



Transporte verde: eficiencia y reducción de CO₂ integrando gestión, tecnologías de información y comunicaciones (TIC) y un metaheurístico*

Rodrigo Andrés Gómez Montoya**, Alexander Alberto Correa Espinal***, José Daniel Hernández Vahos****

Green transportation: efficiency and CO₂ reduction integrating management, information and communication technologies (ICT) and a metaheuristic

Transporte verde: eficiência e redução de CO₂ integrando gestão, tecnologias de informação e comunicações (TIC) e um meta-heurístico

RESUMEN

Introducción. El transporte representa entre el 30 y 70 % de los costos de un sistema logístico además tiene un impacto directo en la satisfacción de los clientes y es una fuente considerable de emisiones de CO₂ que afectan el medio ambiente. **Objetivo.** diseñar y validar un modelo de gestión

del transporte verde que permita el aumento de la eficiencia del proceso, reducciones de las emisiones del CO₂ equivalente, e implementación de prácticas verdes amigables con el medio ambiente en este proceso logístico. **Materiales y métodos.** el modelo de transporte verde integra un componente de gestión (objetivos, estrategia y caracterización), tecnologías de la información y la comunicación (TIC)

* Artículo original derivado del proyecto de investigación "Conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos considerando equipos heterogéneos del año 2015". ** Doctor en Ingeniería: Industria y Organizaciones, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Profesor e Investigador Facultad de Ciencias Agrarias, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. *** Doctor en Optimización e Investigación Operativa, Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor Asociado Departamento Ingeniería de la Organización, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. **** Ingeniero en Sistemas e Informática, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Investigador grupo GIMGO, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

y modelamiento matemático de problema de ruteo, considerando una flota de camiones heterogéneos que se resuelve con un metaheurístico. **Resultados.** De la validación en una empresa de cárnicos se obtuvo que el modelo de gestión verde, que incluyó la solución del problema de ruteo con un algoritmo genético, aumentó la eficiencia del proceso entre un 9,89 y 12,86 %, lo cual disminuyó los tiempos para las rutas de transporte en 4410 min/mes respecto a la regla de ruteo que tenía implementada la empresa. Con el modelo verde se logró una disminución

de 2791 kg de CO₂ equivalente u 11,70 % de las emisiones actuales generadas en el transporte. De esta manera, se valida cuantitativamente la contribución del modelo de gestión del transporte verde a esta área de investigación, a la eficiencia del proceso y a la amigabilidad con el medio ambiente.

Palabras clave: algoritmo genético, medio ambiente, problema de ruteo, tecnologías de la información y comunicación (TIC) y transporte.

ABSTRACT

Introduction. Transportation represents a ratio between 30 % and 70 % of total logistic costs, plus a direct impact on client's satisfaction. It is also a considerable source of CO₂ emissions, thus affecting the environment. **Objective.** Design and validate a model for green transportation management, increasing the process' efficiency, reducing CO₂ emissions and implementing environmentally friendly green practices in this logistic process. **Materials and methods.** The Green transportation model integrates a management component (objectives, strategy and characterization), information and communication technologies (ICT) and a mathematical modeling of the routing problem that considers a fleet of heterogeneous trucks, solved by the use of

a metaheuristic. **Results.** In the validation in a meat company the solution to the routing problem was achieved by means of a genetic algorithm, through which the process' efficiency increased up to a ratio between 9,89 and 12,86 %, reducing transportation time in the routes in 4410 minutes a month if compared to the routing rule the company had before. With a green model, a reduction of 2791 kg of CO₂, equivalent to 11,70 % of the current emissions generated by transportation there, was achieved. This way, we can have a quantitative assessment of the contribution the green transportation management model makes to this research area, to the efficiency of the process and to environmentally friendly practices.

Key words: genetic algorithm, environment, routing problem, information and communication technologies (ICT) and transportation.

RESUMO

Introdução: O transporte representa entre 30 70 % dos custos logísticos totais ademais tem um impacto direto na satisfação dos clientes e é uma fonte considerável de emissões de CO₂ que afetam o meio ambiente. **Objetivo:** desenhar e validar um modelo de gestão do transporte verde que permita o aumento da eficiência do processo, reduções das emissões de CO₂ equivalente e implementação práticas verdes amigáveis com o meio ambiente neste processo logístico. **Materiais e métodos.** o modelo de transporte verde integra um componente de gestão (objetivos, estratégia e caracterização), Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) e modelamento matemático de problema de roteamento considerando uma frota de caminhões heterogéneos que se resolve com um meta-heurístico. **Resultados.**

Da validação numa empresa de carnes se obteve que o modelo de gestão verde, que incluiu a solução do problema de roteamento com um algoritmo genético aumentou a eficiência do processo entre um 9,89 e 12,86 %, o qual diminuiu os tempos para as rotas de transporte em 4410 min/mês com respeito à regra de roteamento que tinha implementada a empresa. Com o modelo verde se conseguiu uma diminuição de 2791 kg de CO₂ equivalente a 11,70 % das emissões atuais geradas no transporte. Desta maneira, se valida quantitativamente a contribuição do modelo de gestão do transporte verde a esta área de investigação, à eficiência do processo e a amabilidade com o meio ambiente.

Palavras chave: algoritmo genético, meio ambiente, problema de roteamento, Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) y transporte.

INTRODUCCIÓN

El proceso de transporte es considerado uno de los más importante en la cadena de suministro, ya que permite movilizar carga entre puntos geográficos para atender los requerimientos de los clientes en las condiciones pactadas (Christopher, 2013). Adicionalmente, en la literatura académica y en estudios empresariales se ha indicado que el transporte representa entre el 30 y 70 % de los costos logísticos totales de la empresa según el tipo de producto, mercado y zona geográfica (Liu, 2011; Coyle, Novack, Gibson y Bardi, 2015). Por lo tanto, este proceso tiene un alto impacto en la productividad y rentabilidad de las cadenas de suministro; de allí la importancia de su adecuada planeación, ejecución y control.

En la gestión del transporte los artículos científicos se han enfocado principalmente en aumentar su eficiencia y la eficacia de procesos a través de la formulación de problemas de ruteo y administración de flotas de vehículos los cuales se resuelven con métodos de optimización, heurísticos, metaheurísticos u otros modelos cuantitativos. Debe resaltarse que los artículos revisados en el estado del arte, se enfocan en diseñar rutas de mínimo tiempo o distancia que reduzcan el consumo de combustible y generen menor cantidad de emisiones de CO₂ (Sbihi y Eglese, 2010; Erdoğan y Miller-Hooks, 2012; Jemai, Zekri y Mellouli, 2012; Guo, Huang y Sadek, 2013; Ćirović, Pamučar y Božanić, 2014; Lin, Choy, Ho y Ng, 2014^a, Lin, Choy, Ho, Chung y Lam, 2014^b; Salimifard y Raeesi, 2014). De la revisión en el estado del arte sobre logística y transporte no se identifican artículos que plantean o implementan modelos que integren la gestión del transporte verde, las tecnologías de la información y la comunicación, las prácticas verdes ni los problemas de ruteo de mínimo tiempo (distancia o costo) en el transporte verde. Este hallazgo se justifica en las siguientes limitantes detectadas en los artículos revisados sobre el transporte verde que únicamente modelaron el ruteo vehículos, y no consideraron otros componentes que se describen a continuación: primero, un modelo de gestión

y estrategia para el diseño implementación y control del transporte verde y su interacción con otros procesos logísticos; segundo, el diseño e implementación de tecnologías de información y comunicación (TIC) como el TMS (*Transportation Management System*) u otros software que permitan sistematizar las operaciones del transporte y digitalizar documentos que eliminen o reduzcan el uso de papel en este proceso; tercero, implementación de prácticas de logística verde tales como reutilización y control de empaques y embalajes (cajas, canastillas, estibas, entre otros), reducción del papel, uso de combustibles amigables con el medio ambiente, entre otros.

A partir de los hallazgos del estado del arte, se establece el objetivo del artículo que consiste en diseñar y validar un modelo de gestión del transporte verde que permita aumentar la eficiencia del proceso, reducir las emisiones del CO₂ equivalente e implementar prácticas verdes amigables con el medio ambiente. El modelo integra simultáneamente: i) un módulo de gestión el transporte verde que incluye un cuadro de objetivos y estrategias, caracterización verde del proceso, prácticas verdes e integración TIC enfocadas a transporte y ii) formulación de un problema de ruteo considerando flotas de vehículos heterogéneas que se solucionan con metaheurísticos con el fin de obtener el menor tiempo posible para atender los requerimientos de los clientes y disminuir las emisiones de CO₂ equivalente en la red de distribución. Con el desarrollo y validación de este modelo de transporte verde se contribuye al estado del arte ya que integra gestión, TIC y modelamiento matemático. De otra parte, el modelo que se desarrolla se valida en una empresa de cárnicos mediana, localizada en la ciudad de Medellín, con el propósito de implementar y cuantificar la contribución a la eficiencia, reducción de CO₂ equivalente y la apropiación del transporte verde.

Finalmente, el resto del artículo está organizado en las siguientes secciones: en la sección dos se presentan los conceptos de gestión de transporte y sus relaciones con la eficiencia, la reducción

de CO₂ y amigabilidad con el medio ambiente; en la sección tres se presentan los métodos y materiales que están basados en la metodología de modelo de gestión de transporte verde considerando eficiencia operacional y reducción del CO₂. En esta sección tres también se incluye la planeación y configuración de experimentos para la validación empresarial del modelo de gestión verde del transporte en una empresa de cárnicos; en la sección cuatro se presentan los resultados y la discusión de la implementación del modelo de gestión del transporte verde en una empresa de cárnicos, la cual incluye análisis de la eficiencia y emisiones del CO₂. Finalmente, en la quinta sección se presentan las conclusiones y los trabajos futuros derivados del artículo.

Gestión del transporte: eficiencia, reducción del CO₂ y amigabilidad con el medio ambiente

El transporte es un proceso logístico en la cadena de suministro que permite movilizar flujos de productos entre puntos geográficos con el fin de satisfacer las necesidades de los clientes. Por lo tanto, la gestión del transporte es un componente clave del sistema logístico que permite conectar los eslabones de la cadena suministro (proveedores, empresa y clientes) utilizando diferentes medios de transporte según el tipo de producto y mercado de las empresas (Christopher, 2013). La eficiencia de la adecuada gestión del transporte que incluye el diseño de estrategias, administración de flotas y configuración de rutas no solo impacta en los tiempos de entrega a los clientes sino que también determina los costos operacionales que deben ser asignados a los productos para determinar su precio final en el mercado (He, Song y Chaudhry, 2014). Por su parte, desde la perspectiva medioambiental la adecuada selección de los medios de transporte y el diseño de rutas óptimas o pseudo-óptimas del mínimo tiempo o distancia posibles contribuyen a la generación de menores cantidades de emisiones de CO₂ equivalentes. Esto es planteado porque los medios de transporte seleccionados ejecutan las rutas visitando los puntos geográficos eficientemente.

En la actualidad la logística verde ha cobrado importancia en el ámbito de la cadena de suministro. Esto se debe a que las empresas no solo buscan sostenibilidad y crecimiento de mercado, sino también sostenibilidad ambiental para garantizar la continuidad del negocio en la cadena de suministro (Martinsen y Björklund, 2012; Brito y Dekker, 2002). Debe resaltarse que la logística verde no solo promueve un enfoque ambiental y social sino que también busca implementar políticas y prácticas que permitan utilizar adecuadamente los recursos y ejecutar efectivamente los procesos en las empresas que conforman las cadenas de suministro (Zhao y Gu, 2014). En el contexto logístico, el proceso de transporte puede ser considerado la mayor fuente de emisiones de CO₂ equivalentes en la cadena de suministro, ya que los medios de transporte tales como: terrestre con camiones, aéreo, ferroviario y marítimo no solo consumen combustibles sino que recorren kilómetros para ejecutar la entrega de los productos en puntos geográficos nacionales o internacionales, según la estructura de las redes de distribución. Por este motivo, el proceso de transporte puede clasificarse como una de las mayores fuentes de emisiones de CO₂ en los sistemas logísticos. Dependiendo de la estructura de la cadena de suministro, de la red distribución nacional e internacional y de los volúmenes de productos movilizados, el proceso de transporte puede generar entre un 30 y 80 % de las emisiones de CO₂ debido a la utilización de combustibles (Ćirović, Pamučar y Božanić, 2014; Lin, Choy, Ho et al., 2014^a, Lin, Choy, Ho et al., 2014^b; Salimifard y Raeesi, 2014). Por este motivo, una adecuada eficiencia del transporte contribuye a la amigabilidad del proceso con el medio ambiente porque se pueden reducir las emisiones de CO₂ las cuales son contaminantes.

Por los motivos expuestos cobra importancia un modelo de gestión del transporte verde que no solo reduzca producción de emisiones del CO₂ equivalentes sino que también permita aumentar la eficiencia buscando de esta manera contribuir a la productividad y competitividad de la cadena de suministro. Para abordar este enfoque en la próxima sección se desarrolla un modelo de

gestión del transporte verde que considere la eficiencia y la reducción en la generación del CO₂ en la cadena de suministro.

Materiales y métodos: metodología de modelo de gestión de transporte verde considerando eficiencia operacional y reducción del CO₂

El modelo de gestión de transporte verde que busca contribuir al aumento de eficiencia

operacional y disminuir la producción de emisiones de CO₂ equivalentes en el sistema logístico de la cadena de suministro se conforma por tres componentes denominados: gestión verde del transporte (componente 1), diseño eficiente de operaciones de ruteo eficiente utilizando un metaheurístico (componente 2) y validación empresarial del modelo (componente 3). A continuación, se presentan los componentes del modelo de transporte verde (figura 1):

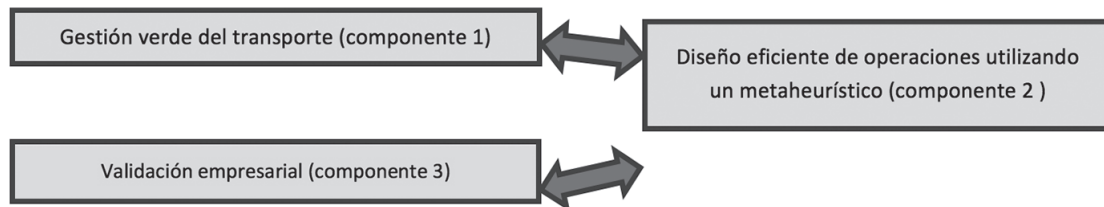


Figura 1. Estructura modelo gestión del transporte verde

Fuente: elaborado por el autor

El componente de gestión verde del transporte (componente 1) está conformado por elementos tales como: i) objetivos y estrategias verdes, ii) caracterización del proceso de transporte incluyendo prácticas verdes e indicadores y iii) tecnologías de información y comunicaciones (TIC) en la gestión del transporte. Por su parte, el componente de diseño eficiente de operaciones (componente 2) está compuesto por etapas como: i) identificación y selección de operaciones en el transporte, ii) formulación algebraica de problema operacional cuyo objetivo es aumentar la eficiencia del proceso iii) solución del problema formulado utilizando un metaheurístico. Finalmente, la validación empresarial (componente 3) permite comprobar los beneficios e impactos que genera el modelo de transporte verde en el sistema logístico de la empresa seleccionada. En las próximas subsecciones, se desarrolla metodológicamente cada uno de los componentes del modelo de transporte verde.

Gestión verde del transporte (componente 1)

La gestión verde del transporte tiene como propósito diseñar, implementar y controlar una estructura para establecer los objetivos y estrategias verdes para el proceso de transporte, incluyendo su alineación con el sistema logístico, planeación estratégica de la empresa e interés de otros actores de la cadena de suministro (proveedores, clientes y otros actores interesados). Adicionalmente, el componente de gestión verde incluye la caracterización del proceso de transporte que no solo considera los objetivos y estrategias verdes establecidos sino también prácticas verdes e indicadores para su seguimiento y control. Por lo tanto, la caracterización se convierte en una herramienta para gestionar el transporte verde. Para elaborar la caracterización se utiliza la metodología de gestión de procesos denominada SIPOC (*Supplier_proveedor*, *Input_entrada*, *Process_*

proceso, Output_salida, Costumer_consumidor) (Mishra y Kumar Sharma, 2014). Finalmente, en este componente de gestión se considera el diseño, implementación y mejoramiento de TIC asociadas al proceso de transporte como: TMS (*Transportation Management System*- Sistema de administración del transporte), WMS (*Warehouse Management System*-Sistema de Administración de Almacenes) y GPS (*Global Positioning System*), los cuales apoyan la planeación, ejecución

y control de las operaciones asociadas al transporte, incluyendo los objetivos, estrategias y prácticas verdes que permiten su amigabilidad con el medio ambiente.

A continuación, se representa el plan de objetivos y estrategias (tabla 1) y la caracterización del proceso con enfoque verde (tabla 2) que conforman este primer componente del modelo.

Tabla 1. Objetivos y estrategias de la gestión del transporte verde

Objetivo global transporte verde			
Objetivo particular l		Objetivo particular m
Estrategia l.1		Estrategia m.1
Estrategia l.2		Estrategia m. m

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Caracterización del proceso de transporte

Nombre	Objetivo global del proceso				
Alcance	Objetivo global transporte verde				
Proveedores	Entradas	Actividades	Salidas	Clientes	Recursos asociados
Recursos				Impacto verde	
Personal					
Medios de transporte					
Infraestructura					
TIC					
Otros recursos					
Prácticas en el transporte verde					
Indicadores del transporte verde					
Nombre del indicador			Valor actual		

Fuente: elaboración propia

Respecto a las TIC estas permiten sistematizar las operaciones del proceso de transporte utilizando *software* para la gestión de la información y uso de *hardware* (terminales de código de barras, radiofrecuencia, entre otros) para capturar datos o identificar productos, medios de transporte o instalaciones. En el ámbito del proceso de transporte las TIC más

comunes son: TMS (*Transportation Management System*), ERP (*Enterprise Resource Planning*) y GPS (*Global Positioning System*) principalmente. Dependiendo del alcance del proceso de transporte puede ser necesaria la utilización de módulos de un WMS (*Warehouse Management System*) relacionados con el cargue y descargue de los medios de transporte en almacenes

de fábrica, producto terminado o centros de distribución (CEDI). A continuación, se presenta

una estructura de las TIC en el componente de gestión verde del transporte (figura 2):

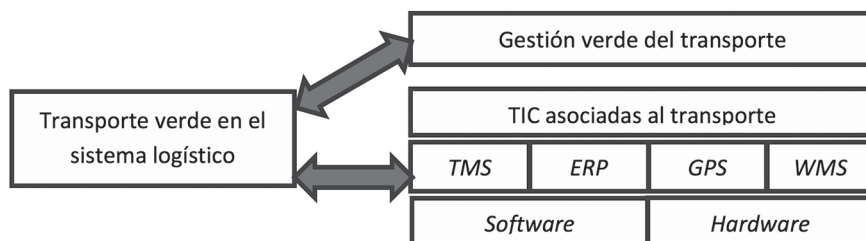


Figura 2. TIC en la gestión verde del transporte (componente 1)

Fuente: elaborado por el autor

De la representación de las TIC en la gestión verde del transporte debe resaltarse que su utilización no solo apoya y agiliza la planeación, ejecución y control de sus operaciones y recursos sino también puede contribuir a la reducción del uso de papel, ya que la información se sistematiza en tiempo real. Por lo tanto, se genera una práctica que es amigable con el medio ambiente, ya que se promueve la utilización de documentación únicamente necesaria por aspectos legales para los actores de la cadena de suministro.

De las diferentes TIC representadas debe tenerse en cuenta que el TMS suele incluir funcionalidades tales como: i) configuración del cargue medio de transporte; ii) diseño de rutas de mínimo tiempo, costo o distancia según la estructura de la red de distribución; iii) administración de medios de transporte: selección y criterios de productividad; iv) trazabilidad del proceso de transporte y sus interacciones con otros procesos del sistema logístico; v) gestión del uso y desempeño de los recursos, y vi) medición y seguimiento del desempeño de las operaciones y recursos del proceso de transporte. Por su parte, el ERP comprende funcionalidades asociadas con contabilidad y finanzas, ventas, producción, y el sistema logístico de las empresas en la cadena de suministro, las cuales entregan y reciben información del transporte. Por lo tanto, el ERP recibe y entrega información de TIC específica para el transporte como el TMS que permite sistematizar el proceso de transporte. De otra

parte, el WMS puede ser implementado en el transporte según el alcance establecido por este proceso. Esto se plantea porque algunos procesos de transporte inician en el cargue de los medios de transporte y finalizan con el descargue en instalaciones de producción, almacenes de materias primas, almacenes de productos terminados o CEDI. Debe resaltarse, que el WMS es una TIC dedicada a la gestión de procesos de almacenamiento o CEDI. Finalmente, el GPS es una TIC que se integra al TMS para realizar control y trazabilidad satelital en tiempo real de los medios de transporte, las operaciones y recursos asociados a este proceso logístico. En caso de requerir mayor información sobre las TIC logísticas en el transporte y la logística en la cadena de suministro se sugiere revisar artículos de autores tales como: Helo y Szekely (2005), Correa y Gómez (2009) y Nettsträter, Geilssen, Witthaut, Ebel y Schoneboom (2015).

Diseño eficiente de las operaciones del transporte (componente 2)

Este segundo componente consiste en diseñar o mejorar las operaciones asociadas al proceso de transporte para que operen de manera eficiente con el fin de que se ejecute en el menor tiempo, distancia o costo posible. A partir de una revisión del arte, se identificó que aproximadamente el 45 % los artículos científicos de transporte y distribución entre los años 2010 y 2015 (fecha actual), se enfocaban en la actividad

de planificación de rutas. Esta actividad del transporte se encuentra asociada al diseño de secuencias de puntos geográficos a ser visitados y a la asignación de medios de transportes para movilizar la carga entre los eslabones de la cadena de suministro en la menor distancia, costo o tiempo posible. Inclusive, esta actividad del transporte suele representar entre el 30 y el 70 % de los costos operativos del proceso y tiene un impacto directo en la satisfacción del cliente (Erdoğan et al., 2012; Ćirović et al., 2014). Debe resaltarse que los puntos geográficos en una ruta de transporte están separados por distancias que se caracterizan con una matriz de origen y destino, las cuales pueden presentar cobertura nacional e internacional según la red de distribución.

En el presente artículo científico el modelo de gestión verde del transporte se desarrolla en el contexto de Colombia. Por tal motivo, en el ruteo de transporte se consideran camiones de diferentes características (capacidades de carga) para movilizar la carga entre los diferentes puntos geográficos de la red de distribución. Por lo tanto, una actividad de ruteo considera las siguientes características:

- Flota de vehículos heterogéneos (diferentes capacidades de carga).
- Características de la red distribución (ubicación geográfica y tipos de productos).
- Restricciones en el transporte por acceso de vehículos a medios de transporte y secuencia de visita de los puntos geográficos en la cadena de suministro.

A continuación, se presenta el modelamiento algebraico de programación entera mixta para el problema de ruteo en el transporte considerando una flota de K vehículos heterogéneos y demás características listadas anteriormente. Los índices, parámetros y variables de decisión asociados al problemas se muestran en la Tabla 3.

Formulación del problema

A continuación, se presenta la formulación algebraica del problema de ruteo en el modelo de gestión verde del transporte

$$\begin{aligned} \text{Min } T = & \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \frac{d_{hj}}{V_k^r} \cdot S_{hj}^t \cdot Y_k^t \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in L} b_i^t \cdot tcd_{kih}^t \cdot Y_k^t \cdot X_i^t \end{aligned} \quad \text{ecuación 1}$$

s.a.:

$$\sum_{i \in I} b_i^t \cdot CC_i \cdot X_i^t \leq CCD_k Y_k^t \quad \forall t \in T, k \in K \quad \text{ecuación 3}$$

$$\sum_{t \in T} X_i^t = 1 \quad \forall i \in I \quad \text{ecuación 2}$$

$$\sum_{j \in L, j \neq h} S_{hj}^t = N_h^t \quad \forall t \in T, h \in L \quad \text{ecuación 4}$$

$$\sum_{h \in L, j \neq h} S_{hj}^t = N_j^t \quad \forall t \in T, j \in L \quad \text{ecuación 5}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in L} Y_k^t \cdot N_j^t = \sum_{j \in L} N_j^t \quad \forall t \in T \quad \text{ecuación 6}$$

$$\sum_{h \in g, j \in L \setminus g} S_{hj}^t \geq N_h^t \quad \forall t \in T, g \subseteq L \quad \text{ecuación 7}$$

$$S_{hj}^t, X_i^t, Y_k^t, N_j^t \in (0,1) \quad \text{ecuación 8}$$

La función objetivo (1) se propone minimizar el tiempo total de las rutas de transporte en la cadena de suministro. La primera restricción (2) controla que la capacidad de carga de un vehículo k de la flota de la empresa no sea excedida por la cantidad de productos i que se cargan en este en una ruta rR . La segunda restricción (3) garantiza que los productos i a transportar se asignan únicamente a una ruta rR . Las restricciones (4) y (5) controlan cada nodo geográfico predecesor y sucesor en una ruta de transporte rR . La restricción (6) restringe que cada nodo geográfico j considerando dentro de una ruta rR es visitado por un vehículo kK . La restricción (7) previene subrutras o ciclos en un conjunto de L nodos geográficos que conforman la red de distribución. La restricción (8) declara que las variables de decisión modeladas son números binarios.

Tabla 3. Índices, conjuntos, parámetros y variables de decisión del problema de ruteo

Índices y conjuntos
$h, j \in L$ Nodos geográficos (clientes o proveedores)
$g \in L$ Subconjunto de posiciones de almacenamiento
$k \in K$ Un camión heterogéneo específico perteneciente a la flota de la empresa
$t \in T$ Rutas de transporte
$i \in I$ Producto i perteneciente a los pedidos a transportar en la cadena de suministro
Parámetros
d^{hj} Distancia entre dos nodos geográficos h y j
V_k^t Velocidad de viaje (m/s) de cada vehículo $k \in K$
tcd_{kij}^t Tiempo para cargar, descargar y manipular un producto $i \in I$ que se moviliza desde el nodo i a la j utilizando un vehículo $k \in K$
b_i^t Cantidad de producto i transportado en la ruta $t \in T$
CC_i Capacidad de carga utilizada por el producto i
CCD_k Capacidad de carga disponible de un vehículo heterogéneo $k \in K$
Variables de decisión
$S_{hj}^t = \begin{cases} 1, & \text{Si el nodo geográfico } j \text{ es visitado inmediatamente después del nodo } h \text{ en una ruta } t \in T \\ 0, & \text{otro caso} \end{cases}$
$X_{i}^t = \begin{cases} 1, & \text{Si el producto } i \text{ a transportar es asignado a la ruta } t \in T \\ 0, & \text{otro caso} \end{cases}$
$Y_k^t = \begin{cases} 1, & \text{Si el vehículo } k \text{ es asignado a la ruta } t \in T \\ 0, & \text{otro caso} \end{cases}$
$N_j^t = \begin{cases} 1, & \text{si el nodo geográfico } j \text{ de la red de distribución es visitado en la ruta } t \in T \\ 0, & \text{otro caso} \end{cases}$

Fuente: elaborado por el autor

Para solucionar el problema de ruteo en el transporte formulado, se propone la utilización de metaheurísticos tales como: búsqueda tabú, algoritmos genéticos, enfriamiento simulado, entre otros, los cuales permiten obtener conjuntos de rutas pseudo-óptimas de mínimo tiempo. Debe considerarse que el problema formulado considera una red de distribución de, mínimo, 200 puntos geográficos a visitar utilizando una flota de camiones (diferentes capacidades de carga). A partir de pruebas computacionales con métodos de optimización se descarta su utilización, ya que estos permitían resolver problemas con, máximo, 100 puntos

geográficos. La principal limitación en las pruebas computacionales fue que en el 75 % de las corridas el modelo de optimización no generaba soluciones cuando se modelaban redes de distribución con más de 150 nodos geográficos. De esta manera, se justifica la utilización de metaheurísticos para resolver el problema de ruteo en el transporte considerando flotas de K vehículos heterogéneos. Finalmente, la solución del problema en el transporte no solo permite obtener conjuntos de rutas con el menor tiempo posible que permiten aumentar la eficiencia del proceso, sino que también busca reducir la cantidad de emisiones de CO₂ equivalentes que

generan los vehículos en la red de distribución. De esta manera, el modelo de gestión del transporte verde busca contribuir al cumplimiento de estos dos objetivos en el sistema logístico.

Validación empresarial del modelo de gestión del transporte verde

Esta sección presenta la validación empresarial del modelo de gestión de transporte verde con el fin de analizar si este permite aumentar la eficiencia y reducir las emisiones de CO₂ equivalentes en el proceso logístico en estudio. Para desarrollar la validación se selecciona una empresa localizada en la ciudad de Medellín, dedicada a la producción y comercialización

de alimentos cárnicos, los cuales se distribuyen a través de una red logística conformada por más de 250 puntos geográficos en Medellín y el departamento de Antioquia, Colombia. La empresa cuenta con un área de producción y almacenamiento de aproximadamente 1300 m² y 80 empleados. La flota de la empresa se compone por 5 camiones, 3 de los cuales tienen una capacidad de carga de 10 toneladas y los dos restantes son de 6 toneladas. Por lo tanto, la flota puede ser clasificada como heterogénea.

La metodología de la validación empresarial está conformada por las siguientes etapas que se representan en la figura 3:

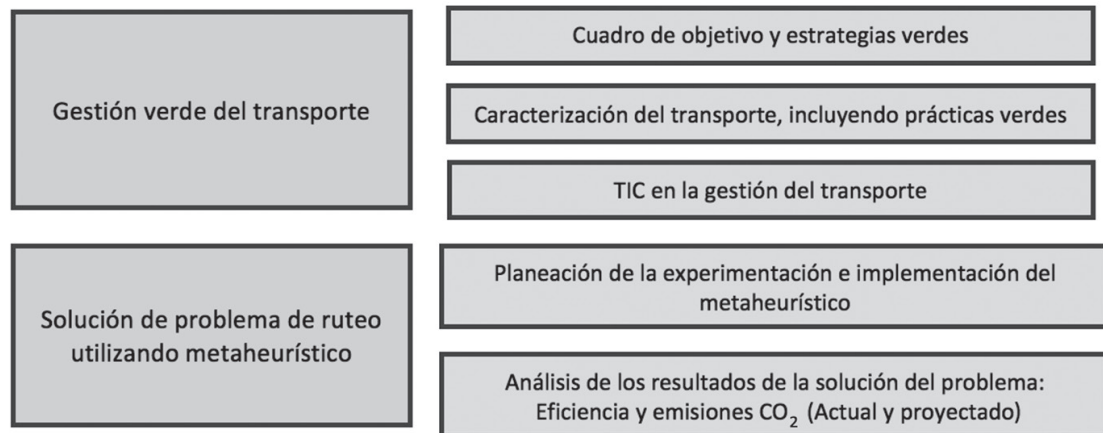


Figura 3. Estructura validación empresarial gestión del transporte verde

Fuente: elaborado por el autor

A continuación se presenta la planeación de la experimentación y configuración de la regla y algoritmo genético para resolver el problema de

ruteo en el transporte de la empresa de cárnicos (tabla 4):

Tabla 4. Planeación de la experimentación y enfoque de solución del problema de ruteo

Parámetros del ruteo de transporte empresa de cárnicos
<p>Flota heterogénea conformada por 5 camiones. Tres camiones de 10 toneladas y dos camiones de 6 toneladas. Se utiliza ERP y <i>software</i> de transporte para apoyar la planeación, ejecución y control del proceso.</p> <p>Red de distribución conformada por aproximadamente 250 puntos geográficos en Medellín y Antioquia. Las rutas inician y terminan en el CEDI de la empresa de cárnicos.</p> <p>Se selecciona un conjunto de pedidos con productos típicos a ser transportados en la red de distribución de la empresa de cárnicos en estudio para atender los requerimientos de los clientes. Debido a que existen dos tipos de camiones: 6 toneladas y 10 toneladas.</p>
Matriz de tiempos origen-destino
<p>El problema de ruteo de mínimo tiempo posible que se resuelve con metaheurístico utiliza una matriz de origen-destino que mide los tiempos entre dos puntos geográficos en la red de distribución de la empresa de cárnicos. Debe tenerse en cuenta que el punto geográfico de inicio y de fin de cada ruta es el CEDI. Los tiempos entre los puntos son medidos en minutos.</p>
Regla LLLC
<ul style="list-style-type: none"> • Número de iteraciones ejecutada es 1. Esta regla realiza una única iteración para calcular las rutas de transporte, debido a que no ejecuta búsquedas sistemáticas en vecindarios. • La regla de ruteo LLLC se modela en Microsoft Excel ®
Metaheurístico algoritmo genético
<ul style="list-style-type: none"> • Se implementa un algoritmo genético con estrategias de cruzamiento, mutación y selección elitista. • Número de iteraciones: 1000 corridas. • El algoritmo genético para solucionar el problema se programó en JAVA utilizando <i>Netbeans</i>, IDE 7.0.1, disponible para Windows en un computador con procesador Intel Pentium 4 de 3.20GHz y memoria RAM de 1 Gb.

Fuente: elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de la implementación del modelo verde del transporte en la empresa de cárnicos seleccionada para la validación empresarial.

Componente de gestión verde del transporte en la empresa de cárnicos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el componente de gestión que se compone del cuadro de objetivos y estrategias, y la caracterización del proceso de transporte verde (figura 4).

Para medir los valores actuales de emisiones CO₂ equivalentes (kg) en el proceso de transporte en la empresa de cárnicos se emplea una calculadora que implementa la metodología del IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio

Climático), organismo de Naciones Unidas (Euskadi, 2015). Los resultados de las mediciones actuales de emisiones CO₂ en Kg y cantidades de papel en kg empleados en el proceso de transporte se registran en la caracterización del proceso de transporte.

TIC en el componente de gestión verde del transporte

La empresa de cárnicos tiene implementado un ERP que permite gestionar desde una perspectiva administrativa procesos tales como finanzas, contabilidad, producción, mercadeo y logística. Para la gestión del transporte la empresa tiene un *software* propio que permite i) gestionar la documentación del proceso, ii) realizar seguimiento a las entregas en los puntos geográficos y trazabilidad a las rutas utilizando una plataforma GPS, y iii) indicadores de cumplimiento de las entregas a los clientes. Este

Objetivo global transporte verde	Reducir las emisiones de kg de CO ₂ equivalentes y el uso de papel en el proceso de transporte de la empresa de cárnicos buscando un enfoque de amigabilidad con el medio ambiente.		
Objetivo particular 1	Disminuir las emisiones de CO ₂ equivalentes a partir del diseño de rutas de transporte de mínimo tiempo posible.	Objetivo particular 2	Reducir la cantidad del uso de papel en la gestión del transporte utilizando TIC logísticas.
Estrategia 1.1	Rediseño del método de ruteo en el transporte de la empresa utilizando metaheurísticos.	Estrategia 2.1	Análisis de la documentación física asociada al transporte, e identificación de oportunidades para su sistematización.
Estrategia 1.2	Medición periódica de los kg de CO ₂ equivalente generados por la flota de vehículos para establecer disminuciones debido a la mejora del ruteo.	Estrategia 2.2	Implementación de TIC para apoyar la gestión del transporte de la empresa.



Nombre	Transporte	Objetivo global del proceso	Entregar los productos solicitados a los clientes en las condiciones pactados en el menor tiempo posible y generando la menor cantidad de emisiones de CO ₂ posible.		
Alcance	Configuración de la carga, ruteo y movilización de la carga	Objetivo global del transporte verde	Reducir las emisiones de kg de CO ₂ equivalentes y el uso de papel en el proceso de transporte de la empresa de cárnicos buscando un enfoque de amigabilidad con el medio ambiente.		
Proveedor	Entradas	Actividades	Salidas	Clientes	Recursos asociados
CEDI	Pedidos de los clientes	Diseñar rutas de mínimo tiempo posible utilizando metaheurísticos	Conjunto de rutas de mínimo tiempo posible	Transporte	Analistas de transporte (modelar problema y metaheurístico de solución TIC transporte)
Transporte	Conjunto de rutas	Configurar cargue según productos asignados a las rutas diseñadas	Plan de cargue de los vehículos asignados a las rutas	Transporte	Vehículos heterogéneos disponibles Analistas de transporte TIC transporte
Transporte	Conjunto de rutas de transporte	Ejecución de rutas diseñadas	Informe de ejecución de rutas	Clientes	Vehículos heterogéneos Analistas de transporte TIC transporte
Recursos				Impacto verde	
Personal	Director de transporte, 1 analista supervisor de transporte, 5 conductores y 10 auxiliares de transporte.		Este personal participa en la ejecución eficiente del proceso e implementación de prácticas verdes.		
Medios de transporte	Flota de 5 camiones heterogéneos: 3 camiones de 10 toneladas y 2 de 6 toneladas		Los camiones generan emisiones de CO ₂ equivalentes.		

Continuación figura 4.

Infraestructura	Instalaciones físicas del CEDI para cargar los camiones y puntos de descarga(clientes) con 5 lámparas, compresor eléctrico para plataforma de cargue y computadores	Estas instalaciones utilizan energía eléctrica para iluminación de las áreas logísticas, compresor de plataforma de cargue de camiones y computadores en el proceso de transporte.
TIC	ERP e software de transporte para apoyar actividades del proceso y disminuir el uso del papel	El ERP y el software de transporte reducen el uso de papel, lo que contribuye con la amigabilidad del medio ambiente.
Otros recursos	Material de empaque y embalaje (canastillas y estibas)	La reutilización de empaque y embalaje reduce el impacto ambiental de producir nuevos productos y reduce los costos logísticos.
Prácticas verdes en el transporte		
<ul style="list-style-type: none"> • Ejecución de conjuntos de rutas de transporte de mínimo tiempo posible diseñadas con metaheurístico, lo cual contribuye a la eficiencia del proceso y reducción de emisiones de CO₂ equivalente • Sistematización de documentación del transporte que pueda ser gestionada digitalmente a través de TIC en tiempo real sin generar afectaciones legales. Esta práctica permite reducir los kg de papel impreso en el proceso de transporte. • Plan de mantenimiento preventivo a la flota de camiones con el fin que estos generen la menor cantidad posible de contaminación que puede ser medida por los kg de CO₂ equivalentes. • Diseño de un sistema logístico de control de canastillas y estibas plásticas en la red de distribución de la empresa que garantice que estas se reutilicen y no se pierdan. Esto contribuye a la reducción de producción de estos productos que generan impacto en el medio ambiente. • Generación de cultura de amigabilidad con el medio ambiente en el personal de logística de la empresa de cárnicos en estudio. Esto genera impactos en el diseño, gestión y ejecución del proceso de transporte. 		
Indicadores del transporte verde		
Nombre del indicador		Valor actual
Kg de CO ₂ equivalente en el proceso de transporte		
Cantidad de papel consumido en el proceso medidos en kg		
Cantidad de canastillas y estibas plásticas reutilizadas medido en unidades		

Figura 4. Objetivos, estrategias y caracterización como parte del componente de gestión del transporte verde

Fuente: elaborado por el autor

software de transporte también se encuentra integrado con el WMS (*Warehouse Management System*) de la empresa para gestionar el inventario y actividades asociadas al despacho, las cuales generan entradas de información para el transporte. Finalmente, el software de transporte se compone de i) software de transporte y GPS y ii) hardware dispositivo GPS, lectores de códigos de barras e impresoras de etiquetas.

Solución de problema de ruteo en el transporte usando un metaheurístico

En esta sección se resuelve el problema de ruteo de transporte de la empresa de cárnicos utilizando un metaheurístico. Actualmente el

problema de ruteo se soluciona utilizando una regla denominada LLLC (Lugar más Lejano Lugar más Cercano). Con esta regla la secuencias de las rutas es configurada de la siguiente manera: primero se visitan los clientes que se encuentren a distancias más lejanas del CEDI para posteriormente entregar los productos a los clientes que están ubicados geográficamente más cercanos a este. Esta regla no implementa búsquedas sistemáticas en el espacio de rutas de transporte sino que configura las secuencias usando la regla descrita. Por lo tanto, la regla LLLC suele generar soluciones de menor calidad respecto al tiempo del proceso y producir mayores emisiones de CO₂ con relación a la implementación de metaheurísticos. Debe

resaltarse que los metaheurísticos implementan búsquedas inteligentes y sistemáticas que permiten identificar conjuntos de rutas del mínimo tiempo total posible considerando simultáneamente la flota de vehículos heterogéneos, la ubicación geográfica de los clientes y las características de los productos a movilizar en la red de distribución. Por lo expuesto, el uso de metaheurístico no solo pretende incrementar la eficiencia del proceso al reducir los tiempos de ruteo sino también disminuir las emisiones de CO₂ equivalentes que generan un impacto negativo en el medio ambiente.

Para solucionar el problema de ruteo de transporte en la empresa de cárnicos, se selecciona un metaheurístico denominado algoritmo genético. Este algoritmo genético ha sido utilizado en la literatura científica para

solucionar problemas combinatoriales para resolver problemas de rutas no solo en el transporte sino también en la preparación de pedidos y en la programación de la producción (Sbihi y Eglese, 2010; Lin, Choy, Ho et al., (2014^b). A partir de la ejecución de 1000 corridas de experimentación el algoritmo genético generó mejores resultados que un metaheurístico de búsqueda tabú para solucionar el problema de transporte modelado en el presente artículo; de allí la justificación de la solución.

A partir de la implementación de la regla LLLC y el algoritmo genético para resolver el problema de ruteo en el transporte considerando una flota de camiones heterogéneos, se obtienen los siguientes resultados respecto a los tiempos de rutas, eficiencia y generación de emisiones CO₂ en la empresa de cárnicos en estudio (tabla 5).

Tabla 5. Resultados de regla LLLC y algoritmo genético para resolver problema de ruteo

	Regla LLLC	Algoritmo genético
Tiempo promedio de ruta de transporte (min/ruta)- 6 toneladas	171	149
Kilómetros promedio por ruta (km/ruta) -6 toneladas	114	100
Número promedio de rutas de transporte por mes (3 camiones)	135	135
CO ₂ equivalente en kg/mes	14620	12740
Reducción del CO ₂ equivalente en kg- 6 toneladas		1880
Incremento en la eficiencia operacional/mes		12,86 %
Tiempo promedio de ruta de transporte (min/ruta)- 10 toneladas	182	164
Kilómetros promedio por ruta (km/ruta) -10 toneladas	121	110
Número promedio de rutas de transporte por mes	80	80
CO ₂ equivalente en kg/mes	9221	8310
Reducción del CO ₂ equivalente en kg / toneladas		911
Incremento en la eficiencia operacional/mes		9,89 %

Fuente: elaboración propia

De los resultados obtenidos, se identifica que el algoritmo genético para resolver el problema de ruteo considerando K vehículos heterogéneos permite aumentar la eficiencia entre un 9,89 y 12,86 % por ruta respecto a la implementación de la regla LLLC. Este aumento en la eficiencia del transporte puede generar disminuciones de

tiempos por mes de 2970 min/mes para rutas ejecutadas con el camión de 6 toneladas, y 1440 min/mes para el de 10 toneladas. De esta manera, se demuestra cuantitativamente que la utilización del metaheurístico para solucionar el problema de ruteo contribuye al aumento de la eficiencia del proceso logístico. Con relación a

la generación de emisiones de CO₂ se mide que la implementación del algoritmo genético para resolver el problema de ruteo en la empresa de cárnicos produce una reducción de 2791 kg de CO₂ equivalente u 11,70 % con relación al uso de la regla LLLC. Los resultados obtenidos permiten inferir que el modelo de gestión del transporte verde desarrollado en la empresa de cárnicos contribuye al aumento de la eficiencia operacional del transporte y a la reducción de emisiones de kg de CO₂ equivalentes, paralelamente. Por estos motivos, puede concluirse que al reducir los tiempos y distancias de las rutas de transporte, se disminuye la producción de emisiones CO₂ equivalentes. De allí, la importancia de implementar modelos cuantitativos o metaheurísticos para esta actividad de ruteo, la cual es crítica en el transporte.

En la empresa de cárnicos la implementación del ERP con el software de transporte y GPS integrado permitiría reducir el consumo de papel en 1000 kg/mes, lo que significa una disminución del 25 % respecto a la cantidad utilizada actualmente. Esta reducción se justifica porque se implementa la firma electrónica de documentos de recibo y se digitaliza documentación soporte al transporte documentación logística asociada los productos cárnicos (guía de transporte, fichas técnicas, control a la cadena de frío, entre otros). De esta manera, se logra una reducción de costos de adquisición e impresión de papel de aproximadamente \$ 350.000\$/mes y 4.200.000\$/año así como una práctica amigable con el medio ambiente.

Respecto a la práctica de reutilización y sistema de control de canastillas y estibas plásticas en la red de distribución se implementó un módulo en el WMS y software de transporte. El módulo computacional realiza trazabilidad de las canastillas y estibas utilizando un sistema de codificación que permite capturar información de fecha de entrega, responsable, tiempo de permanencia en el cliente y fecha de devolución. Esta práctica disminuyó el costo de compra de estibas y canastillas en 10 % que representan alrededor de \$ 1.500.000/mes y \$18.000.000/

año. Los impactos de las dos prácticas descritas, software de transporte y gestión de estibas y canastillas, demuestran que el modelo de gestión verde del transporte no solo genera beneficios a la eficiencia de la empresa y disminución de costos potenciales de sus operaciones sino que contribuye a la sostenibilidad y amigabilidad con el medio ambiente.

CONCLUSIONES

Como resultado del presente artículo se diseñó y validó un modelo de gestión del transporte verde que permita aumentar la eficiencia del proceso, reducir las emisiones del CO₂ equivalente e implementar prácticas verdes amigables con el medio ambiente. El modelo realizó una contribución al estado del arte ya que integró un componente gestión, TIC de transporte y modelamiento matemático de un problema de ruteo considerando una flota de equipos heterogéneos que resolvió con un algoritmo genético. Con este enfoque se busca aumentar la eficiencia del proceso al obtener rutas del mínimo tiempo en el transporte y reducir las emisiones de CO₂ equivalentes. Debe resaltarse, que el enfoque desarrollado no había sido detectado en la literatura científica, ya que los artículos revisados abordaban en el transporte verde únicamente modelamiento del problema de ruteo para reducir el consumo de combustible y generar menor cantidad de emisiones del CO₂ equivalente.

De la validación en una empresa de cárnicos se obtuvo que el modelo de gestión verde, que incluyó la solución del problema de ruteo con un algoritmo genético permitió aumentar la eficiencia del proceso entre un 9,89 y 12,86 %, lo cual disminuyó los tiempos para las rutas de transporte en 4410 min/mes respecto a la regla de ruteo que tenía implementada la empresa. Adicionalmente, con el modelo verde se logró una disminución de 2791 kg de CO₂ equivalente o 11,70 % de las emisiones actuales generadas por el proceso de transporte de la empresa. Los resultados demostraron que el modelo verde implantado en la empresa contribuye al aumento

de la eficiencia operacional del transporte y a la reducción de emisiones de kg de CO₂ equivalentes, lo que promueve la amigabilidad del proceso con el medio ambiente. De esta manera, se valida cuantitativamente la contribución del modelo de gestión del transporte verde a esta área de investigación. Finalmente, como trabajo futuro se planea integrar el proceso de gestión del transporte con otros procesos logísticos con el fin de fomentar la implementación de cadenas de suministro verde que consideren componentes de gestión, TIC y modelamiento matemático. Así, los modelos verdes en la cadena de suministro deben contribuir a la eficiencia y la amigabilidad con el medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brito, M., & Dekker, R. (2002). Reverse logistics - a framework. *Econometric Institute Research Papers, 1*, 1-19.
- Ćirović, G., Pamučar, D., & Božanić, D. (2014). Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model. *Expert Systems with Applications, 41*(9), 4245-4258.
- Christopher, M. (2013). *Logistics and Supply Chain Management ePub eBook*. Pearson
- Correa, A., & Gómez, R. A. (2009). Tecnologías de la información en la cadena de suministro. *Dyna, 76*(157), 37-48.
- Coyle, J., Novack, R., Gibson, B., & Bardi, E. (2015). *Transportation: A Global Supply Chain Perspective*. Cengage Learning.
- Erdođan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 48*(1), 100-114.
- Guo, L., Huang, S., & Sadek, A.W. (2013). An evaluation of environmental benefits of time-dependent green routing in the greater Buffalo-Niagara region. *Journal of Intelligent Transportation Systems, 17*(1), 18-30.
- He, S., Song, R., & Chaudhry, S. S. (2014). Service-oriented intelligent group decision support system: application in transportation management. *Information Systems Frontiers, 16*(5), 939-951.
- Helo, P., & Szekely, B. (2005). Logistics information systems: an analysis of software solutions for supply chain co-ordination. *Industrial Management & Data Systems, 105*(1), 5-18
- Jemai, J., Zekri, M., & Mellouli, K. (2012). An NSGA-II algorithm for the green vehicle routing problem. En *Evolutionary computation in combinatorial optimization, 1*(1), 37-48).
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T., & Ng, T. W. (2014). A Genetic Algorithm-based optimization model for supporting green transportation operations. *Expert Systems with Applications, 41*(7), 3284-3296.
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H., & Lam, H. Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications, 41*(4), 1118-1138.
- Liu, J. J. (2011). *Supply Chain Management and Transport Logistics*. Routledge.
- Martinsen, U., & Björklund, M. (2012). Matches and gaps in the green logistics market. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 42*(6), 562-583.
- Mishra, P., & Kumar Sharma, R. (2014). A hybrid framework based on SIPOC and Six Sigma DMAIC for improving process dimensions in supply chain network. *International Journal of Quality & Reliability Management, 31*(5), 522-546.
- Nettsträter, A., Geils sen, T., Witthaut, M., Ebel, D., & Schoneboom, J. (2015). Logistics Software Systems and Functions: An Overview of ERP, WMS, TMS and SCM Systems. En *Cloud Computing for Logistics, 1*(1), 1-11.
- Salimifard, K., & Raeesi, R. (2014). A green routing problem: optimising CO₂ emissions and costs from a bi-fuel vehicle fleet. *International Journal of Advanced Operations Management, 6*(1), 27-57.
- Sbihi, A., & Eglese, R. W. (2010). Combinatorial optimization and green logistics. *Annals of Operations Research, 175*(1), 159-175.
- Zhao, Y. Y., & Gu, Y. J. (2014). Green Logistics and Social Sustainable Development. En *Advanced Materials Research* (Vol. 962, pp. 2180-2184).