6)
ene-11	54,6	102,02	47,43	86,87%	45,18	99
feb-11	47,93	90,41	42,47	88,62%	46,82	109
mar-11	64,3	103,81	39,51	61,45%	47,03	10
abr-11	60,43	103,26	42,83	70,87%	46,88	13
may-11	57,21	107,51	50,3	87,92%	48,13	34
jun-11	45,47	103,43	57,96	127,48%	38,67	375
jul-11	40,83	97	56,17	137,59%	33	779
ago-11	41,02	94	52,98	129,17%	33	636
sep-11	46,82	105	58,18	124,28%	38	438
oct-11	48,37	103	54,63	112,95%	42	1513
nov-11	45,69	99	53,31	116,66%	39	3600
dic-11	48,36	101,75	53,39	110,41%	41,5	1346
ene-12	50,42	104,52	54,1	107,28%	44,93	2541
feb-12	53,33	105,4	52,07	97,64%	49,27	3616
mar-12	46,85	100,62	53,77	114,78%	40,67	4437

Tabla 3.2 Tiempos de cruce en Pharr-Reynosa
PHARR-REYNOSA

mes-año	tiempo de cruce promedio	95 percentil en tiempo de cruce	95 - promedio	Buffer Index	Mediana	Tamaño de muestra
	(1)	(2)	(3) = (2)-(1)	(4)=(3)/(1)	(5)	(6)
ene-11	57,18	107	49,8	87,10%	55	10957
feb-11	66,1	113	46,9	71,00%	65	8765
mar-11	73,06	115	41,9	57,40%	76	5945
abr-11	64,61	113	48,4	74,90%	64	5103
may-11	63,17	112	48,8	77,30%	61	8347
jun-11	59,91	108	48,1	80,30%	56	10950
jul-11	51,31	105	53,7	104,60%	45	15895
ago-11	53,64	105	51,4	95,70%	50	9250
sep-11	55,06	99	43,9	79,80%	48	13059
oct-11	55,1	125	69,9	126,90%	45	11629
nov-11	63,6	127	63,4	99,70%	57	6610
dic-11	56,48	121	64,5	114,20%	48	7767
ene-12	67,2	134	66,8	99,40%	60	6815
feb-12	66,23	132	65,8	99,30%	60	5620
mar-12	71,4	135,1	63,7	89,20%	69	6719

Fuente: U.S. DOT Federal Highway Administration

Por otra parte, la Federal Highway Administration y el Texas Department of Transport en conjunto con el Texas Transport Institute de la Universidad Texas A&M, desarrollaron un sistema de información para cruces fronterizos (Border Crossing Information System), en el cual se puede consultar los tiempos de espera y los tiempos de cruce para distintos cruces fronterizos. A continuación se muestran algunos estadísticos y gráficos referentes al mes de septiembre de 2015 para los cruces de Nuevo Laredo, Reynosa y Matamoros. Se eligieron estos cruces por ser los más importantes en la frontera entre Texas y Tamaulipas, por lo que son los que se podrían utilizar en algún ejercicio de comercio exterior entre México y la costa Este de los Estados Unidos.

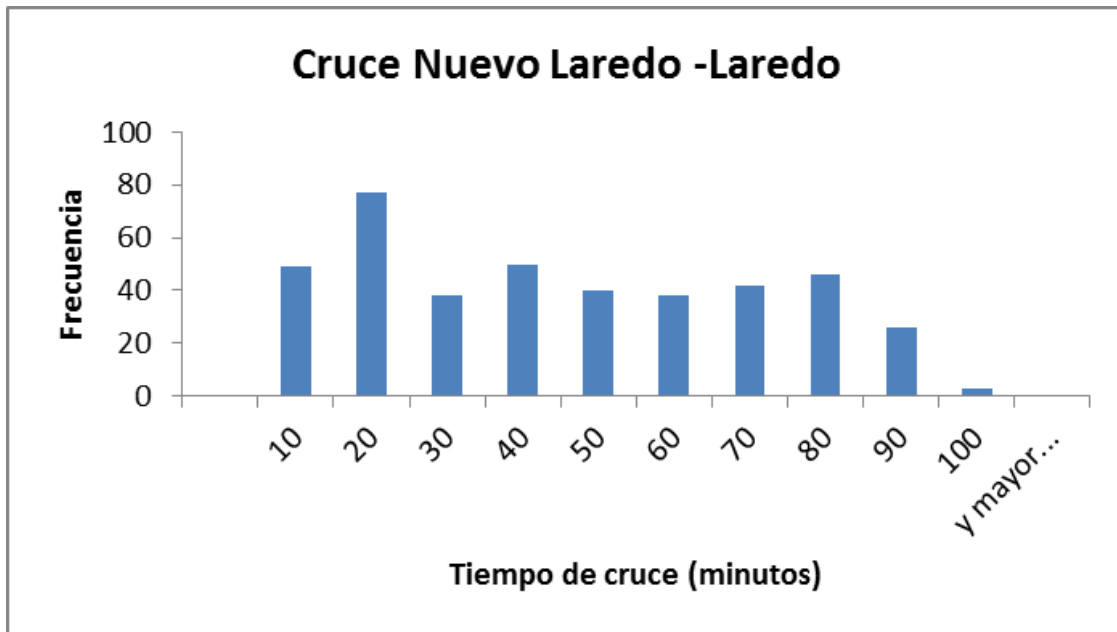


Figura 3.3 Tiempos de cruce en Nuevo Laredo

Tabla 3.3 Principales estadísticas en tiempos de cruce para Nuevo Laredo

Media	42,0
Mediana	40,0
Desviación estándar	25,3
Máximo	92,0
Mínimo	6,0
Percentil 95	84,0

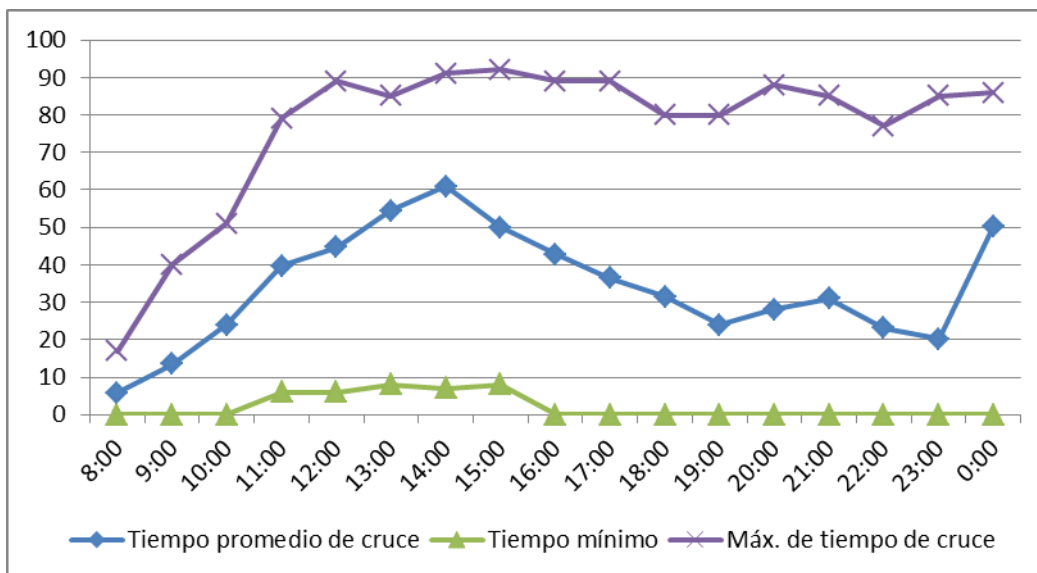


Figura 3.4 Rango de tiempos de cruce en Nuevo Laredo

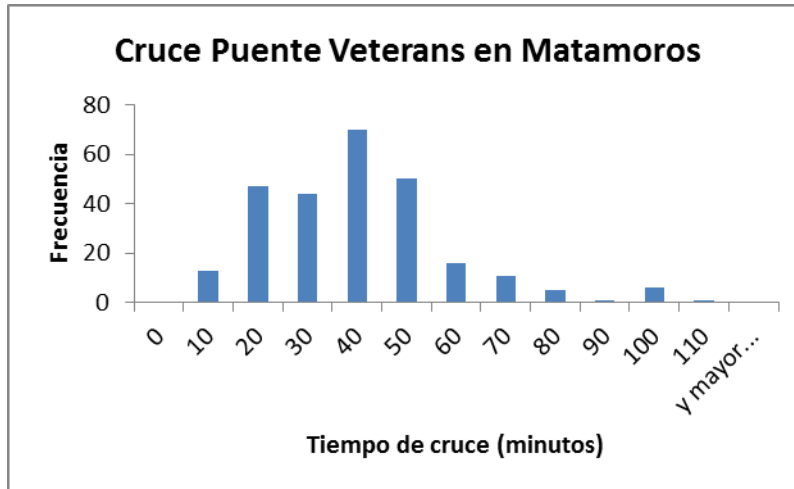


Figura 3.5 Tiempos de cruce en Matamoros

Tabla 3.4 Principales estadísticas en tiempos de cruce para Matamoros

Media	20,48
Mediana	15,00
Desviación estándar	22,78
Máximo	105,00
Mínimo	0,00
Percentil 95	62,40

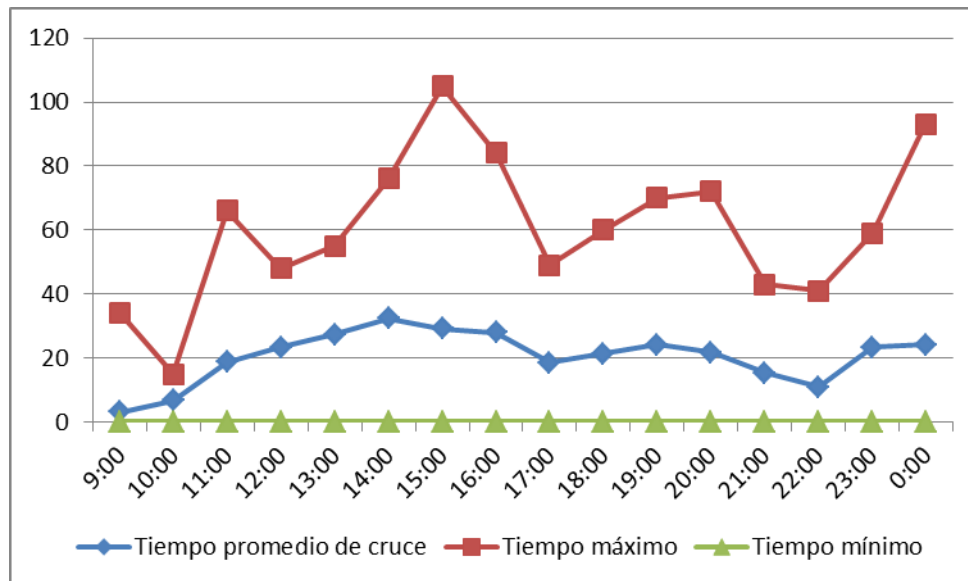


Figura 3.6 Rango de tiempos de cruce en Matamoros

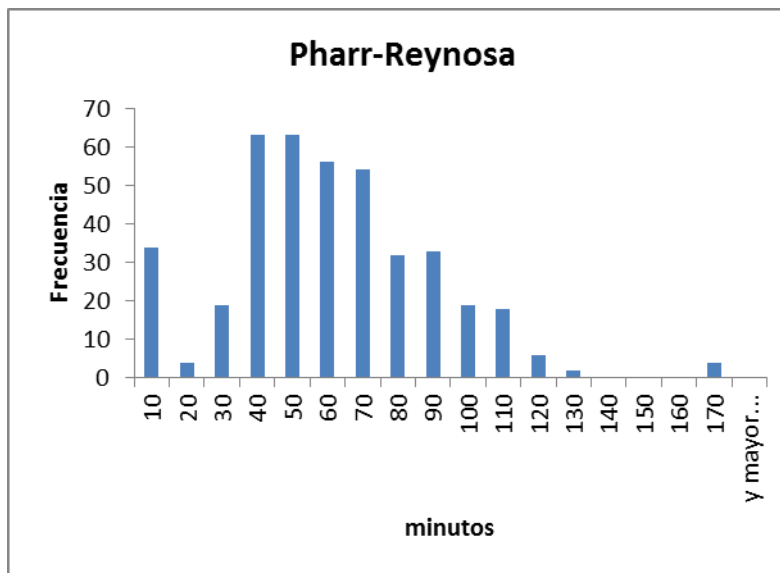


Figura 3.7 Tiempos de cruce en Reynosa

Tabla 3.5 Principales estadísticas en tiempos de cruce para Reynosa

Media	43,86
Mediana	44,00
Desviación estándar	34,71
Máximo	164,00
Mínimo	0,00
Percentil 95	101,00

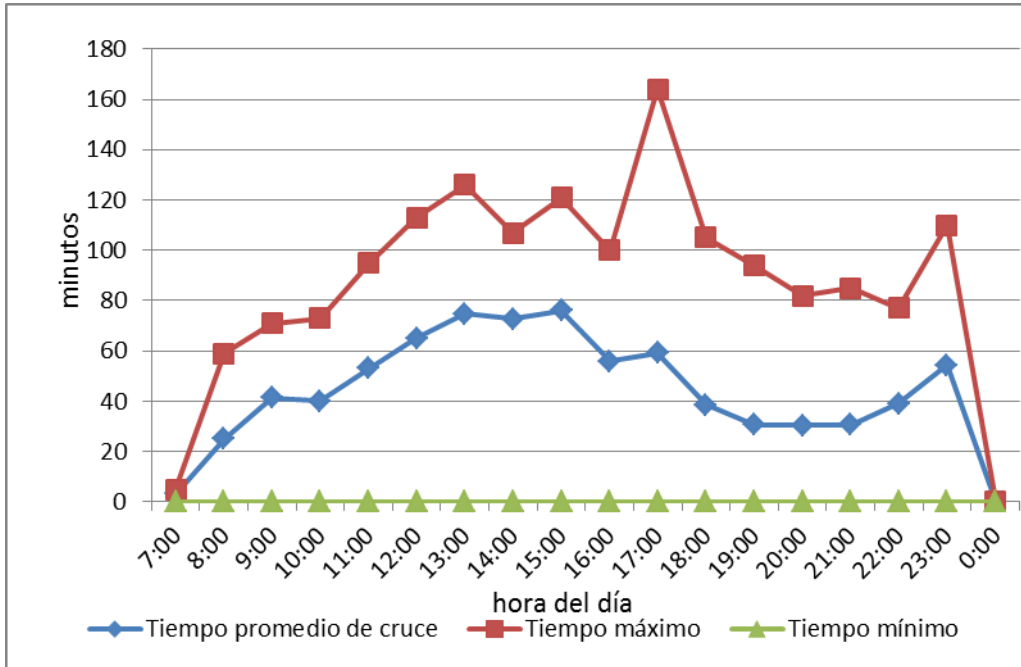


Figura 3.8 Rango de tiempos de cruce en Reynosa

4 Corrida de flujo a costo mínimo

El Observatorio Estratégico Tecnológico del ITESM, por su parte, identifica los clusters más prometedores para impulsar su desarrollo. Para el Estado de México en el sector agropecuario, en 2004 el sector agrícola mexiquense representaba 4 853 833 miles de pesos (precios de 1993), lo que equivale a 3% del PIB estatal total de ese año y al 5.33% del PIB agropecuario nacional. En el sector agrícola del Estado de México, el maíz constituye el 60% de la superficie sembrada y aporta el 26.12% de la producción. Una oportunidad se encuentra en la siembra de flores de ornato. La siembra de crisantemo, rosa y clavel en el sur y oriente del estado constituye el 19.33% del valor total de la producción usando solo el 0.38% de la superficie sembrada.

La proximidad de México a los Estados Unidos, el principal comprador de flores de México en el exterior, le da al país una ventaja competitiva en este mercado en relación con sus competidores como Colombia y Ecuador, para permitir mejores tiempos de viaje por el transporte motorizado y el consiguiente ahorro de costos en comparación con el modo aéreo, condición que sólo puede ser utilizado por los productores nacionales (Martner et al. 2005, Morales et al. 2006). Aunque el transporte aéreo es rápido en comparación al transporte de superficie (camión, contenedor marítimo, etc.), la respuesta de las flores y follajes cortados a las temperaturas cálidas conduce a su rápido deterioro, aún durante las relativamente cortas horas de transporte aéreo.

Existe una amplia gama de rutas que seguiría un embarque de flor desde el Estado de México hacia Estados Unidos. Para simplificar el análisis, se considera un tramo a partir de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, con posibles destinos en New Orleans, Luisiana o en Houston, Texas (Figura 4.1). Se consideran tres posibles cruces fronterizos: Nuevo Laredo, Reynosa y Matamoros, Tamaulipas.

La Tabla 4.1 muestra la distancia entre los distintos arcos. Al considerar los costos de operación de un camión articulado en terreno plano con un IRI de 4, de acuerdo con Arrollo et al. (2014), el costo de operación vehicular sería de 15.51 pesos por vehículo-kilómetro (Tabla 4.2), con lo que el resultado del cruce de un vehículo de este tipo daría como resultado los valores de la Tabla 4.3.

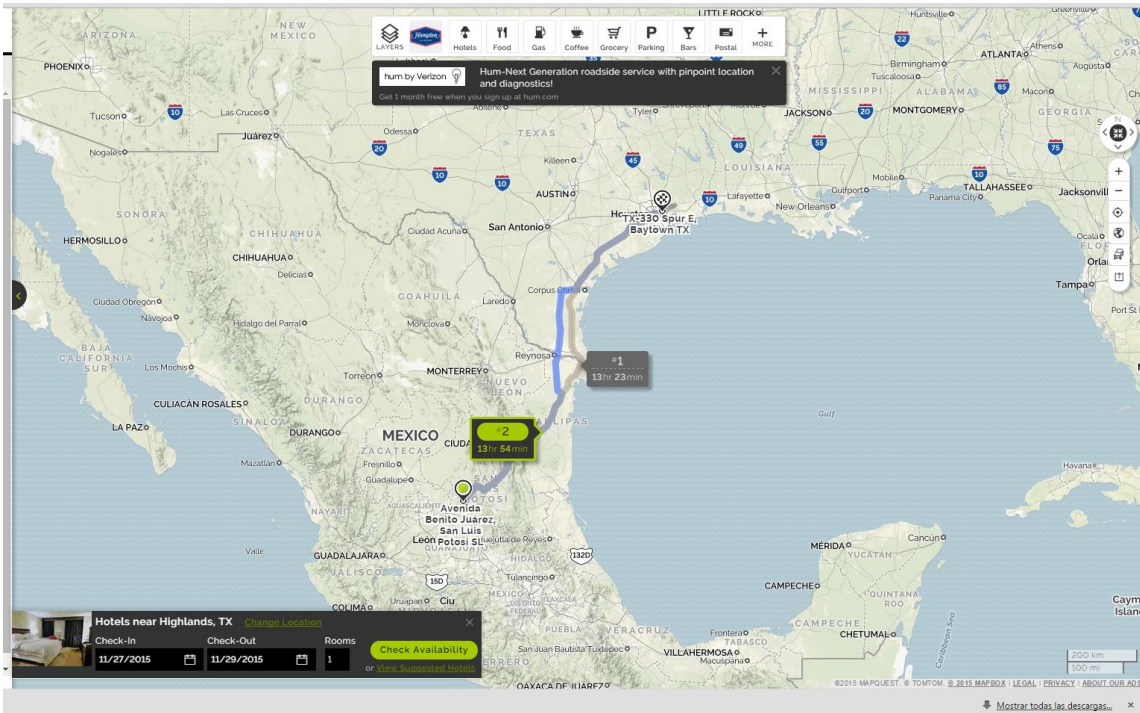


Figura 4.1 Tramo a analizar

Se consideraron dos casos, el primero en que la mercancía es entregada en Monterrey, mientras que el segundo caso la mercancía es entregada en el destino final.

Caso 1

Si se toma como lugar de entrega un punto intermedio (que podría ser incluso el origen), poniendo como ejemplo la ciudad de Monterrey, la Figura 4.2 representa la variación horaria del valor del tiempo de forma lineal donde se tiene un valor inicial en el punto de entrega, que es diferente al destino final. El valor del embarque va disminuyendo conforme transcurre el tiempo de transporte llegando a ser cero al término de la vida útil del producto. Para esto, se estima para cada ruta por un lado el costo de operación vehicular y por el otro el tiempo con su consiguiente disminución del valor. Al final se tiene el costo generalizado para cada opción y se puede seleccionar la ruta más corta.

Considerando que un embarque de flores puede tener un valor de hasta 80000 dólares (Morales, 2006) que su tiempo de vida puede ser de hasta 13 días, se tomó una depreciación lineal por hora, por lo que el valor por hora de un embarque completo sería de 256.41 dólares. Si se toma una paridad de 17 pesos por dólar, se tendrían los costos por tiempo que se muestran en la Tabla 4.6 por lo que el costo generalizado resultante es el que se muestra en la Tabla 4.7.

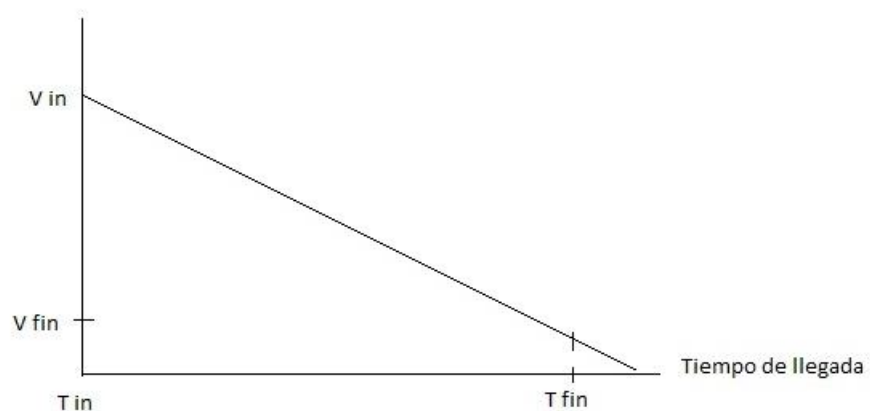


Figura 4.2 Comportamiento tipo valor del tiempo para caso 1

Tabla 4.1 Distancia entre arcos que comunican lugares establecidos en el caso de aplicación (km)

	NLD	REX	MAM	N. O.	Hou
MTY	223	225	312	--	--
NLD	0	--	--	1088	508
REX	--	0	--	1152	573
MAM	--	--	0	1152	577

Tabla 4.2 Costos de operación, para un vehículo T3-S2. Valores calculados, en pesos por veh-km (2014)

IIR	Caso base	Plano	Lomerío	Montañoso
2	12.87	14.32	18.06	22.48
4	13.94	15.51	19.33	23.78
6	15.09	16.71	20.63	25.1
8	16.56	18.12	22.02	26.49
10	18.24	19.74	23.53	27.96
12	20.02	21.47	25.16	29.53

Fuente: Arroyo et al. (2014)

Tabla 4.3 Costos de operación, para un vehículo T3-S2, para tramos seleccionados

	NLD	REX	MAM	N. O.	Hou
MTY	\$3459	\$3490	\$4839	--	--
NLD	0	--	--	\$16875	\$7879
REX	--	0	--	\$17868	\$8887
MAM	--	--	0	\$17868	\$8949

Tabla 4.4 Tiempo entre arcos que comunican lugares establecidos en el caso de aplicación

Tiempo (horas)					
	NLD	REX	MAM	N. O.	Hou
MTY	2,8	2,8	3,9	--	--
NLD	0	--	--	13,6	6,4
REX	--	0	--	14,4	7,2
MAM	--	--	0	14,4	7,2

Tabla 4.5 Tiempo medio en cruces fronterizos seleccionados

tiempo medio (minutos)			
	NLD	REX	MAM
	42	44	21

Nota: Valores tomados de las tablas 3.3, 3.4 y 3.5

Tabla 4.6 Valor de tiempo en arcos (pesos)

	NLD	REX	MAM	N. O.	Hou
MTY	\$12.151	\$12.260	\$17.000	--	--
NLD	0	--	--	\$59.282	\$27.679
REX	--	0	--	\$62.769	\$31.221
MAM	--	--	0	\$62.769	\$31.439

Tabla 4.7 Costo total considerando valor del tiempo

	NLD	REX	MAM	N. O.	Hou
MTY	\$15.609	\$15.749	\$21.839	--	--
NLD	0	--	--	\$76.157	\$35.559
REX	--	0	--	\$80.637	\$40.108
MAM	--	--	0	\$80.637	\$40.388

Al resolver el problema de flujo a costo mínimo para la función de costo generalizado, el resultado se muestra en la Tabla 4.8. Este costo incluye tanto el costo de operación vehicular como el costo por unidad de tiempo.

Tabla 4.8 Selección de ruta

	NLD	REX	MAM	Min	Cruce
MTY – N.O.	\$94.818	\$99.572	\$103.964	\$94.818	NLD
MTY - Hou	\$54.219	\$59.044	\$63.715	\$54.219	NLD

Como puede observarse en las tablas anteriores, el componente del valor del tiempo tiene un peso mucho mayor en el costo total que el que tiene el costo de operación vehicular. Esta situación puede variar dependiendo del producto, de su densidad económica, de su tiempo de vida y de su valor de rescate. En el caso de las flores de ornato, un embarque tiene un valor económico alto, un tiempo de vida corto y no tiene un valor de rescate.

Caso 2

Si se toma como lugar de entrega el destino final, el valor de la mercancía empezaría a disminuir conforme se diera el retraso al tiempo convenido de entrega. La Figura 4.3 representa la variación horaria del valor del tiempo de forma lineal a partir del tiempo convenido, mientras que antes de ese tiempo el valor de la mercancía se mantiene constante.

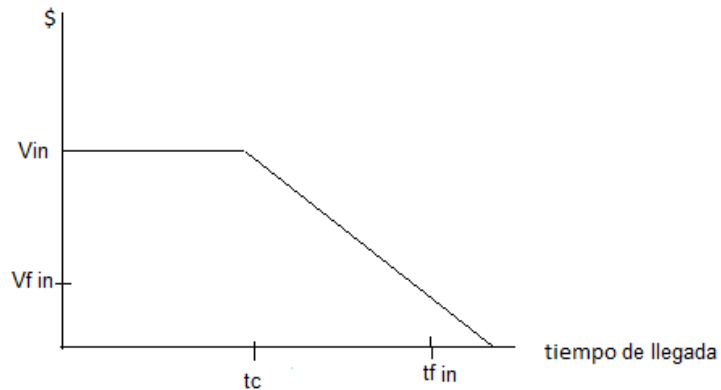


Figura 4.3 Comportamiento tipo valor del tiempo para caso 2

A diferencia del caso 1, los pasos para estimar el costo generalizado son los siguientes:

1. Se identifica el tiempo convenido de entrega (en el ejemplo se utilizó el tiempo correspondiente a la ruta más rápida en promedio como se muestra en la Tabla 4.9).
2. Se obtiene el valor del tiempo del embarque como la relación entre el valor del embarque y la diferencia entre el tiempo de vida del producto y el tiempo convenido.
3. Para cada ruta se calcula la diferencia entre el tiempo de la ruta con respecto al tiempo convenido.
4. La diferencia de tiempos de cada ruta es multiplicada por el valor horario del embarque.
5. El costo de operación vehicular se obtiene como en el caso 1.
6. Finalmente se obtiene el costo generalizado de transporte con los componentes de costo de operación vehicular y del valor del tiempo (Tabla 4.10).

Tabla 4.9 Ruta más rápida (horas)

	NLD	REX	MAM	Min	Cruce
MTY - N.O.	17,09	17,94	18,64	17,09	NLD
MTY - Hou	9,84	10,71	11,45	9,84	NLD

Tabla 4.10 Selección de ruta en caso 2

	NLD	REX	MAM	Min	Cruce
MTY – N.O.	\$20.334	\$25.210	\$29.700	\$20.334	NLD
MTY - Hou	\$11.338	\$16.286	\$21.063	\$11.338	NLD

Al comparar ambos casos, se puede observar en la Figura 4.4 que hay una gran diferencia en el costo generalizado siendo mucho mayor en el caso 1. Esta diferencia se debe a que en el caso 1 se toma en cuenta todo el tiempo que transcurre desde el punto de entrega hasta el destino final, mientras que en el caso 2 se considera la diferencia del tiempo de cada ruta con respecto al tiempo convenido.

Esta situación ejemplifica cómo escoger distintos términos de entrega como pudieran ser los INCOTERMS, repercute en el costo generalizado en función del valor del tiempo de retraso en la entrega de las mercancías respecto a un plazo convenido.

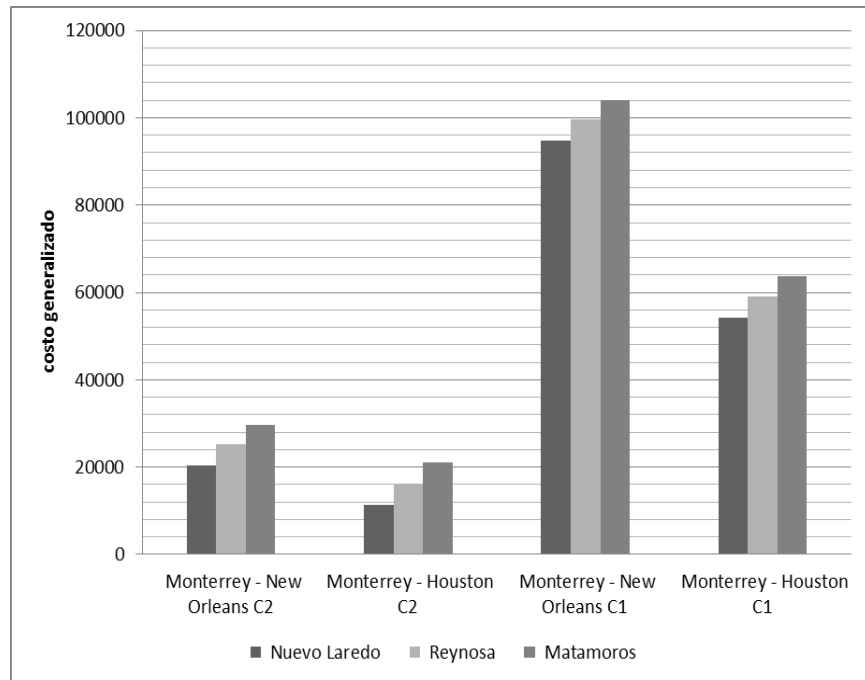


Figura 4.4 Comparación de costos generalizados por caso

5 Conclusiones

Este trabajo de investigación se centró la construcción de un modelo para encontrar el conjunto de soluciones en problemas en redes de transporte que tienen que ver con la consecución de objetivos múltiples y con atributos de arcos y nodos estocásticos, aplicado a una red de transporte intermodal de comercio internacional de productos perecederos, por lo que el modelo a desarrollar se catalogaría como un Problema Estocástico Multiobjetivo de Flujo a Costo Mínimo. Para efectos de este trabajo, los nodos en los que se consideran las variaciones se refieren a los cruces fronterizos entre México y Estados Unidos.

Este problema, al ser una generalización del modelo correspondiente de ruta más corta, tiene la ventaja de considerar también las capacidades de flujo que se generan en los nodos de origen, la demanda en los nodos de destino y las capacidades de los arcos de la red.

En este trabajo se muestran algunas consideraciones para la inclusión del valor del tiempo de la mercancía en el costo total del transporte en el proceso de exportación. Se ejemplifica el caso de un producto perecedero de consumo final, el cual tiene alto valor económico, corto tiempo de vida y no tiene valor de recuperación por lo que el componente del valor del tiempo es mayor al del costo de operación vehicular. Es de esperarse que la participación del valor del tiempo del producto dependerá del tipo de producto, de su tiempo de vida, del valor del embarque y de su valor de recuperación.

Resultaría de interés ver el comportamiento del tiempo para productos intermedios, en el cual el incumplimiento en el tiempo de llegada incurriría en costos de almacenamiento por llegar antes o de oportunidad por tener que parar una línea de producción por llegar tarde.

Para una modelación del flujo de transporte resultante de la actividad económica a nivel nacional, el uso de software especializado (VISUM, TransCAD) facilitaría el proceso.

Apéndice A. Consideraciones para estimar el valor de embarque

Para estimar el valor de un embarque completo se tomaron en cuenta los siguientes factores:

Tipo de embalaje y cubicaje en unidad de transporte

Cantidad total de producto

Valor en mercado de destino

Tipo de embalaje. Considerando el uso de tecnología especializada para manejo de flores como el sistema Procona (PROducer to CONsumer in Aqua), el cual consta de un contenedor que permite que las flores se mantengan en agua para conservarlas por más tiempo y de una caja de cartón para proteger la parte superior de las flores. El contenedor está diseñado para que en su interior se llene de agua o con una solución perseverante.

Se tienen diversos modelos de procona, los cuales varían en sus dimensiones. Considerando el modelo Florida, éste tiene una superficie de 30 x 24 cm y pueden tener alturas de 18, 25 ó 35 cm. Estas proconas se pueden acomodar en pallets ISO de 100 x 120 cm, 80 x 120 cm y 60 x 80 cm.

En la Figura 1 se muestra el acomodo de un nivel de proconas en un pallet ISO de 100 x 120 cm. En el pallet caben 16 proconas por nivel y el contenedor tiene una altura que permite llevar cuatro niveles

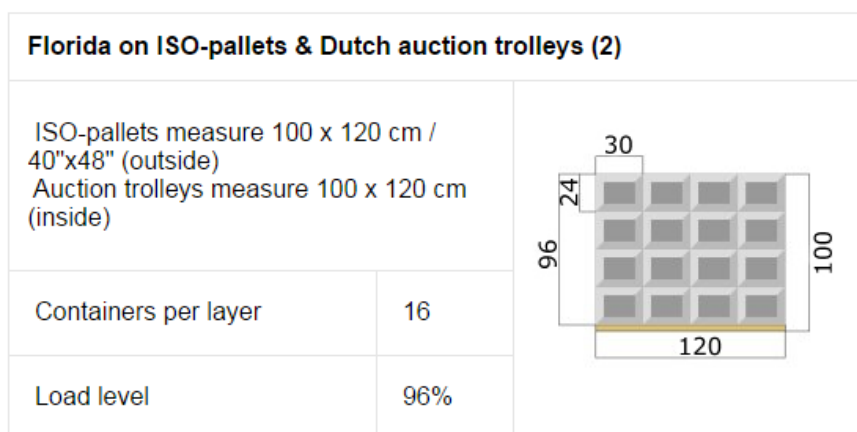


Figura 1. Disposición de proconas en pallet ISO

En lo que se refiere al acomodo de los pallets dentro de un contenedor de 40 pies, en la página web del fabricante de Procona se sugiere que pueden acomodarse 23 ó 26 pallets, dependiendo del ancho del contenedor. Como se muestra en la figura siguiente.

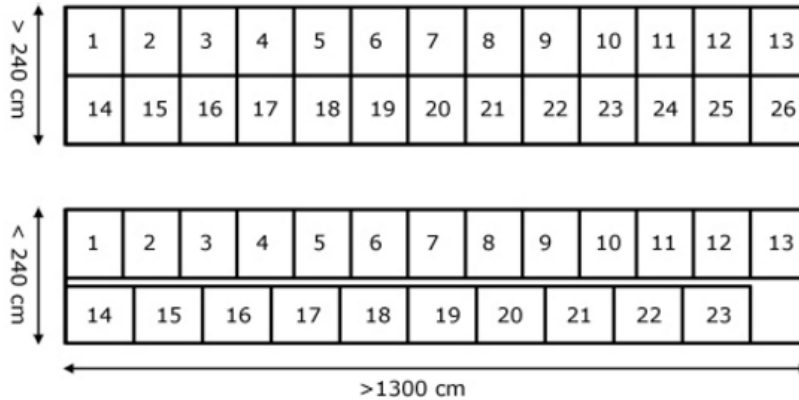


Figura 2. Acomodo de pallets en contenedores

Con lo anterior se puede estimar que en un contenedor caben $16 \times 4 \times 26 = 1664$ proconas.

Considerando un valor de mercado de aproximadamente 50 USD por procona (entre 40 y 50 rosas), el valor del embarque en destino sería de 83200 USD.

Bibliografía

Arroyo, J., Aguerrebere, R., Torres, G. *Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2014* Publicación técnica 407. Instituto Mexicano del Transporte. 2014.

Ahuja, R., Magnanti, T., Orlin, J. *Network Flows, Theory, algorithms and applications*. Prentice Hall. 1997.

Bazaraa, M., Jarvis, J., Sherali, H. *Linear Programming and Network Flows*. John Wiley and Sons. Inc. 2005.

Bustos, A., Herrera, L. Jiménez, E. *Efficient frontier for multi-objective transportation networks in international market of perishable goods*. Journal of Applied Research and Technology. Vol. 12 No. 4. Pp. 654-665. 2014.

El Colegio de la Frontera Norte. *Estudio de puertos de entrada México-Estados Unidos: Análisis de capacidades y recomendaciones para incrementar su eficiencia*. Reporte técnico. 2007.

Hansen, T., Mathisen T., Jorgensen F. *Generalized transport costs in intermodal freight transport*. 15 th meeting of the Euro Working Group on Transportation. Procedia - Social and Behavioral Sciences 54 (2012) 189 – 200. 2012.

Herrera, A., Moreno, M.A., Martínez, J.J., Acha, J.A. *Modelo conceptual de un puerto fronterizo y plataformas para simular su operación*. Publicación Técnica 408. Instituto Mexicano del Transporte. 2014.

Lomax, T., Schrank D., Turner, S. *Selecting Travel Reliability Measures*. Texas Transportation Institute. Texas A&M University. 2003.

Martner, C Morales, C., de la Torre, M., Bustos, A. *Cadenas logísticas de exportación en México*. Publicación técnica 276. Instituto Mexicano del Transporte. 2005.

Miller-Hooks, E. and Mahmassani, H. *Optimal Routing of Hazardous Materials in Stochastic, Time-Varying Transportation Networks*. Transportation Research Record 1645. Paper No. 98-0416. pp. 143-151. 1998.

Morales, C., de la Torre, M. *Características del transporte refrigerado en México*. Publicación técnica 297. Instituto Mexicano del Transporte. 2006.

Moreno, E. Rico, O., Bustos, A. *Funciones volumen demora en la modelación de flujos vehiculares*. Publicación Técnica 427. Instituto Mexicano del Transporte. 2014.

Rajbhandari, R., Villa, J., Macias, R. *Measuring Border Delay and Crossing Times at the U.S.–Mexico Border—Part II*. Texas Transportation Institute. 2012.

Texas Transportation Institute. *Measuring Border Delay and Crossing Times at the U.S./Mexico Border*. The Texas A&M University System. 2007.

Torres, G., Hernández, S., Ruvalcaba, J.I. *Actualización de la metodología para estimar el valor del tiempo de los usuarios de la red carretera nacional*. Publicación Técnica 381. Instituto Mexicano del Transporte. 2012.

U.S. Department of Transportation. *Measuring border delay and crossing times at the US – Mexico border*. 2012.

<http://www.pagter.com/en/procona/technical-information>



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

publicaciones@imt.mx

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