

Una Solución al Enrutamiento de Vehículos en Ciudades Montañas Considerando Aspectos Ambientales y Económicos

Victor F. Suarez-Chilma⁽¹⁾, William A. Sarache⁽¹⁾ y Yasel J. Costa⁽²⁾

(1)Universidad Nacional de Colombia, Dpto. de Ingeniería Industrial, Campus La Nubia, Manizales-Colombia (e-mail: vfsuarezc@unal.edu.co; wasarachec@unal.edu.co)

(2) Facultad de Ingeniería, Universidad de Manizales, Manizales-Colombia (e-mail: yaselcosta@gmail.com)

* Autor a quien debe ser enviada la correspondencia

Recibido Jul. 21, 2017; Aceptado Oct. 2, 2017; Versión final Dic. 7, 2017, Publicado Jun. 2018

Resumen

Este trabajo aborda un problema de enrutamiento de vehículos en ciudades de montaña, para determinar la más óptima. Actualmente el transporte verde se ha convertido en un tema de gran interés debido a su relación directa con el costo operativo y su impacto en el medio ambiente. Tradicionalmente se ha considerado que la ruta más corta minimiza tanto costos como emisiones. Sin embargo, la topografía del terreno en montañas es una particularidad que debe ser considerada con miras a lograr soluciones más acordes con la realidad. Para este estudio, se propone un modelo matemático multiobjetivo, el cual determina una ruta que logra un adecuado balance entre el costo del transporte y el impacto ambiental. El modelo se aplicó en un canal de distribución minorista de una ciudad andina de Colombia. Se concluyó que, en escenarios de montaña, la ruta más corta no es necesariamente la mejor, debido al impacto de la pendiente en el consumo de combustible y en las emisiones de CO₂.

Palabras clave: enrutamiento de vehículos; consumo de combustible; emisiones de CO₂; pendiente de la carretera; multiobjetivo

A Vehicle Routing Solution for Hilly Cities Considering Environmental and Economic Issues

Abstract

This paper addresses a vehicle routing problem in mountainous cities with the objective of finding the optimum route. Currently, green transportation has become a topic of great interest due to its direct relation with operational costs and its impact on the environment. Traditionally, the shortest route has been considered to minimize both costs and emissions. However, topography in mountains is a particularity that must be considered in order to achieve more realistic solutions. For this study, a multi-objective mathematical model is proposed to determine a route that achieve a proper balance between transportation cost and environmental impact. The model was applied in a retail distribution channel of an Andean city in Colombia. It was concluded that in mountain scenarios, the shortest route is not necessarily the optimum, due to the impact of slope on fuel consumption and CO₂ emissions.

Keywords: vehicle routing; fuel consumption; CO₂ emissions; road slope; multiobjective

INTRODUCCIÓN

El transporte es una actividad logística que tiene un alto impacto en los costos de la cadena de suministro. Además, es una de las actividades que más genera gases de efecto invernadero (GEI) (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, US EPA, 2014). Así mismo, se estima que el transporte por carretera es responsable del 75% de las emisiones generadas entre todos los tipos de transporte (Agencia Internacional de la Energía, IEA, 2009). Una de las principales causas de la generación de GEI es el consumo de combustibles fósiles. En el transporte por carretera, este combustible se utiliza para producir una reacción de combustión en el motor, lo que da lugar a emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, entre otras. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2014), las emisiones de CO₂ son proporcionales al consumo de combustible. Para calcular el consumo de combustible de un vehículo y sus emisiones existen varios modelos que pueden agruparse en dos grandes categorías: microscópicos y macroscópicos (Demir et al., 2014; Posada Henao, 2013). En la primera categoría se consideran las diversas fuerzas que afectan el vehículo durante su movimiento; en la segunda, se analizan un conjunto de variables estadísticas que afectan al consumo de combustible. No obstante, en ambas categorías se destaca la importancia de diseñar estrategias para aumentar la eficiencia energética (IEA, 2009).

En este contexto, el problema de enrutamiento de vehículos (Vehicle Routing Problem, VRP) juega un papel importante, tanto en los costos del transporte como en los efectos ambientales. El VRP es una extensión del problema del agente viajero (Travelling Salesman Problem, TSP) y, por lo tanto, es un problema de optimización combinatoria NP-Hard. En la versión más simple de un VRP, se debe fijar el itinerario de una flota de vehículos homogénea ubicada en un depósito, para satisfacer la demanda de un conjunto de clientes fijos. El propósito es minimizar el costo de la distancia recorrida bajo cierto conjunto de restricciones. Las cuatro variantes de VRP más estudiadas son: VRP con Restricciones Capacitadas (CVRP), VRP con Ventanas de Tiempo (VRPTW), VRP con Backhauls (VRPB) y VRP con Recogidas y Entregas (VRPPD) (Cordeau et al., 2007; Mingyong y Erbao, 2010). Basado en estas variantes básicas, la investigación en VRP ha generado una amplia gama de problemas surgidos de situaciones particulares, especialmente en contextos urbanos (Kim et al., 2015).

A pesar de que la minimización de costos ha sido el objetivo más analizado en las variantes antes mencionadas, la investigación en VRP considerando aspectos ambientales (perspectiva de logística verde) ha mostrado un crecimiento significativo en los últimos años. Bajo este enfoque se estableció una variante del problema denominada VRP Verde (GVRP). Esta variante se ocupa de la optimización del consumo de energía del transporte la cual está directamente relacionada con el consumo de combustible, buscando un equilibrio entre la eficiencia operativa y los efectos ambientales causados por el uso de combustibles fósiles, de manera que se logren reducir los costos del transporte y, al mismo tiempo, las emisiones de GEI (Lin et al., 2014).

Dado el alto impacto del consumo de combustible en los costos y en el medio ambiente, lo más pertinente bajo un enfoque GVRP, debería ser el diseño de soluciones que integren los modelos para el cálculo del consumo con los modelos de optimización de rutas (VRP). Sin embargo, esta perspectiva aumenta la complejidad del problema, ya que el consumo de combustible depende de diversos factores tales como el tipo de vehículo, el conductor, las condiciones ambientales y las condiciones del tráfico, entre otros (Demir et al., 2011). Debido a tal complejidad, la integración de tales modelos sólo ha sido estudiada de forma incipiente por lo cual se requiere más investigación. En particular, aspectos tales como la incertidumbre en la operación del vehículo, la topografía del camino, y sus implicaciones en la estimación de las emisiones, son tópicos que según Sentoff et al. (2015), requieren mayor profundización.

Desde esta perspectiva, una de las primeras contribuciones, propuesta por Palmer (2007), analizó el efecto de la velocidad del vehículo en las emisiones de CO₂ bajo diferentes escenarios de congestión de tráfico y considerando ventanas de tiempo. Maden et al. (2009) analizaron un VRPTW que reportó una reducción de hasta un 7% en las emisiones de CO₂ en un estudio de caso realizado en el Reino Unido. Bauer et al. (2010) estudiaron el efecto del transporte intermodal en la reducción de emisiones. Bektas y Laporte (2011) propusieron un modelo de VRP para las emisiones de carbono, analizando su impacto en la función de costo total, considerando variantes con o sin ventanas de tiempo. Otros estudios relevantes han analizado el uso de la flota heterogénea desde una perspectiva del GVRP (Koç et al., 2014, 2016; Kopfer et al., 2014), el uso de flotas de vehículos eléctricos (Felipe et al., 2014; Goeke y Schneider, 2015; Juan et al., 2014; Yang y Sun, 2014), la planificación de los sistemas de recogida de residuos reciclables teniendo en cuenta las preocupaciones económicas y medioambientales (Ramos et al., 2014) y las emisiones asociadas con viajes dependientes del tiempo (Ehmke et al., 2015; Qian y Eglese, 2016).

La mayor parte de estos trabajos consideran que la reducción de la distancia recorrida es la mejor manera de reducir el consumo de combustible y las emisiones. Dicha premisa es verdadera siempre y cuando todas las

rutas se desarrollen en terreno plano o poco inclinado. Esto se debe a que en este tipo de terreno el consumo de combustible es directamente proporcional a la distancia recorrida. Sin embargo, cuando se consideran variaciones considerables en la topografía, una ruta corta en una vía con pendiente alta causará un mayor consumo de combustible en comparación con una ruta menos inclinada pero más larga, debido a que se requiere una mayor potencia para vencer las fuerzas que se oponen al movimiento. No obstante, bajo el planteamiento de los modelos actuales, se llega a condiciones de operación, donde la ruta más corta incluye secciones con pendientes que requieren más energía para que los vehículos puedan ascender, lo que resulta en mayores emisiones. En este sentido, Boriboonsomsin y Barth (2009) afirmaron que al comparar una ruta plana con una ruta descendente, el consumo de combustible se puede reducir aproximadamente a la mitad, mientras que en una ruta inclinada el consumo puede incrementarse entre 1,5 y 2 veces. De la misma manera, Xiao et al. (2012) concluyeron que la distancia más corta no siempre es la solución óptima, ya que otros elementos como la carga y la congestión de la carretera pueden afectar la tasa de consumo de combustible. Por tanto, también es importante que la ruta a tomar tenga en cuenta los factores de tráfico, los cuales resultan en un mayor tiempo de espera en la carretera y por consiguiente, en un mayor consumo de combustible (Scora et al., 2015).

Asimismo, Scott et al. (2010), mostraron que el gradiente del camino y la carga útil juegan un papel determinante en la selección de la ruta. A su vez, Tavares et al. (2009) analizaron la recogida de residuos en Cabo Verde considerando el efecto de la variación de la pendiente de la carretera en el consumo de combustible. En este trabajo se obtuvo una reducción del 12% en el consumo de combustible en comparación con el consumo de la ruta más corta; sin embargo, no se consideraron las restricciones de velocidad y de carga del vehículo. Tajik et al. (2014) y Mohammadi et al. (2014) también propusieron modelos de enrutamiento teniendo en cuenta la pendiente de la vía; no obstante, esta variable no desempeñó un papel importante en los casos de estudios analizados. El trabajo de Carrese et al. (2013) abordó el impacto de los hábitos de conducción, la pendiente de la vía y la capacidad de carga, en el rendimiento del transporte público. Según sus resultados, la pendiente podría duplicar el consumo de combustible y, también, el factor de carga puede aumentarlo entre 7% y 26%.

Goeke y Schneider (2015) extendieron el VRPTW a una flota mixta compuesta por vehículos eléctricos y vehículos comerciales convencionales de combustión interna. En contraste con un consumo de energía dependiente de la distancia de desplazamiento, se adoptó un consumo de energía más realista que incorporaba la velocidad, la pendiente del terreno y el factor de carga. Naderipour y Alinaghian (2016) propusieron la medición, evaluación y minimización de CO₂, NO_x y CO en el problema de enrutamiento de vehículos dependientes del tiempo abierto (OTDVRP) utilizando un modelo que considera la velocidad del vehículo, la pendiente del camino y la carga del vehículo, obteniendo una reducción del 16% en la generación de emisiones. Estos autores también propusieron un modelo macroscópico integral para el problema de enrutamiento de vehículos dependiente del tiempo con un grafo multi-alternativo para reducir el consumo de combustible considerando factores como carga, velocidad del vehículo, pendiente de la carretera y tráfico urbano, reportando una reducción del 21% en el caso del estudio.

Como puede verse, el efecto de variables como la velocidad, la carga, la congestión del tráfico, el uso de flota heterogénea y las ventanas de tiempo, en el consumo de combustible, es un tema de gran interés. Sin embargo, las contribuciones que evalúan el efecto simultáneo de estas variables en el consumo de combustible son escasas. De hecho, en los modelos que consideran la pendiente, los rangos empleados para evaluar la variabilidad son limitados. Por ejemplo, en el trabajo de Demir et al (2011) se evaluaron 4 modelos diferentes de consumo de combustible, donde la variación de la pendiente sólo osciló entre $\pm 0,57$ y ± 1.15 grados. Por su parte, Levin et al. (2014) evaluaron un modelo de consumo examinando el efecto de la pendiente con ángulos de $\pm 1,91$ y $\pm 5,71$ grados; Boriboonsomsin y Barth (2009) emplearon ángulos ± 5 grados en sus experimentos; y Wang et al. (2015) variaciones de tan sólo $\pm 4\%$. Si bien estos trabajos constituyen antecedentes del estudio de la pendiente en el problema VRP, en el caso particular de ciudades con topografía montañosa, donde la inclinación de las vías llega a ser superior al 8% (Instituto Nacional de Vías, 2008), dichos modelos no han examinado a profundidad el efecto de la ruta en el consumo, omisión que de acuerdo a Sentoff et al. (2015), genera errores prominentes en el cálculo de las emisiones.

En este sentido, el presente trabajo propone un modelo CVRP que busca lograr un equilibrio adecuado entre el costo de transporte y el desempeño ambiental. En particular, el modelo analiza la potencia requerida por un vehículo considerando factores como la pendiente, la velocidad media y el tamaño de la carga, la resistencia al rodamiento, la resistencia aerodinámica, la eficiencia del motor y la eficiencia de la transmisión, de manera que es posible hacer una estimación del consumo total de combustible y de las emisiones de CO₂ para cada recorrido. De esta manera, el objetivo se centra en encontrar una ruta donde el consumo de combustible y las respectivas emisiones, se puedan minimizar, impactando directamente el costo de operación al reducir los rubros relacionados con combustible y reduciendo los efectos contaminantes de los vehículos sobre el ambiente.

Dadas las características del problema se propone un enfoque de solución multiobjetivo, empleando un algoritmo genético NSGA-II (Algoritmo Genético de Clasificación Elitista No Dominada), el cual permite hallar soluciones aproximadas al óptimo global gracias a su robustez y a su paralelismo implícito, el cual le permite operar de forma simultánea con varias soluciones, evitando convergencias prematuras hacia óptimos locales. El algoritmo se evaluó considerando diferentes instancias del CVRP disponibles en la literatura. Adicionalmente, el modelo se aplicó a un caso de estudio en la ciudad de Manizales (Colombia), ubicada a 2150 metros de altura sobre el nivel de mar en plena cordillera andina. En esta ciudad, las pendientes de las vías fluctúan entre el 0% y $\pm 20\%$ de inclinación. Los resultados mostraron una reducción del consumo de combustible en un promedio de 12,2% al comparar las soluciones del algoritmo con la ruta más corta.

El presente documento se ha organizado de la siguiente manera: inicialmente se explica el modelo propuesto. Posteriormente se presenta el algoritmo NSGA II, seguido por la descripción de los experimentos computacionales efectuados. A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos y en la sección subsiguiente se presenta el caso de estudio. Finalmente, se exponen las principales conclusiones y las sugerencias para futuras investigaciones.

MODELO MATEMÁTICO

El problema se define como un grafo no dirigido $G = (V, A)$, donde $V = \{0, 1, \dots, n\}$ es el conjunto de vértices (clientes) y 0 denota el depósito; a su vez, $A = \{(i, j) : i, j \in V \wedge i \neq j\}$ denota el conjunto de arcos. Cada cliente i ($i = 1, \dots, n$) está asociado con una demanda conocida d_i y el depósito tiene una demanda ficticia $d_0=0$. En el depósito está disponible un grupo de K vehículos idénticos, cada uno con una capacidad C . Para asegurar la viabilidad se supone que $d_i \leq C, \forall i = 1, \dots, n$. Adicionalmente, se contempla que cada cliente sea visitado sólo una vez y que los vehículos inicien y terminen el recorrido en el depósito. Además, un costo no negativo C_{ij} está asociado con cada arco $(i, j) \in A$, el cual representa el consumo de combustible para ir del vértice i al vértice j moviendo una carga específica l_{ij} . Finalmente, la variable de decisión x_{ij} toma el valor de 1 si el arco (i, j) está incluido en la solución o 0 en caso contrario. Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo se define de la siguiente forma:

$$\min Z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n C_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n x_{ij} d_i \leq C \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0} = K \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0j} = K \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} - \sum_{i=0}^n x_{ji} = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (6)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (8)$$

La ecuación (1) corresponde a la función objetivo, la cual está orientada a encontrar la ruta con menor consumo de combustible. Las ecuaciones (2) a la (8) son las restricciones del modelo. La ecuación 2 garantiza que la demanda total de la ruta no exceda la capacidad del vehículo en cada trayecto. Las ecuaciones (3) y (4) garantizan que los K vehículos partan del depósito y regresen al mismo después de realizar la ruta

asignada. La ecuación (5) asegura la continuidad de la ruta. Las ecuaciones (6) y (7) garantizan que cada cliente sea visitado sólo una vez. Finalmente, la ecuación (8) elimina la generación de subtours.

Función de consumo de combustible

El consumo de combustible se obtiene a partir de una adaptación del modelo de cálculo de potencia específica del vehículo (Jiménez-Palacios, 1999) y la función de tasa de consumo de combustible planteada por la Nam y Giannelli (2005). El primero tiene en consideración factores como la inercia, el gradiente, la velocidad, la aceleración, la masa, la resistencia aerodinámica y la resistencia al rodamiento. En el segundo se considera la eficiencia y la velocidad de la transmisión del vehículo. Este se representa en las ecuaciones (9) y (10). A su vez, la Tabla 1 presenta la definición de las variables.

$$c_{ij} = \frac{\varphi \left[K N V_d + \frac{(P_{ij} + P_{acc})}{\eta_t} \right]}{LHV} * t_{ij} \quad (9)$$

$$P_{ij} = m_{ij} * v_{ij} \left(1.1 * a_{ij} + g * \text{Sen}(\theta) + g * C_r \right) + \frac{1}{2} \rho * C_d * A_f * v_{ij}^3 \quad (10)$$

Tabla 1: Definición de variables.

Variable	Definición	Unidades
c_{ij}	Consumo de combustible del vehículo entre los vértices (i,j)	ml
P_{ij}	Potencia requerida por el vehículo para ir entre los vértices (i,j)	W
m_{ij}	Masa desplazada entre los vértices (i,j) incluyendo la carga y el peso del vehículo	Kg
v_{ij}	Velocidad de desplazamiento del vehículo entre los vértices (i,j)	m/s
g	Aceleración debida a la gravedad	m/s ²
θ	Ángulo de inclinación entre los vértices (i,j)	%
C_r	Coefficiente de rozamiento (0,09)	Adimensional
ρ	Densidad del aire	Kg/m ³
C_d	Coefficiente de dragado aerodinámico	Adimensional
A_f	Área frontal del vehículo	m ²
φ	Tasa de equivalencia aire-combustible	Adimensional
K	Fricción del motor	Adimensional
N	Velocidad del motor	RPM
V_d	Volumen de desplazamiento del motor	[L]
η_t	Eficiencia de la transmisión	Adimensional
η	Eficiencia del motor	Adimensional
LHV	Poder calorífico bajo del combustible	J/g
P_{acc}	Potencia consumida por los accesorios del vehículo	W
t_{ij}	Tiempo que tarda el desplazamiento del vehículo entre los vértices (i,J)	s

Para el presente estudio sólo se consideran vehículos propulsados por gasolina. Por tal razón la cantidad de emisiones de CO₂ se obtiene mediante un factor de conversión de 2.8 Kg de CO₂/litro.

En la Figura 1 se presenta la respuesta del modelo de consumo de combustible ante las variaciones de velocidad, pendiente y carga. Respecto a la velocidad, el modelo exhibe que el vehículo tiene un mayor consumo a bajas velocidades, luego este se reduce a velocidades medias y nuevamente sufre un incremento a altas velocidades. Respecto a la pendiente, cuando el vehículo está vacío, al 5% de gradiente el consumo promedio se duplica, al 10% se triplica y al 15% se cuadruplica. A media carga, el consumo promedio puede llegar a quintuplicarse a gradientes elevados, mientras que, a carga completa, dicho valor puede llegar a ser seis veces mayor.

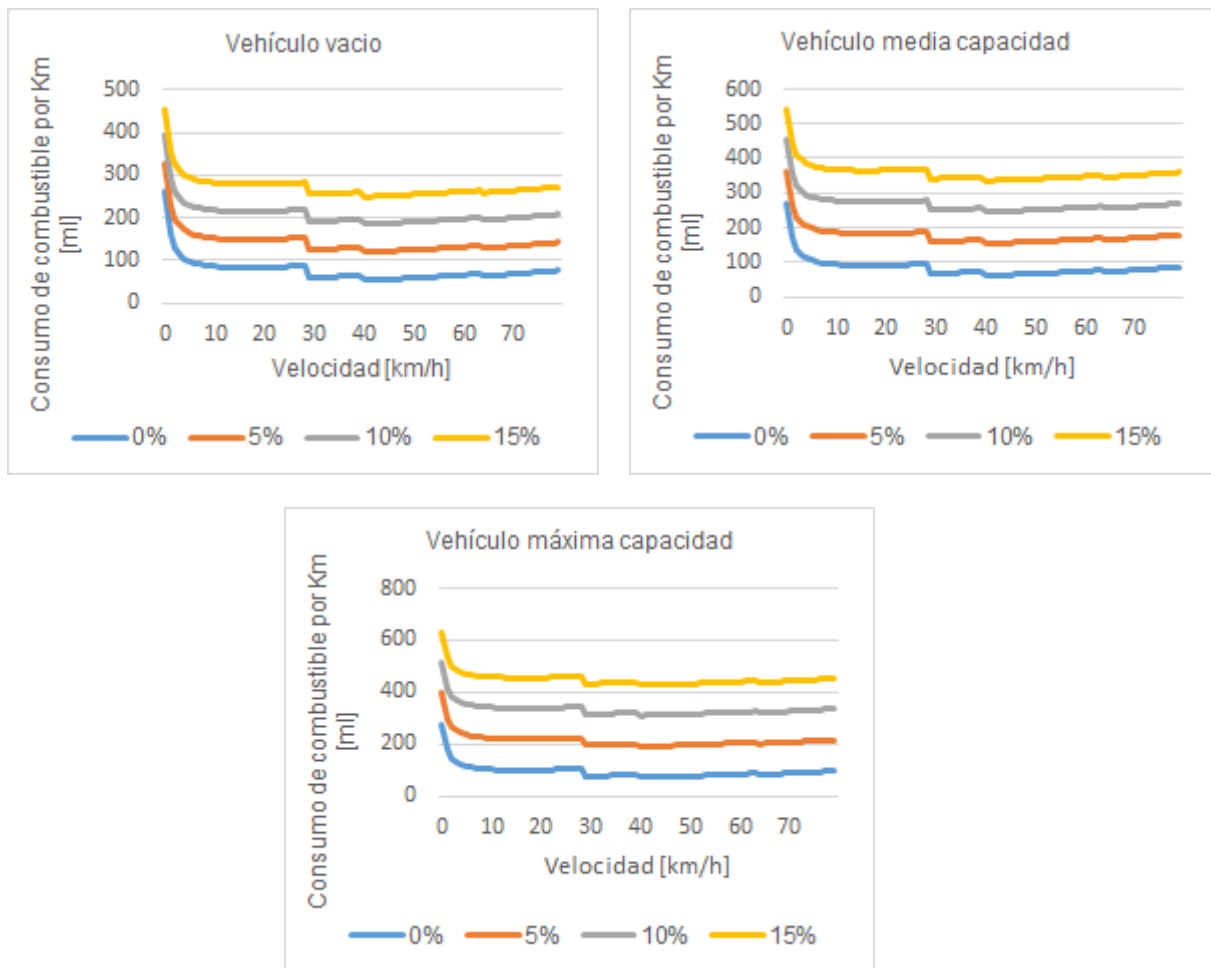


Fig. 1 Consumo de combustible por km bajo variaciones de carga y velocidad.

DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

Para dar solución al modelo, se aplicó el algoritmo genético NSGA II (Deb et al., 2002). Dicho algoritmo utiliza una población de descendientes Q_t (tamaño N), que se crea inicialmente mediante el uso de una población de padres P_t (tamaño N) a través de operadores de cruce y mutación. A continuación, ambas poblaciones se unen para conformar un conjunto R_t de tamaño $2N$. Posteriormente, y utilizando una clasificación no dominada, y de acuerdo con los resultados de la función objetivo, la población R_t se clasifica en diferentes frentes. Esta tarea requiere un proceso complejo en el que se comprueba la dominación de la población de padres y descendientes. Una vez finalizado el proceso de clasificación no dominado, la nueva población se extrae de los frentes no dominados. Hasta que toda la población (N) se complete, la población de descendientes se estructura mediante el uso de los individuos de los mejores frentes. Cuando la población está estructurada, se eliminan todos los individuos pertenecientes a los conjuntos de menor calidad. Para ello se utilizan técnicas basadas en la distancia de apilamiento. La Fig. 2 muestra el procedimiento del algoritmo descrito.

Para el modelo propuesto, cada cromosoma representa una ruta de solución factible en la que el número 0 representa el depósito y el resto de elementos representa a los clientes. La población inicial (P_t) está estructurada con N cromosomas de longitud n que se crean aleatoriamente, donde $N = 2 * n$ y $n = 2 * \text{clientes} + 1$, ya que cada cromosoma admite la ruta más larga. A partir de entonces, utilizando una combinación de operadores genéticos (cruzamiento y mutación), se crean los nuevos descendientes. El algoritmo utiliza el cruce parcialmente compensado (PMX) el cual obtiene un nuevo descendiente seleccionando una subsecuencia de un tour de un padre y manteniendo el orden y la posición de los elementos pertenecientes al segundo padre.

Al aplicar una tasa de mutación de 0,2 de probabilidad, el operador de mutación intercambia las posiciones de algunos elementos en el cromosoma. Con base en la función objetivo y las restricciones de carga de la flota, los padres y los descendientes son evaluados en cada iteración. De acuerdo con la función objetivo propuesta, tanto la minimización de la distancia recorrida como el consumo de combustible deben ser

considerados para cada ruta. Finalmente, mediante la aplicación de un proceso de clasificación no dominado (basado en la distancia de apilamiento), la nueva población se selecciona de los padres y descendientes. Este resultado se convierte en la nueva población inicial. El proceso se repite hasta que se alcanza el criterio de parada. Hay dos criterios de detención: a) el algoritmo alcanza $20 * n$ iteraciones; B) la mejora de la función objetivo es inferior al 0,01% cada 10% del número máximo de iteraciones.

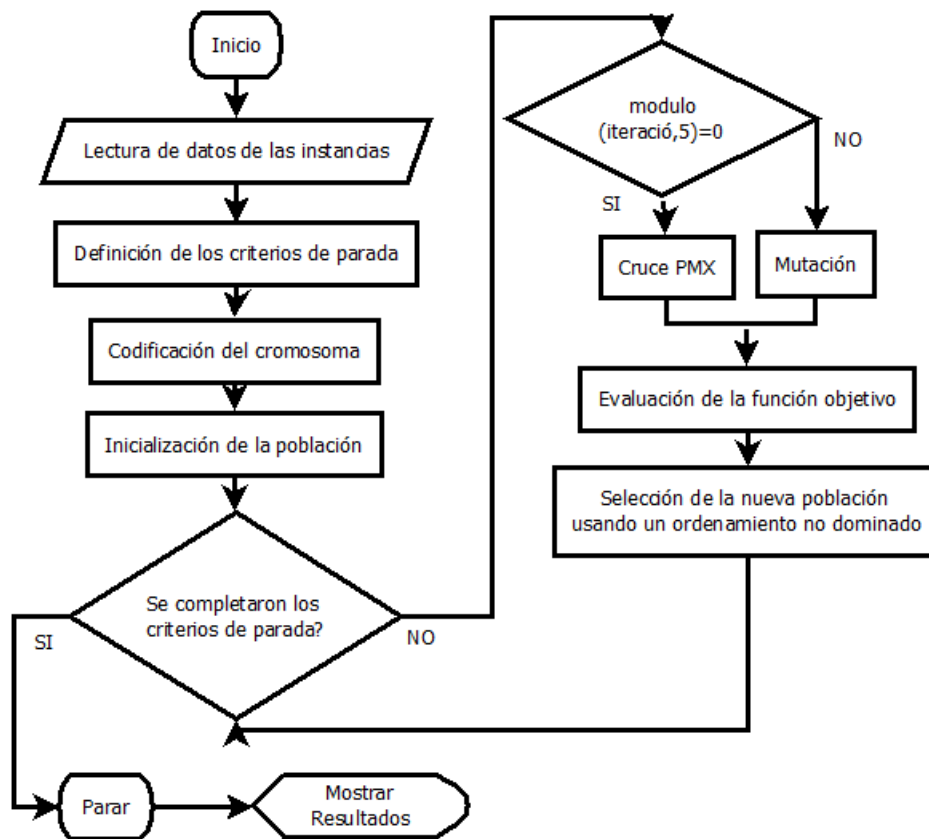


Fig. 2 Procedimiento empleado por el algoritmo genético

EXPERIMENTOS COMPUTACIONALES

El algoritmo se probó usando varias instancias de datos reportados en la literatura, cuyo objetivo de optimización era ruta con longitud más corta. En los experimentos se consideraron variaciones en la pendiente para determinar el efecto en el consumo y en las emisiones. El experimento consideró tres escenarios: a) Evaluando las soluciones óptimas reportadas para cada instancia según los parámetros propuestos; b) buscando minimizar la longitud de la ruta, el consumo de combustible y las respectivas emisiones de CO₂ y c) buscando minimizar sólo el consumo y las respectivas emisiones de CO₂ independientemente de la longitud de la ruta. En cada caso, se consideraron 4 diferentes tipos de inclinación. El algoritmo se ejecutó en un ordenador personal provisto de un procesador Intel CORE i7 de 2,4 GHz y 8 GB de memoria RAM. Respecto a las instancias, se consideraron cuatro diferentes conjuntos de datos: La E-n33-k4 y la E-n51-k5 propuestas por Christofides and Eilon (1969), con 33 y 51 vértices respectivamente; y la P-n40-k5 y la A-n61-k9 propuestas por Augerat (1995), con 40 y 61 vértices respectivamente.

RESULTADOS

La Tabla 3 muestra el resultado del consumo, la distancia total recorrida y el total de emisiones para cada una de las instancias en cada uno de los escenarios propuestos.

Los resultados mostraron que en terreno llano (0% de inclinación) la ruta óptima ofrecía menor consumo de combustible, un recorrido más corto y menor cantidad de emisiones, en todas las instancias, en comparación con los dos escenarios de minimización propuestos mediante el algoritmo NSGA-II. En este caso, el promedio de diferencia en el consumo fue del 8% mientras que en la longitud de la ruta fue en promedio de 8,4%. No obstante, cuando se evaluaron las instancias incluyendo la variación de la pendiente, la ruta óptima no obtuvo, en ningún caso, el menor consumo de combustible ni la menor cantidad de emisiones. Para pendientes del 5%, en el escenario de equilibrio entre la longitud de la ruta y el consumo de combustible, este fue, en

promedio, 9,6% menor al de la ruta óptima; mientras que en el escenario de sólo minimización del consumo, éste fue, en promedio, un 13% menor. Para pendientes del 10%, en el escenario de equilibrio entre la longitud de la ruta y el consumo de combustible, este fue, en promedio, 12,2% menor al de la ruta óptima; mientras que en el escenario de sólo minimización del consumo, fue un 12,3% menor. Para pendientes del 15%, en el escenario de equilibrio entre la longitud de la ruta y el consumo de combustible, este último fue en promedio 14,7% menor al de la ruta óptima; mientras que en el escenario de sólo minimización del consumo, éste fue en promedio un 17,2% menor.

Tabla 3: Consumo de combustible, distancia total recorrida y emisiones de CO₂ para cada instancia en cada escenario propuesto.

Instancia	Pendiente [%]	Óptimo			Equilibrio en entre longitud , consumo y emisiones			Minimización de consumo y emisiones		
		Consumo [Galones]	Distancia [km]	CO ₂ [kg]	Consumo [Galones]	Distancia [km]	CO ₂ [kg]	Consumo [Galones]	Distancia [km]	CO ₂ [kg]
E-n33-k4	0	16,2	838,7	171,7	17,2	860,5	182,1	16,8	842,5	177,9
	±5	22,6	838,7	239,9	21,3	1117,1	225,2	18,7	1029,9	197,7
	±10	35,2	838,7	373,5	27,6	1030,8	292,3	31,7	1142,4	336,0
	±15	47,6	838,7	505,0	38,3	965,7	406,1	34,6	1097,3	366,4
P-n40-k5	0	8,8	461,7	92,9	9,2	469,6	97,9	10,6	564,3	111,9
	±5	11,6	461,7	123,3	11,5	488,8	122,0	11,2	613,3	118,8
	±10	17,9	461,7	190,2	17,9	505,1	189,7	16,7	674,8	177,1
	±15	24,2	461,7	256,0	22,5	492,1	238,5	22,5	600,0	238,5
E-n51-k5	0	10,1	524,9	107,0	11,0	572,5	116,8	11,8	645,8	125,5
	±5	13,7	524,9	145,2	13,1	625,7	139,1	12,3	735,8	130,6
	±10	21,2	524,9	224,5	20,4	656,8	216,0	18,8	704,6	199,4
	±15	28,5	524,9	302,6	26,2	628,8	277,3	25,1	783,7	265,9
A-n61-k9	0	22,2	1161,5	235,4	22,6	1172,1	240,0	23,2	1244,5	246,2
	±5	32,5	1161,5	344,5	23,8	1263,9	252,0	25,8	1329,5	273,3
	±10	50,5	1161,5	535,4	39,0	1216,6	413,3	39,8	1332,5	422,0
	±15	68,2	1161,5	723,4	52,0	1236,0	550,7	52,9	1361,0	560,7

Los hallazgos indican que la pendiente tiene una fuerte influencia en la decisión de la ruta, determinando en gran medida la magnitud del consumo y la cantidad de emisiones producidas. En este sentido es importante resaltar que, aunque la ruta optima tuvo en promedio una longitud menor en comparación con los otros dos escenarios propuestos, este factor no fue determinante en la reducción del consumo y las emisiones a pesar de que en el escenario de equilibrio el promedio de la diferencia era 12% inferior y en el caso de la minimización del consumo era en promedio de 26,45% inferior.

CASO DE ESTUDIO

Manizales es una ciudad situada en la cordillera de los Andes a 2.150 m. sobre el nivel del mar. Teniendo en cuenta las características de esta ciudad, la distribución minorista es un desafío diario, ya que es común encontrar pendientes con una inclinación de hasta el 36%. Además, los vehículos medianos y grandes no pueden acceder a algunas calles debido a la imposibilidad de mover las cargas a causa de las pronunciadas inclinaciones.

Con el objetivo de aplicar el modelo antes expuesto, se seleccionó un canal de distribución de alimentos. La empresa distribuye granos, alimentos enlatados, productos de limpieza para el hogar, pasteles, aceites y aperitivos. Los clientes son supermercados dispersos por toda la ciudad. Actualmente, esta empresa provee alrededor de 600 clientes cuya demanda mensual se distribuye al azar. Con el fin de satisfacer la demanda, el vehículo realiza más de una ruta diaria. Las rutas actuales se obtienen aplicando la heurística del vecino más cercano. Para aplicar el modelo, se consideró la operación diaria, donde 33 órdenes elegidas al azar debían ser entregadas a los diferentes clientes, ubicados alrededor de la ciudad. La distancia promedio entre nodos fue de 4,96 km, con rango de recorrido entre nodos entre 0,5 km y 10,2km. Con el fin de obtener las pendientes y las distancias entre cada par de clientes (vértices) se utilizó el software ArcGIS.

En este caso, el problema se analizó bajo los dos distintos objetivos de optimización planteados; es decir, equilibrando distancia y el consumo, y minimizando sólo el consumo y las emisiones. En cada uno de ellos se realizaron 40 ejecuciones para observar su variabilidad (Ver Fig. 3). Los resultados promedio y su desviación se pueden ver en la Tabla 4.

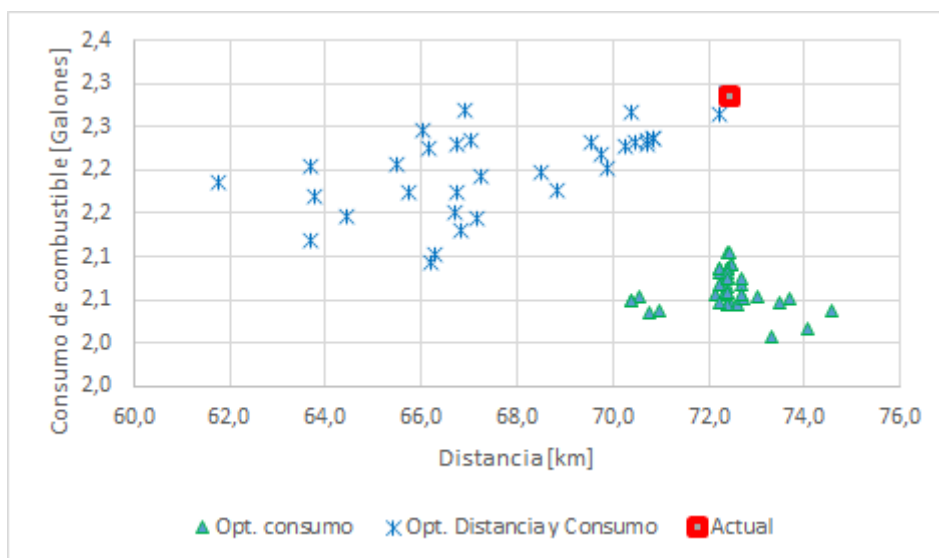


Fig. 3 Distancia y consumo de combustible para el caso de estudio para los dos casos de optimización planteados

Tabla 4: Media y desviación estándar de los dos

	Distancia [km]		Consumo [Galones]	
	Media	Desviación	Media	Desviación
Optimizar consumo	72,4	0,9	2,1	0,02
Optimizar distancia y consumo	68,5	3,0	2,2	0,1

Con base en los resultados obtenidos, se pueden destacar los siguientes resultados: 1) las soluciones con menor distancia no estuvieron asociadas a un menor consumo. 2) Al buscar equilibrar el consumo y la distancia fue posible reducir el recorrido hasta en 14,7% en comparación con la ruta actual; sin embargo, dicha reducción no se vio reflejada en un menor consumo. 3) Cuando sólo se buscó reducir el consumo de combustible, el valor medio de la distancia no cambió en comparación con la distancia de la ruta actual; no obstante, el consumo de combustible se redujo hasta en un 12,2% en comparación con la ruta actual.

CONCLUSIONES

Esta investigación desarrolló un modelo para enrutamiento de vehículos basado en la potencia requerida por éstos para su desplazamiento, el cual estima el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ producidas. Dicho modelo permitió confirmar que, en terrenos sin inclinación, la ruta más corta es la que permite un menor consumo de combustible y, consecuentemente, menos emisiones. No obstante, en escenarios con variaciones positivas y negativas de la pendiente, la ruta más corta no fue en ningún caso la de menor consumo de combustible. En el escenario donde se trataba de equilibrar la distancia recorrida y el consumo, el algoritmo permitió una reducción del consumo de hasta un 14,7% en promedio, mientras que en el escenario donde el objetivo sólo era la minimización del consumo, el algoritmo logró una reducción de hasta un 17,2% en promedio. Lo anterior corrobora que en ciudades montañosas el tránsito por pendientes positivas incrementa el consumo, mientras que en pendientes negativas ofrece un ahorro. Por tanto, una correcta selección de la ruta, en la que se consideren dichas variaciones, permitirá una reducción considerable en el consumo de combustible y en sus respectivas emisiones.

En cuanto al caso de estudio, el modelo permitió reducir el consumo y las emisiones hasta en un 12%, en comparación con la ruta actual. En este caso, además de los efectos ambientales positivos, la reducción de costos de transporte es un resultado valioso para la empresa, debido al impacto que tienen los costos de la gasolina. De esta manera, el estudio ofrece una importante contribución para la ciudad analizada, ya que sus condiciones topográficas implican un mayor consumo de combustible en comparación con las ciudades planas. Este hallazgo tiene gran importancia considerando que varias ciudades ubicadas en la cordillera de los Andes

tienen topografía montañosa. Por lo tanto, las decisiones de transporte basadas en la perspectiva expuesta permitirán una utilización más eficiente de la infraestructura vial existente.

Para investigaciones futuras se sugiere trabajar en modelos de consumo que incluyan un rango mucho más amplio en los valores de inclinación de la vía, que permitan la evaluación instantánea de dicho consumo considerando aspectos particulares para cada tipo de vehículo. Así mismo, sería importante considerar el uso de flotas heterogéneas y el efecto de los cambios en el tráfico. Además, dada la fuerte relación entre los problemas de enrutamiento y la logística urbana, el análisis simultáneo de la ubicación de las instalaciones y de la VRP es un tema de investigación interesante en el contexto de las ciudades con topografía montañosa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Colciencias (Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, La Tecnología y la Innovación "Francisco José de Caldas") por su apoyo financiero (Proyecto 111971551628).

REFERENCIAS

- Augerat, P., *Approche polyédrale du problème de tournées de véhicules*, Tesis de doctorado, Institut National Polytechnique de Grenoble, Francia (1995)
- Bauer, J., Bektas, T., y Crainic, T. G., *Minimizing greenhouse gas emissions in intermodal freight transport: An application to rail service design*, *Journal of the Operational Research Society*, 61(3), 530–542 (2010)
- Bektas, T. y Laporte, G., *The pollution-routing problem*, *Transportation Research Part B*, 45, 1232–1250 (2011)
- Boriboonsomsin, K. y Barth, M., *Impacts of Road Grade on Fuel Consumption and Carbon Dioxide Emissions Evidenced by Use of Advanced Navigation Systems*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2139, 21–30 (2009)
- Carrese, S., Gemma, A. y La Spada, S., *Impacts of Driving Behaviours, Slope and Vehicle Load Factor on Bus Fuel Consumption and Emissions: A Real Case Study in the City of Rome*, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 87, 211–221 (2013)
- Cordeau, J., Laporte, G., Savelsbergh, M. W. P. y Vigo, D., *Vehicle Routing*. In *Transportation, Handbooks in OR & MS*, 14, 367–428 (2007)
- Christofides, N. AND Eilon, S., *An algorithm for the vehicle routing dispatching problema*, *Operations Research Quaterly* 20, 309-318 (1969)
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. y Meyarivan, T., *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197 (2002)
- Demir, E., Bektaş, T., y Laporte, G., *A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation*, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(5), 347–357 (2011)
- Demir, E., Bektaş, T., y Laporte, G., *A review of recent research on green road freight transportation*, *European Journal of Operational Research*, 237(3), 775–793 (2014)
- Ehmke, J. F., Campbell, A. M. y Thomas, B. W., *Vehicle Routing to Minimize Time-Dependent Emissions in Urban Areas*, *European Journal of Operational Research*, 251 (2), 478-494 (2015)
- Felipe, Á., Ortuño, M. T., Righini, G. y Tirado, G., *A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges*, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 71, 111–128 (2014)
- Goeke, D. y Schneider, M., *Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles*, *European Journal of Operational Research*, 245(1), 81–99 (2015)
- International Energy agency (IEA), *Transport, Energy and CO2*, Paris, France: IEA/OECD (2009)
- Instituto Nacional de Vías, *Manual de diseño geométrico de carreteras*, (En línea <https://goo.gl/pWtyk5>, acceso 10 de octubre de 2017), INVIAS, Colombia (2008)
- IPPC, *IPCC Fifth Assessment Report (AR5) - Chapter 8: Transport*. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, 599–670, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, U.S: Cambridge University Press (2014)
- Jimenez-Palacios, J. L., *Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing*, Tesis de doctorado, Massachusetts Institute of Technology, Dpt. Ing. Mecánica, U.S (1998)
- Juan, A. A., Goentzel, J. y Bektaş, T., *Routing fleets with multiple driving ranges: Is it possible to use greener fleet configurations?*, *Applied Soft Computing*, 21, 84–94 (2014)
- Kim, G., Ong, Y.-S., Heng, C. K., Tan, P. S. y Zhang, N. A., *City Vehicle Routing Problem (City VRP): A Review*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(4), 1654–1666 (2015)

- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O. y Laporte, G., The fleet size and mix pollution-routing problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 239–254 (2014)
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., y Laporte, G., The impact of depot location, fleet composition and routing on emissions in city logistics, *Transportation Research Part B: Methodological*, 84, 81–102 (2016)
- Kopfer, H. W., Schönberger, J. y Kopfer, H., Reducing greenhouse gas emissions of a heterogeneous vehicle fleet, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 26(1–2), 221–248 (2014)
- Levin, M., Duell, M., y Waller, S., Effect of Road Grade on Networkwide Vehicle Energy Consumption and Ecorouting, doi: 10.3141/2427-03, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2427, 26–33 (2014)
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H., & Lam, H. Y., Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends, *Expert Systems with Applications*, 41, 1118–1138 (2014)
- Maden, W., Eglese, R. y Black, D., Vehicle Routing and Scheduling with Time Varying Data: A Case Study, *Journal of the Operational Research Society*, 61, 515–522 (2009)
- Mingyong, L. y Erbao, C., An improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries and time windows, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(2), 188–195 (2010)
- Mohammadi, M., Torabi, S. A. y Tavakkoli-Moghaddam, R., Sustainable hub location under mixed uncertainty, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 89–115 (2014)
- Naderipour, M. y Alinaghian, M., Measurement, evaluation and minimization of CO₂, NO_x, and CO emissions in the open time dependent vehicle routing problem, *Measurement*, 90, 443–452 (2016)
- Nam E. y Giannelli R., Fuel Consumption Modeling of Conventional and Advanced Technology Vehicles in the Physical Emission Rate Estimator (PERE), (En línea <https://goo.gl/4M5GbF>, acceso 10 de octubre de 2017) EPA, U.S (2005)
- Palmer, A. The development of an integrated routing and carbon dioxide emissions model for goods vehicles, tesis de doctorado, Cranfield University (2007)
- Posada Henao, J. J., Consumo de combustible en vehículos para transporte por carretera – Modelos predictivos, *Revista de Ingeniería de Medellín*, 12(23), 35–46 (2013)
- Qian, J. y Eglese, R., Fuel emission optimization in vehicle routing problems with time-varying speeds, *European Journal of Operational Research*, 248(3), 840–848 (2016)
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I. y Barbosa-Póvoa, A. P., Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns, *Omega*, 48, 60–74 (2014)
- Scora, G., Boriboonsomsin, K. y Barth, M., Value of eco-friendly route choice for heavy-duty trucks, *Research in Transportation Economics*, 52, 3–14 (2015)
- Scott, C., Urquhart, N. y Hart, E., Influence of topology and payload on CO₂ optimised vehicle routing, *Lecture Notes in Computer Science*, 6025, 141–150 (2010)
- Sentoff, K. M., Aultman-Hall, L., y Holmén, B. A., Implications of driving style and road grade for accurate vehicle activity data and emissions estimates, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 35, 175–188 (2015)
- Tajik, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Vahdani, B. y Meysam Mousavi, S., A robust optimization approach for pollution routing problem with pickup and delivery under uncertainty, *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2), 277–286 (2014)
- Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V. y Carvalho, M. G., Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling, *Waste Management*, 29(3), 1176–1185 (2009)
- US EPA. Sources of Greenhouse Gas Emissions. (En línea <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>, acceso 23 de noviembre de 2016) EPA (2014)
- Wang, Y., Du, X., Yu, H., Huang, J., y Li, Y., Impacts of Road Grade on Fuel Consumption of Light Vehicles by Use of Google Earth DEM, *International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery*, 360–363, Xi'an - China, 17-19 Septiembre (2015)
- Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I. y Xu, Y., Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, 39(7), 1419–1431 (2012)
- Yang, J. y Sun, H., Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles, *Computers and Operations Research*, 55, 217–232 (2014)

