

ISSN 0188-7297



Certificado en ISO 9001:2000
Laboratorios acreditados por EMA

SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES



"IMT, 20 años generando conocimientos y tecnologías para el desarrollo del transporte en México"

MODELOS DE COORDINACIÓN DE INVENTARIOS Y SU RELACIÓN CON LAS VARIABLES FUNDAMENTALES DEL TRANSPORTE

José Elías Jiménez Sánchez

Publicación Técnica No 283
Sanfandila, Qro 2006

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Modelos de coordinación de
inventarios y su relación con
las variables fundamentales
del transporte**

Publicación Técnica No. 283
Sanfandila, Qro, 2006

Este trabajo fue realizado por José Elías Jiménez Sánchez, en el marco del programa Doctoral “Gestión de la Cadena de Suministro e Integración Empresarial”. El autor agradece los valiosos comentarios de sus Directores de tesis, el Dr Juan Gaytán Iniestra¹ y el Dr José Pedro García Sabater². La edición final del documento fue realizado por Gabriela de Jesús Zea.

¹ Profesor del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, México.

² Profesor de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

Índice

| | |
|--|-----------|
| Índice | i |
| Resumen | v |
| Abstract | vii |
| Introducción | 1 |
| 1. El transporte en la cadena de suministro | 7 |
| 1.1 Importancia del transporte en la cadena de suministro | 7 |
| 1.2 El transporte de abastecimiento (<i>inbound</i>) y distribución (<i>outbound</i>), y su impacto en el sistema de inventarios | 8 |
| 1.3 Relaciones estratégicas de colaboración en el transporte | 11 |
| 1.4 Coordinación de la participación modal de transporte en la cadena de suministro | 15 |
| 2. El inventario y los costos del transporte | 19 |
| 2.1 El inventario y su relación con el transporte | 19 |
| 2.2 El tamaño del pedido y su impacto en el costo de transporte | 22 |
| 2.3 Costo de transporte considerando restricciones de capacidad | 24 |
| 2.4 Impacto del costo de transporte en el precio de venta según el tipo de <i>incoterm</i> | 28 |
| 2.5 Envíos en “ <i>contenedor completo</i> ” (FCL) contra “ <i>contenedor consolidado</i> ” (LCL), y sus implicaciones en los costos de transporte | 30 |
| 3. Política de inventario y la elección del modo de transporte | 33 |
| 3.1 Relación del modo de transporte y la política de pedido | 33 |
| 3.2 Transporte combinado y la importancia de su coordinación | 35 |
| 3.3 Los factores relevantes del transporte multimodal | 37 |
| 3.4 Evaluación y selección de las cadenas multimodales de transporte | 39 |
| 3.4.1 Análisis del intercambio (<i>trade-off</i>) costo-nivel de servicio de transporte | 40 |
| 3.4.2 Evaluación competitiva de las opciones multimodales de transporte | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 4. Los modelos de inventario y las variables fundamentales del transporte | 43 |
| 4.1 Modelos de coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte (revisión de la literatura) | 44 |
| 4.1.1 Coordinación entre un proveedor y un cliente | 44 |
| 4.1.2 Coordinación entre un proveedor y varios clientes | 71 |
| 4.1.3 Características principales de los modelos de coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte | 82 |
| Conclusiones y líneas de futuro | 85 |
| Referencias | 89 |

Índice de cuadros y figuras

Cuadros

| | | |
|------------|---|-----|
| Cuadro 2.1 | Costos de transporte por tipo de <i>incoterm</i> | 36 |
| Cuadro 2.2 | Impacto en el precio de las mercancías por tipo de <i>incoterm</i> | 37 |
| Cuadro 3.1 | Elección y evaluación de rutas multimodales no dominadas | 53 |
| Cuadro 4.1 | Características principales de los modelos de coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte | 109 |

Figuras

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1.1 | Relación del transporte y el inventario en las etapas de abastecimiento y distribución | 13 |
| Figura 2.1 | Relación del tamaño del envío y su costo de transporte | 28 |
| Figura 2.2 | Punto de equilibrio de los costos de transporte | 29 |
| Figura 2.3 | Esquema 1. Incorporación del costo de transporte al precio de compra | 31 |
| Figura 2.4 | Esquema 2. Incorporación del costo de transporte al precio de compra | 31 |
| Figura 2.5 | Esquema 3. Incorporación del costo de transporte al precio de compra | 32 |
| Figura 2.6 | Punto de inflexión de la relación de los costos FCL y LCL | 38 |
| Figura 2.7 | Efecto en el costo de transporte por una mejora en el sistema de consolidación de carga | 39 |
| Figura 3.1 | Relación entre el tamaño del pedido y su costo por diferentes modos de transporte | 42 |
| Figura 3.2 | Costos totales de transporte y de inventario en tránsito | 43 |
| Figura 3.3 | Alternativa unimodal | 48 |
| Figura 3.4 | Transporte combinado autotransporte-ferrocarril | 48 |
| Figura 3.5 | Transporte combinado autotransporte-ferrocarril-marítimo | 48 |
| Figura 3.6 | Transporte multimodal desde el origen hasta el destino | 48 |
| Figura 3.7 | Óptimo de Pareto para la elección de rutas multimodales de carga | 51 |
| Figura 4.1 | Cadena de suministro proveedor-transportista-cliente | 65 |
| Figura 4.2 | Costos de abasto y entrega | 84 |

Resumen

La tendencia predominante de las empresas líderes, para abordar la planificación de sus inventarios, ha sido enfrentarlo de manera integrada y global. Por mucho tiempo los esfuerzos se han orientado a minimizar progresivamente los costos logísticos con un enfoque de optimización individual. Sin embargo, en años recientes se reconoce que el verdadero potencial de la logística se logra mediante la coordinación de las actividades entre las diferentes empresas en la cadena.

Por lo anterior, cada vez más investigadores y practicantes se han dado a la tarea de desarrollar modelos que buscan la integración entre las actividades más apremiantes (o de mayor costo); en este caso, por ejemplo, la gestión de inventarios y el transporte. Por lo anterior, en el presente documento se describen los trabajos más relevantes sobre la coordinación de inventarios, los cuales consideran las variables fundamentales del transporte.

Antes, se presenta un panorama general de la importancia del transporte en la gestión de la cadena de suministro, y luego se puntualiza sobre los parámetros y variables que caracterizan la función de transporte. Al respecto, se lleva a cabo un análisis del impacto recíproco que tienen el transporte y la gestión de inventarios.

Al final, se hace alusión a las conclusiones más relevantes y las líneas de futuro, derivadas de esta investigación. Entre las conclusiones más importantes puede destacarse que algunos estudios sobre la coordinación de inventarios, considerando las variables fundamentales del transporte, han corroborado la existencia de ventajas en costo y beneficios por el uso de estrategias de coordinación no sólo para el cliente y el proveedor, sino también para el transportista.

Abstract

The predominant characteristic of the leading global firms, when they need to carry out to planning of inventories, has been to face it in an integrated and global way. For many time, the efforts have been orientated to minimize progressively the logistic costs with an approach of individual optimization. Nevertheless, in the last years, it is known that the real potential of the logistics is by means of the coordination of the activities between the different firms in the chain.

Nowadays, more and more researchers develop models who look for the integration between the most critical (or costly) activities; in this case, the management of inventories and the transport. The current work are described the most relevant articles about inventory coordination, which consider the fundamental variables of transport. Thus, we have first explained a general panorama of the importance of the transport in the management supply chain and we have specified the parameters and variables that characterize the transport function. Therefore, we develop a preliminary assessment about the reciprocal effects between transport and the inventory management.

Finally, we present the most relevant conclusions and the future research, outcome of this study. It can be outlined the most important conclusions, some studies on the inventory coordination, considering the fundamental variables of transport, have corroborated that advantages exist in cost and benefits for the use of coordinating strategies, not only for the buyer and vendor, but also for the transportation.

Introducción

van Norden y van de Velde (2005) reconocen que aunque los costos de transporte constituyen una parte sustancial de los costos logísticos totales de un producto, sorprendentemente y de manera frecuente se han ignorado en la modelación del tamaño de la orden en la gestión de inventarios; véase por ejemplo, la revisión hecha por Drexl y Kimms (1997). Y lo que es peor todavía, las características relevantes de los diferentes modos de transporte (que definen las variables fundamentales), generalmente no se consideran. Tyworth (1992), sin embargo, establece que existe una estrecha relación entre la determinación del tamaño del lote y el transporte utilizado; inclusive para demostrarlo, señala que dentro de las características del transporte destacan la tarifa, velocidad y la consistencia de las entregas de cada uno de los diferentes modos disponibles. En la definición del tamaño de la orden (administración de los inventarios), destacan las funciones de determinación del número de ordenes y nivel de almacenamiento (que involucra: existencias en uso, de seguridad, y en tránsito). En especial, destaca que el servicio de transporte se vincula con el nivel de inventarios. Por ejemplo, la velocidad de entrega afecta directamente a las existencias de seguridad y en tránsito, mientras que la consistencia afecta el nivel de existencias de seguridad. Asimismo, afirma que el producto sintetiza los elementos del transporte e inventario por medio de sus costos logísticos (entregas directas, ordenes y almacenamiento) para cualquier nivel de producto disponible o en almacenaje.

Ng, *et al.* (1997), van más lejos e identifican un conjunto de factores en las áreas de compras y transporte que pueden reducir el tiempo de ciclo no sólo desde el punto de vista de las manufacturas, sino desde una perspectiva más integral, involucrando compras, logística de aprovisionamiento (materias primas y productos en proceso), manufactura y logística de abasto (productos terminados). Swenseth y Godfrey (2002) por su parte, reconocen que a partir de las políticas de desregulación se ha incrementado el ambiente competitivo en donde las tarifas y servicios de transporte deben orientarse hacia la innovación de estrategias de abasto. Señalan que el énfasis en la cadena de suministro y el uso de tecnologías tipo ERP (*Enterprise Resource Planning*), la necesidad de desarrollar modelos con una apropiada representación de las consideraciones de transporte, es aun más relevante.

De esta manera, recientemente las compañías han intensificado su visión hacia un enfoque basado en los costos logísticos para lograr una mayor eficiencia en las cadenas de suministro. Por parte de las empresas cliente, existe un mayor escrutinio de los costos en sus decisiones de compra (Carter y Ferrin, 1996). En este sentido, existen diversas razones del por qué un cliente desearía tomar el control de los costos de aprovisionamiento: en primer lugar, puede ver una oportunidad de ahorro sobre las tarifas de transporte llegando a un acuerdo directo sobre las mismas, cuando el proveedor sólo atiende ordenes del tipo FOB (*Free on Board*); segundo, cuando el cliente paga por el transporte, la tarifa resulta relevante en las decisiones del tamaño del lote y en el precio del producto (Abad y

Aggarwal, 2005); tercero, conocer de manera detallada sus costos logísticos; cuarto, definir esquemas de mejora continua, entre otras.

Dicho lo anterior, el problema de estudio por tanto, consiste principalmente en que clientes y proveedores distantes organicen y coordinen sus actividades para el suministro de productos, con el propósito de reducir sus costos relevantes de manera conjunta, no sólo considerando los parámetros relacionados con la gestión de inventarios, sino también que tengan en cuenta las variables fundamentales del transporte. En otras palabras, el problema de la coordinación de inventarios abordado por los investigadores debe buscar evaluar las estrategias de coordinación que permitan optimizar el costo y la influencia del transporte, así como reducir el costo logístico de inventario por medio establecimiento de un programa de pedidos de tamaño óptimo benéfico para ambas partes.

La tendencia predominante de las empresas líderes para abordar la planificación de sus inventarios, ha sido enfrentarlo de manera integrada y global. La sincronización de los intereses entre los diferentes actores de la cadena de suministro en sus distintas áreas, en función de las restricciones actuales o potenciales permitiendo a su vez, minimizar los costos operacionales (abastecimiento, manufactura, distribución, inventarios) y los costos ocultos relacionados con los faltantes o escasez. Sin embargo, cabe aclarar que por mucho tiempo los esfuerzos se han orientado a minimizar progresivamente los costos logísticos con un enfoque de optimización individual. Entre los componentes más importantes están: los inventarios, almacenes y el transporte. No obstante, en años recientes se reconoce que el verdadero potencial de la logística se logra con un enfoque de optimización global. Además, la coordinación de las actividades entre las diferentes empresas en la cadena, es sin duda un formalismo sensato (nada sencillo) para mejorar el desempeño general.

De manera particular y por fortuna, actualmente cada vez más investigadores y practicantes se han dado a la tarea de desarrollar modelos que buscan la integración entre las actividades más apremiantes; en este caso la gestión de inventarios y el transporte, con el propósito de establecer una política conjunta de suministro. En general, ambas actividades se reconocen como los principales elementos del costo logístico, los cuales absorben alrededor del 60% del costo total. Esto ha dado pie a la búsqueda de soluciones prácticas relacionadas con su reducción.

El problema de incluir las variables fundamentales de transporte para la definición de políticas de inventarios data del trabajo realizado por Beaumol y Vinod (1970) y Constable, *et al.* (1978). Más recientemente, Hoque y Goyal (2000), desarrollan una política óptima de coordinación del sistema de producción-inventario entre un proveedor y un cliente, teniendo en cuenta restricciones en la capacidad del transporte; en tanto, Lei, *et al.* (2003), Choi, *et al.* (2004); y Zhao, *et al.* (2004), desarrollan modelos donde se considera la decisión sincronizada del abasto y su transporte en el trinomio proveedor-transportista-cliente. Feng, *et al.* (2005), consideran además en su modelo tres modos de transporte que interactúan con

un sistema de inventario de revisión periódica y demanda estocástica; cada modo de transporte se denota como rápido, medio y lento. Reyes y Gaytán (2003), extienden este trabajo construyendo un modelo que considera dos modos de transporte (uno lento y otro rápido) para el abasto de una familia de productos de un proveedor a un cliente, fijando la cantidad de carga que deberá moverse bajo cada modo.

Por todo lo anterior, este trabajo de investigación tiene los siguientes objetivos:

Objetivo general

Identificar las estrategias de coordinación más utilizadas y los modelos matemáticos más recientes, desarrollados para el control de los inventarios que consideren las variables fundamentales del transporte, con el firme propósito de identificar los vacíos o líneas de futuro sobre este importante tema.

Objetivos específicos

- Describir el contexto general del transporte en la cadena de suministro y sus necesidades de coordinación.
- Identificar los problemas claves de la falta de coordinación en la cadena de suministro y sus principales elementos de modelación.
- Analizar y clasificar los trabajos de investigación que tratan los modelos sobre la coordinación de inventarios, considerando las variables fundamentales del transporte.
- Identificar líneas de futuro relacionados con el presente tema.

Hipótesis

Un examen de las condiciones generales sobre la coordinación de los inventarios puede aceptarse como una magnífica oportunidad de estudio en la que pueden suponerse que aun en la estructura más simple de la cadena de suministro, constituida por un proveedor y un cliente, es requisito insoslayable plantear la política de inventario, bajo alguna estrategia de gestión para que el sistema de abastecimiento proveedor-cliente sea eficiente mediante ciertas condiciones de demanda, precio de los productos y número de artículos suministrados, entre otros aspectos. Al mismo tiempo, supone que el transporte en esta clase de modelos es considerado como un elemento fundamental y estratégico para la política de abasto y control de los inventarios.

Alcances

El análisis realizado se basa en los estudios y artículos relacionados con el tema de la coordinación de inventarios que tienen en cuenta las variables fundamentales del transporte. Por el interés que prevalece en esta investigación se decidió discriminar los artículos que tratan el tema con un enfoque estocástico;

es decir, únicamente se reportan artículos del ámbito determinista, con alguna excepción por el aporte directo que le representa a este trabajo, y con relación a la determinación del tamaño del lote y el nivel de inventarios.

Las fuentes encontradas obtuvieron de las principales revistas o publicaciones arbitradas de carácter internacional, de autores de reconocido prestigio, y algunas del Internet. En general, se respeta la nomenclatura utilizada por ellos, independientemente de que en los distintos artículos se refieren al mismo concepto.

Contenido

Los alcances específicos de esta investigación están contenidos en los siguientes capítulos que lo constituyen:

La presente “**Introducción**”, menciona algunos aspectos de carácter general del trabajo, y describe brevemente la problemática existente así como el motivo que originó este reporte y sus alcances. Presenta también un breve resumen de los capítulos del mismo.

El capítulo 1, “**El transporte en la cadena de suministro**”, describe la importancia que tiene el transporte en la gestión de la cadena de suministro; se destacan aquellos aspectos claves que lo hacen relevante. Más adelante se presenta un análisis de la función transporte y su impacto en el sistema de inventarios de los sistemas de abasto y distribución, mediante el cual se ratifican los planteamientos que se llevan cabo sobre las relaciones de colaboración estratégicas. Ambas secciones anteriores abren el camino para establecer los conceptos sobre la relevancia de la coordinación de los diferentes modos de transporte en el abasto de productos, y el control de los inventarios en el contexto de la cadena de suministro.

El capítulo 2, “**El inventario y los costos del transporte**”, hace un breve repaso de las consideraciones más relevantes que involucran los costos de transporte. La idea detrás de los planteamientos encontrados en este capítulo, tiene como propósito establecer la base matemática del fenómeno de los costos de transporte y su interacción con el sistema de inventarios en una relación cliente-proveedor, cuestión que se lleva a cabo en la primera sección. En la segunda, se analiza la estructura básica de los costos de transporte, que da paso a un análisis de la relación de éstos con el tamaño del envío por modo, extendiendo el análisis considerando restricciones de capacidad del equipo de transporte. También se identifica el impacto del costo del transporte en el precio de venta de los productos en el ámbito del comercio internacional de acuerdo con el tipo de *incoterm* empleado. Finalmente, se presenta una comparación entre los costos de transporte para el caso de “*contenedor completo*” contra “*contenedor consolidado*”.

El capítulo 3, “**Política de inventario y la elección del modo de transporte**”, presenta un análisis general de las decisiones sobre la elección del modo de transporte en función de la política de inventario. Así, en la primera sección se trata el tema de la relación del transporte y la política de pedido con un enfoque unimodal de transporte. En una segunda sección se aborda el tema en estudio, pero ahora desde una óptica multimodal (transporte combinado) y destacando la importancia de su coordinación para el sistema de inventarios. Más adelante, se presentan los factores relevantes del transporte que han sido identificados por algunos autores como los principales elementos para la selección no sólo del modo de transporte, sino de las rutas multimodales y la combinación idónea de modos (cadenas de transporte). Esta última sección, se complementa con una interesante propuesta de evaluación de las rutas multimodales de transporte, la cual permite realizar la elección de la ruta más adecuada de acuerdo con un análisis de de tipo *trade-off* (intercambio) entre costo y tiempo.

En el capítulo 4, “**Los modelos de inventarios y las variables fundamentales del transporte**”, se presenta un panorama de los artículos más relevantes que tratan el tema. Se describen los modelos matemáticos que consideran la función transporte en la gestión de inventarios, con el propósito establecer el contexto y las ventajas que representa dicha combinación.

Finalmente, en las “**Conclusiones y líneas de futuro**”, se ofrecen algunos comentarios acerca de los resultados de la caracterización de las estrategias, y los modelos de coordinación de inventarios; al final, se incluye una breve descripción de las líneas de futuro identificadas.

1 El transporte en la cadena de suministro

En este capítulo se describe la importancia que tiene el transporte en la gestión de la cadena de suministro; se destacan aquellos aspectos claves que lo hacen relevante. Más adelante se presenta un análisis de la función transporte y su impacto en el sistema de inventarios de los sistemas de abasto y distribución, mediante el cual se ratifican los planteamientos que se llevan a cabo sobre las relaciones de colaboración estratégicas. Ambas secciones anteriores abren el camino para establecer los conceptos acerca de la relevancia de la coordinación de los diferentes modos de transporte, para el abasto de productos y el control de los inventarios, en el contexto de la cadena de suministro.

1.1 Importancia del transporte en la cadena de suministro

Para Linn, *et al.* (2002), la gestión efectiva de la cadena de suministro requiere de la integración de todas sus funciones, tales como: abasto, compras, producción, ventas, finanzas, almacenamiento, y transporte. Asimismo, en Jiménez y Hernández (2002), se reconoce que son varios los aspectos que se tienen que tener en cuenta para optimizar la cadena, entre ellos están: a) crear relaciones de colaboración entre proveedores y clientes; b) agilizar los procesos en la toma de decisiones; c) fomentar la comunicación, coordinación y colaboración; d) uso adecuado de la tecnología de la información; y f) reconocer la importancia del transporte. Sin embargo, se advierte que la mayor parte de los investigadores que han estudiado los procesos en la cadena de suministro, han centrado sus análisis en los primeros cuatro puntos, siempre descuidando el último.

La importancia del transporte en la cadena de suministro reside en dos aspectos primordiales: a) se encuentra en todos los eslabones de la cadena; b) es reconocido como una de las dos actividades con mayor participación en los costos logísticos (junto con la gestión de inventarios).

Adicionalmente, es imprescindible destacar que a partir de la proliferación de las unidades productivas globales, los sistemas de transporte han alcanzado una mayor importancia y significado, debido al aumento de sus costos de operación derivado de las siguientes tendencias:

- a) Acelerado desarrollo de redes logísticas globales (fragmentación de la producción)
- b) Minimización de inventarios en el canal comercial
- c) Incremento de la demanda para servicios *justo a tiempo*
- d) Aumento de los requerimientos para mejorar la rentabilidad del servicio de transporte, sobre todo para grandes distancias
- e) Aumento incesante del precio del combustible

Lo anterior ha traído consigo que los factores de transporte, tales como: flexibilidad, rapidez y fiabilidad sean mayormente explotados. En este sentido, puede considerarse que el transporte ha dejado de ser una actividad meramente funcional, pasando a ser un factor más de la estrategia competitiva de las compañías. Así parece indicar el estudio realizado por Gentry (1995), en donde clientes y proveedores señalaron que los transportistas son entidades importantes para alcanzar numerosas metas operacionales en una relación estratégica de colaboración.

En su estudio, Gentry encontró que la mayoría de los entrevistados afirmó que los transportistas pueden ser un factor "crítico" o "importante" en los siguientes aspectos: a) para aumentar las entregas a tiempo (89%); b) apoyar las iniciativas *justo a tiempo* (69%); c) disminuir los niveles de inventario (69%); d) acortar el tiempo de ciclo total (69%); e) alcanzar metas de servicio a clientes (67%); f) bajar los costos administrativos (54%); g) optimizar el costo total de propiedad (52%); y h) reducir el riesgo a través del valor agregado de los servicios (52%).

De esta manera, puede afirmarse que el estudio y consideración explícita de la operación del transporte, en combinación con otras funciones logísticas, se convierte en un requisito insoslayable en el desarrollo de técnicas modernas o en modelos de gestión integrales.

1.2 El transporte de abastecimiento (*inbound*), y distribución (*outbound*) y su impacto en el sistema de inventarios

El adecuado desempeño de la cadena de suministro depende en gran parte del transporte. En todas las etapas de la cadena se encuentra en los dos extremos de cada uno de los eslabones, en el abastecimiento y la distribución. En el primero, el transporte garantiza la materia prima necesaria para llevar a cabo la producción; mientras que en el segundo garantiza que los productos sean entregados al siguiente eslabón en la cadena de suministro, es decir, clientes o consumidores.

La función del transporte se concreta a llevar los productos en tiempo y forma al sitio donde se requieren. La interacción del transporte con los programas de abastecimiento y distribución, constituye un proceso dinámico que en la cadena de suministro exige una alta coordinación. En este sentido puede decirse que cuando se originan cambios en cualquiera de los subprocesos de la cadena, seguramente se producirán variaciones en los dos procesos asociados con el transporte. Los cambios no planificados, evidentemente provocarán presiones, desfases y despilfarros, además de niveles de inventario de alto costo, calificando al servicio de transporte como deficiente y de mala calidad.

Por lo anterior, la actividad de transporte en la cadena de suministro debe planificarse y considerarse en los acuerdos de coordinación entre los miembros de

la misma (clientes y proveedores). A su vez, su logística necesita facilitar y mantener el control sobre los inventarios y el flujo de los productos (inventario en tránsito). Es decir, debe propiciar suficiente flexibilidad para reaccionar a los rápidos cambios en la demanda del mercado. En la cadena de suministro, la logística de transporte puede estar conformada por las siguientes actividades:

- Traslado de productos
- Traslado de la carga
- Manipulación
- Almacenamiento de la carga
- Gestión o administración del transporte

En términos generales, un adecuado funcionamiento de estas actividades puede ayudar a reducir los costos de los productos a entregar; es más, una apropiada combinación, bajo la denominación genérica de "costos logísticos", permite definir los elementos a partir de los cuales habrán de seleccionarse las posibles alternativas de transporte que al mismo tiempo favorezcan el control de los inventarios. Sin embargo, tal situación no es una tarea fácil, ya que el transporte de carga implica múltiples operaciones (manipulación, almacenamiento y transporte), y participantes (transportistas terrestres, navieros, aseguradores, aduanas, etc), los cuales pueden provocar problemas en el sistema de inventarios.

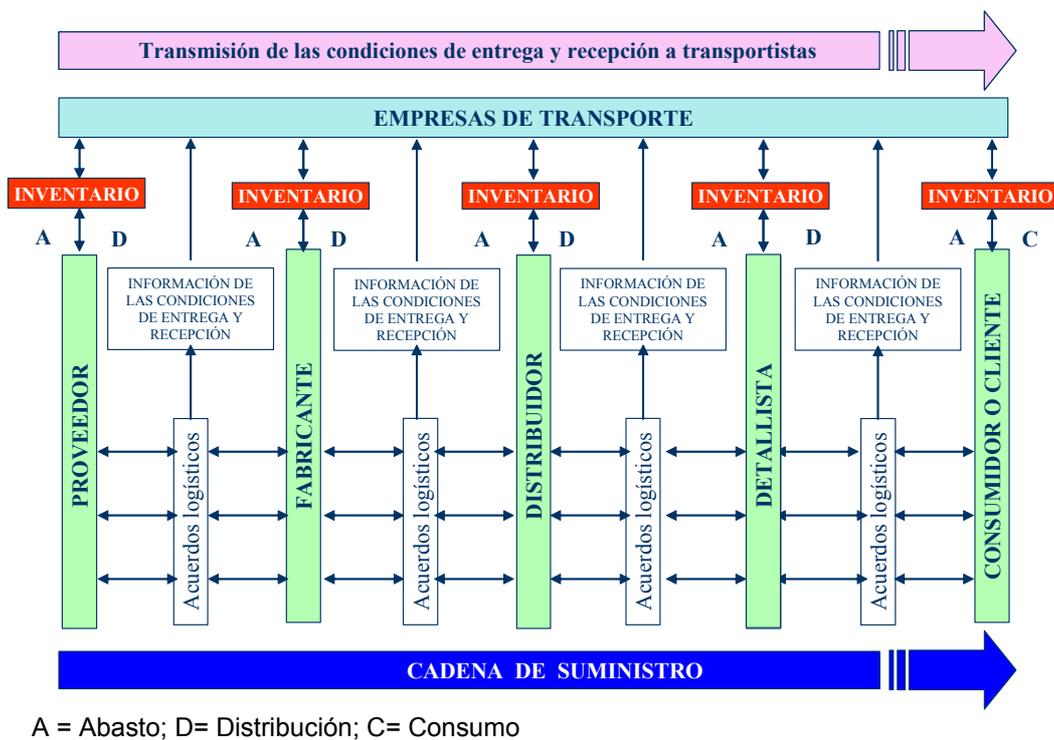
En la práctica esto significa que es posible preparar alternativas que en algunos casos, podrían entrañar mayores costos de transporte para la empresa, aunque éstos se compensen considerablemente con la reducción de gastos administrativos y de manipulación-almacenamiento e inventarios (*trade off*). Estos mayores costos en un subsistema (por ejemplo, transporte) o interfaz pueden aceptarse si permiten obtener proporcionalmente mayores beneficios para todo el sistema empresarial, o cadena de suministro.

Sin embargo, es importante destacar que en el transporte uno de los despilfarros más comunes es la manipulación innecesaria de los productos. Por ejemplo, en la cadena de suministro se podría hablar de derroches cuando las materias primas o componentes de un producto, en vez de entregarse directamente a la línea de producción se envían a un almacén; lo mismo sería si al terminar una pieza se almacena en un depósito de productos semielaborados en vez de entregarla directamente al proceso siguiente. Despilfarros no tan evidentes en el transporte, pueden observarse cuando los contenedores de ferrocarril o autotransporte se utilizan como bodegas temporales. Para eliminar esta clase de desperdicio, hay que mejorar los procesos, de tal manera que se coordinen mejor las actividades de abastecimiento y distribución con los procesos de transporte. De una u otra manera se presenta un impacto negativo en el costo por inventario (ya sea fijo o en tránsito), transformándose en un problema de falta de coordinación.

Cabe señalar que el servicio de transporte para el abastecimiento y la distribución, se evalúa como satisfactorio en cuanto a calidad, cuando se ha efectuado la entrega de productos o mercancías sin ningún detrimento cualitativo y cuantitativo,

y cuando se cumplió con el plazo de entrega estipulado; ambos casos contribuyen a una reducción de los costos por manutención de inventarios. De igual manera se deben evaluar las cadenas de transporte.

Por todo lo anterior, no debe minimizarse la importancia del transporte en los esquemas de abastecimiento y distribución; la producción misma depende de la salida y entrada oportuna de materias primas, de piezas y de ensamblajes parciales; la satisfacción del cliente depende de la salida de los productos terminados en los plazos convenidos, por tanto, el transporte de abastecimiento y distribución juega un papel preponderante en la cadena de suministro para lograr la correcta disponibilidad de los inventarios (véase figura 1.1).



A = Abasto; D= Distribución; C= Consumo

Figura 1.1
Relación del transporte y el inventario en las etapas de abastecimiento y distribución

Fuente: Adaptado de Recomendaciones AECOC para la Logística (RAL). AECOC (Asociación Española de Codificación Comercial).

La figura 1.1 anterior, pretende ilustrar cómo el desarrollo de esquemas específicos sobre el flujo de la información y las relaciones entre el transporte y los eslabones de la cadena de suministro, permiten estipular a detalle los procesos de entrega y recepción de mercancías, y con ello el nivel de inventario en cada eslabón. Dichos esquemas contemplan, sobre todo, el diseño de canales muy precisos de comunicación y transmisión de la información.

En la práctica, los esquemas de información y comunicación son de vital importancia para el buen desempeño del transporte y de la cadena de suministro. En cada etapa del proceso general, la información oportuna y veraz permitirá al transportista brindar un mejor servicio en las etapas de abastecimiento y distribución, facilitando el cálculo de los niveles de inventario a los empresarios. Esta situación trae consigo una mayor integración del transporte en la cadena de suministro, e incluso permite participar a los transportistas en el diseño logístico de abastecimiento, y la distribución de materia prima y productos terminados.

Es común que el transporte se considere como un gasto, y pocas veces tratado como un elemento que puede aportar ventajas competitivas. Su función de “*arrastrador*” de cargas es un calificativo que debe ser cosa del pasado, pues con una integración cabal en la cadena de suministro es factible una mayor aportación en la cadena de valor de los usuarios.

En la actualidad, algunas empresas transportistas están ingresando al sistema de certificación de normas de calidad ISO 9000, para que en un ambiente de cadena de suministro puedan competir con calidad en su mercado objetivo. Sin embargo, si un fabricante no integra al transporte a sus procesos logísticos, la certificación puede estar seriamente cuestionada, es decir, ¿realmente la certificación garantiza el adecuado funcionamiento de las actividades de abastecimiento y distribución? o más específicamente, ¿ello es suficiente para contribuir al mejor control de otras funciones, como en el caso de los inventarios?

1.3 Relaciones estratégicas de colaboración en el transporte

Las mejoras en la gestión empresarial, históricamente han pasado por diferentes estrategias centradas en optimizar los procesos internos. Desde la desregulación del transporte, la tendencia de los embarcadores se ha enfocado a contratar a sus proveedores de servicio de transporte, con énfasis en la negociación de la tarifa. Generalmente, durante las negociaciones, el cargador buscaba obtener el mejor provecho aun en detrimento de la calidad del servicio de transporte afectando su competitividad.

Cabe señalar que la competitividad es uno de los factores que más ha impactado en la cadena de suministro actual. Desde la desregulación del transporte y la apertura de los mercados internacionales, los niveles de competencia han obligado a las empresas a desarrollar alianzas estratégicas de colaboración que han transformado la competencia entre empresas por la competencia entre cadenas, en las que el transporte se encuentra involucrado.

Producto de los altos niveles de competitividad, los transportistas asimismo deben reconocer la necesidad de llevar a cabo actividades de mercadotecnia, logística, administración y gestión, alentados por alcanzar metas y objetivos mediante el desarrollo de estrategias de colaboración. En la actualidad, con base en

relaciones estratégicas de colaboración, la fijación de la tarifa y la contratación del servicio de transporte pueden llevarse a una relación de carácter simbiótico.

Esta colaboración implica en muchos casos, la modificación de las reglas que actualmente rigen los acuerdos entre usuarios y proveedores del servicio de transporte. Términos como coordinación, resolución conjunta de problemas y compartir información cobran relevancia en las nuevas relaciones, pero sólo serán exitosas si la colaboración entre las empresas involucradas en el traslado de mercancías fijan criterios muy estrictos por seguir; de nada sirve que una de las partes capacite a su personal para ofrecer un buen servicio si la otra no lo hace, o si los acuerdos se hacen a nivel gerencial y en el nivel operativo no se difunden.

Las relaciones estratégicas de colaboración se presentan en todos los sectores y en el transporte no es la excepción. Es más, por la naturaleza del transporte, las relaciones de colaboración entre transportistas y embarcadores deben ser fuertemente modificadas. Debe señalarse que Esper y Williams (2003), reportan que una de las primeras extensiones del marco conceptual de las relaciones de colaboración en la cadena de suministro son las *Relaciones de Colaboración para la Gestión del Transporte* (Browning y White, 2000). Dicha estrategia tiene como meta desarrollar relaciones de colaboración entre proveedores, clientes, transportistas y proveedores de terceras partes logísticas, con el fin de mejorar el servicio, la eficiencia y los costos asociados con el proceso de entrega (Karolefski, 2001).

De hecho Greg Bryan (1999), en un estudio realizado en países desarrollados encontró que los niveles de colaboración entre transportistas y embarcadores han evolucionado desde que ambos se veían como rivales; han pasando por procesos de selección (*RFP, Process*) que manejaban criterios muy vanos impulsados por los dueños de la carga, basados en relaciones sin compromisos y de corto plazo. En épocas anteriores, la integración corporativa era la única forma de establecer algún esquema de colaboración, pero éste siempre era interno. Señala que los acuerdos entre empresas se concretaban a la optimización de recorridos y a la puntualidad, en términos del tamaño de los embarques y recorridos de las rutas. Recientemente, se está gestando un proceso ascendente en los niveles de colaboración entre empresas. Dichos niveles, básicamente comparten información crítica, y se llevan a cabo mediante relaciones estrategias de colaboración.

Para integrarse de manera adecuada a la cadena de suministro en un ambiente de relaciones de colaboración, los transportistas tienen importantes áreas que requieren atención en su administración: negociación del precio de sus servicios; ruteo y programación; desarrollo de servicios; competencia; y actividades de mercadotecnia. Los embarcadores y transportistas requiere verse como socios en la cadena de suministro. Cada uno debe manejar eficiente y eficazmente sus operaciones para proveer niveles adecuados de servicio al cliente con los menores costos. Es más, en términos de Porter (2000), la estrategia de las empresas de transporte puede también orientarse en función del mercado

(segmentación), costo o diferenciación; esto último, desarrollando paquetes especiales de servicios.

Lambert y Stock (1992), señalan que las estrategias de los embarcadores y transportistas se encuentran estrechamente interrelacionadas; por lo anterior, el transporte debe verse como una parte integral de la estratégica logística, y que los directivos de logística necesitan tener cuidado en identificar cómo el transporte puede ayudar a la empresa a satisfacer las necesidades de los clientes en su cadena de valor; por ejemplo, en la determinación del tamaño de lote y los niveles de inventario.

Desde el punto de vista de la operación, en una relación de colaboración, los miembros de la cadena de suministro requieren estar conscientes que la importancia de un buen ruteo y programación de los servicios de transporte, les permitirá un aceptable nivel de servicio para sus clientes. Por ejemplo, una programación de los embarques para un mercado específico, permite reducir la frecuencia de viajes y aumentar el factor de carga de los vehículos. El resultado se reflejará en los ahorros correspondientes: costos de operación al transportista y ahorros en los costos de manipulación, transporte, almacenaje e inventarios para el usuario (cliente del transporte).

Algunos esquemas de operación se han diseñado para reducir los costos, tanto para el cliente como para el proveedor, incluso para el transportista. En la práctica, las empresas están programando la entrega de sus materiales y controlando sus inventarios considerando los costos, capacidad y tarifas del transporte; incluso para ser más eficientes, programan sus embarques con varios días de anticipación con el uso de diversas estrategias de coordinación.

Julie Gentry (1995), en su estudio sobre relaciones de colaboración entre clientes y proveedores, investigó acerca de las relaciones con los transportistas. Encontró que una parte importante de los entrevistados, señalaban al transporte como un elemento importante que permite fortalecer las relaciones de colaboración en un esquema de cadena de suministro. El estudio consistió de entrevistas directas a 69 empresas que trabajan con relaciones de colaboración (cliente-proveedor). De éstas, 47 (68%) fueron clientes y 22 (32%) proveedores. A partir de la encuesta, el estudio arrojó los siguientes resultados más relevantes:

En ambientes de colaboración estratégica entre clientes y proveedores, destacó que el 78% de las veces, la selección del transportista es decisión de una de las partes, es decir, sólo el 22% toma una decisión conjunta. De la decisión unilateral, 40% son proveedores y el 38% clientes. En palabras de este autor, dicho resultado parece contradecir la filosofía de las relaciones de colaboración en términos de la toma de decisiones conjuntas, debido a que las cifras permiten intuir una mayor proporción de relaciones tradicionales (transacciones básicas).

Sin embargo, los resultados también parecen indicar que en una relación de colaboración entre clientes y proveedores, no se le da la debida importancia al

transporte y que en una contratación individual del servicio parece apoyar la idea de que sólo se beneficia una de las partes (al cliente o al proveedor). En las relaciones tradicionales de transacción básica, es común negociar sobre la base de "bajo precio", en la que el costo de transporte va incluido en el precio de compra del producto, donde los proveedores generalmente toman las decisiones sobre el servicio de transporte.

De la encuesta, el 54% de las empresas señaló que contratan a un único transportista para atender todos los movimientos que se generan entre dos compañías, bajo un esquema de relaciones de colaboración cliente-proveedor. Para Gentry (1995), esto indica la presencia de relaciones multiempresas necesarias para el alcance exitoso de las actividades de suministro. Es decir, un poco más de la mitad de empresas tercerizan la función transporte, lo cual significa una ampliación de la asociación prevaleciente entre clientes y proveedores.

En el estudio, uno de los comentarios más señalados, establece que los transportistas que atienden a las empresas con acuerdos estratégicos de colaboración, están más involucrados en las actividades logísticas de las mismas, que aquellos que sólo son contratados bajo la filosofía de las transacciones tradicionales (no socios).

En torno a los resultados más relevantes, indicó que los transportistas contratados dentro de una alianza estratégica, se caracterizaron por los siguientes aspectos: a) formalizan compromisos a largo plazo; b) las comunicaciones son abiertas y comparten información; c) su relación es cooperativa, buscan mejoras continuas para reducir costos y aumentar la calidad del servicio; y d) comparten riesgos y ganancias en la relación.

Por su parte, los transportistas que trabajaron con clientes y proveedores bajo una relación de colaboración, lograron mejoras significativas en los siguientes aspectos: a) reducción del tiempo de respuesta para rastrear embarques solicitados; b) disminución del tiempo total de ciclo del pedido; y c) menor número de reclamos. Como es evidente, el éxito de una relación cliente-proveedor puede reforzarse a través de la integración del transportista, proporcionándole un fuerte apoyo al involucrarlo en los esquemas de cooperación y coordinación, así como en los sistemas de información y de mejora continua.

Como puede observarse, lo anterior parece apoyar la idea de que los transportistas juegan un papel importante en el desempeño operativo de las relaciones de colaboración entre clientes y proveedores. Por consiguiente, es factible deducir que existen oportunidades para aumentar la probabilidad de éxito en las relaciones de colaboración estratégica, involucrando a los transportistas con más profundidad en las diversas actividades logísticas en la cadena de suministro. Sin embargo, aun cuando se aprecia que los transportistas son importantes para lograr numerosas metas operativas, más del 65% de los entrevistados señalaron

que los transportistas "nunca participan", o sólo "de vez en cuando" en la planificación estratégica de sus empresas.

No obstante lo anterior, la ventaja de que los clientes y proveedores perciban que los transportistas juegan un papel importante para lograr metas operativas, favorece la necesidad de explorar oportunidades potenciales de relaciones estratégicas con los transportistas.

En una segunda fase del estudio, Julie Gentry realizó entrevistas a representantes de empresas comprometidas en relaciones estratégicas multiempresa, es decir, a compañías que forman parte de una cadena de suministro. En esta etapa consideró el tamaño de la organización, la industria y el tipo de producto, así como el nivel de cooperación del transportista. Entre lo más destacados encontró que en las relaciones más exitosas de colaboración multiempresa, en un ambiente de cadena de suministro, fueron aquéllas en que los transportistas estaban integrados de un nivel "moderado" a uno "alto".

Encontró que muchos transportistas se están involucrando en el proceso de la planificación estratégica de los clientes y proveedores, con miras a aprovechar los beneficios potenciales que produce una relación multiempresas. Un detalle significativo se obtuvo cuando algunos clientes y proveedores señalaron que han involucrado a los transportistas en las fases iniciales del diseño del producto, e incluso a cambios en los procesos industriales para beneficiarse de la especialización del transportista, facilitando el logro de objetivos realistas y asequibles para cada miembro en la cadena de suministro, minimizando los riesgos.

Por ello, puede señalarse que la importancia de estos conceptos tiende a incrementar los niveles de inversión, y reducir el riesgo involucrado en los nuevos productos o procesos. Ya se ha repetido que la confianza y acuerdos de largo plazo son esenciales para el éxito de una relación de colaboración en la cadena de suministro.

1.4 Coordinación de la participación modal de transporte en la cadena de suministro

Históricamente, los sistemas de transporte se han edificado sobre la base de medios independientes, los cuales tienen diferentes fuerzas y debilidades. Por tal motivo, la selección y coordinación de los modos de transporte se vuelve relevante, pues las características de cada uno influirán de manera significativa en la estrategia de abastecimiento.

En la praxis empresarial es común encontrar compañías que realizan sus envíos a través de los modos más "baratos", pero más lentos; o viceversa, por modos caros y más rápidos, sin analizar las consecuencias técnicas y económicas que de ello se deriva.

La gestión del abasto por un sólo modo puede tener complicaciones en los plazos de entrega, o altos costos por concepto de transporte y de inventario. Por ejemplo, debido a la lentitud de desplazamiento de los barcos en el traslado de productos, es necesario que la fabricación y el embarque respectivo se haga generalmente con bastante antelación, provocando altos costos de capital, almacenamiento e inventario en tránsito, aumentando al mismo tiempo la incertidumbre en el cumplimiento de los plazos de entrega, independientemente de que se crean ahorros en el costo de transporte. El caso contrario lo representa el avión, el cual implica altos costos de transporte y bajos costos en la gestión de inventarios.

Por lo anterior, es una práctica común que las empresas permitan a sus proveedores que los productos que fabrican les sean enviados, haciendo uso de diversos modos de transporte (o cadenas multimodales) para apoyar los diferentes tiempos de respuesta que proporciona cada modo. Por ejemplo, HP ensambla cajas tipo MODO en su planta de Singapore, pero permite a sus centros de distribución localizados en Grenoble, Guadalajara, Roseville y Singapore elegir entre envíos por barco o avión, como transporte principal (Beyer y Ward, 2000).

Otros ejemplos son frecuentes en las empresas maquiladoras instaladas en México, donde por razones de costo y tiempo de entrega, coordinan adecuadamente diferentes modos de transporte para el abasto desde sus proveedores localizados en los Estados Unidos. Sin embargo, dicha práctica se realiza sin algún análisis técnico, y tan sólo basada en la urgencia del envío. Lo anterior, desde luego exige la mayor coordinación posible de las empresas de transporte que participan en una ruta multimodal, para así cumplir con las necesidades del cliente.

Más específicamente, este tipo de acciones ofrece a las empresas la oportunidad de trazar planes de abasto para cumplir con sus políticas de inventario. Algunas de las ventajas más relevantes de este tipo de estrategias son las siguientes:

- a) Reducción de los costos de inventario
- b) Reducción de los costos de transporte
- c) Cumplimiento de los plazos de entrega
- d) Economías de escala
- e) Negociación de tarifas de transporte o descuentos
- f) Uso eficiente de la infraestructura de transporte

Por las características operativas de cada modo de transporte, aparentemente su elección no debe representar mayor complicación, sin embargo, el verdadero problema reside en determinar ¿qué cantidad o tamaño de lote debe asignarse para cada uno de los modos de transporte disponibles, de tal forma que se alcance la mayor parte de las ventajas señaladas? La respuesta a esta interrogante, evidentemente no es sencilla. Algunos autores establecen que la participación relativa de cada modo de transporte en el movimiento de la carga,

influye de manera decisiva en la política de abasto y en el cumplimiento de las entregas. Algunos planteamientos sobre este tópico se presentan en el capítulo siguiente.

2 El inventario y los costos del transporte

En este capítulo se hace un breve repaso de las consideraciones más relevantes que involucran los costos de transporte. La idea detrás de los planteamientos encontrados en este capítulo, tiene como propósito establecer la base matemática del fenómeno de los costos de transporte y su interacción con el sistema de inventarios en una interrelación cliente-proveedor, cuestión que se lleva a cabo en la primera sección. En la segunda se analiza la estructura básica de los costos de transporte, que da paso a un análisis de la relación de éstos con el tamaño del envío por modo, considerando restricciones de capacidad del equipo de transporte. También se identifica el impacto del costo del transporte en el precio de venta de los productos en el comercio internacional de acuerdo con el tipo de *incoterm* empleado. Finalmente, se presenta una comparación entre los costos de transporte para el caso de *contenedor completo* contra *contenedor consolidado*.

2.1 El inventario y su relación con el transporte

La gestión de inventarios es un aspecto crítico de los sistemas de producción y distribución. Un almacenamiento amplio, o uno lento movimiento de los inventarios (y a menudo ambos) son señales claras de una compañía en problemas. Las soluciones con poca visión por corregir estos extremos, ya sea cambiando la frecuencia de la producción o estableciendo programas para atender órdenes de emergencia, a menudo provocan peores resultados.

Para proporcionar el más alto nivel de servicio a los clientes y reducir los costos de operación al más bajo valor, la coordinación de inventarios con otras operaciones, tales como: producción, pedidos, almacenaje y transporte, es muy importante. De manera particular, la relación del transporte con el sistema de inventarios es directa. El grado de influencia sobre el nivel de las existencias radica en la combinación explícita del diseño de la red y la capacidad del transporte (la cual incluye, la selección del modo).

Lo deseable es la determinación conjunta de la alternativa de transporte y los parámetros de inventario (por ejemplo: punto de reorden y cantidad a ordenar). La clave es formular el problema de inventario, incluyendo de manera explícita las variables fundamentales del transporte.

Tradicionalmente, los modelos de gestión de inventario se utilizan para determinar del tamaño de lote económico de producción o de pedido, generalmente incluyen los costos que implican la producción, preparación, generación de órdenes y de almacenamiento, considerando de manera implícita los costos de transporte. En efecto, normalmente la política de inventario considera fijos los siguientes parámetros relevantes del transporte: a) costo; b) tiempo promedio de traslado; y c) variabilidad del tiempo de transporte. Evidentemente, las diferencias en el costo de transporte o variabilidad y el valor del tiempo de traslado de mercancías,

pueden originar diferentes niveles de inventario de seguridad y cantidades a ordenar.

Por lo anterior, los costos de transporte implícitos implican con frecuencia que el precio de venta de los productos al distribuidor (P_{VV}) enfrente grandes diferencias con respecto al precio de venta del consumidor final (P_{VB}). La razón es obvia, y puede explicarse por los costos en que se incurre durante la manipulación y el traslado de los bienes entre los sitios de producción y consumo. En general, después del proceso de elaboración, un artículo se resguarda en un sitio especial para que sea preparado y posteriormente cargado en un vehículo especializado de transporte, y enviarse a un sitio donde será descargado para almacenamiento temporal, en espera de su uso en el ensamble o consumo final. Los costos más evidentes relacionados con este conjunto de tareas son:

- Preparación y empaque
- Manipulación
- Pérdidas
- Almacenamiento
- Procesamiento de órdenes
- Financieros
- Tarifas, comisiones, u otros pagos oficiales
- Transporte

Daganzo (1996), clasifica estos tipos de costos en dos grandes grupos: a) los incurridos en el movimiento; y b) los relacionados con la manutención (almacenamiento). Los primeros representan los de transporte, dirigidos a superar la distancia; mientras que los segundos, están más relacionados con los costos de inventario orientados al tiempo.

Los costos incurridos por el movimiento incluyen aquellos que tienen que ver con la manipulación de las mercancías y el transporte. Los primeros, relacionados con el tamaño del lote (por ejemplo, manutención, preparación y empaque, maniobras de carga y descarga, etc), y los segundos, asociados con la distancia (por ejemplo, costo/ton-km).

Por lo que refiere a los costos de manutención, incluyen la “renta” (C_r) de las inversiones y los causados por el tiempo de resguardo de los artículos (C_h). Los costos de la “renta” implican: el espacio o área destinada al almacenamiento (C_s), las inversiones en maquinaria o equipo empleado para la manipulación (C_{CE}); y el mantenimiento destinado a los dos anteriores (C_M). Los costos por el tiempo de resguardo son significativos para capturar el costo de permanencia de los productos en el almacén (C_{hp}), el cual incluye el costo de oportunidad del capital destinado al almacenamiento (C_{CR}), y el valor perdido durante el resguardo (obsolescencia) (C_o). Así, para un conjunto dado de instalaciones (espacio y

equipo), existe una componente fija (C_f) del costo total; y los costos de resguardo (almacenamiento) se conjugan en una componente variable (C_v), que dependen de cómo son procesados los productos, es decir, de la estrategia (E) empleada. Por lo anterior:

$$C_r = C_S + C_{CE} + C_M \Rightarrow C_f \quad (2.1)$$

$$C_h = C_{hP} + C_{CR} + C_O \Rightarrow C_v(E) \quad (2.2)$$

De esta forma, el costo total (CT_h) de manutención de inventarios está compuesto por:

$$C_f + C_v(E) = CT_h \quad (2.3)$$

En especial, el costo por uso de instalaciones y equipo (renta), a diferencia del de resguardo por unidad de tiempo, no depende de la cantidad almacenada. Más específicamente, el costo de la renta, está en función del tamaño de las instalaciones necesarias que albergan la máxima acumulación de productos en un momento determinado. Por ello, el diseño de un sistema de manejo y gestión del inventario (D_s) debe ser proporcional a la máxima acumulación posible ($A_{m\acute{a}x}$), definido por la estrategia o política de inventario (E).

$$D_s \approx A_{m\acute{a}x} \Rightarrow E \quad (2.4)$$

En este sentido, el factor de proporcionalidad dependerá de la cantidad de productos, sus requerimientos de almacenaje, y el predominante costo de la renta por el espacio.

Si las instalaciones son propias (no arrendadas), entonces el costo de adquisición debe aumentar linealmente con el tamaño. Luego, se podrá calcular una renta equivalente (basada en la amortización de los costos de inversión sobre la vida útil), la cual debe ser fuertemente proporcional a la máxima acumulación.

En general, los costos de manutención de inventarios han sido ampliamente tratados en la literatura existente, y su característica principal es que dependen directamente del volumen de mercancías gestionado; de manera conjunta se combinan con los costos por ordenar, o de producción, adquisición y de escasez o rezagos en las entregas, con el propósito de determinar el costo total de un sistema de inventarios.

Contrario a los costos de inventario, el de transporte no es directamente proporcional al volumen de mercancías adquiridas, sino que depende del volumen transportado en cada pedido; es decir, se miden en función del segmento de carga que se esté moviendo y de las características de una diversidad de elementos operativos (por ejemplo, tipo de mercancía, modo de transporte, clase de vehículo, distancia entre el origen y destino de la carga, flota rentada o propia, infraestructura disponible, etc).

En la práctica, la combinación de estos elementos operativos del sistema de transporte provoca que en la mayoría de las veces sus costos sean muy difíciles de cuantificar. Por esta razón, en las secciones a continuación se lleva a cabo una presentación general de los componentes del costo de transporte, bajo diferentes contextos de gestión, entre los que destaca la participación del transporte en la relación cliente-proveedor.

2.2 El tamaño del pedido y su impacto en el costo de transporte

En un esquema básico para el envío de productos entre un origen y un destino, los costos de transporte se determinan prácticamente por un costo fijo que afecta de manera directa los envíos realizados (\$/unidad de carga; por ejemplo, \$/ton), más el costo incurrido por unidad de carga durante el desplazamiento (\$/unidad de carga-unidad de distancia; por ejemplo, \$/ton-km). En efecto, los costos variables se definen a partir de los gastos incurridos por la operación, representados regularmente por el nivel de consumo de los combustibles y el mantenimiento de la flota vehicular, prorrateados por el volumen de carga transportada entre el origen y el destino de los productos.

La formulación matemática de esta aseveración es muy sencilla y puede iniciarse con establecer lo siguiente. Por cada envío realizado, el costo de transporte está compuesto por un cargo fijo (c_f), el cual incluye todos aquellos gastos que se realizan para la administración y explotación del servicio, y de un cargo variable (c_v), el cual incluye todos aquellos gastos erogados afectados por el nivel de las operaciones de la empresa. Específicamente, el costo de transporte por unidad de carga entre un par origen y destino está determinado por la siguiente expresión:

$$\text{Costo de transporte} = c_f + c_v \quad (2.5)$$

Cuando se habla del nivel de operaciones se hace referencia al volumen de carga que se envía de un origen a un destino, es decir, del tamaño del pedido Q . Por tanto, el costo de transporte crecerá linealmente de manera rigurosa, o sea:

$$\text{Costo de transporte } (Q) = c_f + c_v \cdot Q \quad (2.6)$$

La expresión anterior permite observar que un aumento gradual del volumen del envío produce un aumento similar en el costo de transporte. Evidentemente, llegará el momento en que tal incremento rebase la capacidad máxima de transporte (k), haciendo necesario agregar más de un vehículo a fin de satisfacer la demanda, por tanto, la función de costos de transporte $f_i(Q)$ mostrará

aumentos súbitos en el costo de transporte por envíos simultáneos derivado del aumento de su tamaño (véase figura 2.1).

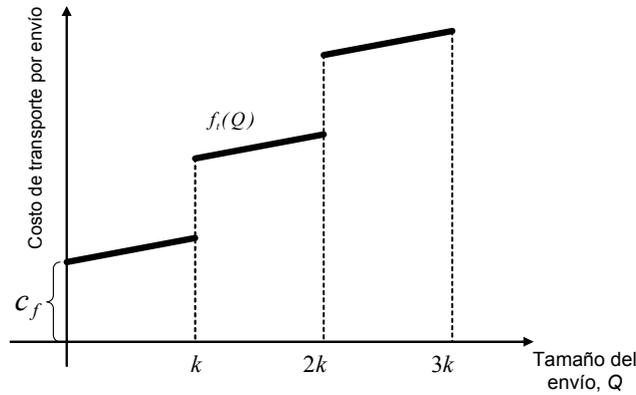


Figura 2.1
Relación del tamaño del envío y su costo de transporte

Fuente: Daganzo (1996).

Por lo anterior, considerando $Q > k$ y que se requiere $Q/k = n$ vehículos simultáneamente, el costo total de transporte c_T^T para n envíos está determinado por la siguiente expresión:

$$c_T^T = \sum_{i=1}^n c_f + c_V Q = n c_f + c_V Q \quad (2.7)$$

Utilizando el teorema de “punto de equilibrio”, la ecuación anterior permite llevar el análisis a dos casos relevantes para el costo: I. Para cuando el transporte es propio (recta A); y II. Para el caso de transporte rentado (recta B) (véase figura 2.2).

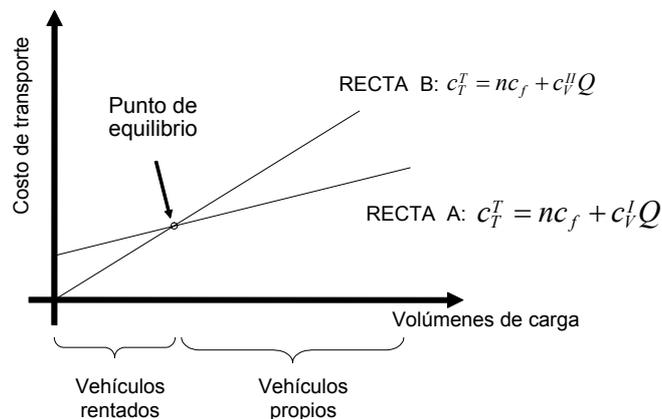


Figura 2.2
Punto de equilibrio de los costos de transporte

Fuente: Vázquez (2003).

Analizando la alternativa I, representada por la recta "A" en la figura 2.2, el costo de transporte parte de un costo inicial c_f , referente por supuesto al costo de inversión en equipo de transporte y a su gestión, con una pendiente que puede ser suave o fuerte, significativa de mantener una tendencia conservadora o un fuerte incremento, respectivamente. Se asume en ambos casos que la pendiente es constante y que representa los costos de operación que son directamente proporcionales al volumen de las operaciones de la empresa (Vázquez, 2003). Nótese que aquí puede haber importantes efectos de las economías de escala debido a la posibilidad de prorratear los costos fijos, y con ello obtener un costo de transporte por producto (\$/unidad de carga) cada vez menor, aunque parta de un valor muy alto, es decir:

$$\text{Costo de transporte / producto} = c_f \left(\frac{n}{Q} \right) + c_v = c_f \left(\frac{1}{Q} \right) + c_v \quad (2.8)$$

Cabe mencionar que en esta última expresión se observa que la única variable de decisión del problema más simple de un origen y un destino es n (o \bar{Q}), por tanto, es justo destacar que el costo variable (c_v) no debe influir en las decisiones del número de envíos o volúmenes de carga, debido a que no es una constante.

En la alternativa II, la del servicio rentado, se tiene también un crecimiento lineal de costos. Sin embargo, el costo promedio parte de cero, y es constante dado que es proporcional a la carga movida. Aquí no se observan economías de escala para la empresa que contrata el servicio. El comportamiento puede observarse en la recta "B" de la figura 2.2.

El concepto "punto de equilibrio" implica, en términos generales, que si se tiene una intensidad de movimientos baja (ubicado en la gráfica, del lado izquierdo del punto de equilibrio), se obtendría un costo menor si se contratara el servicio de transporte. Por el contrario, si se presenta un intenso movimiento de carga (esquemáticamente, se ubica a la derecha del punto de equilibrio), sería más conveniente emplear vehículos propios para la movilización de los productos.

2.3 Costo de transporte considerando restricciones de capacidad

La relación primaria y directa del sistema de inventario con los costos de transporte, surge de una práctica común de gestión en la que los costos de transporte se incorporan al precio de adquisición. En la mayoría de las negociaciones comerciales, el cliente asume los costos de transporte de manera más o menos tácita o implícita en el precio de compra.

A raíz de esta situación, los costos de transporte no son fáciles de identificar y mucho menos de cuantificar. Una manera práctica de lograr lo anterior, puede llevarse a cabo mediante la tipificación de los esquemas más comunes, mismos que se describen a continuación.

Esquema 1. El proveedor asume de manera explícita los costos de transporte para su abasto (C_{RV}) y entrega (C_{EV}) de las cantidades de materia prima (Q_{RV}), y productos terminados (Q_{EV}). El cliente (distribuidor) asume sus costos de entrega (C_{EB}) de la cantidad (Q_{EB}) de productos terminados. En este caso, el precio de venta del proveedor (P_{VV}) y el precio de venta del distribuidor (P_{VB}), cada uno con su correspondiente margen (M), se determinan incluyendo el costo de producción (C_{PV}) y de compra (C_{CV}); este último considerando explícitamente el costo de transporte (véase figura 2.3).

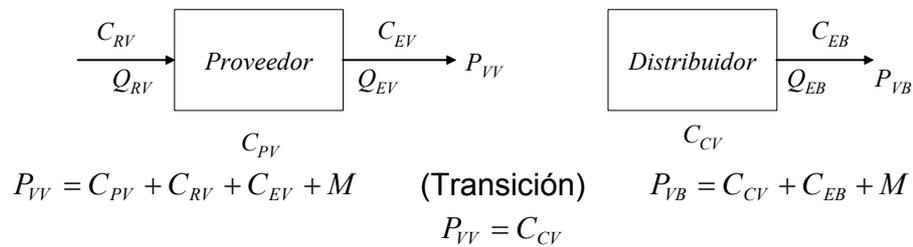


Figura 2.3

Esquema 1. Incorporación del costo de transporte al precio de compra

Esquema 2. El proveedor y cliente (distribuidor) asumen de manera explícita únicamente sus costos de entrega (C_{EV}) y (C_{EB}) de las cantidades (Q_{EV}) y (Q_{EB}) de productos. El precio de venta del proveedor (P_{VV}) y el del distribuidor (P_{VB}), cada uno con su correspondiente margen (M), se determinan asumiendo que los costos de producción (C_{PV}), y de compra (C_{CV}) llevan implícitos los costos de suministro (C_{RV}) y (C_{EV}), los cuales incluyen los costos de transporte (véase figura 2.4).

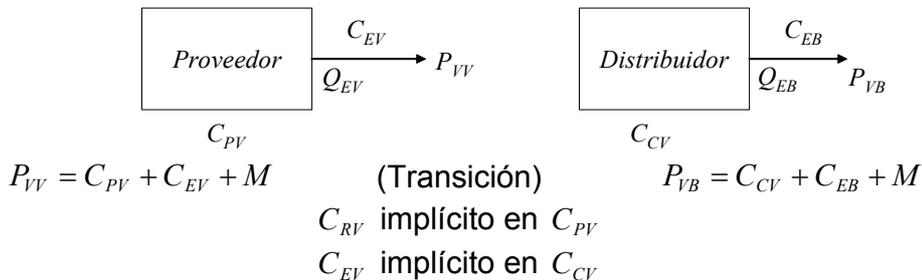


Figura 2.4

Esquema 2. Incorporación del costo de transporte al precio de compra

Esquema 3. El proveedor asume sólo sus costos de abasto (C_{RV}), y el cliente (distribuidor) ambos costos (abasto, C_{RB} y entrega, C_{EB}) para abastecer las cantidades (Q_{RV}) al proveedor, y ($Q_{RB} + Q_{EB}$) para el distribuidor. El precio de venta del proveedor (P_{VV}) y del distribuidor (P_{VB}), con sus respectivos márgenes, consideran de manera explícita los correspondientes al transporte, tal y como puede observarse en el siguiente esquema operativo (figura 2.5).

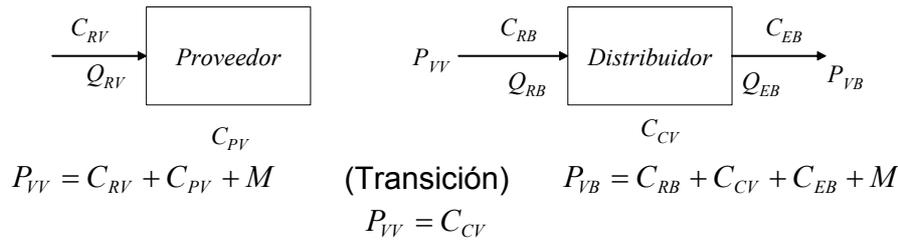


Figura 2.5

Esquema 3. Incorporación del costo de transporte al precio de compra

En la práctica, el esquema más común es que el proveedor que abastece el producto realiza las actividades de suministro, y controla la función de distribución (esquema 2). Es decir, el proveedor generalmente absorbe los gastos, mismos que se cargan al precio final del producto de manera implícita, como costo de transporte. La cuestión que aquí se pretende destacar reside en el hecho de que la gestión del sistema de transporte, por parte del proveedor es relevante, debido a que puede representar un elemento crucial de ventaja o desventaja competitiva.

Por ejemplo, para el caso en que $C_{EV} > C_{RB}$ significa que existe una pésima gestión o planeación del abasto por parte del proveedor, lo que implica un aumento en el precio de venta de sus productos P_{VV} , mismo que es pagado por el distribuidor (cliente). Por el contrario, con $C_{RB} > C_{EV}$ implica que el distribuidor (cliente) no tiene un adecuado sistema para abastecerse, y es mejor dejar al proveedor esta labor. Evidentemente, tal hecho se presenta entre cada eslabón de la cadena de suministro, y el esquema que mejor se adapte al menor costo, siempre será el más recomendable. Por tanto, ambos extremos de la cadena, y principalmente el cliente, deberá estar al pendiente de los esquemas de distribución y operación que utilizan sus proveedores.

Se dice que los costos operativos de transporte para el abasto y entrega de mercancías son más críticos para el caso de explotar una flota propia que una rentada. El principio básico que sustenta dicho enunciado se basa en la economía de la especialización; de ahí que si se acepta este hecho para el caso de una flota propia, la brecha entre el costo mínimo que podría lograrse y el real podría ampliarse aun más. Para el caso de recurrir a una flota rentada, generalmente se

establece un pago fijo por unidad de peso o contenedor, siendo una manera más fácil de cuantificar los costos de transporte.

Para efectos del presente trabajo, y reconsiderando nuevamente que el abasto y entrega de mercancías involucran los costos de transporte, los cuales están conformado por dos componentes principales (un costo fijo, incurrido por la estructura administrativa o de gestión y la tenencia del equipo de transporte, y un costo variable incurridos por el volumen de carga movilizada (véase sección anterior), puede establecerse el siguiente análisis de costos.

Para el caso del esquema 1 anterior, un proveedor incurre de manera explícita en un costo de transporte $C_{RV}(Q_{RV})$ que involucra una componente fija Cf_V para abastecerse Q_{RV} unidades de productos, generalmente restringido por su capacidad de transporte k (unidades de carga/vehículo), y afectado por el costo por unidad de carga transportada C_V , es decir:

$$C_{RV}(Q_{RV}) = Cf_{RV} + C_V^{RV} \left[\frac{Q_{RV}}{k_1} \right] \quad (2.9)$$

Similarmente, durante la entrega de una cantidad determinada de productos a su cliente, el proveedor incurre en el siguiente costo de transporte:

$$C_{EV}(Q_{EB}) = Cf_{EB} + C_V^{EB} \left[\frac{Q_{EB}}{k_2} \right] \quad (2.10)$$

Donde Q_{EB} denota la cantidad de producto a entregar al cliente, y Cf_{EB} el costo fijo incurrido para hacer llegar las mercancías al cliente. De esta manera, el costo total de transporte para el proveedor CT_{TV} se determina por la siguiente expresión:

$$CT_{TV} = C_{RV}(Q_{RV}) + C_{EV}(Q_{EB}) = Cf_{RV} + C_V^{RV} \left[\frac{Q_{RV}}{k_1} \right] + Cf_{EB} + C_V^{EB} \left[\frac{Q_{EB}}{k_2} \right] \quad (2.11)$$

Sin embargo, asumiendo el uso de la misma estructura organizacional para atender los flujos de aprovisionamiento (abasto) y suministro (entrega), y empleando la misma flota de transporte, los parámetros $k_1 = k_2 = k$ y $C_V^{RV} = C_V^{EV} = C_V$ son los mismos; es decir, $Cf_{RV} = Cf_{EB}$, por tanto:

$$CT_{TV} = Cf_V + C_V \left[\frac{Q_{RV}}{k} + \frac{Q_{EB}}{k} \right] \quad (2.12)$$

Si siguiendo la misma estructura de costos, el distribuidor al entregar productos a su cliente, incurrirá en un costo determinado por:

$$CT_{TB} = C_{EB}(Q_{EB}) = Cf_{EB} + C_V^{EB} \left[\frac{Q_{EB}}{k_{EB}} \right] \quad (2.13)$$

En resumen, el costo total explícito de transporte (CT_{TS}) del sistema proveedor-cliente para el esquema 1, lo determina la siguiente expresión:

$$CT_{TS}(Q_{V \rightarrow B}) = \left(Cf_V + C_V \left[\frac{Q_{RV}}{k} + \frac{Q_{EV}}{k} \right] \right) + \left(Cf_{EB} + C_V^{EB} \left[\frac{Q_{EB}}{k_{EB}} \right] \right) \quad (2.14)$$

Similarmente, el costo total explícito de transporte (CT_{TS}) para los esquemas 2 y 3, se definen respectivamente por:

$$CT_{TS}(Q_{V \rightarrow B}) = \left(Cf_{EV} + C_V^{EV} \left[\frac{Q_{EV}}{k_V} \right] \right) + \left(Cf_{EB} + C_V^{EB} \left[\frac{Q_{EB}}{k_B} \right] \right) \quad (2.15)$$

$$CT_{TS}(Q_{V \rightarrow B}) = \left(Cf_{RV} + C_V^{RV} \left[\frac{Q_{RV}}{k_V} \right] \right) + \left(Cf_B + C_V \left[\frac{Q_{RB}}{k} + \frac{Q_{EB}}{k} \right] \right) \quad (2.16)$$

2.4 Impacto del costo de transporte en el precio de venta según el tipo de *incoterm*

Los *incoterms* conforman un conjunto de reglas internacionales para la interpretación de los términos utilizados en el comercio internacional. Evitan las incertidumbres derivadas de las distintas interpretaciones de tales términos en diferentes países. Operativamente, indican en donde inicia y en dónde termina la responsabilidad del que vende, y en dónde empieza la responsabilidad del que compra. Es decir, determinan el punto de transferencia de la responsabilidad de las mercancías en tránsito. Los *incoterms* no determinan la propiedad de una mercancía; este punto, debe prevenirse en otra cláusula en el contrato de venta. Pero sí establecen el punto exacto de los costos asumidos por el vendedor y comprador, entre ellos los del transporte.

El comercio internacional, generalmente involucra dos tipos de transporte: doméstico e internacional, cuya combinación forma extensas cadenas multimodales. En el lenguaje operativo de los *incoterms*, el transporte internacional se reconoce como el *transporte principal*. El costo de transporte, ya sea doméstico o internacional, es cubierto por el vendedor o el comprador según el tipo de *incoterm* acordado. En el cuadro 2.1 se muestra un resumen de los costos principales asociados con el movimiento de las mercancías de exportación/importación, y quién los asume en cada caso.

La operatividad de los *incoterms* radica en determinar por parte de los responsables, decisiones sobre la selección del transporte para una orden en

particular; establecer cuándo la propiedad de un envío cambiará de manos del vendedor al comprador, y quién sufragará los gastos del envío. En especial destacan las decisiones que tendrán impacto en el precio de las mercancías. En este sentido, el cuadro 2.2 presenta los cargos a las mercancías según el tipo de *incoterm* negociado.

Cuadro 2.1
Costos de transporte por tipo de *incoterm*

| Costos | EXW | | <i>Incoterms (Grupo F)</i> | | | | | |
|---|-----|---|----------------------------|---|-----|---|-----|---|
| | | | FCA | | FAS | | FOB | |
| | V | C | V | C | V | C | V | C |
| Maniobras de carga | | • | • | | • | | • | |
| Transporte doméstico país exportador | | • | • | | • | | • | |
| Aduana país exportador | | • | • | | • | | • | |
| Maniobras de descarga/carga | | • | • | • | • | • | • | |
| Transporte principal (internacional) | | • | | • | | • | | • |
| Maniobras de descarga/carga | | • | | • | | • | | • |
| Aduana país importador | | • | | • | | • | | • |
| Transporte doméstico país importador | | • | | • | | • | | • |
| Maniobras de descarga | | • | | • | | • | | • |

V = vendedor; C = comprador.

| Costos | <i>Incoterms (Grupo C)</i> | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----|---|-----|---|-----|---|
| | CFR | | CIF | | CPT | | CIP | |
| | V | C | V | C | V | C | V | C |
| Maniobras de carga | • | | • | | • | | • | |
| Transporte doméstico país exportador | • | | • | | • | | • | |
| Aduana país exportador | • | | • | | • | | • | |
| Maniobras de descarga/carga | • | | • | | • | | • | |
| Transporte principal (internacional) | • | | • | | • | | • | |
| Maniobras de descarga/carga | • | • | • | • | • | • | • | • |
| Aduana país importador | | • | | • | | • | | • |
| Transporte doméstico país importador | | • | | • | | • | | • |
| Maniobras de descarga | | • | | • | | • | | • |

Nota: Para estos *incoterms*, la diferencia consiste en quién contrata el transporte y quién paga el seguro.

| Costos | <i>Incoterms (Grupo D)</i> | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|
| | DAF | | DES | | DEQ | | DDU | | DDP | |
| | V | C | V | C | V | C | V | C | V | C |
| Maniobras de carga | • | | • | | • | | • | | • | |
| Transporte doméstico país exportador | • | | • | | • | | • | | • | |
| Aduana país exportador | • | | • | | • | | • | | • | |
| Maniobras de descarga/carga | • | | • | | • | | • | | • | |
| Transporte principal (internacional) | • | | • | | • | | • | | • | |
| Maniobras de descarga/carga | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| Aduana país importador | | • | | • | | • | | • | | • |
| Transporte doméstico país importador | | • | | • | | • | | • | | • |
| Maniobras de descarga | | • | | • | | • | | • | | • |

Fuente: Harter, Jhon (1990). "El lenguaje del comercio". Glosario de términos de uso frecuente del Sistema Comercial Internacional. Servicio Informativo y Cultural de los Estados Unidos (versión en español).

Cuadro 2.2
Impacto en el precio de las mercancías por tipo de incoterm

| Descripción | | Precio de venta de la mercancía |
|-------------|---|---|
| EXW | Ex Works | No Incluye fletes, seguros, maniobras ni despacho |
| | En fábrica | |
| FCA | Free Carrier | Puede o no incluir fletes, seguros, pero incluye maniobras y despacho de exportación |
| | Libre transportista | |
| FAS | Free Alongside Ship | Incluye fletes y seguros al costado del buque e incluye despacho de exportación. |
| | Libre al costado del buque | |
| FOB | Free On Board | Incluye fletes, seguros, maniobras hasta cruzar maniobras hasta cruzar la borda del buque y despacho de exportación. |
| | Libre a bordo | |
| CFR | Cost and Freight | Incluye fletes hasta puerto de destino, maniobras hasta cruzar la borda del buque y despacho de export. |
| | Costo y flete | |
| CIF | Cost, Insurance and Freight | Incluye fletes y seguro hasta puerto de destino, maniobras hasta cruzar la borda del buque y despacho de exportación. |
| | Costo, seguro y flete | |
| CPT | Carriage Paid To | Incluye fletes hasta punto de destino, maniobras de carga en el lugar convenido y despacho de exportación. |
| | Porte pagado hasta.. | |
| CIP | Carriage and Insurance Paid To | Incluye fletes y seguros hasta punto de destino, maniobras de carga en el lugar convenido y despacho de export. |
| | Porte y seguro pagado hasta.. | |
| DAF | Delivered at Frontier | Incluye fletes y seguros hasta frontera de export., maniobras de carga en el lugar convenido y despacho de exportación. |
| | Entrega en frontera | |
| DES | Delivered Ex Ship | Incluye fletes, maniobras y seguro hasta puerto de destino, y despacho de export. |
| | Entrega en buque en puerto de destino | |
| DEQ | Delivered Ex Quay | Incluye fletes y seguro hasta puerto de destino, maniobras de descarga y despacho de exportación. |
| | Entrega en muelle de destino con derechos pagados | |
| DDU | Delivered Duty Unpaid | Incluye fletes y seguro hasta lugar convenido país de destino, y despacho de export. |
| | Entrega en destino con derecho no pagados | |
| DDP | Delivered Duty Paid | Incluye fletes y seguro hasta lugar convenido país de destino, despacho de exportación y despacho de importación. |
| | Entrega en destino con derecho pagados | |

Fuente: Elaboración propia, con base en diversas fuentes del comercio internacional.

2.5 Envíos en “*contenedor completo*” (FCL) contra “*contenedor consolidado*” (LCL), y sus implicaciones en los costos de transporte

En la actualidad, los embarcadores de mercancías tienen mayor variedad de servicios de transporte para llevar a cabo sus envíos sobre redes globales a cualquier parte del mundo, caracterizadas por la efectividad en el manejo de la carga. Las facilidades existentes, sobre todo para aquellas pequeñas y medianas empresas que generan bajos volúmenes de carga, han permitido mejores esquemas de operación del transporte que complementan a las grandes compañías que generan mayores volúmenes de carga. En efecto, el contar con altos volúmenes de carga pueden realizarse envíos en *contenedor completo* (FCL, *Full container Load*), lo cual posibilita a los transportistas ofrecer bajos costos y un mejor servicio, resultando un ahorro en tiempo y dinero. Para el caso de volúmenes de carga reducidos por parte de los embarcadores, los sistemas de

consolidación o *contenedor consolidado* (LCL, *Less Container Load*), son los mecanismos más eficientes que permiten reducir los costos.

En la práctica, el costo F por unidad de carga (por ejemplo, tonelada) para el caso FCL, siempre es menor que el costo c_L por unidad de carga del sistema LCL, el cual varía por el tipo de carga, peso y/o volumen ($k \text{ m}^3$) que se utiliza del contenedor, es decir: $F < kc_L$. En parte, esta última expresión se debe a que en un sistema de consolidación, el costo de transporte se incrementa porque incluye el costo de la recolección de carga que se realiza con vehículos generalmente pequeños.

Por lo antes comentado, establecer ¿cuál es el volumen de carga suficiente o más conveniente para que el expedidor minimice sus costos de envío? se convierte en el cuestionamiento principal entre estas dos variantes de servicio. El planteamiento más común para descifrar dicho cuestionamiento está dado por la relación F/c_L , la cual permite estimar el tamaño de los envíos (punto de inflexión), desde el punto de vista del expedidor, considerando las tarifas que anteponga el transportista. El comportamiento general de esta relación es igual a uno, hasta cierto volumen de carga; a partir del cual surgen economías de escala que sugieren la negociación de tarifas, bajo el esquema FCL (en el ejemplo de la figura 2.6, $F/c_L = 1.0$ hasta 14 ton).

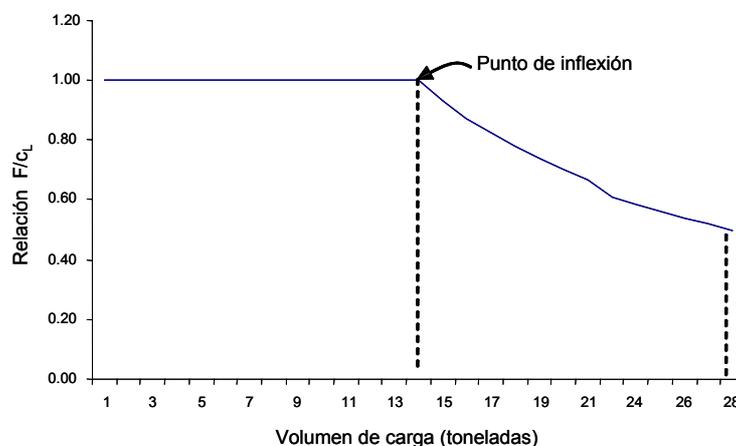


Figura 2.6
Punto de inflexión de la relación de los costos FCL y LCL

Fuente: Eijs (1994).

A manera de comentarios:

1. Un esquema de *contenedor completo* (FCL) exige un mínimo de carga para garantizar economías de escala y menores tiempos de espera.

2. El envío de productos por medio de contenedor completo implica un costo por contenedor, sin importar prácticamente el tipo o mezcla de productos que se muevan.
3. El esquema de *contenedor consolidado* (LCL) implica consolidar cargas impactando directamente de manera negativa en el tiempo de espera y de recorrido de las mercancías.
4. Desde el punto de vista del transportista, cuando su servicio se paga por unidad de carga (por ejemplo, tonelada movilizada), en un esquema de *contenedor consolidado*, el punto de inflexión en la figura 2.6 representa el volumen mínimo de carga que le garantiza cubrir sus costos operativos, y obtener una ganancia mínima.
5. Debido a que $F < kc_L$ la diferencia entre $F - c_L$, siempre observará un valor negativo de magnitud τ^- . Sin embargo, una mejora en la coordinación del sistema de consolidación y de transporte, permite una reducción de los costos $-\Delta c_L$, y por tanto un decremento de la diferencia con respecto a F ; es decir, $F - \Delta c_L = -\Delta\tau^-$, buscando en la medida de las posibilidades alcanzar un valor cercano a cero (véase figura 2.7).

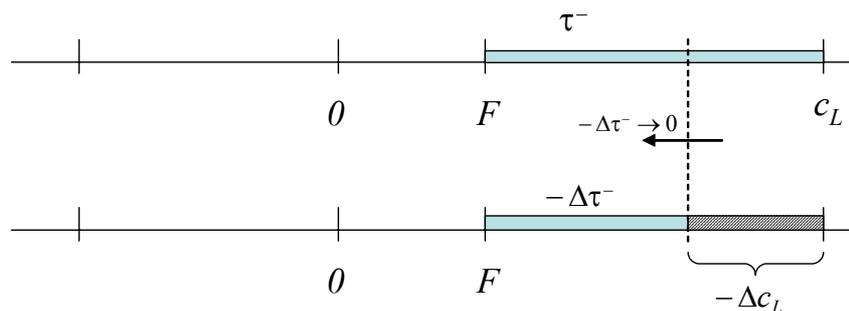


Figura 2.7
Efecto en el costo de transporte por una mejora en el sistema de consolidación de carga

3 Política de inventario y la elección del modo de transporte

Se presenta un análisis general de las decisiones sobre la elección del modo de transporte en función de la política de inventario. Así, en la primera sección se trata el tema de la relación del transporte y la política de pedido, con un enfoque unimodal de transporte. En una segunda sección se aborda el tema, pero desde una óptica multimodal (transporte combinado) y la importancia de su coordinación para el sistema de inventarios. Más adelante, se hace referencia a los factores relevantes del transporte, identificados por algunos autores como los principales elementos para la selección no sólo del modo de transporte, sino de las rutas multimodales y la combinación idónea de modos (cadenas de transporte). Esta última sección se complementa con una interesante propuesta de evaluación de las rutas multimodales de transporte, la cual permite la elección de la ruta más adecuada de acuerdo con un análisis de intercambio (*trade off*) entre costo y tiempo.

3.1 Relación del modo de transporte, y la política de pedido

Como se ha venido mencionando, aproximadamente el costo de transporte por envío crece linealmente con su tamaño, por tanto, grandes variaciones pueden ser motivo suficiente para pensar en cambiar de modo de transporte. Daganzo (1996), afirma que algunos modos de transporte pueden mostrar bajo costo por envío, y uno alto por producto; otros suelen ser lo opuesto.

La elección de un modo de transporte que permita reducir el costo de los envíos, dependerá precisamente en gran medida de los volúmenes de carga que se estén manejando, es decir, de la política de inventario. Al respecto, la figura 3.1 muestra tres curvas que representan los costos de transporte por envío, como una función de su tamaño. Nótese que el mejor modo depende del tamaño del pedido; conforme éste crece, se tiende a favorecer a los modos con más bajos costos variables y altos costos fijos.

Si el embarcador opera su propia flota, las curvas de la figura 3.1 podrían representar diferentes tipos de vehículos, e indicar el más económico para un particular tamaño de envío. Sin embargo, en este caso no es tan flexible la elección del vehículo como en el transporte rentado, debido a que los embarcadores no podrían cambiar frecuentemente su flota, tantote ahí que deberán recurrir a una curva más apropiada para evaluar los costos de transporte. Adicionalmente, es de destacar que la envolvente formada por las curvas de costos evidencia incrementos súbitos en el costo de transporte por envío. Aunque no es cóncava dicha curva, la envolvente podría ser inclusive sub-aditiva y creciente (Daganzo, 1996).

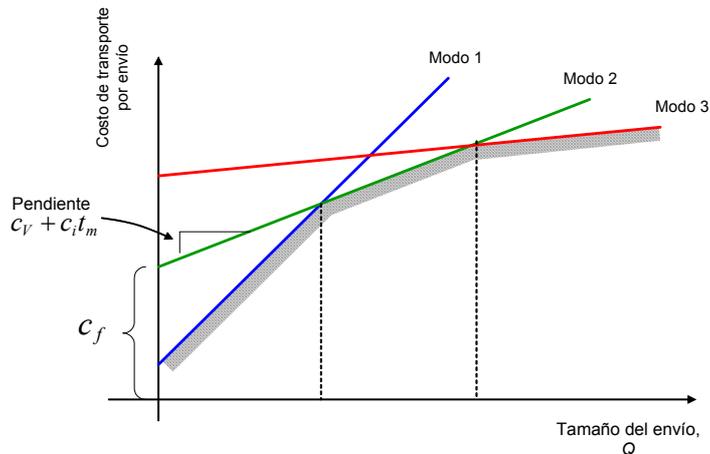


Figura 3.1
Relación entre el tamaño del pedido y su costo por diferentes modos de transporte

Fuente: Daganzo (1996).

Obsérvese que la comparación de los diferentes modos de transporte, incluye el costo del inventario en tránsito ($c_i t_m$). La razón principal se debe a que su elección está muy relacionada con las bondades del nivel de servicio que brinda cada modo de transporte, en donde la velocidad de entrega (tiempo en tránsito) de los productos, junto con el costo de transporte, suelen ser los atributos más importantes que favorecen la elección del modo de acuerdo con los volúmenes de carga. Sin embargo, dado el costo en tránsito de las mercancías, en general los modos más rápidos se ven favorecidos para mover productos más valiosos. Así, a los modos más lentos se asignan mayores volúmenes de carga de menor densidad económica, propiciando un costo de inventario en tránsito más grande, pero con el menor costo por unidad movilizada. En contraparte, los modos más rápidos suelen presentar tarifas más altas por unidad de carga transportada con costos de inventario en tránsito menores, para bajos volúmenes de carga (véase figura 3.2).

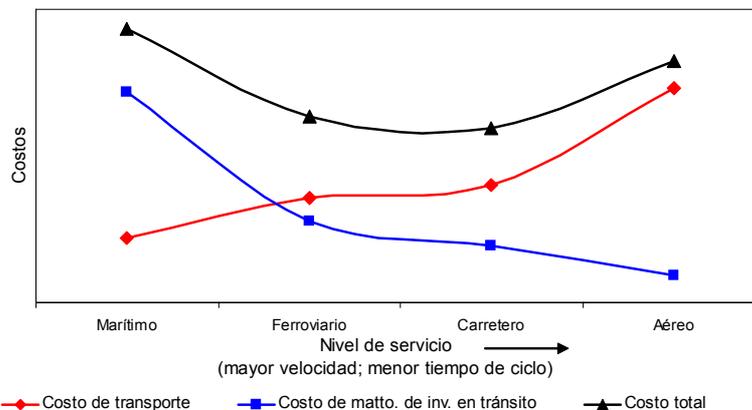


Figura 3.2
Costos totales de transporte y de inventario en tránsito

3.2 Transporte combinado y la importancia de su coordinación

Una derivación de la sección anterior está determinada por la necesaria combinación en una especie de cadena, de los diferentes modos de transporte para el movimiento de los productos. En el ámbito internacional un modo generalmente no opera de manera independiente y sí en cambio de manera complementaria. Conforman grandes cadenas multimodales para dar respuesta a los cambios en los requerimientos de la gestión de la cadena de suministro en mercados y sistemas de distribución globales.

El uso combinado para potenciar las ventajas inherentes a los distintos modos de transporte no ha sido del todo explotado, ya sea por las barreras naturales de las diferencias operativas que existen entre ellos, la escasez de planes y programas de apoyo a su expansión por parte de las autoridades, o simplemente por los *usos y costumbres* de los embarcadores, o ignorancia de éstos sobre las ventajas competitivas de esa modalidad de transporte, denominado “multimodal”.

Entre los factores favorables del transporte multimodal destacan el costo y el aumento de la capacidad para mover grandes volúmenes de carga. Esta modalidad permite también a su vez el uso adecuado de la infraestructura, y promueve la distribución equilibrada de la carga por modo. Impacta en los costos sociales por medio de la reducción de la contaminación, consumo de energía y aumento de la seguridad.

Sin embargo, el transporte multimodal sólo se convierte en una alternativa real cuando opera con altos niveles de coordinación para reducir los denominados “*costos de fricción*”. Los costos de fricción se definen como el sobre-coste que constituye una medida de ineficiencia en las operaciones que se traducen en precios más elevados, demoras en los plazos de entrega, menos disponibilidad de servicios de calidad, limitaciones del tipo de mercancías, más riesgos de desperfectos, procedimientos administrativos más complejos, entre otros.

Más específicamente, el transporte multimodal supone una reordenación de los recursos de las empresas, en donde el objetivo se concentra en administrar el flujo de mercancías sobre una cadena sucesiva de modos que se consolida a partir del resurgimiento de las cadenas de suministro internacionales.

Por fortuna, las condiciones internacionales del mercado actualmente impulsan de manera “natural” la evolución del sistema de transporte multimodal. Un buen número de servicios ha resultado de iniciativas por parte de algunas compañías. No obstante, Dewitt y Clinger (2000) señalan que el crecimiento del transporte multimodal obedece a cuatro factores principales: a) medición, entendimiento y respuesta del papel que juega el multimodalismo en los cambios de los requerimientos del cliente y la hipercompetitividad de la cadena de suministro en un mundo global; b) mayor confiabilidad y flexibilidad de respuesta a cambios en

los requerimientos del cliente, mediante la uniforme e integrada coordinación del flujo de carga a través del equipo de diversos modos; c) conocimiento actual y futuro de las opciones operativas y alternativas multimodales, así como el potencial para mejorar las tecnologías de la información y las comunicaciones; y d) atención a las restricciones y coordinación de la capacidad de la infraestructura disponible, incluyendo las relacionadas a la política y regulación, así como a una mejor gestión de infraestructura existente, considerando las futuras inversiones.

Lo anterior propició, por ejemplo, que el transporte terrestre sea mucho más importante para las líneas navieras de lo que fue en el pasado. Hace veinte años, el tránsito regular de Hong Kong a Nueva York era de 40 días por medio de un servicio totalmente marítimo a través del Canal de Panamá. A finales de los setenta, el transporte multimodal se convirtió en una opción. La carga de Hong Kong se descargaba en la costa occidental, y trasladada a Nueva York por ferrocarril durante un tiempo de tránsito de 30 días. En 1984, el desarrollo del servicio integrado de doble plataforma de la costa occidental redujo aun más el tránsito a 24 días. Para 1990, el servicio directo de Hong Kong a la costa occidental y subsecuentes mejoras al sistema intermodal, estableció un servicio de 17 días. Se trata de una reducción en el tiempo en tránsito de más del 50% (Prince, 1998). El desarrollo no se debe únicamente a la tecnología intermodal, sino a la mayor importancia otorgado al proceso integrado con énfasis en la coordinación.

Un estudio realizado en Alberta, Canadá, concluye que los principales factores que los embarcadores toman en cuenta para seleccionar un servicio de transporte multimodal, en orden de la importancia otorgada, son: las tarifas o precio de transporte; confiabilidad del servicio; disponibilidad/adecuado equipo de transporte, y el tiempo en tránsito (Alberta, 2004).

Los resultados anteriores, parecen confirmar que la mayoría de los usuarios buscan una cadena de transporte económica y confiable para trasladar sus mercancías. Sin embargo, con la caída constante de las tarifas los usuarios se percatan de que pueden obtener tarifas bastante competitivas de cualquier cadena de su elección. Como resultado de esta situación, elegirán los servicios multimodales que brinden el mejor nivel y que cumplan con su estrategia de suministro. Desde luego, esto último se encuentra muy relacionado con el tiempo en tránsito o la velocidad; para muchos usuarios, dicho concepto posiblemente les interesará para plantear una reducción de sus costos por medio de una adecuada elección y combinación de la cadena de transporte para el movimiento de sus productos. Ello, también les permitirá obtener una reducción de sus costos si hacen una adecuada distribución modal de sus mercancías. Los usuarios están en busca de una completa certidumbre de que las mercancías llegarán a tiempo, e intactas al menor costo.

Desde el punto de vista de la eficiencia en el control de los inventarios, los objetivos del transporte multimodal generalmente se orientan hacia los siguientes dos aspectos fundamentales:

- a) Atender integralmente los pedidos de los clientes, asegurando la entrega, cantidad y calidad del producto solicitado.
- b) Combinar los modos de transporte de menor costo de flete (barco, ferrocarril) con los modos de costo más elevado (avión, camión) cuando sea necesario, ya sea para cubrir la demanda programada; retrasos de embarques; pérdidas de embarques; cubrir faltantes, o urgencias, con un enfoque de bajo costo.

3.3 Los factores relevantes del transporte multimodal

Para Banomyong y Beresford (2001), la competitividad internacional del comercio está cambiando enormemente ante la influencia de varios factores, los cuales aumentan los costos totales de transporte. Entre ellos, los asociados a la transferencia física de los bienes, en donde la información se convierte en una pieza esencial en las negociaciones mercantiles del comercio internacional, y en los costos de capital que se incurren durante el desplazamiento de los productos, es decir, el costo del inventario en tránsito. El nivel de incertidumbre en la cuantificación del costo (directo como indirecto) es una cuestión que enfrentan las empresas y que perjudican constantemente a los embarcadores. Para estos autores, las consideraciones mencionadas indican que las oportunidades de comercio pueden beneficiarse con servicios de transporte multimodal mejor organizados.

La elección del modo de transporte ejerce un impacto directo en la eficiencia del sistema de transporte multimodal. Dependiendo de los modos combinados, el desempeño del sistema multimodal se verá afectado. Simples modelos de costo-distancia entre autotransporte y ferrocarril son comunes en la literatura para movimientos locales. Para viajes largos (internacionales) se modela la relación barco contra avión. De acuerdo con Banomyong y Beresford (2001), existen diversos modelos creados para ayudar al tomador de decisiones a realizar la elección o combinación de los modos de transporte, no sólo para minimizar los costos y los riesgos, sino que satisfaga los requerimientos del nivel de servicio.

Beresford (1999), desarrolló un modelo que considera los costos incurridos por los distintos modos de transporte (autotransporte, ferrocarril, barco y canales de navegación), y en las zonas de transferencia intermodal (puertos, terminales de carga ferroviarias, terminales interiores intermodales).³ El modelo se desarrolla

³ Cuando diferentes modos son utilizados en el transporte de mercancías, se incurre en un costo por concepto de transferencias. Dicho costo es el pago por transferir la carga de un modo de transporte a otro. La transferencia puede ser relativamente simple, de un tren a un camión. Alternativamente puede ser más compleja, como la descarga de cajas en un muelle que pueden transferirse hasta una terminal aérea. Dichas maniobras son consideradas como los costos de "manipulación" de la carga. Los gastos de transferencia pueden ser fijos o variables. Como en el transporte, dichos costos pueden calcularse sobre una unidad fija por unidad de peso, o con base en unidad de volumen. Dependen de la localidad donde se realiza la transferencia. De esta manera, la diferencia en el costo puede estar sujeta a factores tales como: costo de la mano de obra local, o por el tipo de equipo para realizar las maniobras. De la misma manera, el costo de transferencia entre distintos modos de transporte es muy diferente.

para el caso del movimiento *todo superficie*, es decir, no incluye el modo aéreo. Establece cuatro etapas principales. Desde la forma más básica (figura 3.3), pasando por formas intermedias (figuras 3.4 y 3.5), hasta la forma más integral (figura 3.6).

La premisa fundamental de este modelo considera que el costo de transporte varía entre los modos. La pendiente de las curvas refleja el valor del costo. Para ciertos volúmenes de carga, se establece que el transporte marítimo es el de menor costo por tonelada por distancia; por su parte, el autotransporte se considera el más caro, normalmente después de cierta distancia. Por su parte, desplazamiento por canales y el ferrocarril en cierta forma son juzgados como costos intermedios.

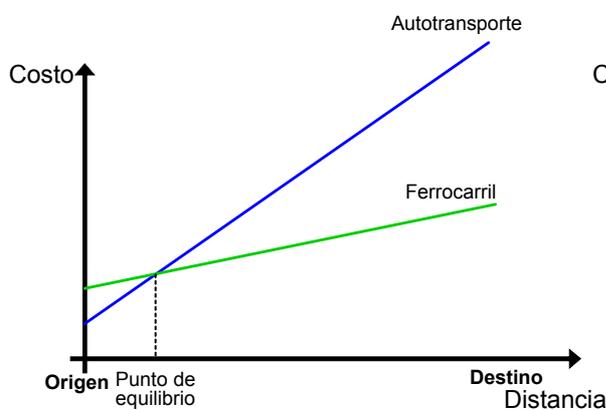


Figura 3.3
Alternativa unimodal

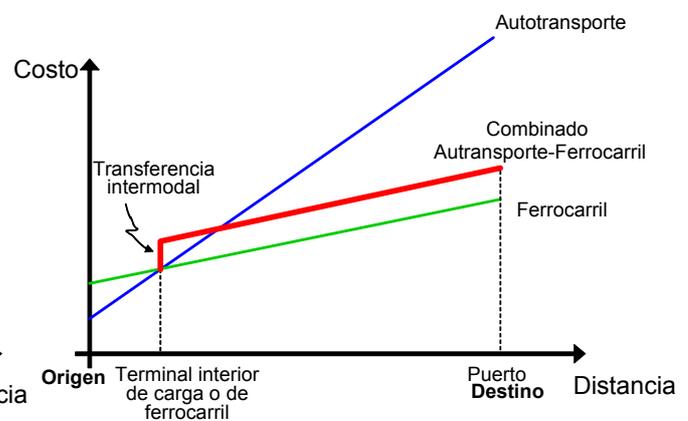


Figura 3.4
Transporte combinado
Autotransporte-Ferrocarril

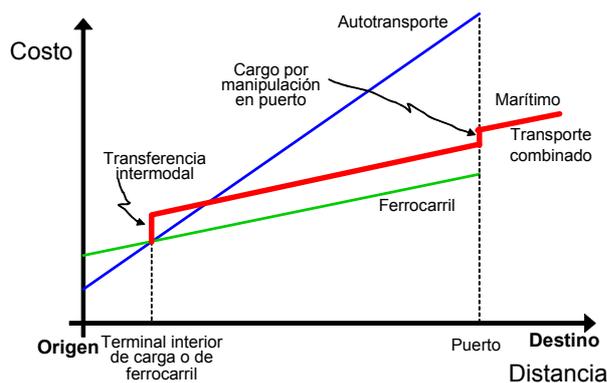


Figura 3.5
Transporte Combinado
Autotransporte-Ferrocarril-Marítimo

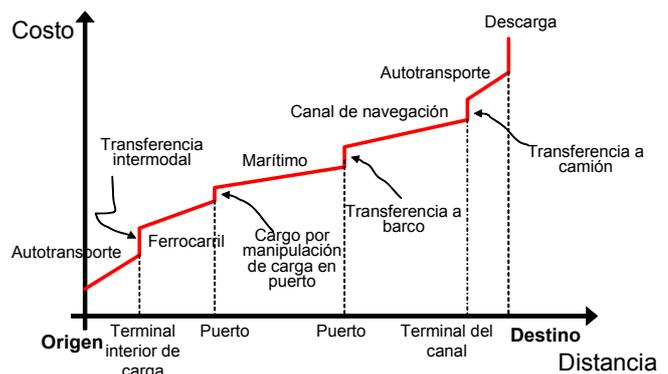


Figura 3.6
Transporte multimodal desde
el origen hasta el destino

Fuente: Beresford (1999).

En todos los puertos y terminales intermodales interiores de carga se aplica un pago por el manejo de la carga, sin considerar algún tipo de servicio de valor agregado. En las figuras anteriores, dicho valor está representado por la curva vertical dentro del proceso del movimiento de carga. La altura de la curva vertical es proporcional al nivel del pago (costo). De esta manera, dependiendo de la ruta seleccionada y la combinación de los modos, el costo de transporte es muy diferente. Por lo anterior, Beresford (1999), establece que los factores relevantes en el transporte multimodal son: costo; tiempo; combinación de los modos de transporte; y la transferencia multimodal. Otros autores agregan factores tales como: tipo de mercancía; y el reparto de la carga por diferentes modalidades de transporte (Bookbinder y Neil, 1998; Ruesch, 2001).

3.4 Evaluación y selección de las cadenas multimodales de transporte

Con la apertura y formulación de los acuerdos de libre comercio, muchas empresas ahora tienen la oportunidad de expandir su mercado. Sin embargo, se reconocen dos obstáculos significativos: el primero, es que los envíos de carga o productos involucran varias rutas y modos de transporte que observan diferentes costos; el segundo, se relaciona con las dificultades (por ejemplo, congestión, demoras administrativas, etc.) al cruzar las fronteras (Giermanski, 1998).

Para el segundo caso, soluciones puntuales pueden implementarse por las instituciones gubernamentales correspondientes; para el primero, es necesaria una evaluación destinada a la selección del modo de transporte. Vale decir que para tránsitos internacionales, existe evidencia empírica de que el transporte multimodal puede ser más competitivo en comparación con un sólo modo.

Por ejemplo, utilizando un camión sobre una ruta específica, un fabricante puede enviar un contenedor con carga a la Ciudad de México desde Montreal, Canadá. Si ese mismo contenedor se transporta por otra ruta recurriendo al transporte marítimo (camión-barco-camión) como segmento principal, es posible que el costo de esta combinación sea más barato, pero con el inconveniente de llegar dos días después.

Por lo anterior, y desde el punto de vista del expedidor, las decisiones sobre la elección de la ruta y los servicios de transporte a utilizar, demandan soluciones *no dominadas*, basadas en los siguientes dos objetivos:

- a) *Maximizar (nivel de servicio), o minimizar (tiempo en tránsito)*
- b) *Minimizar (costo total)*

Esto es, cada una de las rutas poseen un costo y un nivel de servicio en función del tiempo en tránsito de las mercancías, según el modo o combinación multimodal disponible; por tanto, la decisión de elección de alguna alternativa se resuelve a partir de la evaluación previa de los dos criterios anteriores, buscando

el mejor nivel de servicio posible y el más bajo costo. En donde el nivel de servicio representa el *tiempo en tránsito* desde el origen hasta el destino, incluyendo el cruce en las fronteras del país y otras demoras. Mientras que el costo se compone de la suma de los gastos incurridos en todos los segmentos de transporte, más cualquier cargo por maniobras de manipulación y entrega (*costo de transferencia*).

3.4.1 Análisis del intercambio (*trade off*) costo y nivel de servicio de transporte

Una manera de facilitar la toma de decisiones de diversas alternativas de transporte, sobre los criterios de nivel de servicio y costo, puede definirse con ayuda de la construcción de una frontera eficiente de soluciones de *Óptimo de Pareto* para un problema con dos objetivos [*minimizar (tiempo en tránsito)*; *minimizar (costo total)*]. En efecto, desde un punto de vista analítico no es necesario escoger un objetivo sobre el otro. En vez de ello, los modelos de optimización pueden ayudar a hacer evaluaciones de ambos objetivos y seleccionar el más conveniente.

En la figura 3.7 las rutas multimodales localizadas sobre la “frontera eficiente” son definidas como soluciones *no dominadas*. Una mejora en el nivel de servicio (reducción del tiempo en tránsito), implica un aumento en el costo de transporte, o viceversa. Una ruta que conecta un par origen-destino (O-D) es *no dominada* con respecto a otra existente si al menos es mejor en tiempo en tránsito o en costo, y es estrictamente superior en alguno de esos criterios. Una ruta multimodal es *dominada* si existe otra ruta (con el mismo par O-D) que la supere en ambos objetivos.

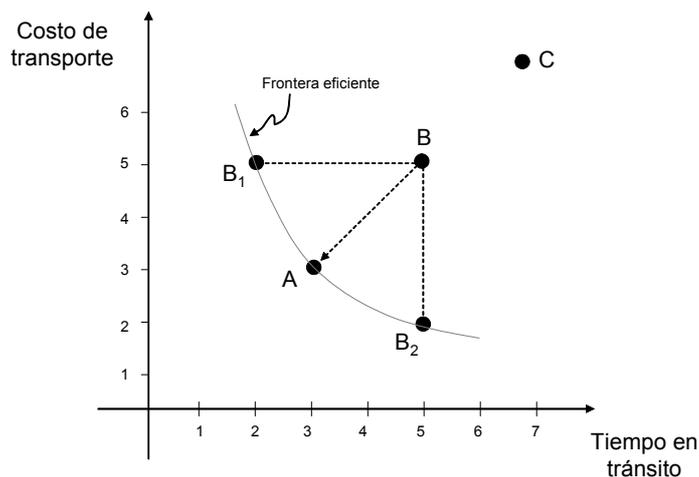


Figura 3.7
Óptimo de Pareto para la elección de rutas multimodales de carga

Fuente: Shapiro (2000).

La figura 3.7 muestra el intercambio (*trade off*) entre el costo de transporte y el tiempo en tránsito (medido en días) del proceso de toma de decisiones para seleccionar una ruta (unimodal o multimodal). Supóngase que la política actual de una empresa establece que el tiempo de entrega (nivel de servicio) es de cinco días, y que su costo de transporte corresponde al nivel que señala la alternativa B, misma que se encuentra fuera de la frontera eficiente. Utilizando un modelo de optimización, la alta dirección tiene la oportunidad de identificar y poner en práctica la ruta B_2 sobre la frontera eficiente, la cual baja el costo de transporte, quizá con la negociación de descuentos por volumen en las tarifas de transporte, pero manteniendo la misma política de servicio al cliente.

Alternativamente, la compañía podría pensar en gastar la misma cantidad en el transporte de sus productos, pero exigir mayor coordinación para mejorar el nivel de servicio (reducir el tiempo en tránsito), con lo cual se podría ofrecer una mejora del servicio al cliente poniendo en práctica la alternativa B_1 no dominada. Otra opción es cambiar de ruta (alternativa A), buscando al mismo tiempo reducir el costo de transporte y mejorar el nivel de servicio para un plazo de entrega hasta de tres días. En contraste, la ruta C es tan distante de la frontera eficiente que son necesarias mejoras significativas para hacer de ella una opción viable.

3.4.2 Evaluación competitiva de las opciones multimodales de transporte

De acuerdo con la sección anterior, la elección de una ruta de transporte se centra únicamente en aquellas alternativas no dominadas para cada par origen-destino. Sin embargo, seleccionar la que proporcione el mayor beneficio no es tan evidente para el caso de un conjunto de opciones localizadas sobre la frontera eficiente. Por tanto, es necesario diseñar un procedimiento de evaluación que permita dilucidar la mejor alternativa (ruta).

Una propuesta de evaluación radica en establecer un parámetro que afecte al tiempo en tránsito, medido a partir del costo de capital de las mercancías durante su transporte.

El mayor tiempo en el movimiento de un producto es cuando éste se encuentra en tránsito. Entre más prolongado es el tiempo en tránsito, el producto se encuentra indisponible para su consumo, implicando con ello un aumento en los costos de capital; daños a la mercancía; seguros e inventarios de seguridad; es decir, un aumento de los costos de *inventario en tránsito*.

La evaluación apropiada de este factor permite al proveedor y su cliente decidir cuánto reducir el valor del tiempo en tránsito. No obstante la dificultad de medir el costo del inventario en tránsito, algunos autores asumen que cada contenedor incurre en un cargo de x dólares por día por tiempo en tránsito. Con este elemento, los costos totales de transporte se dividen en dos componentes principales: a) el costo de transporte K ; y b) el costo de inventario en tránsito x .

En tal caso, el intercambio entre el costo y el tiempo en tránsito de rutas *no dominadas*, de hecho pueden ser ordenadas.

De esta manera, el costo total de transporte $y = K + Tx$; donde T es el tiempo en tránsito asociado a la ruta. Para cada ruta *no dominada* entre un origen-destino específico, la construcción total de las curvas permite determinar el rango x para la cual, la alternativa de transporte ofrece el costo total más bajo (Bookbinder y Neil, 1998).

Para el caso de las tres rutas que se presentan en el cuadro 3.1, para cualquier valor de x , la ruta 2 nunca alcanzará el menor costo total de las tres; por tanto, se elimina del análisis; en este caso se logra la situación más simple donde existen dos rutas *no dominadas* para un par origen-destino en particular. Una es más barata y lenta (ruta 1), la otra es más rápida pero de mayor costo (ruta 2); ante esta disyuntiva, el valor de x en donde es indiferente la elección, es de \$311.33 por día por tiempo en tránsito. Para valores de $x < \$311.33$, la elección se inclinara por la ruta 1; por el contrario, la ruta 2 será preferida para valores mayores de x .

Cuadro 3.1
Elección y evaluación de rutas multimodales no dominadas

| Ruta | Modos | K (\$) | T (horas) | x (\$/día/t) | y (\$) |
|------|------------------|-------------|----------------|-------------------|-------------|
| 1 | Carr-fc-mar-carr | 6,269.4 | 8.5 | 311.3333 | 6269.4 |
| 2 | Carr-fc- fc-carr | 6,945.7 | 8.0 | | 6945.7 |
| 3 | Carr-mar-carr | 6,269.4 | 5.5 | | 6269.4 |

Nota: Carr = carretero; fc.=ferrocarril; mar = marítimo.

Fuente: Bookbinder y Neil (1998).

4 Los modelos de inventario y las variables fundamentales del transporte

El estudio de la coordinación multieslabón cliente-proveedor ha logrado captar una significativa atención (Goyal, 1976; Banerjee, 1986; Goyal, 1988; Goyal y Gupta, 1989; Woo, *et al*, 2001; Dong y Xu, 2002; Li, *et al*, 1996; Hill, 1997 y 1999; Klastorin, *et al*, 2002; Kim, *et al*, 2002; Munson y Rosenblatt, 2001; Khouja, 2003; Viswanathan y Piplani, 2001; Piplani y Viswanathan, 2004; Gaytán y Pliego, 2002; etc). Sin embargo, la mayor parte de esta literatura no incluye explícitamente algún tipo de relación logística o de asociación con el transporte, el cual ha ido tomado importancia creciente en la gestión de la cadena de suministro. Carter y Ferrin (1995), apuntan que la coordinación proveedor-cliente posiblemente no podrá optimizar sus beneficios sin involucrar a los transportistas. Por esta razón, en años recientes muchos investigadores, de manera paulatina han considerado ya las variables fundamentales del transporte en el estudio de la coordinación de inventarios.

En general, los investigadores que tratan el tema de la gestión de inventarios, que involucran aspectos de la operación del transporte, los han dado por llamar *Problema conjunto de inventario-transporte (JTIP)*, por sus siglas en inglés). Precisamente, Ward y Zhai (2004), presentan una revisión de los artículos que atienden este tema, en donde reportan siete categorías de problemas de este tipo:

1) El problema de ruteo-inventario (*IRP*, por sus siglas en inglés), y 2) *IRPSF* con instalaciones satelitales, son los dos problemas clásicos estudiados por muchos investigadores. En estos se analizan las actividades tácticas del sistema logístico, por ejemplo, determinación del ruteo de una flota vehicular para visitar a los clientes, decidiendo el período y tamaño de lote de entrega para cada uno de ellos. 3) Los problemas estratégicos de ruteo-inventario (*SIRP*, por sus siglas en inglés), atiende cuestiones relacionadas con decisiones de planeación de recursos, por ejemplo, el objetivo de minimizar el tamaño (o costo) de la flota vehicular requerida para el transporte de los productos. 4) El problema de ruteo-vehicular (*RVP*, por sus siglas en inglés), que estrictamente hablando no es un problema *JTIP*, pero es un tópico con una larga historia que, en ese sentido, conjunta las etapas para un *JTIP*. 5) El problema de envío-ruteo (*SRP*, por sus siglas en inglés) el cual puede ser visto como un programa multi-depósitos *JTIP*, involucra el diseño de un conjunto de rutas para una flota con pedidos heterogéneos atendiendo un conjunto de centros de producción y de consumo de un sólo producto. Las cantidades cargadas y despachadas se determinan por la tasa de producción y consumo de cada uno de los centros, en función del nivel de inventario. 6) El problema de localización de inventarios (*IAP*, por sus siglas en inglés), asume que las rutas recorridas por los vehículos son predeterminadas, y trata sobre cómo localizar el inventario en los clientes. 7) El problema de entrega-despacho (*DDP*, por sus siglas en inglés), involucra la asignación de los vehículos

a los itinerarios, por ejemplo, conjunto predeterminado de clientes con cantidades fijas de entrega al menor costo.

En términos generales, los tipos de problemas señalados, en su gran mayoría están más enfocados al diseño de rutas de transporte y la determinación del tamaño del lote de distribución en un contexto multieslabón, es decir, tratan el tema en el contexto de un proveedor que atiende múltiples clientes por medio de una flota vehicular para el caso unimodal; en este sentido, puede observarse que no atienden el problema de la gestión misma de los inventarios y su coordinación en el abasto; más aun, no se evalúa la influencia directa del transporte y sus posibles combinaciones (transporte multimodal). En otras palabras, se detecta que las decisiones de la función transporte siguen siendo predeterminadas.

En este capítulo se describen algunos de los pocos artículos más recientes que tratan el tema de la coordinación de inventarios entre cliente-proveedor, que involucran aspectos relacionados con las variables fundamentales del transporte.

4.1 Modelos de coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte (revisión de la literatura)

En esta sección se presentan los modelos de coordinación del sistema de inventarios, que toman en cuenta las variables fundamentales del transporte. Los modelos se clasifican por el tipo de estructura de la cadena de suministro. En este sentido, se identificaron sólo dos categorías: a) la estructura básica de un proveedor y un cliente; y b) la coordinación entre un proveedor y varios clientes; esta última, en el contexto del diseño de la cadena de suministro.

4.1.1 Coordinación entre un proveedor y un cliente

Un primer procedimiento utilizado en la práctica, es conocido como “algoritmo heurístico de transporte”; el cual estudia el impacto de la selección del modo de transporte en el nivel del inventario y considera al costo, tiempo promedio, y variabilidad del tiempo de traslado como los parámetros relevantes del transporte (Villarreal, 2005).

Este algoritmo, propuesto por Constable y Whybark (1978), establece que contrariamente a las políticas de inventarios, que asumen fijos los parámetros relevantes del transporte, asume que las variaciones en los costos de transporte y en el tiempo de entrega influyen de manera significativa en el inventario de seguridad y en el tamaño del pedido. Lo anterior, argumentan dichos autores, se debe a que involucran diferentes opciones o modos de transporte que presentan variaciones importantes entre sí.

El modelo determina de manera conjunta la alternativa de transporte y los parámetros de inventario (punto de reorden y cantidad a ordenar). La clave del algoritmo se basa en la formulación del problema de inventario, incluyendo como variable el tiempo de transporte.

En principio, se define que el costo total anual (TC) puede ser representado por la siguiente expresión:

$$TC = C_t D + C_i v \tau D + C_o D/q + C_r (r - u + q/2)(v + C_r) + C_s (D/q) \cdot \sum (u - r) P_r(u) \quad (4a.1)$$

La cantidad q que optimiza TC , se obtiene mediante la solución iterativa de la siguiente función basada en r , y en los parámetros de transporte, τ , C_t y $P_r(u)$.

$$q = \left\{ 2[C_o D + C_s D \cdot \sum (u - r) P_r(u)] / C_r (v + C_t) \right\}^{0.5} \quad (4a.2)$$

Los parámetros y variables utilizados son:

- C_t = costo unitario de transporte
- C_i = costo anual de mantener un dólar en inventario en tránsito
- C_o = costo de ordenar
- C_r = costo de mantener un dólar en inventario
- C_s = costo unitario de escasez (*backorder*)
- D = demanda anual promedio
- v = costo del producto antes de transportarlo
- τ = tiempo de entrega promedio
- u = demanda durante tiempo de entrega
- μ_u = media conjunta de demanda durante tiempo de respuesta
- $P_r(u)$ = función de distribución de probabilidad de la demanda durante el tiempo de entrega
- q = cantidad a ordenar
- r = punto de reorden

El procedimiento de aplicación del algoritmo consiste de tres fases principales:

- Fase I. Seleccionar una opción de transporte, y estimar los valores óptimos de q y r .
- Fase II. Utilizar q y r para determinar el costo total anual asociado con el resto de las opciones de transporte. Seleccionar la alternativa con el menor costo.
- Fase III. Re-estimar los valores óptimos de q y r para la opción de transporte óptima si es diferente a la previamente seleccionada.

Se supone que el tiempo de respuesta y la demanda diaria se distribuyen normalmente. La media y varianza de la distribución conjunta de la demanda y el tiempo de respuesta están definidos por:

$$u = \mu_d \tau \quad (4a.3)$$

$$\sigma_u^2 = \tau \sigma_u^2 \sigma_d^2 + \mu_d^2 \sigma_\tau^2 \quad (4a.4)$$

Aplicando el algoritmo, es muy favorable para obtener la solución óptima siempre con menor tiempo. La solución óptima de la mayoría de los problemas involucra la alternativa de transporte con el mínimo costo. La relación del costo unitario de transporte/costo del artículo es un indicador valioso para determinar si las decisiones de transporte e inventario se hacen por separado. Si es alto, se separan.

Este algoritmo tiene la ventaja de ser un procedimiento muy sencillo y fácil de aplicar, aunque con la “desventaja” de tener que conocer la distribución de densidad de la demanda y los tiempos de entrega. Por otro lado, aun cuando combina diferentes opciones de transporte, el análisis concluye en la elección de uno sólo. Es decir, no lleva a un análisis de la combinación modal.

Por su parte, Van Eijs (1994), lleva a cabo un análisis sobre dos eslabones de una cadena de suministro, un cliente y un proveedor. Plantea que el cliente compra una familia de N artículos al proveedor y los almacena en un sólo lugar. Los inventarios se revisan periódicamente. En cada período de revisión, el cliente puede colocar una orden de uno o más artículos que llegará L unidades de tiempo después (considerando a L como una constante). Las demandas del artículo i en los períodos subsecuentes se consideran independientes e idénticamente distribuidas de manera aleatoria con media μ_i y varianza σ_i^2 .

El proceso de la demanda, para todos los artículos, se supone independiente de los demás. Establece como objetivo minimizar el costo total promedio por unidad de tiempo, sujeto a la restricción de cumplir con un nivel de servicio predeterminado. Las fuentes del costo están dadas por la acción de ordenar, almacenar, así como del costo del producto y su transporte. Considera un costo por inventario disponible (h_i) del artículo (i) por unidad de tiempo, y uno fijo (a_i) si el artículo i está incluido en el pedido.

Se cuenta con dos opciones para transportar los artículos desde el extranjero hasta el almacén central. La primera se refiere a llevar productos en *contenedor completo* (FCL), para el cual se carga un costo fijo F por transportar los productos, sin importar el tipo ni la cantidad de cada artículo. La segunda opción es transportar los productos en *contenedor consolidado* (LCL), a un costo totalmente variable: c_L incurrido por m^3 utilizando del contenedor. Para $K m^3$ de capacidad del contenedor, resultan economías de escala cuando $Kc_L > F$, como ya ha sido mencionado.

Dicho autor considera una política de inventario del tipo (R, S) con surtido conjunto y decisiones de transporte, utilizando los siguientes pasos:

1. Dado el período de revisión R , calcular el nivel óptimo S_i (ordenar hasta este nivel) de cada artículo utilizando el método de Kok.⁴
2. En cada período de revisión, de acuerdo con la política (R, S) del paso 1, la composición de la orden se determina a través de procedimientos de optimización de una etapa, la cual incorpora el aprovechamiento de economías de escala en los costos de transporte.

A partir de este escenario, Van Eijs (1994), propone un modelo de optimización para resolver el problema de órdenes conjuntas, incluyendo decisiones de transporte: en el período de revisión, las cantidades a ordenar del artículo i se definen de los parámetros de la política básica (R, S) . Si I_i denota la posición del inventario del artículo i , entonces la cantidad a ordenar al inicio está dada por $q_i = \max\{0, S_i - I_i\}$. El problema para el cliente será decidir si las cantidades a ordenar denotadas por el vector $Q = \{q_1, \dots, q_N\}$ tienen que ser aumentadas con un vector de $E = (e_1, \dots, e_N)$ unidades, para tomar ventaja del menor costo por usar la carga completa del contenedor. La decisión de incrementar las cantidades a ordenar no sólo afectan los costos por ordenar, transportar y almacenar en el período actual, sino también en períodos futuros ya que la posición del inventario en el siguiente período de revisión dependerá del aumento de la cantidad del período actual de revisión. Considérense las siguientes variables:

$\Delta C_1(Q, e)$: Suma de los costos extras totales esperados por ordenar y mantener inventario cuando en el período actual de revisión se ordenan $Q + E$ en lugar de Q .

$\Delta C_2(Q, e)$: Costo total esperado ahorrado en transporte cuando en el período actual de revisión se ordena $Q + E$ en lugar de Q .

El modelo de optimización no lineal es el siguiente:

$$\min_E \{\Delta C_1(Q, e) - \Delta C_2(Q, e)\} \quad (4a.5)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{i=1}^N (q_i + e_i) w_i \leq K \quad (4a.6)$$

$$\sum_{i=1}^N (q_i + e_i) w_i \geq \frac{F}{c_L} \quad (4a.7)$$

$$I_i' + q_i \leq I_i + e_i \leq UB_i \quad i = 1, \dots, N \quad (4a.8)$$

⁴ Véase De Kok, A.G. (1990). "Hierarchical production planning for consumer goods". *European J. Oper. Res.* 45, 55-69.

La condición (4a.6) indica que el volumen del pedido no debe rebasar la capacidad del contenedor; la condición (4a.7) establece que el volumen total debe exceder el punto de inflexión F/c_L para obtener ahorros en el transporte. Finalmente la condición (4a.8) permite al tomador de decisiones evadir grandes desviaciones de la política de control de inventarios básica, especificando una cota superior UB_i en la posición del inventario del artículo i justo después del resurtido.

El problema no lineal, anteriormente propuesto puede ser resuelto con técnicas de programación dinámica estándar, sin embargo, debido al gran tamaño que puede tomar un problema de este tipo, el autor diseña un algoritmo heurístico para acceder a la solución.

El estudio numérico de aplicación lo lleva a cabo por medio de la comparación de los resultados, sin y con la estrategia de pedidos conjuntos y decisiones de transporte a diversos casos planteados. El resultado del ejemplo numérico mostró, que los ahorros disminuyeron en alrededor del 20% en caso de que los planes de pedidos y de transporte estén integrados.

Hoque y Goyal (2000), desarrollan una política óptima de integración del sistema de producción-inventario entre un proveedor y un cliente, tomando en cuenta restricciones de capacidad del equipo de transporte. Asumen una tasa de demanda determinista y constante en un horizonte de tiempo infinito; el lote de producción puede ser enviado en órdenes de igual y/o diferente tamaño. Se incurre en un costo de transporte por cada envío. No se permiten faltantes. Los tiempos de transporte y de preparación de una nueva corrida de producción son insignificantes; por tanto, se ignoran. El costo unitario de almacenamiento representa el costo de almacenar una pieza del inventario físico del producto. Costo de preparación de una nueva corrida de producción, el costo unitario de almacenamiento para el proveedor y el cliente, los costos de un envío desde el proveedor hasta el cliente, y la capacidad de transporte son conocidos. El objetivo es minimizar los costos anuales conjuntos incurridos por el cliente y el proveedor, por medio del siguiente modelo de optimización:

$$\text{Minimizar } \frac{B}{Q} + \frac{mb}{Q} + AQ + Q \left[\frac{a}{f(m,e)} + \frac{h_2 - h_1(k^{2e} - 1)/(k^2 - 1) + (m - e)k^{2(e-1)}}{2\{(k^e - 1)/(k - 1) + (m - e)k^{(e-1)}\}^2} \right] \quad (4a.9)$$

$$\text{Sujeto a: } e - \sum_{r=0}^{e-1} k \leq m^r - \frac{Q}{g} \quad (4a.10)$$

Donde:

A_1 = costo de preparación de una nueva corrida de producción

A_2 = costo de un envío del proveedor al cliente

h_1 = costo de almacenamiento por unidad incurrido por el proveedor

h_2 = costo de almacenamiento por unidad incurrido por el cliente

D = demanda por año
 P = tasa de producción
 k = relación, tasa de producción contra demanda
 g = capacidad del equipo de transporte
 z = tamaño del lote más pequeño
 Q = tamaño de la orden
 m = número total de embarques (m es un entero positivo)
 e = número de lotes de tamaño diferente (e es un entero positivo)
 C = costo total anual del sistema integrado

El proveedor transporta la orden Q , completa m envíos en la cual, $e-1$ son diferentes, y $m+1-e$ son iguales. Se asume que $P > D$ y $h_2 > h_1$.

A partir de la solución del modelo anterior, Hoque y Goyal (2000), establecen una serie de propiedades que la solución óptima debe satisfacer. Con la ayuda de dichas propiedades se construye un algoritmo, con el cual determinan la política óptima de integración del sistema de producción-inventario entre un proveedor y un cliente.

Lei, *et al.* (2003), desarrollaron un modelo muy interesante para estudiar las relaciones de colaboración entre el trinomio proveedor-transportista-cliente. El planteamiento del problema se establece en un ambiente donde existe un sólo proveedor que abastece un producto a un cliente, e involucran a un *tercera parte logístico* (3PL-transportista), con funciones de costo cóncavas. Consideran que al adquirir el producto del proveedor, el cliente incurre en costos fijos por ordenar y por manutención del inventario. El proveedor controla el precio de venta al cliente, paga el costo de envío de cada orden colocada en el sitio del cliente, y los de almacenaje del inventario requerido para garantizar el suministro continuo al cliente. El transportista aplica al proveedor una tasa de envío (tarifa), y es el responsable de trasladar el producto desde proveedor hasta el cliente, e incurre en sus propios costos de operación, $a+bQ$ por envío, donde el parámetro a representa el costo fijo por envío (por ejemplo, seguro de la carga por viaje, costo del operador, costo kilómetro, depreciación, etc.), y el parámetro b es el costo variable por unidad de envío. La demanda de mercado $D(x)$, se asume que es una función decreciente convexa del precio del cliente (x); es decir, $D(x) = d/x^e$ donde $e > 1$ representa el índice de elasticidad del precio, y $d > 0$ un escalar.

Bajo estos supuestos, Lei, *et al.* (2003), formula el modelo para cuantificar la rentabilidad de las mejoras en la cadena de suministro. Dichas mejoras buscan aumentar la cooperación y tener una rápida estimación del presupuesto; así como conocer los beneficios a compartir o las cantidades de descuento que se ofrecerá a los socios comerciales en el proceso de negociación.

Se asume que los costos de operación (por ordenar y almacenar unidades), son conocidos por todos los socios.

La nomenclatura utilizada se describe a continuación:

- x = precio unitario de venta del cliente (o distribuidor) en el mercado (como variable de decisión del cliente)
- p = precio unitario de adquisición del cliente ($p < x$) del proveedor (como variable de decisión del proveedor)
- c = costo variable del proveedor por fabricar ($c < p$)
- S_B = costo fijo del cliente por ordenar
- S_S = costo fijo y de procesamiento por orden del proveedor
- a = costo fijo del transportista por embarque (o por orden)
- b = costo unitario de transporte
- H_B = costo unitario de almacenamiento por año, en el que incurre el cliente
- H_S = costo unitario de almacenamiento por año, en el que incurre el proveedor
- Q = tamaño del lote del cliente (o la cantidad embarcada) por orden (como variable de decisión del cliente)
- g = tasa promedio (tarifa) del transportista (como variable de decisión del transportista), y $g > b + a/Q$ donde el costo de operación del transportista por cada pedido se asume como $a > bQ$
- $D(x)$ = demanda anual del mercado, como una función convexa decreciente de x , $D(x) = d/x^e$, donde d es el factor escalar (> 0) y e es el índice de elasticidad del precio (> 1).

Lei, *et al*, (2003), asumen que el proceso de suministro es libre a bordo (FOB), el cual indica que los costos de envío son pagados por el proveedor, y que el precio del venta del proveedor (p) al cliente debe cubrir sus costos de producción (c), el costo fijo promedio por unidad, y los costos de envío (g). Esto significa que debe cumplir $c + g < p < x$. El proceso de suministro subyacente, se muestra en la figura 4.1.



Figura 4.1
Cadena de suministro proveedor-transportista-cliente

Fuente: Lei, *et al*. (2003).

Con estos supuestos, los autores determinan que la función de beneficio de cada uno de los eslabones de la cadena están dados por:

Beneficios del proveedor en función de su precio de venta:

$$\Pi_S(p) = (p - c - g)D(x) - S_S D(x) / Q - H_S Q / 2 \quad (4a.11)$$

Beneficios del transportista en función de su tarifa por envío:

$$\Pi_T(g) = gD(x) - (a + bQ)D(x) / Q = (g - b)D(x) - aD(x) / Q \quad (4a.12)$$

Beneficios del cliente en función de la cantidad de compra y del precio de venta al público:

$$\Pi_B(x, Q) = (x - p)D(x) - S_B D(x) / Q - H_S Q / 2 \quad (4a.13)$$

A partir de las funciones de beneficio definidas y una demanda con función convexa decreciente sobre el precio de venta x , de tipo $D(x) = d / x^2$, se llevó a cabo el desarrollo de los siguientes dos escenarios:

Escenario 1. Determinación de la política óptima en un ambiente sin coordinación.

Vale recordar que en una política sin coordinación, cada uno de los miembros de la cadena de suministro tratará de establecer sus condiciones con el propósito de maximizar sus beneficios individuales.

Por lo anterior, un ambiente no coordinado que involucra un proveedor, un cliente, y un transportista, es un proceso donde el transportista decide su tarifa g , que es aceptada por el proveedor y pagada por el cliente.⁵ El proveedor selecciona su precio p de venta al público, para maximizar sus beneficios anuales con conocimiento de que el cliente va actuar para maximizar sus propios beneficios. Para un precio p , el cliente tomará decisiones sobre las cantidades que ordenará; o Q_B , que minimiza sus costos anuales por ordenar y de almacenamiento, y determina el precio de venta x del mercado, que maximiza los beneficios del cliente. Por tanto, reemplazando $Q_B = (2S_B D(x) / H_B)^{1/2}$ y $D(x)$ por d / x^2 en la ecuación (4.13), el beneficio anual de cliente está dado por:

$$\Pi_B(x | Q) = \frac{d}{x} - \frac{sp}{x^2} - \frac{[2dS_B H_B]^{1/2}}{x} \quad (4a.14)$$

Los cuales, para un p dado, son maximizados cuando el precio de venta en el mercado es de:

$$x_B = \frac{2dp}{d - [2dS_B H_B]} \quad (4a.15)$$

⁵ Julie Gentry (1995), en su estudio sobre relaciones de colaboración estratégicas entre clientes y proveedores, destacó que el 78% de las veces la selección del transportista es decisión de una de las partes, es decir, sólo el 22% toma una decisión conjunta. De la decisión unilateral, 40% son proveedores y el 38% clientes.

Con Q_B , y x_B definidos, los beneficios anuales del proveedor $\Pi_S(p)$ se recalculan sustituyendo estos valores en la función del beneficio original. Luego, haciendo $\partial \Pi_S / \partial p$ se determina el valor de p como:

$$p = \frac{2(c+g)(d^{1/2} - (2S_B H_B)^{1/2})}{d^{1/2} - \theta(2S_B H_B)^{1/2}} \quad (4a.16)$$

Dónde:

$$\theta = 1 + S_S / S_b + H_S / H_B \quad (4a.17)$$

Similarmente, dado Q_B , x_B , y p , y remplazando en la función de beneficios del transportista se recalcula $\Pi_T(g)$; luego, haciendo $\partial \Pi_T / \partial g$ se obtiene la tarifa óptima del transportista (g_{SC}^*) sin coordinación, determinada por:

$$g_{SC}^* = \frac{2(c+b)[d^{1/2} - \theta(2S_B H_B)^{1/2}]}{d^{1/2} - (\theta + 2a/S)(2S_B H_B)^{1/2}} - c \quad (4a.18)$$

Reemplazando g_{SC}^* en (4a.16) se obtienen p_{SC}^* , y este valor en (4a.15) se obtienen x_{SC}^* , lo cual lleva al siguiente enunciado:

En un negocio no coordinado con función de demanda $D(x) = d/x^2$, el precio de venta óptimo para el cliente (distribuidor), la tarifa de carga óptima para el proveedor, y el precio de venta al público está dado por:

$$x_{SC}^* = 8(c+b) \frac{d^{1/2}}{d^{1/2} - (\theta + 2a/S_B)(2S_B H_B)^{1/2}} \quad (4a.19)$$

$$p_{SC}^* = 4(c+b) \frac{d^{1/2} - (2S_B H_B)^{1/2}}{d^{1/2} - (\theta + 2a/S_B)(2S_B H_B)^{1/2}} \quad (4a.20)$$

$$g_{SC}^* = \frac{2(c+b)[d^{1/2} - (1 + S_S/S_B + H_S/H_B)(2S_B H_B)^{1/2}]}{d^{1/2} - (\theta + 2a/S_B)(2S_B H_B)^{1/2}} \quad (4a.21)$$

Los resultados anteriores demostraron que cuando la magnitud de la demanda del mercado (medida por el factor d) para el producto es suficientemente grande, se tiene que: $p_{SC}^* \approx 4(c+b)$, $x_{SC}^* \approx 2p_{SC}^*$, y $g_{SC}^* \approx 2b+c$.

Sustituyendo los valores óptimos de g_{SC}^* , p_{SC}^* y x_{SC}^* , en $\Pi_B(x|Q)$, $\Pi_S(p)$ y $\Pi_T(g)$, se determinan los beneficios óptimos Π_B^* , Π_S^* y Π_T^* . Puesto que $\theta > 0$, se define que:

$$\Pi_B^* > 2\Pi_S^*, \quad \Pi_S^* > 2\Pi_T^* \quad (4a.22)$$

Es decir, en un ambiente de negocios independientes para cualquier contrato de adquisición firmado por el proveedor, cliente y el transportista, este último tiene la menor iniciativa para tomar la responsabilidad del desempeño total de la cadena de suministro, lo cual revela la debilidad potencial competitiva en los servicios logísticos de un proceso de negocio no coordinado.

Escenario 2. Determinación de la política óptima en un ambiente coordinado.

En esta sección se analiza el impacto en las políticas de los negocios, y la coordinación estratégica sobre el total de los beneficios con respecto a los dos diferentes niveles de colaboración entre los socios. Primero, consideran un ambiente parcialmente coordinado donde el cliente y el proveedor cooperan, mientras que dejan al transportista actuar de manera independiente. Luego, plantean un ambiente de total coordinación, donde las tres figuras actúan como si pertenecieran a la misma compañía, y acuerdan compartir los beneficios y no imputar cargos entre sí, excepto del cliente (distribuidor) al consumidor en el mercado. Para cada uno de los sub-casos, se desarrolló la política óptima para los socios y se cuantifica la mejora sobre la rentabilidad de la cadena de suministro, asumiendo políticas óptimas que pueden ser completamente ejecutadas.

Un ambiente de coordinación parcial es un proceso donde el cliente y el proveedor comparten beneficios, y toman decisiones conjuntas sobre el tamaño de lote Q_{SB} y el precio de venta S_{SB} , que maximizan conjuntamente los beneficios anuales de ambos. El transportista actúa de manera independiente y controla su tarifa g que es pagada por proveedor, bajo un acuerdo FOB.

En un ambiente parcialmente coordinado, los costos conjuntos por ordenar $S_{SB} = S_S + S_B$ y de almacenamiento $H_{SB} = H_S + H_B$, y el tamaño de lote económico conjunto definido por $Q_{SB} = (2S_{SB}D(x)/H_{SB})^{1/2}$ permiten al proveedor y al cliente determinar sus ingresos anuales conjuntos $\Pi_{SB}(x|Q_{SB})$, los cuales se maximizan cuando el precio de venta del producto x_{SB} en el mercado se calcula mediante:

$$x_{SB} = \frac{2d(c+g)}{d - [2dS_{SB}H_{SB}]^{1/2}} \quad (4a.23)$$

Con base en Q_{SB} y x_{SB} , los beneficios anuales del transportista $\Pi_T(g)$ se calculan, y con ello la tarifa óptima g_{CP}^* que maximiza sus ingresos en un ambiente de coordinación parcial con $D(x) = d/x^2$, determinada como:

$$g_{CP}^* = \frac{2(c+b)[d^{1/2} - \omega^{1/2}]}{d^{1/2} - (1+a/S)\omega^{1/2}} - c \quad (4a.24)$$

con $\omega = 2S_{SB}H_{SB}$

Sustituyendo g_{CP}^* en (4a.23), el precio de venta óptimo x_{CP}^* en este escenario está definido por:

$$x_{CP}^* = 4(c+b) \frac{d^{1/2}}{d^{1/2} - (1+a/S_{SB})\omega^{1/2}} \quad (4a.25)$$

Con este resultado, Lei, *et al.* (2003), demuestran que el precio óptimo del mercado x_{CP}^* es más bajo que para el caso completamente no coordinado. De hecho definen que:

$$x_{CP}^* < \frac{1}{2}x_{SC}^*, \text{ para } D(x) = d/x^2 \text{ y } S_S/S_B \geq H_S/H_B \quad (4a.26)$$

Señalan que en la práctica, una situación muy común es que la relación de los costos por ordenar sea mayor o igual a los costos por almacenar ($S_S/S_B \geq H_S/H_B$), especialmente si el proveedor es un fabricante quien tiene que pagar un costo fijo de preparación para cada uno de los clientes, sobre todo, cuando éstos colocan un pedido. En este caso, los costos de inventario para el mismo producto deben ser similares en el almacén del fabricante y del cliente. Sin embargo, los costos fijos del fabricante (S_S), fácilmente podrían ser cientos o miles de veces más altos que los de compra por colocar un pedido (S_B).

La función decreciente del precio de venta en el mercado se altera cuando se pasa de un ambiente sin coordinación a otro parcialmente coordinado; la situación se invierte y la demanda del producto aumenta, provocando que el beneficio de los socios comerciales mejore, incluido el de los transportistas, determinado por $\Pi_{T(SB)}^* > 4\Pi_T^*$, cuando $S_S/S_B \geq H_S/H_B$. Esto se debe a un aumento en la demanda por el uso del modelo de tamaño de lote económico conjunto Q_{SB} por parte de los proveedores y clientes. En la práctica, sí el modelo EOQ conjunto es instrumentado, podría ofrecer una fuerte iniciativa al transportista con el cual puede liderar una mejor coordinación y un mejor servicio logístico. Sin embargo, con $\omega = 2S_{SB}H_{SB} > 0$, los beneficios del cliente y del proveedor se encuentran por arriba de los del transportista ($\Pi_{SB}^* > 2\Pi_{T(SB)}^*$). Por tanto, en un ambiente parcialmente coordinado, el transportista nuevamente recibe una mínima parte del total de los beneficios.

Considerando que $D(x) = d/x^2$ y con x_{CP}^* , puede corroborarse también que el beneficio total en un escenario parcialmente coordinado, es mayor que para el caso no coordinado, es decir:

$$\Pi_{SB}^* + 2\Pi_{T(SB)}^* > 12/7(\Pi_S^* + \Pi_B^* + \Pi_T^*) \quad (4a.27)$$

Lo anterior permite deducir que al menos 70% de los beneficios totales anuales aumentan con la política de coordinación parcial en relación a la no coordinada.

Sin embargo, los beneficios anuales pueden ser mayores si el transportista es incorporado también bajo una política de coordinación total, es decir, llevar a cabo alianzas entre los tres socios comerciales para compartir beneficios actuando de manera cooperativa. Así, con los costos totales del sistema por ordenar y almacenar, definidos como $S_J = S_S + S_B + S_T$; y $H_J = H_S + H_B + H_T$; y el tamaño de lote económico conjunto determinado como $Q_J = (2S_J D(x) / H_J)^{1/2}$, se formula la siguiente función de beneficio anual conjunto:

$$\Pi_J(x | Q_J) = (x - c - b) \frac{d}{x^2} \sqrt{2S_J H_J \frac{d}{x^2}} \quad (4a.28)$$

La cual, se maximiza con:

$$\Pi_J^* = \frac{1}{4(c+b)} [d^{1/2} - 2S_J H_J]^{1/2}]^2 \quad (4a.29)$$

Para:

$$x_J^* = \frac{2d(c+d)}{d - [2dS_J H_J]^{1/2}} \quad (4a.30)$$

A partir de lo anterior se pudo observar que sí la demanda del mercado se aproxima a una función $D(x) = d/x^2$, y el precio de venta óptimo en el mercado x_J^* que maximiza los beneficios conjuntos de los tres actores (proveedor, cliente (detallista) y transportista), es mucho más bajo que el precio x_{CP}^* para un ambiente de coordinación parcial, y con $x_J^* < x_{CP}^*$. Los beneficios para una estrategia totalmente coordinada, está definida como:

$$\Pi_J^* > 1(1/3)(\Pi_{SB}^* + 2\Pi_{T(SB)}^*) > 2(2/7)(\Pi_S^* + \Pi_B^* + \Pi_T^*) \quad (4a.31)$$

Lo anterior establece que al pasar de una coordinación parcial a una totalmente coordinada, se podrían tener incrementos potenciales de 1/3.

Una generalización del método anterior se presenta para cuando $D(x) = d/x^e$, con $e > 1$. Permitiendo determinar el total de los beneficios para cada uno de los escenarios mencionados.

Choi, *et al.* (2004), realizaron una investigación similar a la anterior, pero con algunas consideraciones diferentes. El marco de análisis es el mismo; es decir, un proveedor que abastece un producto a un cliente por medio de la contratación de un transportista, pero este último ahora con una función de costos cóncava. El cliente compra un producto que es vendido en el mercado. La demanda aun se

considera que es sensible al precio de venta, pero se agrega que también es sensible a la calidad del producto que abastece el proveedor (o fabricante). Se establecen las relaciones de dominancia entre la rentabilidad lograda por la coordinación totalmente centralizada y la suma de los beneficios individuales de un ambiente descentralizado, y se analiza el efecto de la coordinación del transportista. Se llevan a cabo algunas propuestas sobre políticas de coordinación conjunta para optimizar el precio de venta al público, el nivel de calidad del producto, y la cantidad de carga movida por el transportista.

Se asume que los costos por ordenar, almacenar, preparar, y de inventario (unidades por año) son conocidos por todos los miembros de la cadena. Adicionalmente, se acepta que la demanda es determinista, continua, decreciente con un aumento en el precio de venta x al público, y creciente cuando la calidad q del producto mejora (o también, aumenta conforme los costos del proveedor se incrementan con una mejora en la calidad). Sea $D(x,q)$ una función continua que denota la sensibilidad de la demanda al precio y a la calidad del producto.

Notación agregada:

- q = nivel de calidad del producto ($0 < q < 1$); cuando $q \Rightarrow 1$ el producto es de la más alta calidad en el mercado respectivo
- u = presupuesto sobre la calidad para cada unidad de producto
- $T(p)$ = costo del transportista por unidad enviada (o kilómetro), como una función creciente de p
- g = flete de envío cotizado por el transportista, $g > T(p)$
- k = beneficios del transportista por unidad enviada, como una componente constante de g
- S_T = costo fijo del transportista por orden
- H_T = costo unitario en el que incurre el transportista por almacenamiento de inventario en tránsito por año
- $D(x,q)$ = demanda anual, como una función de x y q

Asumiendo que el proceso es libre a bordo (FOB), el proveedor incluye en su precio de venta los costos de producción c ; un costo unitario por la calidad del producto (como variable de decisión); el flete de envío; y el margen de su venta; es decir: $c + u + g < p < x$, en donde x es el precio de venta al público por parte del cliente (distribuidor). Dado estos supuestos, las expresiones a continuación representan los beneficios esperados del proveedor, transportista y el cliente, respectivamente.

$$\text{Proveedor: } \Pi_S(p,q) = (p - c - u - g)D(x,q) - S_S D(x,q)/Q - H_S Q/2 \quad (4a.32)$$

$$\text{Transportista: } \Pi_T(g) = (g - T(p))D(x,q) - S_T D(x,q)/Q - H_T Q/2 \quad (4a.33)$$

$$\text{Cliente: } \Pi_B(x,Q) = (x - p)D(x) - S_B D(x)/Q - H_S Q/2 \quad (4a.34)$$

A partir de estas funciones anuales de beneficio, se observa que se optimizan para diferentes tamaños de lote (Q). Los costos de operación del transporte, definido como una componente de (4a.33), es una función cóncava de la demanda del mercado $D(x, q)$. Dependiendo de la cantidad ordenada para ser enviada en cada período, los costos anuales de operación del transportista pueden ser representados como:

$$T(p) \cdot D(x, q) + \frac{S_T H_i + S_i H_T}{\sqrt{2S_i H_i}} \sqrt{D(x, q)}; \quad i = \text{proveedor, cliente o transportista} \quad (4a.35)$$

Con lo cual se minimiza en $T(p) \cdot D(x, q) + \sqrt{2S_T H_T D(x, q)}$, cuando $i = \text{transportista}$, o cuando la cantidad ordenada en (4a.33) se obtiene igualmente para el *tamaño de lote económico del transportista (ETQ)*, o para:

$$Q = Q_T = \sqrt{2S_T D(x, q) / H_T} \quad (4a.36)$$

Bajo un esquema similar al estudio anterior, Choi, *et al.* (2004), determinan el tamaño de lote económico, y los beneficios individuales del cliente y del proveedor, en función del precio óptimo y calidad del producto. Por su parte, los beneficios del transportista se determinan en función del flete preestablecido. La suma total de los beneficios individuales proporcionan los ingresos máximos que puede alcanzar el sistema en un ambiente descentralizado. A partir del análisis de los resultados de una aplicación realizada, deducen los siguientes aspectos más importantes:

- a) Con el tamaño de lote económico establecido por el cliente $Q_B(p, q)$ y la estructura de costos que presenta el transportista, los beneficios anuales de este último, nunca podrán ser más grandes que el máximo que puedan lograr con su propia política *ETQ*: $Q_T(p, q) = \sqrt{2S_T D(x_B^*(p, q), q) / H_T}$.
- b) Con el tamaño de lote económico establecido por el cliente $Q_B(p, q)$, los beneficios del proveedor nunca serán más grandes que el máximo que puedan lograr con su propio *EOQ*: $Q_S(p, q) = \sqrt{2S_S D(x_B^*(p, q), q) / H_S}$.
- c) Con el $Q_S(p, q)$ del proveedor, los beneficios anuales de los clientes nunca serán más grandes que el máximo que puedan lograr bajo su política *EOQ*: $Q_B(p, q) = \sqrt{2S_B D(x_S^*(p, q), q) / H_B}$.
- d) Con la política del proveedor $Q_S(p, q)$ y la estructura de costos del transportista, los beneficios anuales de este último nunca serán más grandes que el máximo que puedan lograr con su política óptima *ETQ*: $Q_T(p, q) = \sqrt{2S_T D(x_{SB}^*(p, q), q) / H_T}$.

Una conclusión contundente de este ejercicio indica que en un sistema descentralizado (descoordinado), los beneficios totales máximos representan posiblemente la cuota más baja que puede lograr un esquema completamente coordinado.

En un esquema coordinado, Choi, *et al.* (2004), demuestran que los beneficios del transportista pueden mejorarse, aun en un ambiente descoordinado sí el cliente incorpora en sus decisiones sobre el tamaño de su lote, los costos operativos incurridos por el total de los socios comerciales en la cadena de suministro. Dado $S_J = S_S + S_B + S_T$, $H_J = H_S + H_B + H_T$ y $Q_J = \sqrt{2S_J D(x, q) / H_J}$.

Establecen también que en un ambiente de negocios descentralizado, para cualquier p, q, g y x , sí se cumple:

$$\frac{S_S + S_T}{S_B} \geq \frac{H_S + H_T}{H_B} \quad \text{y} \quad (4a.37)$$

$$\frac{S_T}{H_T} \geq \sqrt{\frac{S_B}{H_B} \cdot \frac{S_J}{H_J}} \quad (4a.38)$$

El beneficio del transportista, con una política coordinada, es al menos igual o mayor que los beneficios obtenidos con una política de lote económico establecida por el cliente, es decir:

$$\Pi_T(g | Q_J) \geq \Pi_T(g | Q_B) \quad (4a.39)$$

Choi, *et al.* (2004), señalan que para el caso de la condición (4a.37) es fácil su justificación. Sin embargo, para la condición (4a.38) sólo se cumple para costos fijos del transportista relativamente más altos que los costos fijos del cliente.

A partir de los modelos desarrollados bajo un escenario de coordinación, Choi, *et al.* (2004), determinan los siguientes teoremas:

a) Relaciones de dominancia. Para un p, q, g y x , el beneficio total de la cadena de suministro, bajo un Q_J domina la suma de los beneficios anuales máximos de los socios en un ambiente independiente usando el tamaño de lote óptimo del cliente Q_B . Esto es: $\Pi_J(x, p, q | Q_J) \geq \Pi_S + \Pi_T + \Pi_B$

b) Generalizando la relación de dominancia. Para un p, q, g y x , se tiene que los ingresos totales conjunto serán mayores o iguales a la suma de beneficios individuales ($\Pi_J(x, p, q | Q_J) \geq \Pi_S + \Pi_T + \Pi_B$), a pesar de que el tamaño de lote Q , en un ambiente descentralizado, sea decidido por cualquier miembro de la cadena; dicho de otra manera: $Q = Q_S, Q_B$, o Q_T .

c) Los beneficios totales de la cadena de suministro, bajo el tamaño de lote económico conjunto Q_J , y los ingresos $\Pi_J^*(p)$, aumentan según se reduzca el precio de venta por unidad del proveedor.

d) Los beneficios totales de la cadena de suministro, bajo el tamaño de lote económico conjunto Q_J , y los ingresos $\Pi_J^*(p)$, aumentan cuando el flete (tarifa) de transporte g disminuye.

e) En un ambiente de coordinación, el precio unitario óptimo de venta del proveedor p_J^* y el precio unitario de transporte g_J^* cargado al proveedor está dado por:

$$p_J^* = c + u_J^* + g_J^* + S_S / Q_J + H_S Q_J / [2D(x_J^*, q_J^*)] \quad (4a.40)$$

$$g_J^* = T(p_J^*) + S_J / Q_J + H_T Q_J / [2D(x_J^*, q_J^*)]; \quad \text{con } k_J^* = 0 \quad (4a.41)$$

Zhao, *et al.* (2004), desarrollaron un modelo donde involucran los costos de transporte en un problema del tipo cliente-proveedor. Asumen que la demanda es estática durante todo el horizonte de planeación. Los productos pueden entregarse en un tiempo L después de que han sido ordenados; L es llamado el tiempo de ciclo, y es un parámetro predeterminado. Además, los resurtidos deben ser completados sin incurrir en productos almacenados. Existe un conjunto de vehículos homogéneos con capacidad limitada para entregas, que son rentados a un *tercera parte logístico* (3PL-transportista), cada vez que es necesario entregar productos terminados.

Por tanto, dada una demanda (β) por unidad de tiempo (por día) y la cantidad ordenada de productos (y), el modelo busca minimizar los costos totales promedio (TCU_0) del sistema logístico a lo largo del horizonte de planeación, con el siguiente problema (P1) de optimización:

$$\text{Minimizar } TCU_0 = \frac{K}{y/\beta} + \frac{sy}{y/\beta} + \frac{nc}{y/\beta} + \frac{mf}{y/\beta} + \frac{hy}{2} \quad (4a.42)$$

$$\text{Sujeto a: } (n-1)p < y \leq np \quad (4a.43)$$

$$d \leq U/t \quad (4a.44)$$

$$Md \geq n \quad (4a.45)$$

m, n, d son enteros

Donde:

TCU_0 = costo total por unidad de tiempo asociado con el sistema logístico

p = capacidad de carga de los vehículos

f = costo fijo (representado éste como el costo de renta más bajo de un vehículo en un día de trabajo, sin importar la distancia viajada)

| | | |
|-----|---|---|
| c | = | costos variables de transporte por viaje |
| U | = | duración del trabajo por día |
| t | = | tiempo total de cada viaje |
| K | = | costo de preparación de una orden |
| h | = | costo unitario de inventario por unidad de tiempo |
| s | = | costo unitario de producción |
| m | = | número de vehículos usados para entregar y |
| n | = | número total de viajes de esos vehículos |
| d | = | número máximo de viajes que un vehículo es capaz de realizar en un día de trabajo |

En general, el nivel más alto de inventario ocurre cuando (y) es recibido, el cual después de y/β periodos de tiempo, la cantidad de inventario se va reduciendo hasta cero.

La restricción (4a.43) especifica el número de viajes concluidos por los vehículos y entrega de la cantidad ordenada de productos (y). Debido a que (d) en las restricciones (4a.44) y (4a.45) representan el número máximo de viajes que un vehículo es capaz de realizar en un día de trabajo, éste es considerado como un parámetro predeterminado. Haciendo $m = g(n)$, el modelo P1 se expresa como:

$$\text{Minimizar } TCU(y) = \frac{K}{y/\beta} + \frac{sy}{y/\beta} + \frac{nc + fg(n)}{y/\beta} + \frac{hy}{2} \quad (4a.46)$$

$$\text{Sujeto a: } (n-1)p < y \leq np \quad (4a.47)$$

$$g(n) = m, \left\lceil \frac{n}{d} \right\rceil \quad (4a.48)$$

m, n, d son enteros

A partir del cual, deducen que el tamaño de lote económico óptimo puede calcularse con:

$$y_n^* = \sqrt{\frac{2\beta(K + cn + fg(n))}{h}} \quad (4a.49)$$

Por tanto, Zhao, *et al.* (2004), determinan que el costo total óptimo por unidad de tiempo, asociado al sistema logístico, involucrando los costos fijos y las variables del transporte, puede determinarse con la siguiente expresión:

$$TCU_n(y_n^*) = \sqrt{2 \cdot \beta \cdot h \cdot [k + cn + fg(n)]} + s \cdot \beta \quad (4a.50)$$

Sethi, *et al.* (2002), plantean a su vez que la mayoría de las compañías globales tratan con clientes con diferentes niveles de variabilidad de su demanda y

habilidades de prevención. Señalan que los clientes con habilidades de previsión superiores pueden permitirse el lujo de abastecerse de una cantidad importante de su demanda, utilizando modos de entrega lentos, pagando un costo extra sólo para aquellas entregas en modos más rápidos para satisfacer la demanda cuando ésta surge inesperadamente. En cambio, las compañías con demandas irregulares y poca habilidad de previsión, generalmente tienen que pagar por modos de entrega más rápidos para responder a los cambios inesperados en la demanda.

Por lo anterior, afirman que los proveedores han reconocido la importancia de dos aspectos fundamentales: a) manejar una cartera de clientes con necesidades diferentes; y b) identificar el valor de conocer por anticipado su demanda. En mucho tienen razón pues con el avance en las tecnologías de la fabricación, los servicios logísticos y la globalización de los mercados, el segundo aspecto es vuelve posible.

En este contexto, Sethi, *et al.* (2002), formularon un modelo considerando tres modos de transporte que interactúan con un sistema de inventario de revisión periódica, y dos esquemas de pronósticos de actualización de la demanda antes de que ésta se presente. Cada modo de transporte se denota como rápido, medio y lento. Los pedidos son hechos al inicio de cada período. Para el modo rápido sus entregas se realizan al final del mismo período (actual); para el modo medio se entregan al final del siguiente período, y los pedidos por el modo lento, al término del segundo siguiente período. Es decir, tienen un tiempo de ciclo de 1, 2 y 3 períodos, respectivamente. En cuanto al costo, las órdenes por el modo más rápido son más caras que el modo medio, y éste más caro que el modo lento. Consideran una secuencia de eventos tal y como se describe a continuación:

Al inicio de cada período se revisa el nivel de existencias o faltantes, y se actualiza el pronóstico de la demanda que se presentará en los siguientes tres períodos, contabilizando el período actual como el primero. Adicionalmente, se conocen las cantidades ordenadas por el modo medio y lento, solicitadas uno y dos períodos previos, respectivamente. Con esta información, las decisiones se toman sin importar las cantidades a pedir por cada modo. El objetivo es tomar las decisiones de las cantidades a ordenar de tal manera que se minimice el costo total sobre el horizonte de planeación. Para describir esta situación, la notación a continuación define los parámetros y variables empleadas para la formulación del modelo:

$\langle 1, N \rangle = \{1, 2, \dots, N\}$: períodos de planeación (horizonte de planeación)

(Ω, F, P) = espacio de probabilidad

F_k = cantidad ordenada por el modo rápido (no-negativa) en el período k

M_k = cantidad ordenada por el modo medio (no-negativa) en el período k

S_k = cantidad ordenada por el modo lento (no-negativa) en el período k

$\pi_k^f(u)$ = costo de la orden rápida, $u \geq 0$ unidades en el período k

$\pi_k^m(u)$ = costo de la orden medía, $u \geq 0$ unidades en el período k

- $\pi_k^s(u)$ = costo de la orden lenta, $u \geq 0$ unidades en el período k
 R_k^1 = primer determinante (variable aleatoria) de la demanda en el período k
 R_k^2 = segundo determinante (variable aleatoria) de la demanda en el período k
 R_k^3 = tercer determinante (variable aleatoria) de la demanda en el período k
 D_k = demanda no-negativa en el período k modelada como una función de $g_k(R_k^1, R_k^2, R_k^3)$
 X_k = nivel del inventario al inicio del período k
 $Y_k = X_k + M_{k-1} + S_{k-2}$: posición del inventario al inicio del período k
 X_{N-1} = nivel del inventario al final del último período del horizonte de planeación
 $H_k(x)$ = costo del inventario cuando $X_k = x$ en el período k
 $H_{N+1}(x)$ = costo del inventario cuando $X_{N+1} = x \geq 0$, o costo de penalización cuando $X_{N+1} = x < 0$
 $E[\cdot]$ = valor esperado definido en el espacio de probabilidad (Ω, F, P)
 $E[\cdot | \mathfrak{R}]$ = valor esperado condicionado a un σ -campo \mathfrak{R}

La función objetivo a minimizar es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 J_l(x_1, s_{-1}, m_0, s_0, r_1^1, r_1^2, r_2^1, (F, M, S)) = & \\
 & H_1(x_1) + E \left\{ \sum_{l=1}^{N-2} [\pi_l^f(F_l) + \pi_l^m(M_l) + \pi_l^s(S_l) + H_{l+1}(X_{l+1})] \right. \\
 & + [\pi_{N-1}^f(F_{N-1}) + \pi_{N-1}^m(M_{N-1}) + H_N(X_N)] \\
 & \left. + [\pi_N^f(F_N) + H_{N+1}(X_{N+1})] \right\} \quad (4a.51)
 \end{aligned}$$

Donde $(F, M, S) = ((F_1, \dots, F_N), (M_1, \dots, M_{N-1}), (S_1, \dots, S_{N-2}), \dots)$ es una secuencia histórica independiente, o decisiones no anticipadas admisibles.

La interpretación de la función anterior busca minimizar el costo del inventario en el período 1, más el valor esperado de las cantidades por los tres modos dos períodos antes, teniendo en cuenta sus respectivos tiempos de entrega (l) y el valor del inventario en el período inmediato siguiente al actual, más el valor esperado de las cantidades pedidas por los modos rápido y medio, y el valor del inventario del último período del horizonte de planeación, más el valor esperado de la cantidad pedida por el modo rápido en el período actual y el valor del inventario en el período inmediato siguiente al último, del horizonte de planeación.

Para solucionar el modelo, Sethi, *et al.* (2002), proponen un modelo de programación dinámica y una política óptima de Markov. Verifican si el costo de la política de Markov obtenido de la solución de la programación dinámica iguala el valor de la función objetivo (4a.51) del problema sobre $\langle 1, N \rangle$, horizonte de planeación o no. La prueba se hace a través de dos teoremas los cuales concluyen que hay una política óptima de Markov que iguala la solución dada de la

función objetivo. Así, existe una política del tipo histórico-dependiente, cuyo valor de la función objetivo iguala el valor de la función objetivo (4a.51), por lo que se concluye que existe una política de Markov que provee el mismo valor de la función objetivo, planteada inicialmente. Por tanto, la función objetivo se transforma a las siguientes ecuaciones de programación lineal:

$$U_l(x_l, s_{l-2}, m_{l-1}, s_{l-1}, r_l^1, r_l^2, r_{l+1}^1) = H_l(x_l) + \inf_{\substack{F \geq 0 \\ M \geq 0 \\ S \geq 0}} \{ \pi_l^f(F) + \pi_l^m(M) + \pi_l^s(S) \\ + E[U_{l+1}(\psi_{l+1}(F), s_{l-1}, M, S, r_{l+1}^1, R_{l+1}^2, R_{l+2}^1)] \} \quad (4a.52)$$

$$l = 1, 2, \dots, N - 2$$

$$U_{N-1}(x_{N-1}, s_{N-3}, m_{N-2}, s_{N-2}, r_{N-1}^1, r_{N-1}^2, r_N^1) = H_{N-1}(x_{N-1}) + \inf_{\substack{F \geq 0 \\ M \geq 0}} \{ \pi_{N-1}^f(F) + \pi_{N-1}^m(M) \\ + E[U_N(\psi_N(F), s_{N-2}, M, r_N^1, R_{N1}^2)] \} \quad (4a.53)$$

y

$$U_N(x_N, s_{N-2}, m_{N-1}, r_N^1, r_N^2) = H_N(x_N) + \inf_{F \geq 0} \{ \pi_N^f(F) + E[H_{N+1}(\psi_N(F))] \} \quad (4a.54)$$

Donde la notación $\psi_{l+1}(\cdot)$ está definida como:

$$\psi_{l+1}(F) = x_l + s_{l+2} + m_{l+1} + F - g_l(r_l^1, r_l^2, r_l^3), \quad l = 1, \dots, N \quad (4a.55)$$

Y F, M y S son argumentos de minimización en la ecuaciones (4a.52, 4a.53 y 4a.54).

Para un análisis más profundo del problema, se analiza la optimalidad del tipo de política de inventario-base, donde se reemplaza F por $\varphi - y_l$, M por $\mu - (\varphi + s_{l-l})$, y S por $\sigma - \mu$ en las ecuaciones (4a.52) y (4a.54), ahora φ, μ, σ son las posiciones del inventario post-órdenes, después de entregar las cantidades pedidas de cada uno de los tres modos. Con ello, prueban la optimalidad del problema del tipo de política de inventario-base, a través del análisis directo de las restricciones naturales requeridas de los minimizadores de las funciones convexas de costos resultantes de los tres modos de transporte.

Otro problema que se ataca en este trabajo es el del problema del horizonte infinito de planeación, ahora se deja $N = \infty$ y $(F, M, S) = ((F_n, M_n, S_n), (F_{n+1}, M_{n+1}, S_{n+1}), \dots)$. La función objetivo extendida para este problema es:

$$J_n(x_n, s_{n-2}, m_{n-1}, s_{n-1}, r_n^1, r_n^2, r_{n+1}^1, (F, M, S)) = \\ H_n(x_n) + \sum \alpha^{k-n} E[\pi_k^f(F_k) + \pi_k^m(M_k) + \pi_k^s(S_k) + \alpha H_{k+1}(X_{K+1})] \quad (4a.56)$$

Donde α es un valor de descuento dado entre $0 < \alpha < 1$

Ahora las ecuaciones de programación dinámica para este problema son:

$$U_n(x_n, s_{n-2}, m_{n-1}, s_{n-1}, r_n^1, r_n^2, r_{n+1}^1) = H_n(x_n) + \inf_{\substack{F \geq 0 \\ M \geq 0 \\ S \geq 0}} \{ \pi_n^f(F) + \pi_n^m(M) + \pi_n^s(S) \\ + \alpha E[U_{n+1}(x_n + s_{n+2} + F - g(r_l^1, r_l^2, R_l^3), s_{n-1}, M, S, r_{n-1}^1, R_{n+1}^2, R_{n+2}^1)] \} \quad n = 1, \dots, \quad (4a.57)$$

En seguida prueban la existencia de una solución para la ecuación de programación dinámica (4a.57), con el método de aproximaciones sucesivas del problema de horizonte de planeación infinito a través de problemas grandes de horizontes infinitos.

En un trabajo posterior a éste, aplican los resultados obtenidos a problemas de costos promedios sin actualizar el pronóstico, y desarrollan optimizaciones computacionales, así como procedimientos heurísticos para resolverlos.

Como otros autores, Sethi, *et al.* (2002), sostienen que los modelos de inventarios con más de dos alternativas de entrega no han recibido mucha atención en la literatura. Por ejemplo, señalan que Fakuda (1964) y Zhang (1996) son algunos de los autores que han abordado el tema para el caso de tres modos de suministro. Fakuda (1964), investigó el problema bajo un supuesto artificial en el que los pedidos no pueden colocarse en todos los períodos. Bajo dicho supuesto, este autor demostró que el problema es equivalente al de dos modos de entrega. Zhang (1996), extendió ese trabajo para tres modos de suministro. Decidió minimizar la función de costos como nivel base de existencias para los tres modos de entrega, pero sin restricciones. Utilizó un procedimiento heurístico enfocado a estimar sus valores. Sin embargo, Sethi, *et al.* (2002), sostienen que su método no lleva a una política óptima.

Toptal (2003), desarrolla dos modelos en el contexto del problema de coordinación cliente-proveedor para el control de inventarios en los que involucra los costos de transporte (C), para determinar su impacto sobre las decisiones de inventario (por ejemplo, Q), asumiendo una demanda determinista y constante en un horizonte de tiempo infinito, bajo un esquema centralizado de decisiones. El modelo I desarrolla y resuelve el problema más simple, y sólo tiene en cuenta, de manera explícita, la estructura general de los costos del fabricante en el proceso de abasto (*inbound*) ignorando el costo de entrega. El modelo II considera ambos costos simultáneamente; esto es, las fases de abasto (*inbound*) y entrega (*outbound*). Es decir, extiende el primer modelo, pero ahora incluye al cliente y al proveedor con la misma estructura de costos, involucrando explícitamente los costos o restricciones de transporte en la fase de abasto de ambos actores de la cadena (véase figura 4.2).

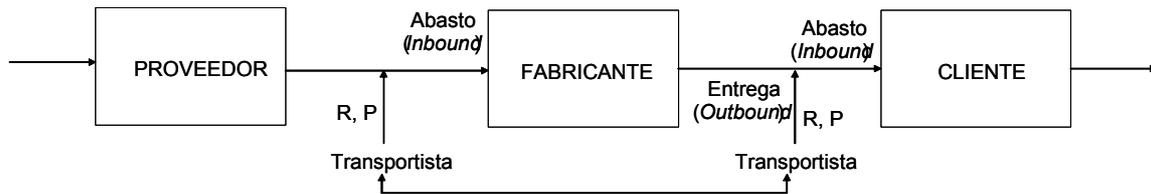


Figura 4.2
Costos de abasto y entrega

Fuente: elaboración propia con base en Toptal, 2003.

Por lo anterior, establece que los costos generalizados de transporte estarán en función de la cantidad abastecida Q , los cuales incluyen un costo fijo K para el abasto/entrega además de un costo variable por camión de carga, es decir:

$$C(Q) = K + \left\lceil \frac{Q}{P} \right\rceil R \quad (4a.58)$$

Donde:

P = Capacidad de carga por camión

R = Costo fijo por camión de carga; se incurre si es completo o parcialmente cargado

Si $nQ \geq P$, puede representar una flota para $n > 1$; ello significa que el costo variable es proporcional al número de camiones utilizados. Por tanto, se asume ilimitada la capacidad de transporte.

Los supuestos del problema considerados por Toptal (2003), son esencialmente los mismos que para el modelo clásico de coordinación de cliente-proveedor de Goyal (1976), con excepción de que en este caso incluye la estructura general del costo de transporte. El costo de resurtido (transporte), del fabricante (C_v) y el cliente (C_b), están dados por:

$$C_v(Q_v) = K_v + \left\lceil \frac{Q_v}{P} \right\rceil R, \text{ y} \quad (4a.59)$$

$$C_b(Q_b) = K_b + \left\lceil \frac{Q_b}{P} \right\rceil R, \text{ respectivamente.} \quad (4a.60)$$

Nótese que las funciones $C_v(\cdot)$ y $C_b(\cdot)$ incluyen los costos de abasto y entrega, representados por los términos $\lceil Q_v/P \rceil R$ y $\lceil Q_b/P \rceil R$, respectivamente. En este sentido, asumen que el transportista contratado por el fabricante administra ambos flujos (véase figura, 4.2). De ahí que el equipo de transporte utilizado sea el mismo, con un costo por camión (R) y capacidad (P).

Por otro lado, también toma en cuenta los costos por almacenamiento del fabricante y el cliente por unidad por tiempo, denotado por h_v y h_b , respectivamente. El costo de almacenamiento del eslabón es denotado por $h' = h_b - h_v \geq 0$.

Para formular los modelos, Toptal (2003), asume que un fabricante se abastece de su proveedor con grandes lotes, y la tasa de demanda de su cliente es una constante conocida, denotada por D ; el problema consiste en calcular las cantidades a ordenar para el fabricante y el cliente para minimizar los costos totales de sistema. En este contexto, la cantidad ordenada por el fabricante, denotada por Q_v , representa el tamaño del envío para abastecerse desde su proveedor. En tanto, Q_b es el tamaño del lote enviado por el fabricante a su cliente.

La notación utilizada por Toptal (2003), se presenta a continuación:

- K_v = costo fijo de suministro del fabricante
- h_v = costo de mantenimiento de inventario por unidad por tiempo del fabricante
- K_b = costo fijo de suministro del cliente
- h_b = costo de mantenimiento de inventario por unidad por tiempo del cliente
- h' = costos de almacenamiento del eslabón ($h' = h_b - h_v \geq 0$)
- R = costo fijo por camión de carga
- P = capacidad de carga por camión
- D = tasa de demanda del cliente
- Q_v = cantidad abastecida al fabricante; tamaño del lote de abasto
- Q_b = cantidad abastecida al cliente; tamaño del lote de entrega al cliente
- T_v = longitud del ciclo de abasto del fabricante
- T_b = longitud de ciclo de abasto al cliente
- n = número de veces que es abastecido un cliente dentro de un ciclo del fabricante
($T_v = nT_b$; entonces, $Q_b = Q_v / n$)

Toptal (2003), establece que los costos totales anuales del modelo I y II, denotados por $G(n, Q_v)$ y $G'(n, Q_v)$, respectivamente, están dados por:

$$\text{Modelo I: } G(n, Q_v) = C_v(Q_v) \frac{D}{Q_v} + \frac{h_v(n-1)Q_v}{2n} + \frac{nK_b D}{Q_v} + \frac{h_b Q_v}{2n} \quad (4a.61)$$

$$\text{Modelo II: } G'(n, Q_v) = C_v(Q_v) \frac{D}{Q_v} + \frac{h_v(n-1)Q_v}{2n} + nC_b(Q_v/n) \frac{D}{Q_v} + \frac{h_b Q_v}{2n} \quad (4a.62)$$

Nótese que D/Q_v representa el número de abastecimientos por año; los primeros términos de las expresiones anteriores forman el costo anual de suministro y los

del camión cargado utilizado para el transporte de abasto (*inbound*). El segundo término de ambas expresiones son los costos de manutención de inventario del fabricante. El tercero y cuarto término son los costos anuales del abasto por camión y el correspondiente a manutención de inventarios por parte del cliente, respectivamente.

Los modelos I y II pueden describirse como:

$$\text{Modelo I: } G(n, Q_V) = \frac{K_V D}{Q_V} + \left\lceil \frac{Q_V}{P} \right\rceil \frac{RD}{Q_V} + \frac{h_V Q_V}{2} + \frac{nK_b D}{Q_V} + \frac{h' Q_V}{2n} \quad (4a.63)$$

$$\text{Modelo II: } G^*(n, Q_V) = \frac{K_V D}{Q_V} + \left\lceil \frac{Q_V}{P} \right\rceil \frac{RD}{Q_V} + \frac{h_V Q_V}{2} + \frac{nK_b D}{Q_V} + \left\lceil \frac{Q_V}{nP} \right\rceil \frac{nRD}{Q_V} + \frac{h' Q_V}{2n} \quad (4a.64)$$

Los problemas en consideración están dados por:

| | |
|------------------------|-----------------------|
| Modelo I | Modelo II |
| Min $G(n, Q_V)$ | $G^*(n, Q_V)$ |
| Sujeto a: $Q_V \geq 0$ | $G^* Q_V \geq 0$ |
| n : entero positivo | n : entero positivo |

Para cada uno de los casos, desarrolla un algoritmo heurístico. Luego, recurriendo a los costos de dicho algoritmo como una cota superior, desarrolla un método exacto de solución.

Toptal (2003), sugiere el desarrollo de modelos que consideren límites en la capacidad de transporte, por ejemplo, $\lceil Q_V / P \rceil \leq C_V$ y $\lceil Q_V / nP \rceil \leq C_b$, donde C_V y C_b denotan el número de camiones de carga disponibles para el proveedor y para el cliente. La transformación lineal propuesta de estas restricciones son:

$$Q_V \leq C_V P \quad \text{y} \quad Q_V \leq n C_b P. \quad (4a.65)$$

Propone también generalizar el caso donde el proveedor cuenta con múltiples opciones para seleccionar modos de transporte, por ejemplo, diferentes tipos de equipo o diversos proveedores de servicios de transporte con costos y capacidad de carga variables. Seguido de esta consideración, la investigación puede extenderse con múltiples productos o proveedores.

Reyes y Gaytán (2003), extendieron el trabajo desarrollado por Gaytán y Pliego (2002). Nuevamente, con el uso de la estrategia *ECR* (Jiménez, 2005) desarrollaron un modelo en el cual consideran dos modos de transporte (uno lento y otro rápido) para el abasto de una familia de productos de un proveedor a un cliente. En la función de costos de su modelo incluyen el costo del inventario en tránsito en que se incurre por el tiempo de desplazamiento de los productos.

Las variables de decisión consideradas por dichos autores son: la cantidad ordenada de cada producto transportado por alguno de los modos; el inventario final; y el descuento proporcionado al proveedor por aceptar la estrategia *ECR*.

La notación utilizada por Reyes y Gaytán (2003), es la siguiente:

g_n^i = costo total del cliente sin política *ECR*

$I_{i,t}$ = inventario final en el período t del producto i

K_i = costo fijo para el cliente por generar una orden del producto i

C_i^1 = costo por transportar una unidad por el modo de transporte rápido (\$/unidad)

C_i^2 = costo por transportar una unidad por el modo de transporte lento (\$/unidad)

$Q_{i,t}^1$ = cantidad del producto i transportado por el modo rápido (unidades/período) en el período t

$Q_{i,t}^2$ = cantidad del producto i transportado por el modo lento (unidades/período) en el período t

h_1 = costo por mantener un artículo en el inventario del cliente durante un período, una unidad de \$ del artículo, dado en \$/(unidad-período), en el almacén del cliente

h_2 = costo por mantener un artículo en inventario mientras es transportado por el modo rápido, dado en \$/(unidad-período)

h_3 = costo por mantener un artículo en inventario mientras es transportado por el modo lento, dado en \$/(unidad-período)

A partir de los supuestos propuestos y bajo una política sin coordinación, Reyes y Gaytán (2003), formulan un modelo para determinar el costo total para el abasto de una familia de productos.

En principio definen el costo del proveedor sin estrategia *ECR*. En este escenario el proveedor le vende a un sólo cliente diferentes tipos de productos, los cuales conforman una familia; el precio de venta es el mismo para cada producto. Sin estrategia *ECR*, el proveedor incurre en un costo fijo A por procesar un conjunto de órdenes (siempre y cuando el cliente haya pedido uno o más productos), más un costo fijo a_i por procesar cada orden del cliente de cada producto $i = 1, \dots, n$. Es decir:

$$g_0^n = \sum_{t=1}^T Ay_t + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T a_i r_{i,t} \quad (4a.66)$$

Donde: y_t y $r_{i,t}$ son variables binarias $\{0, 1\}$

Posteriormente, determinan el costo del cliente sin la estrategia *ECR*. Los supuestos establecen que el cliente experimenta una demanda determinista y dinámica para cada uno de los productos de la familia durante un horizonte finito de T períodos. Incurre en costos por mantener inventario de cada producto y por

generar una orden de compra. Los tiempos de entrega de cada uno de los modos de transporte son conocidos y múltiplos de mes. No se permiten faltantes, el inventario al inicio y al final del horizonte de planeación, es cero. Sin estrategia ECR, cada cliente coloca órdenes en los períodos y en las cantidades de acuerdo con su política óptima, con ayuda de algún método exacto, como el de Wagner y Within (1958). El costo por mantener los productos en inventario es el mismo para todos, únicamente difiere al lugar donde se almacene; si es el inventario del cliente, o si es en cualquiera de los modos de transporte durante su traslado. El costo por concepto de transporte es el mismo para todos los productos, y difiere para cada uno de los modos (lento o rápido).

A partir de estas consideraciones, Reyes y Gaytán (2003), formularon el siguiente modelo que determina los costos totales g_i^n en los que incurre el cliente:

$$\text{Min } g_i^n = \sum_{t=1}^T K_i r_{i,t} + \sum_{t=1}^T C_i^1 Q_{i,t}^1 + \sum_{t=1}^T C_i^2 Q_{i,t}^2 + \sum_{t=1}^T h_1 I_{i,t} + \sum_{t=1}^T h_2 Q_{i,t}^1 + \sum_{t=1}^T h_3 Q_{i,t}^2 \quad (4a.67)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$I_{i,t} = I_{i,t-1} + Q_{i,t}^1 + Q_{i,t}^2 - D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.68)$$

$$Q_{i,t}^1 + Q_{i,t}^2 \leq N_i r_{i,t} \quad \text{con } N_i = \sum_{t=1}^T D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.69)$$

$$\frac{Q_{i,t}^1}{Q_{i,t}^1 + Q_{i,t}^2} = p \quad \text{con } 0 < p < 1, \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.70)$$

$$I_{i,0}, I_{i,T_0} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4a.71)$$

$$I_{i,t}, Q_{i,t}^1, Q_{i,t}^2 \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.72)$$

$$r_{i,t} \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.73)$$

Un modelo equivalente al anterior, más fácil de resolver, se obtienen haciendo $Q_{i,t}^1 = pq_{i,t}$ y $Q_{i,t}^2 = (1-p)q_{i,t}$, es decir:

$$\text{Min } g_i^n = \sum_{t=1}^T K_i r_{i,t} + \sum_{t=1}^T (q_{i,t} (p(C^1 + h_2)(1-p)(C^2 + h_3))) + \sum_{t=1}^T h_1 I_{i,t} \quad (4a.74)$$

Sujeto a:

$$I_{i,t} = I_{i,t-1} + q_{i,t} - D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.75)$$

$$q_{i,t} \leq N_i r_{i,t} \quad \text{con } N_i = \sum_{t=1}^T D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4a.76)$$

$$I_{i,0}, I_{i,T_0} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4a.77)$$

$$I_{i,t}, Q_{i,t}^1, Q_{i,t}^2 \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.78)$$

$$r_{i,t} \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.79)$$

La restricción (4a.75), balance de inventarios, explica que la cantidad de inventario al final del período actual ($I_{i,t}$) es igual al inventario final del período inmediato anterior ($I_{i,t-1}$), más la cantidad pedida por el proveedor en el período actual ($Q_{i,t}^1 + Q_{i,t}^2$), menos la demanda experimentada por el cliente ($D_{i,t}$). La siguiente restricción (4a.76) asegura que el cliente incurrirá en el costo individual de cada artículo por ordenarlo, siempre y cuando pida el producto al proveedor ($r_{i,t}$). La restricción (4a.77) establece que el inventario de cada cliente será cero al inicio y al final del horizonte de planeación. Las restricciones (4a.78) y (4a.79), definen el tipo de variables usadas en el modelo y sus posibles valores.

Modelo con estrategia ECR.

Con la estrategia ECR adoptada, el proveedor incurre en un costo fijo A por procesar un conjunto de órdenes del cliente, más un costo fijo individual a_i por incluir el producto i en la orden, además del descuento que hace al cliente para compensar el aumento en sus costos por incrementar su nivel de inventario al aceptar la política de coordinación ECR. Conoce la demanda de cada producto del cliente y sus costos por ordenar y mantener inventario; por tanto, puede determinar para un tiempo base T_0 en particular, los períodos en los cuales cada cliente debe ordenar para minimizar sus costos. Como consecuencia tiene la posibilidad de determinar el descuento mínimo sobre el precio de los productos, para que el cliente acepte usar la política ECR. Deberá dar al cliente un descuento Z_i para cada producto i sobre el precio de cada uno, a fin de compensar el incremento de los costos de producto i por usar la política ECR, y además proveer un ahorro $S\%$ sobre el costo total si no usará la coordinación ECR. Deberá determinar las cantidades a enviar en cada modo de transporte, de tal manera que sus costos sean mínimos.

Por lo anterior, el modelo de optimización lineal entero a continuación, determina el costo total g_0^c para el proveedor cuando aplica la estrategia ECR, durante el horizonte finito de T períodos, del cual se deriva también el costo total g_i^c de cada producto i al usar la coordinación.

$$\text{Min } g_0^c = \sum_{t=1}^T Ay_t + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T a_i r_{i,t} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{i,t} v Z_i \quad (4a.80)$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^T D_{i,t} v Z_i = \left[\left(\sum_{t=1}^T K_i r_{i,t} + \sum_{t=1}^T (q_{i,t} (p(C^1 + h_2)(1-p)(C^2 + h_3))) + \sum_{t=1}^T h_1 I_{i,t} \right) - g_i^n (1-S) \right] \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4a.81)$$

$$I_{i,t} = I_{i,t-1} + q_{i,t} - D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.82)$$

$$I_{i,0}, I_{i,T_0} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4a.83)$$

$$q_{i,t} \leq N_i r_{i,t} \quad \text{con} \quad N_i = \sum_{t=1}^T D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.84)$$

$$r_{i,t} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t \neq \Omega_0 \quad (4a.85)$$

$$\text{siendo } \alpha = \left\lfloor \frac{T-1}{T_0} \right\rfloor$$

$$\sum_{t=1}^T r_{i,t} \leq M_1 y_t \quad \text{con} \quad M_1 = n; \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (4a.86)$$

$$r_{i,t}, y_t \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.87)$$

$$Z_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4a.88)$$

$$I_{i,t}, q_{i,t} \geq 0, \text{ entero} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4a.89)$$

$$T_0 \in \Omega_0 \quad \text{donde } \Omega_0 = \{x \mid 2 \leq x \leq T, \text{entero}\} \quad (4a.90)$$

$$Q_{i,t}^1 + Q_{i,t}^2 = \frac{Q_{i,t}^1}{p} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (4a.91)$$

En el modelo anterior sobresale que la restricción (4a.81) garantiza el descuento (Z_i), aplicado a cada uno de los productos; compensa con un ahorro del $S\%$ sobre el costo por usar la estrategia *ECR*, debido al incremento por tener más inventario y/o generar más órdenes de compra al no pedir con base en su política óptima individual.

El producto de este trabajo, además de los modelos exactos es el desarrollo de un método de solución exacto para el modelo sin coordinación y un algoritmo heurístico para el modelo, usando la estrategia de coordinación *ECR*.

4.1.2 Coordinación entre un proveedor y varios clientes

En general, los modelos entre un proveedor y varios clientes, considerando las variables fundamentales del transporte, se encuentran en el contexto de una red de suministro. Los primeros modelos de red se enfocaron exclusivamente al problema de localización de instalaciones. Los más recientes involucran el control de los inventarios y la planeación del transporte, es decir, en ellos ya se reconoce que dichas áreas necesitan estar estrechamente coordinadas. No obstante, la relevancia de los primeros modelos de esta clase se debe a que la coordinación de los inventarios se considera de manera implícita en el diseño de la red de distribución. Son muchos los modelos desarrollados de este tipo; por ello, a manera de ejemplo se seleccionaron tres artículos cuyo contenido aportan aspectos importantes a este trabajo.

En ese sentido, Jayaraman (1998), elaboró un modelo que estudia, de manera simultánea la relación entre la gestión del inventario, la localización de las instalaciones, y la determinación de una política de transporte en el contexto del diseño de una red de distribución. Para este autor, dichas actividades actúan recíprocamente, por ejemplo, cada una de las alternativas posibles para ubicar

instalaciones requiere de algún tipo y cantidad específica de transporte, lo que implica un sistema de gestión de inventario diferente. Por esta razón, el autor analiza la interdependencia entre las tres actividades y propone un modelo integrado para el diseño de una red de distribución, que requiere de altos niveles de coordinación. El modelo propuesto, se espera que proporcione un mayor desempeño entre los tres componentes, y que conduzca a mejores soluciones. En concreto, busca evaluar la elección de un sistema operativo en particular, no sólo sobre la base de tiempo de tránsito o el costo.

En términos generales ya se dijo que los modelos matemáticos de localización, se diseñan para contestar las siguientes preguntas: ¿cuántas instalaciones deben ser ubicadas? ¿dónde deben ser localizadas? ¿cómo debe asignarse la demanda del cliente en cada instalación? Las respuestas correspondientes, llevan consigo implícitamente la determinación de la política de transporte e inventarios. Por ejemplo, las decisiones estratégicas de localización de un centro de distribución pueden incluir la determinación y localización del número de almacenes y plantas; capacidad de almacén y planta; proporción de carga (relación); asignación de demandas del cliente para abrir los almacenes; y asignación de almacenes abiertos para abrir las plantas, entre otros. Las decisiones estratégicas de transporte incluyen la selección del modo (ferrocarril, autotransporte, aéreo, marítimo), ya sea propio o rentado. Otras decisiones pueden incluir el tamaño del embarque (o frecuencia del embarque), y la asignación de cargas a los vehículos. Las decisiones del inventario se preocupan por el nivel de inventario total en el sistema y por cada sitio, así como la localización de los mismos.

Existe una fuerte interdependencia entre los tres tipos de decisiones. Un aumento en el número de centros de distribución incrementa el inventario del sistema total. La localización de los inventarios también determina la opción del modo de transporte, tipo y elección del transportista. La decisión de mantener un buen servicio al cliente requeriría el uso de modos de transporte más rápidos y más fiables. Una decisión para cambiar el nivel promedio del ciclo de las existencias llevaría a cambiar el tamaño del embarque en una instalación. Debido a las recientes tendencias tecnológicas y de competitividad, las compañías están convencidas en que no es muy correcto, a la larga, asumir que es suficiente considerar únicamente los costos de transporte por unidad cuando se analiza la localización de los centros de distribución; o considerar las decisiones de inventario relacionadas únicamente con el número y localización de los almacenes de manera independiente de las decisiones de transporte.

Por lo anterior, Jayaraman (1998), buscó minimizar los costos totales de distribución asociados a los tres factores de decisión (localización de instalaciones, niveles de inventario, y selección de las alternativas de transporte). Además, busca representar diferentes opciones de transporte y explícitamente requiere que las demandas de los puntos de venta del cliente para todos los productos, sean satisfechos por los centros de distribución abiertos. El problema, por tanto, es determinar simultáneamente la alternativa de transporte y el nivel de inventario, junto con el número y localización de las plantas y centros de

distribución, que llevaría a los costos totales más bajos de inventario, transporte y localización.

El modelo matemático denominado FLITNET (*Facility Location, Inventory, Transportation Network*) está construido sobre la base de la programación entera mixta, y relaciona los atributos del modo de transporte, localización de los centros de distribución y plantas, así como los parámetros de la política de inventario, sujeto a las restricciones impuestas por el diseño de la red de distribución.

La anotación utilizada es la siguiente:

- I = conjunto de plantas potenciales
- J = conjunto de almacenes potenciales
- K = conjunto de puntos de venta de los clientes
- L = conjunto de productos
- R = conjunto de modos de transporte diferentes
- T_{ijlr} = costo unitario de transporte por enviar el producto l entre la planta i y almacén j , por el modo de transporte r
- F_{ijlr} = frecuencia del embarque de usar el modo de transporte r para el producto l de la planta i , al almacén j
- d_{jklr} = costo unitario de entrega por enviar el producto l entre el almacén j , y punto de la demanda k que usa el modo de transporte r
- L_{ijlr} = promedio de ciclo de entrega para embarques del producto l de la planta i al almacén j , por el modo de transporte r
- CS_{ijlr} = costo del ciclo de inventario en la planta i asociado con el embarque de producto l al almacén j , por el modo de transporte r
- CC_{il} = costo unitario de mantenimiento del producto l en la planta i
- CW_{jl} = costo unitario del inventario del producto l en el almacén j
- C_{lr} = costo unitario del inventario en tránsito del producto l , por unidad de tiempo de tránsito en el modo de transporte r
- a_{kl} = demanda del cliente k para del producto l
- W_j = capacidad del almacén
- G_i = capacidad de la planta
- F_j = costo fijo para abrir y operar un almacén
- O_i = costo fijo por abrir y operar una planta
- S_l = espacio ocupado por el producto l
- W = número de almacenes por abrir
- P = número de plantas por abrir

Los costos totales del modelo FLITNET se expresan como sigue:

Costo anual = costo fijo por abrir y operar un almacén + costo de transporte + costo de entrega + costo del inventario en tránsito + costo del ciclo de existencia

en la planta + costo del ciclo de las existencias en el almacén + costo fijo por abrir y operar una planta.

El modelo propuesto está constituido por la función objetivo y las restricciones siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } Z = & \sum_j F_j Z_j + \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r T_{ijlr} X_{ijlr} + \sum_j \sum_k \sum_l \sum_r d_{jklr} Y_{jklr} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r C_{lr} L_{ijlr} X_{ijlr} + \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r 0.5 * (CC_{il} * X_{ijlr} / F_{ijlr}) + \\ & \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r 0.5 * (CW_{jl} * X_{ijlr} / F_{ijlr}) + \sum_i O_i P_i \end{aligned} \quad (4b.1)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_j \sum_r Y_{jklr} = a_{kl} \quad \forall k, l \quad (4b.2)$$

$$\sum_k \sum_l \sum_r S_l Y_{jklr} = W_j Z_j \quad \forall j \quad (4b.3)$$

$$\sum_j Z_j \leq W \quad (4b.4)$$

$$\sum_k Y_{jklr} \leq \sum_i X_{ijlr} \quad \forall l, r, j \quad (4b.5)$$

$$\sum_j \sum_r \sum_l S_l X_{ijlr} \leq G_i P_i \quad \forall i \quad (4b.6)$$

$$\sum_i P_i \leq P \quad (4b.7)$$

$$X_{ijlr}, Y_{jklr} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l, r \quad (4b.8)$$

$$Z_j, P_i = \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (4b.9)$$

Para el modelo, las variables de decisión son:

X_{ijlr} = Cantidad total de producto l enviado desde la planta i al almacén j por el modo de transporte r

Y_{jklr} = Cantidad total de producto l enviado del almacén j a los puntos de demanda k , por el modo de transporte r

Z_j = {1 si el almacén j está abierto; 0 de otra manera}

P_i = {1 si la planta i está abierta; 0 de otra manera}

La formulación anterior involucra minimizar el costo por la localización de almacenes y plantas; el costo relacionado con el inventario, costo de transporte para el movimiento de los productos desde las plantas hasta los almacenes; y el costo de entrega de los productos desde los almacenes a los puntos de venta del consumidor (4b.1). La condición (4b.2) asegura que la demanda de cada cliente sea satisfecha. La (4b.3) representa la restricción de capacidad del almacén abierto j de acuerdo con la demanda de los clientes. La restricción (4b.4) asegura la localización de los almacenes W . La (4b.5) establece que toda la

demanda de cliente k para el producto l es equilibrada por las unidades totales de producto l , disponible en el almacén j que se ha transportado de las plantas. La condición (4b.6) representa la restricción de capacidad de planta k por lo que se refiere a la cantidad de demanda que puede manejarse. La restricción (4b.7) delimita el número de plantas abiertas para no exceder la cantidad de plantas P . La (4b.8) es la condición de no negatividad del conjunto de variables de decisión (X_{ijlr}, Y_{jklr}) , y la restricción (4b.9) establece la naturaleza binaria sobre los otros dos conjuntos de variables de decisión (Z_j, P_i) .

Qu, *et al.* (1999), también reconocen que las áreas fundamentales de control de inventarios y de planeación de transporte necesitan estar estrechamente coordinadas. Por ello, desarrollaron un sistema que integra decisiones de transporte y de inventario por medio de la combinación de una política de revisión periódica modificada, y una componente del problema del vendedor viajero. El modelo se construye considerando el abasto de múltiples artículos en un ambiente estocástico, con decisiones simultáneas de inventario y de transporte.

El contexto de la investigación se establece a partir de un almacén central que requiere abastecer de productos a un conjunto de detallistas mediante el uso de una flota vehicular (propiedad o controlado por el almacén). El objetivo consiste en determinar una estrategia de abasto (reglas de control del inventario y patrones de ruteo) que permitan a dicho almacén satisfacer su demanda al costo mínimo total de largo plazo por unidad de tiempo.

El modelo de inventario considera un costo fijo de resurtido que es compartido entre todos los artículos incluidos en un abastecimiento determinado, así como un costo mínimo que depende del artículo incluido en el pedido. Se considera que se incurre en un costo de almacenamiento de inventario a una tasa constante por unidad de tiempo. También, se acepta que el costo total por faltantes en el almacén es proporcional al número total de unidades no entregadas. En el problema de transporte se considera un costo fijo para cada parada que realice un vehículo, más un costo variable proporcional a la distancia de viaje. La capacidad del vehículo se asume que es ilimitada. Por otro lado, se establece que no se permitirá escasez o retardos en cualquier recolección.

Por lo anterior, para cada período de surtido j , el costo de transporte incluye los costos de parada $\gamma_{pj}k_{Tp}$ (en aquellas plantas visitadas, p), más los costos de operación del viaje $cD(S_j)$. En promedio, para cada ciclo de longitud MT , el costo de transporte se determina como:

$$\text{Costo promedio de transporte} = \sum_{j=1}^M \left(\sum_{p=1}^P \gamma_{pj}k_{Tp} + cD(S_j) \right) / MT \quad (4b.10)$$

Por su parte, los costos por ordenar están compuestos por el costo fijo (K) por colocar un pedido, y el costo individual por ordenar el producto (i), que es incluido en la orden (K_{ii}). Es decir:

$$\text{Costo promedio ordenar} = \sum_{j=1}^M \left(K + \sum_{i=1}^N y_{ij} k_{ii} \right) / MT = K/T + MOC \quad (4b.11)$$

Donde los costos menores por ordenar se calculan con la siguiente expresión:

$$MOC = \sum_{i=1}^N k_{ii} / m_i T \quad (4b.12)$$

Siguiendo a Hadley y Whitin (1963)⁶, los autores convienen en calcular el costo de almacenamiento entre la llegada de dos órdenes sucesivas, en lugar de considerar el período de colocación entre dichas órdenes. Cuando un pedido es colocado, el almacén espera un tiempo de ciclo constante L para que los artículos lleguen, después del cual el nivel de inventario esperado para el artículo i está dado como: $R_i - \lambda_i L$.

El siguiente pedido llega $m_i T + L$ tiempo después, y el nivel de inventario correspondiente justo antes de la llegada de dicha orden es $R_i - \lambda_i (m_i T + L)$. Por tanto, el nivel de inventario neto promedio (disponible menos faltantes) del artículo i durante el intervalo, es aproximadamente: $R_i - \lambda_i (L + m_i T / 2)$. Para este grado de exactitud, el costo de posesión promedio de largo plazo es definido por:

$$H = \sum h_i [R_i - \lambda_i (L + m_i T / 2)] \quad (4b.13)$$

Por otro lado, un faltante ocurre después de que una orden es colocada en el tiempo t , si la demanda acumulativa x_i (entre t y $t + L + m_i T$) excede R_i , habrá entonces un costo de penalización π para cada unidad faltante. Si la demanda tiene una función de densidad $f(x_i; L + m_i T)$ sobre el intervalo de longitud $L + m_i T$, el costo promedio del faltante BL en el largo plazo esta determinado por:

$$BL = \sum_{i=1}^N (\pi_i / m_i T) \int_{R_i}^{\infty} (x_i - R_i) f(x_i, L + m_i T) dx_i \quad (4b.14)$$

Finalmente, los autores asumen que las demandas de los artículos dados son independientes e idénticamente distribuidas en la forma de un proceso de movimiento de Brownian. Es decir, cuando fijan las variables de decisión m_i y

⁶ Véase Hadley, G. y Whitin, T. M. (1963). "Analysis of Inventory Systems". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

T , la demanda sobre cualquier intervalo de tiempo particular de longitud τ se distribuye normalmente, con $E(x_i; T) = \lambda_i T$ y $Var(x_i, \tau) = \lambda_i \tau$. Considerando que $G = MOC + H + BL$. Entonces, el objetivo es minimizar el costo total esperado de largo plazo C en el problema a continuación:

$$\min C = \sum_{j=1}^M \left(\sum_{p=1}^P \gamma_{pj} k_{Tp} + cD(S_j) \right) / MT + K/T + G \quad (4b.15)$$

Sujeto a:

$$M = \text{mínimo común múltiple de } (m_1, m_2, \dots, m_N) \quad (4b.16)$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{sí } m \text{ divide a } j \text{ exactamente} \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (4b.17)$$

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{sí } \sum_{i=1}^N y_{ij} \theta_{ijP} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (4b.18)$$

$$0 \neq S \subseteq S \quad (4b.19)$$

$$m_i \text{ es entero; } R_i, T \geq 0 \text{ y } 1 \leq i \leq N, \quad 1 \leq j \leq M, \text{ y } 0 \leq p \leq P \quad (4b.20)$$

Para resolver el problema anterior, los autores proponen un método de solución por fases del tipo heurístico, minimizando los costos totales promedio de largo plazo. Es decir, el algoritmo trabaja utilizando cálculos por separado del inventario y de las decisiones de ruteo, para luego coordinarlas apropiadamente. Puesto que el costo mínimo es desconocido, una cota inferior es encontrada para evaluar la efectividad del procedimiento heurístico.

Recientemente, Eskigun, *et al.* (2005), desarrollaron un modelo de optimización para simular la entrega de automóviles desde las plantas ensambladoras a los centros de distribución/consolidación. Particularmente, el enfoque del modelo está dirigido a minimizar los costos fijos de las instalaciones y de transporte, considerando el tiempo de ciclo, la localización de las instalaciones, y la selección del modo de transporte. En términos generales, dicho trabajo puede ubicarse en el contexto del diseño de la red de la cadena de suministro desde el punto de vista de la localización de instalaciones.

El modelo busca contestar las siguientes preguntas: a) ¿dónde ubicar los centros de distribución?; b) ¿cuál debe ser el tamaño (capacidad) del centro de distribución?; c) ¿cómo deben ser entregados los vehículos por áreas de demanda, por camiones o por centro de distribución?; y d) ¿cuál debe ser el volumen en cada centro de distribución?

La función objetivo del problema se determina por la suma de los costos de transporte; el costo del tiempo de ciclo; y los costos fijos. Este modelo considera el tiempo de espera en las plantas y en los centros de distribución, así como el tiempo total del ciclo de entrega de las plantas a las zonas de demanda. Esta consideración es el principal elemento que distingue a este trabajo con respecto a otros relacionados con el diseño de la red.

Los parámetros considerados en el modelo, son:

- d_{ik} = demanda total del tipo de vehículos de la planta i en la zona de demanda k
- cpv_{ij} = costo unitario de transportar un vehículo por ferrocarril desde la planta i al centro de distribución j (vdc) (incluye el costo de operación del vdc por vehículo)
- cvd_{jk} = costo unitario de transportar un vehículo desde el centro de distribución j (vdc), hasta la zona de demanda k por medio de camión
- cpd_{ik} = costo unitario de transportar un vehículo desde la planta i a la zona de demanda k , de manera directa por medio de camión
- tpv_{ij} = tiempo de tránsito desde la planta i al centro de distribución j
- tvd_{jk} = tiempo de tránsito desde el centro de distribución j a la zona de demanda k
- fv_j = costo fijo por abrir el centro de distribución j (este costo no depende del volumen o capacidad del centro, pero es fijo al establecer uno nuevo)
- kv_j = número máximo de vehículos que pueden enviarse a través del centro de distribución j durante el año
- h = valor del dinero en el tiempo de ciclo ($\$/día$), tasado por la compañía

Como variables de decisión:

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{Si los vehículos son entregados desde la planta } i, \text{ a la zona de demanda } \\ & k \text{ a través del centro de distribución } j \\ 0 & \text{De otra manera} \end{cases}$$

$$Z_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{Si los vehículos son entregados desde la planta } i, \text{ a la zona de demanda } \\ & k \text{ directamente por camión} \\ 0 & \text{De otra manera} \end{cases}$$

$$V_j = \begin{cases} 1 & \text{Si el centro de distribución } j \text{ es abierto} \\ 0 & \text{De otra manera} \end{cases}$$

$LTPVD_{ijk}$ = Tiempo de ciclo de los vehículos transportados desde la planta i al centro de distribución j , a la zona de demanda k

$$LTPVD_{ijk} = DTPV_{ij} + DTVD_{jk} + tpv_{ij} + tvd_{jk} \quad (4b.21)$$

Donde $DTPV_{ij}$, $DTVD_{jk}$, tpv_{ij} y tvd_{jk} son definidas en las funciones de tiempo de demoras y en la sección de parámetros, respectivamente.

$LTPD_{jk}$ = Tiempo de ciclo de los vehículos transportados directamente desde la planta i , a la zona de demanda k por medio de camión

$$LTPD_{jk} = DTPD_{ik} + tvd_{ik} \quad (4b.22)$$

Donde $DTPD_{ik}$ y tvd_{ik} son definidas en las funciones de tiempo de demora y en la sección de parámetros, respectivamente.

Las funciones de demora son:

$DTPV_{ij}$ = Tiempo promedio de demora de los vehículos enviados desde la planta i , al centro de distribución j

$$DTPV_{ij} = \begin{cases} c_{ij}^1 + \frac{c_{ij}^2}{\sum_k d_{ik} X_{ijk}} & \text{si } \sum_k d_{ik} X_{ijk} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3b.23)$$

Donde c_{ij}^1 y c_{ij}^2 son constantes.

$DTPD_{ij}$ = Tiempo de demora de los vehículos transportados directamente desde la planta i hasta la zona de demanda k .

$$DTPD_{ik} = \begin{cases} c_{ij}^3 + \frac{c_{ij}^4}{Z_{ik}} & \text{Si } Z_{ik} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3b.24)$$

Donde c_{ij}^3 y c_{ij}^4 , son constantes.

$DTVD_{ij}$ = Tiempo de demora de los vehículos en el VDC j , los cuales son enviados a la zona de demanda k

$$DTVD_{ij} = \begin{cases} c_{ij}^5 + \frac{c_{ij}^6}{\sum_k d_{ik} X_{ijk}} & \text{Si } \sum_k d_{ik} X_{ijk} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3b.25)$$

Donde c_{ij}^5 y c_{ij}^6 , son constantes.

Por tanto, el problema de optimización está constituido por la función objetivo y las restricciones siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & \sum_{ijk} (cpv_{ij} + cvd_{jk}) \cdot d_{ik} X_{ijk} + \sum_{ik} (cpd_{ik}) \cdot d_{ik} Z_{ik} \\ & + \sum_{ijk} h(LTPVD_{ijk}) \cdot d_{ik} X_{ijk} + \sum_{ik} h(LTPD_{ik}) \cdot d_{ik} Z_{ik} + \sum_j (fv_j) \cdot V_j \end{aligned} \quad (4b.26)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_j X_{ijk} + Z_{ijk} = 1 \quad \forall i, k \quad (4b.27)$$

$$\sum_{ik} d_{ik} X_{ijk} \leq (kv_j) V_j \quad \forall j \quad (4b.28)$$

$$X_{ijk}, Z_{ik}, V_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \quad (4b.29)$$

El primer término en la función objetivo representa el costo total de transporte desde las plantas a los centros de distribución a la zona de demanda. El segundo de los términos son los costos asociados al transporte con envíos directos desde las plantas a las zonas de demanda. Las siguientes dos sumatorias representan los costos de tiempo de ciclo de los embarque desde el centro de distribución y envíos directos, respectivamente. La última suma representa los costos fijos por abrir un centro de distribución. La condición (4b.27) garantiza que la demanda en la zona k es servida a través de un solo centro de distribución o por envíos directos, pero no ambos; en tanto que la (4b.28) asegura que el número de vehículos entregados a través del centro de distribución dentro de un período de planeación no excede el límite de capacidad.

Debido a que este problema es no lineal, Eskigun, *et al.* (2005), introduce nuevas restricciones y variables binarias para formular el modelo como un problema de programación lineal entero. Definen:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si } \sum_k X_{ijk} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (4b.30)$$

$$B_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{Si } \sum_k X_{ijk} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (4b.31)$$

$$E_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{Si } \sum_k Z_{ik} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (4b.32)$$

Estas nuevas variables representan los arcos que van desde las plantas (A_{ij}) a los centros de distribución. De éstos a las zonas de demanda (B_{jk}), y de las plantas directamente a las zonas de demanda (E_{ik}). Eskigun, *et al.* (2005), agregan restricciones para asegurar que las relaciones antes definidas se mantengan. Dichas restricciones se definen como a continuación se presenta:

$$X_{ijk} \leq A_{ij} \quad \forall i, j, k \quad (4b.33)$$

$$X_{ijk} \leq B_{jk} \quad \forall i, j, k \quad (4b.34)$$

$$Z_{ik} \leq E_{ik} \quad \forall i, k \quad (4b.35)$$

Juntas, estas restricciones garantizan que las variables toman el valor de uno cuando existe al menos un vehículo entregado entre dos localizaciones dadas. De otra manera se vuelve cero.

Cuando el tiempo de ciclo y el tiempo de demora se escriben en términos de las nuevas variables definidas, y sustituidas en la función objetivo, la formulación anterior puede reducirse y redefinirse como un modelo de programación lineal entero, con la ayuda de variables binarias y la redefinición de las funciones del tiempo de demora.

Proposición 1:

$$\sum_{ijk} h(LTPVD_{ijk}) \cdot d_{ik} X_{ijk} = \sum_{ijk} h(c_{ij}^1 + c_{ik}^5 + tpv_{ij} + tvd_{jk}) d_{ik} X_{ijk} + \sum_{ij} h(c_{ij}^2) A_{ij} - \sum_{jk} h(c_{jk}^6) B_{jk} \quad (4b.36)$$

Proposición 2:

$$\sum_{ijk} h(LTPD_{ik}) \cdot d_{ik} X_{ik} = \sum_{ijk} h(c_{ik}^3 + tpd_{ik}) d_{ik} Z_{ik} + \sum_{ij} h(c_{ik}^4) E_{ik} \quad (4b.37)$$

Con estas dos proposiciones, el modelo se establece como un modelo de programación lineal entero. Después de presentar el modelo, dichos autores desarrollan un conjunto adicional de parámetros para hacer más fácil la lectura del mismo. Sea:

δ_{ijk}^r = costo lineal de entregar un vehículo desde la planta i a la zona de demanda k , a través del centro de distribución $j = cpv_{ij} + cvd_{jk} + h(c_{ij}^1 + c_{ik}^5 + tpv_{ij} + tvd_{jk})$

δ_{ik}^t = costo lineal de entregar un vehículo desde la planta i a la zona de demanda k , directamente por camión = $cpd_{ik} + h(c_{ik}^3 + tpd_{ik})$

γ_{ij}^r = costo fijo por operar una ruta entre la planta i y el centro de distribución $j = h(c_{ik}^3)$

γ_{jk}^v = costo fijo por abrir una ruta entre un centro de distribución j y la zona de demanda $k = h(c_{jk}^6)$

γ_{ik}^t = costo fijo por abrir un arco entre la planta i y la zona de demanda $k = h(c_{ik}^4)$

Con base en lo anterior, el modelo modificado queda de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } \sum \delta_{ijk}^r d_{ik} X_{ijk} + \sum \delta_{ik}^t d_{ik} Z_{ik} + \sum \gamma_{ij}^r A_{ij} + \sum \gamma_{jk}^v B_{jk} + \sum \gamma_{ik}^t E_{ik} - \sum_j (fv_j) \cdot V_j \quad (4b.38)$$

$$\text{Sujeto a: } A_{ij}, B_{jk}, E_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k \quad (4b.39)$$

y las restricciones (4b.27) a (4b.35)

El modelo es un programa lineal entero donde todas las variables son binarias. Cuando son relajadas las restricciones (4b.33) a (4b.35), el modelo se convierte en un problema de localización de una instalación con capacidad definida. Cuando la restricción (4b.28) no es considerada, el problema se convierte en problema de flujo en red. Cuando las restricciones (4b.28) y de la (4b.33) a (4b.35) son relajadas, se convierte un modelo estándar de asignación.

Los autores reconocen que el modelo no es práctico cuando aumenta la cantidad de plantas, centros de distribución, o zonas de demanda, tornándose complicado obtener soluciones exactas en un tiempo razonable de cómputo. Por tanto, desarrollaron un algoritmo con base lagrangeana para obtener soluciones cercanas al óptimo.

De acuerdo con Eskigun, *et al.* (2005), los resultados del algoritmo indicaron que el tiempo de ciclo gana importancia. Señalan que con el uso de camiones, el tiempo de ciclo, de enviar vehículos directamente desde las plantas a las zonas de demanda, se realiza en corto tiempo. Sin embargo, el tiempo promedio de entrega no baja del 65.34% con respecto al caso base. Lo anterior se debe a los tiempos de procesamiento (tiempo de demora) que se presentan en las plantas y los centros de distribución. Con el uso de camiones resultó mayor el costo de transporte en comparación con el ferrocarril. Adicionalmente, cuando el volumen de vehículos entregados directamente por camiones crece, el número de centros de distribución abiertos bajan significativamente y el efecto en los indicadores de capacidad de la cadena de suministro son menores. Aun cuando no se menciona los resultados que obtuvieron, muestran claramente la relación entre el nivel de inventario y el costo de transporte. Por ejemplo, más centros de distribución, menores costos de transporte pero un mayor nivel de inventarios y viceversa.

4.1.3 Características principales de los modelos de coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte

En el cuadro 4.1 se muestra el resumen de las características más relevantes de los modelos de coordinación de inventarios que consideran las variables fundamentales del transporte. En dicho cuadro se aprecia que los documentos reportados, tratan la demanda como un elemento estocástico o determinístico. En la mayoría de los casos, los modelos son desarrollados para el abasto de un sólo producto. En este sentido, se observan dos casos que analizan para más de un producto, la estrategia de coordinación directa de inventarios (Van Eijs, 1994 y Reyes-Gaytán, 2002); otros dos, con un enfoque de diseño red y con coordinación implícita de inventarios, atienden también un problema multi-producto (Jayaraman, 1998; y Qu, *et al.*, 1999).

Con relación a la estructura de la cadena de suministro analizada, se encontró que la estructura básica (cliente-proveedor) es el punto de referencia para la mayoría de los investigadores que estudian el tema de la coordinación de inventarios,

considerando al transporte. Es de sumo interés observar que algunos autores incluyen al transportista como un miembro más de la cadena (Lei, *et al*, 2003; y Choi, *et al*, 2004). Derivando del contexto que presentan en sus investigaciones, en cierta forma puede decirse que es muy novedoso, ya que ambos análisis reconocen fehacientemente el efecto que produce la coordinación del abasto entre cliente y proveedor, en los beneficios directos para el transportista.

Cuadro 4.1
Características principales de los modelos de coordinación de inventarios, considerando las variables fundamentales del transporte

| | Autor | Demanda | Producto | Eslabones | Horizonte de planeación | Precio del producto | Modos | Variable de transporte clave | Control del canal |
|----|------------------------------|--------------|----------------|--|-------------------------|---------------------|------------|--|-------------------|
| 1 | Constable y Whybark, 1978 | Aleatoria | Un producto | Un cliente Un proveedor | Infinito | Constante | Unimodal | Tiempo de transporte | Proveedor |
| 2 | Van Eijs, 1994 | Aleatoria | Multi-producto | Un cliente Un proveedor | Infinito | Constante | Unimodal | Tiempo de ciclo, esquema de consolidación | Proveedor |
| 3 | Hoque y Goyal, 2000 | Determinista | Un producto | Un cliente Un proveedor | Infinito | Constante | Unimodal | Capacidad de transporte | Proveedor |
| 4 | Lei, <i>et al</i> , 2003 | Determinista | Un producto | Un proveedor Un transportista Un cliente | Infinito | Variable | Unimodal | Tarifa y costo unitario de transporte | Ninguno |
| 5 | Choi, <i>et al</i> , 2004 | Determinista | Un producto | Un proveedor Un transportista Un cliente | Infinito | Variable | Unimodal | Tarifa, costo unitario de transporte y nivel de ingresos | Ninguno |
| 6 | Zhao, <i>et al</i> , 2004 | Determinista | Un producto | Un proveedor Un cliente | Infinito | Constante | Unimodal | Capacidad de transporte, tiempo de ciclo, costos fijos y variables | Proveedor |
| 7 | Sethi, <i>et al</i> , 2005 | Aleatoria | Un producto | Un proveedor Un cliente | Finito | Constante | Tres modos | Nivel de servicio, tiempo de entrega | Proveedor |
| 8 | Toptal, 2003 | Determinista | Un producto | Un proveedor Un fabricante Un cliente | Finito | Constante | Unimodal | Costos de abasto (entrada) y entrega | Proveedor |
| 9 | Reyes y Gaytán, 2003 | Determinista | Multi-producto | Un proveedor Un cliente | Finito | Variable | Dos modos | Costo de transporte, tiempo de entrega | Proveedor |
| 10 | Jayaraman | Determinista | Multi-producto | Var. proveedores Var. clientes | Infinito | Constante | Unimodal | Costo de transporte, tiempo de entrega | Proveedor |
| 11 | Qu, <i>et al</i> , 1999 | Aleatoria | Multi-producto | Un proveedor Var. clientes | Infinito | Constante | Unimodal | Costo de transporte | Proveedor |
| 12 | Eskigun, <i>et al</i> , 2005 | Determinista | Un producto | Var. proveedores Var. clientes | Infinito | Constante | Unimodal | Tiempo de ciclo, selección del modo de transporte | Proveedor |

Por lo que respecta al horizonte de planeación, la mayor parte de los modelos se enfocan a atender el control de inventarios sin algún tipo de restricción en el tiempo, es decir, se utilizan de manera infinita en cada período. Por su parte, sólo algunos modelos consideran la planeación finita para llevar sus análisis a una situación más dinámica, es decir, plantean un número N de períodos fijos para llevar a cabo el análisis del comportamiento de los inventarios en el tiempo, con énfasis en la toma de decisiones estratégicas. Al igual que los modelos de coordinación de inventarios destallados en Jiménez (2005), una parte importante

de publicaciones revisadas considera como un parámetro (una constante) el valor del precio de los productos o mercancías; para otras, este factor es un mecanismo utilizado para promover la coordinación; y como tal, se considera como una variable a determinar, ya sea para el caso de aplicar una política de descuentos por volumen o para inducir a aceptar ciertas condiciones operativas de abastecimiento.

Por lo que se refiere al transporte, en términos generales los modelos que incluyen sus variables fundamentales no distinguen más de un modo de transporte. Es decir, atienden el problema unimodal. Únicamente dos artículos (Sethi, *et al*, 2002; y Reyes-Gaytán, 2003) involucran más de un modo de transporte. Una reflexión acerca del tema de la coordinación de inventarios y las variables fundamentales del transporte, considerando el artículo de Sethi, *et al*. (2002), permite identificar que la idea de tener en cuenta al transporte como un elemento para el control de los sistemas de inventario, no es reciente; a pesar de ello, muy pocos son los estudios que en el contexto de la coordinación de inventarios se llevan a cabo, y mucho menos, considerando esquemas multimodales o la combinación de los diferentes modos de transporte para el envío de los productos. Lo anterior, puede deberse a la complejidad que implica la modelación de la combinación de las distintas posibilidades de transporte para más de dos modos.

En este mismo sentido, las variables fundamentales del transporte que más se han considerado en los modelos de coordinación de inventarios, son: el costo de transporte; tiempo de ciclo para la entrega de los productos; capacidad de transporte; tiempo en tránsito; velocidad de entrega (nivel de servicio); y con menor frecuencia, la elección del modo de transporte.

Finalmente, como ya fue mencionado, los investigadores que tratan este importante tema de la coordinación de inventarios, en los que involucran las variables fundamentales del transporte son muy escasos, y llevan a cabo los estudios en diversos contextos de análisis; algunos, vertidos en estrategias de coordinación planteadas a partir de algún tipo de visión (proveedor, cliente o ambos). En general, puede establecerse que los estudios para el control y gestión de inventarios que incluyen las variables fundamentales del transporte, no parecen seguir un patrón específico; en cambio, puede observarse que han surgido líneas de investigación que pueden ser ampliamente extendidas.

Conclusiones y líneas de futuro

El estudio conjunto de las actividades más influyentes en los costos logísticos, es una actividad de vital importancia. Al respecto, la consideración explícita del proceso de transporte en la gestión de inventarios es sin duda, un aspecto que permite distinguir con mayor claridad el impacto en los costos de la gestión logística. Paulatinamente, el interés por el estudio conjunto de estas dos actividades logísticas ha venido creciendo, bajo diferentes perspectivas de análisis. Sin embargo, a partir de la revisión realizada a la literatura puede afirmarse que aun son pocos los autores que estudian este tema con un enfoque orientado a la coordinación de inventarios, considerando las variables fundamentales del transporte. En tal virtud, puede corroborarse la hipótesis planteada al inicio de este trabajo de investigación.

En particular, el problema de los inventarios reside en que las empresas tratan de optimizar individualmente sus beneficios, muchas veces en perjuicio de su cliente o proveedor. Diseñan políticas de inventario, por ejemplo, considerando la capacidad de respuesta de su contraparte comercial, sin tener en cuenta el impacto de la operación del transporte, creando un clima de incertidumbre que de manera inmediata, se reflejan en altos costos logísticos para ambas partes. Por lo anterior, puede establecerse que mientras no exista algún tipo de coordinación, los costos logísticos seguirán siendo un gran problema para las empresas desintegradas.

En definitiva, puede establecerse que la interacción entre los inventarios y el transporte subyace en la determinación de la política de inventario que una empresa debe asumir, en torno al tamaño del pedido y el período de suministro, en función de las características del modo de transporte que se emplee. Así, las diferentes alternativas para transportar mercancía conforman un conjunto de opciones con características exclusivas, y con atributos especiales que suscriben distintos niveles de servicio. Por tanto, el tamaño del embarque en cada modo de transporte se especifica como una función de sus atributos. Desde el punto de vista operativo, en consecuencia se observa la existencia de una relación recíproca entre estos dos elementos del sistema de inventario.

Para tratar de ser más precisos, a continuación se presenta una serie de comentarios concluyentes en torno a la influencia del transporte en la gestión de inventarios:

1. El transporte es un elemento de la cadena de suministro que merece más atención en el sistema de inventarios, tanto en la práctica como en la investigación científica.
2. El impacto del transporte en el sistema de gestión de inventario se refleja en diversos escenarios de análisis, por ejemplo, en el diseño de la cadena de

- suministro; en la definición del tamaño del pedido; en la determinación de los períodos de abasto (*lead times*); en el costo total de gestión logística; etc.
3. El precio de los productos se ve afectado por el nivel de servicio que presenta el transporte; por tanto, impacta en los costos por almacenar y de inventarios en tránsito.
 4. La combinación modal de transporte es una alternativa de administración de los flujos de carga. Bien articulado, permite la reducción de los costos en el suministro de los productos.
 5. Bajo una adecuada gestión de los servicios de consolidación, el transporte es un factor fundamental para el logro de las economías de escala.
 6. El transporte aumenta la eficiencia interna de las empresas, y permite la integración de los procesos de negocio (integración empresarial horizontal). En este sentido, el transporte no es independiente y autónomo frente a otras actividades del proceso de abasto, producción y distribución. En tal virtud, las empresas deben demandar una mayor coordinación con el transporte y sus actividades relacionadas con éste.

En concordancia con Sethi, *et al.* (2002), los planteamientos vertidos en los documentos revisados permiten observar que los modelos de gestión multimodal no son muy socorridos. En general, los análisis se llevan a cabo a nivel unimodal, y sólo para el caso de entregas. Toptal (2003), formuló un modelo considerando el transporte de abasto y de distribución. En general, los datos de transporte utilizados en los modelos son parametrizados, es decir, ningún elemento del transporte se plantea como una variable de decisión.

La literatura revisada, también permite observar diversas formas de abordar el tema del impacto del transporte en la gestión de inventarios. En general, la gran mayoría de los autores evalúan el costo como el principal factor de impacto y sólo algunos, el tiempo de viaje de las mercancías o en su defecto la capacidad de transporte. En realidad, un análisis de otro tipo, por ejemplo, considerando variables cualitativas como la confiabilidad o nivel de servicio del transporte, prácticamente no se realiza; ello puede deberse a las dificultades que presentan en su modelación.

A partir de los resultados de los estudios dedicados a la coordinación de inventarios, que consideran las variables fundamentales del transporte, pueden corroborarse las ventajas en costo y beneficios alcanzados por el uso de estrategias de coordinación, no únicamente para el cliente y el proveedor, sino también para el transportista. Por tal motivo, se justifica la idea de tener en cuenta en todo esquema de gestión al factor transporte, como un elemento más en los sistemas de evaluación de estrategias de suministro. No considerarlo implicaría seguir juzgándolo como una actividad funcional y no como una estrategia evolutiva que propicia ventajas competitivas.

El tratamiento formulado para la gestión de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte, contribuyen notablemente al conocimiento más detallado de la interacción entre estas dos actividades logísticas. Reconstruye esquemas tradicionales de la teoría de inventarios y tiene un gran impacto en los modelos de servicio al cliente.

Basado en los nuevos esquemas de coordinación de inventarios a partir de la consideración explícita del transporte, las prácticas logísticas y las políticas de gestión deben cambiar hacia la búsqueda de integración de los procesos de negocio, formalizar esquemas de contratación de largo plazo, y establecimiento de alianzas estratégicas, entre otros aspectos.

En relación con las limitaciones de este trabajo en particular, básicamente éstas residen en el enfoque mismo de la investigación. En tal sentido, la aseveración de que pocos son los estudios que se dedican a la coordinación de inventarios que consideran las variables fundamentales del transporte, se ve limitada debido al enfoque determinista abordado. No se duda que pueda existir algún otro documento sobre el tema, con un enfoque estocástico.

Líneas de futuro

Acerca de las líneas de investigación que pueden abordarse, se han identificado las siguientes ideas:

1. Extender los modelos de coordinación de inventarios, considerando explícitamente el transporte como una variable de decisión para el caso multimodal. Al respecto, se plantea el desarrollo de un modelo que determine las cantidades de carga de diversos productos o mercancías para distintos modos de transporte, considerando sus parámetros operativos y de nivel de servicio.
2. Asimismo, se plantea que los modelos puedan estar sujetos a modificaciones futuras, como son: a) adoptar las estrategias de coordinación de inventarios identificadas en Jiménez (2005), considerando las variables fundamentales del transporte; b) contemplar más eslabones en la cadena de suministro, es decir, tener en cuenta fabricantes y distribuidores *río arriba* y *río abajo* del cliente y del proveedor, ubicados en diferentes sitios; c) para los mismos modelos desarrollados, evaluar el efecto para una demanda dinámica y en su caso, estocástica; y d) modelar mecanismos de coordinación no sólo en términos de descuento en el precio del producto por volúmenes de abasto, sino que también en el descuento de las tarifas de transporte.

Referencias

1. Abad, P. L. y Aggarwal, Vigía (2005). "Incorporating Transport Costs in Lot Size and Pricing Decisions with Downward Sloping Demand". *International Production Economics*; vol. 95, pp. 297-305.
2. Alberta Transportation (2004). "Alberta Containerized Intermodal Freight Analysis (Exploratory Study)". GTS Group-International. <http://www.tu.gov.ab.ca/Content/doctype56/production/ContainerStudy.pdf>.
3. Banerjee, A. (1986). "A Joint Economic Lot Size Model for Purchaser and Vendor". *Decision Sciences*; vol. 17, pp. 292-311.
4. Banomyong, Ruth y Beresford, Anthony K.C. (2001). "Multimodal Transport: the Case of Laotian Garment Exporters". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*; vol. 31, num. 9.
5. Beaumol, W. J. y Vinod, H.D. (1970). "An Inventory Theoretical Model with Transport Demand," *Management Science*, Vol. 16, No. 7, pp. 413-421.
6. Beresford, A.K.C. (1999). "Modelling Freight Transport Costs: a Case Study of the UK-Greece Corridors". *International Journal of Logistics: Research and Applications*; vol. 2, num. 3, pp. 229-246.
7. Bookbinder y Neil (1998). "Intermodal Routing of Canada-México Shipments Under NAFTA". Pergamon; Elsevier Science, Ltd; vol. 34, num. 4, pp. 289-303.
8. Browning, Beau, y White, A. (2000). "Collaborative Transportation Management". Logility Inc. White paper. <http://www.idii.com/wp/ctm.pdf>.
9. Bryan, Greg (1999). "Anatomy of a Collaborative Transportation Procurement Optimization Process", Council of Logistics Management Annual Conference; October.
10. Carter J. R. y Ferrin B. G. (1995). "The Impact of Transportation Costs on Supply Chain Management". *Journal of Business Logistics*; vol. 16 (1), pp.189-212.
11. Carter, J. R. y Ferrin, B.G. (1996). "Transportation Costs and Inventory Management:: Why transportation costs matter". *Production and Inventory management Journal*; vol. 37, pp. 58-62.
12. Choi, L, Wang y Fang Cx. (2004). "Channel Coordination with Price-Quality Sensitive Demand and Concave Transportation Costs", Working paper. Rutgers Center of Operations Research.
13. Constable, G. K. y Whybark, D. C. (1978). "The Interaction of Transportation and Inventory Decisions". *Decision Sciences*; vol. 9, pp. 688-699.
14. Daganzo, Carlos F. (1996). "Logistics Systems Analysis". Springer. 2ª Edition.
15. Dewitt, William y Clinger, Jennifer (2000). "Intermodal Freight Transportation". A1B05: TRB, Committee on Intermodal Freight Transport Chairman: Gerhardt Muller, U.S. Merchant Marine Academy.
16. Dong, Yan y Xu, Kefeg (2002). "A Supply Chain Model of Vendor Managed Inventory". *Transportation Research Part E*; vol. 38, pp. 75-95.
17. Drexler y Kimms (1997). "Lot Sizing and Scheduling – Survey and Extensions". *European Journal of Operational Research*; vol. 99, pp 221-235.
18. Eijs, M. J. G. Van (1994). "Multi-item Inventory Systems with Joint Ordering and Transportation Decisions". *Int. J. Production Economics*; vol. 35, pp. 285-292.
19. Eskigun, E, Uzsoy, R, Preckel, P, Beaujon, G, Krishnan, S, y Tew, J. (2005). "Outbound Supply Chain Network Design with Mode Selection, Lead Times and Capacitated Vehicle Distribution Centers". *European Journal of Operations Research*; vol. 165, pp. 182-206.

20. Esper, Terry y Williams, Lisa R. (2003). "The Value of Collaborative Transportation Management (CTM): Its Relationships to CPFR and Information Technology". *Transportation Journal*; vol 42; num. 4, pp. 55-65.
21. Feng, Q., Gallego, G., S.P. Sheti, Yan, H. y Zhang, H. (2005). "Periodic-Review Inventory Model with Three Consecutive Delivery Modes and Forecast Updates", *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 124, No. 1, pp. 137-155.
22. Gaytán, J. y Pliego, B (2002). "Vendor - Multibuyers Coordination through Common Replenishment Epochs under Dynamic Demand". *INFORMS*, San Jose, California, USA; pp. 17-20.
23. Gentry, Julie (1995). "Role of Carriers in Buyer/Supplier Strategic Alliances". Center for Advanced Purchasing Studies-CAPS.
24. Giermanski, J. (1998). "NAFTA, Border Crossing and the FNM". Telephone interview (April 7) by the present authors with JG, Director of Center for Study of W. Hemispheric Trade, Texas A & M Intl. U. Laredo TX. USA.
25. Goyal, S. K. (1988). "A Joint Economic-Lot-Size Model for Purchaser and Vendor: A Comment". *Decision Sciences*; vol. 19, pp. 236-241.
26. Goyal, S. K. y Gupta, Y. P. (1988). "Integrated Inventory Models: the Buyer-Vendor Coordination". *European Journal of Operations Research*; vol. 41, pp. 261-269.
27. Goyal, S.K. (1976). "An Integrated Inventory Model for a Single Supplier-Single Customer Problem". *International Journal of Production Research*; vol. 15(1), pp. 107-111.
28. Hill, R M. (1997). "The Single-Vendor Single-Buyer Integrated Production-Inventory Model with a Generalized Policy. *European Journal of Operational Research*; vol. 97, pp. 493-499.
29. Hill, R M. (1999). "The Optimal Production and Shipment Policy for a Single-Vendor Single-Buyer Integrated Production-Inventory Problem". *International Journal of Production Research*; vol. 37, pp. 2463-2475.
30. Hoque, M. A. y Goyal, S. K. (2000). "An Optimal Policy for a Single-Vendor Single-Buyer Integrated Production-Inventory System with Capacity Constraint of the Transport Equipment". *International Journal Production Economics*; vol. 65, pp. 305-315.
31. Jayaraman, Vaidyanathan (1998). "Transportation, Facility Location and Inventory Issues in Distribution Network Design". *International Journal of Operations & Production Management*; vol. 18, num. 5, pp. 471-494.
32. Jiménez S. J. Elías (2005). "Estado del arte de los modelos matemáticos para la coordinación de inventarios en la cadena de suministro". Universidad Politécnica de Valencia. Documento de trabajo-Trabajo de investigación, como parte del programa Doctoral "Gestión de la Cadena de Suministro e Integración Empresarial" (Documento inédito).
33. Jiménez S. J. Elías y Hernández, Salvador (2002). "Marco conceptual de la cadena de suministro: un nuevo enfoque logístico". Instituto Mexicano del Transporte; Publicación Técnica No. 215.
34. Khouja, Moutaz (2003). "Optimizing Inventory Decisions in a Multi-Stage Multi-Customer Supply Chain". *PERGAMON, Transportation Research Part E*; pp. 193-208.
35. Kim, B., Leung, J.M.Y, Park, K. T; Zhang, G, Lee, S. (2002). "Configuring a Manufacturing Firm's Supply Network with Multiple Suppliers". *IIE Transactions*; vol. 34(8), pp. 663-677.
36. Klastorin, T. D, Moinzadeh, Kamran y Son, Joong (2002). "Coordinating Orders in Supply Chains Through Price Discounts". Working paper. <http://faculty.washington.edu/kamran/TimingDiscPaper.pdf>.

37. Lambert, D. M. y Stock, J. R. (1998). "Fundamentals of Logistics Management". New York: Irwin-McGraw Hill, 611 p.
38. Lei, L, Wang, Q. y Fan, C. (2003). "Optimal Business Policies for Supplier-Transporter-Buyer Channel with a Price-Sensitive Demand", Rutgers Center of Operations Research. Research Report RRR-40-2003.
39. Lei, Lei, Wang, Quiang y Fan, Chunxing (2003). "Optimal Business Policies for a Supplier-Transporter-Buyer Channel with a Price-Sensitive Demand". Rutgers Center Operations Research. Research Report RRR-40-2003.
40. Li, Susan X. Huang, Zhimin y Asheley, Allan (1996). "Improving Buyer-Seller System Cooperation Through Inventory Control". ELSEVIER; International Journal Production Economics; vol. 43, pp. 37-46.
41. Linn, Richard J; Chen, Chin-Sheng y Lozan, Jorge A. (2002). "Development of a Distributed Simulation Model for the Transporter Entity in a Supply Chain Process". Department of Industrial and Systems Engineering. Florida International University, Miami. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference; E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, and J. M. Charnes, Eds.
42. Munson, Charles L. y Rosenblatt, Meir J, (2001). "Coordinating a Three-level Supply Chain with Quantity Discounts". IIE Transactions Publisher, Issue: vol. 33, num. 5, pp. 371 – 384.
43. Ng, Bill, Ferrin, Bruce y Pearson, John (1997). "The Role of Purchasing/Transportation in Cycle Time Reduction". International Journal of Operations & Productions Management; vol. 17, núm. 6, pp. 574-591.
44. Piplani, Rajesh y Viswanathan, S. (2004). "Supply chain inventory Co-Ordination Through Multiple, Common Replenishment Epochs and Selective Discount". International Journal of Logistics, Publisher: Taylor & Francis; vol. 7, num. 2, pp. 109-118. June.
45. Porter, M. E. (2000) "Ventaja Competitiva: creación y sostenimiento de un desempeño superior". Compañía Editorial Continental, 19va. Impresión. México.
46. Prince, Theodore (1998). "Procedimientos de la Cumbre de Transporte Intermodal de Norteamérica". Instituto de Transporte Intermodal Proyecto/26 de marzo de 1998. Universidad de Denver en Denver, Colorado, Estados Unidos de América, p 26.
47. Qu, Wendy W, Bookbinder, James H. y Iyogun, Paul (1999) "An Integrated Inventory-Transportation System with Modified Periodic Policy for Multiple Products". European Journal of Operational Research; vol. 115, pp. 254-269.
48. Reyes y Gaytán (2003). "La coordinación del abastecimiento a través de épocas comunes de resurtido, evaluando dos modos de transporte". Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Ciencias con la Especialidad en Sistemas de Calidad y Productividad. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Toluca.
49. Ruesch, Martin (2001). "Potentials for Modal Shift in Freight Transport". 1st. Swiss Transport Research Conference; STRC 2001; Session Freight. March 1. www.strc.ch/ruesch.pdf.
50. Sethi, Suresh T, Yan, Houmin, Zhang, Hanqin, Gallego, Guillermo y Huang, Ying (2002). "A Periodic Review Inventory Model with Three Delivery Modes and Forecast Updates". Working Paper Columbia University.
51. Shapiro, Jeremy F (2000). "Modeling the Supply Chain". Duxbury Press; December, 20.
52. Swenseth, Scott y Godfrey, Michael (2002). "Incorporating Transportation Costs into Inventory Replenishment Decisions".
53. Toptal, Ayşgöl (2003). "Generalized Models and Benchmarks for Channel Coordination". Dissertation, Texas A&M University; Doctor of Philosophy.

54. Tyworth, John E. (1992). "Modeling Transportation-Inventory Trade-off in a Stochastic Setting". *Journal of Business Logistics*; vol. 13, num. 2. pp 97-124.
55. van Nordden, Linda y van de Velde, Steef (2005). "Multi-product Lot-Sizing with a Transportation Capacity Contact". *European Journal of Operational Research*; vol. 165, pp. 127-138.
56. Vázquez, D. F. (2001). "Metodología para externalizar servicios de transporte". Tesis de Maestría en Ingeniería de Transporte. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.
57. Villareal, Bernardo (2005). "Integración y coordinación logística". Universidad de Monterrey. www.udem.edu.mx/paso/academico/profesorado/101411/logistica/presentaciones/integracion/INTEGRACION.ppt.
58. Viswanathan, S. y Piplani, Rajesh (2001). "Coordinating Supply Chain Inventories Through Common Replenishment Epochs". *European Journal of Operational Research*; vol. 129, pp. 277-286.
59. Wagner H M y Whitin T M (1958). "A Dynamic Version of the Economic Lot-Sizing Model". *Management Science*; vol. 5, pp. 89-96.
60. Ward, J. E. y Zhai, X. (2004). "Joint Transportation-and-Inventory Problems in Supply Chains: A Review". Submitted to *Transportation Science*. June.
61. Woo, Y.Y, Hsu, S. L, & Wu, S. (2001). "An integrated Inventory Model for a Single Vendor and Multiple Buyers with Ordering Cost Reduction". *International Journal of Production Economics*; vol. 73, pp. 203-215.
62. Zhao, Qiu-Hong, Wangb, Shou-Yang, Laic, K. K. y Xiaa, Guo-Ping (2004). "Model and Algorithm of an Inventory Problem with the Consideration of Transportation Cost". *Computers & Industrial Engineering*; vol. 46, pp. 389-397.



‡ Certificación ISO 9001:2000 según documento No 0109-2007-AQ-MEX-EMA,
vigente hasta el 24 de octubre de 2009 (www.imt.mx)

CIUDAD DE MÉXICO

Av Nuevo León 210, piso 2
Col Hipódromo Condesa
06100, México, D F
tel (55) 5265 3190
fax (55) 5265 3190 ext 4711

SANFANDILA

km 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx