

MODELO MATEMÁTICO DE ASIGNACIÓN MULTIPRODUCTO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE LÁCTEOS

MATHEMATICAL MODEL OF MULTIPRODUCT ALLOCATION FOR THE DISTRIBUTION OF DAIRY PRODUCTS

Oscar Javier Herrera Ochoa^{1,♦}, Paula Andrea Bedoya Porez²,
Nelsy Yurani Obando Rozo³

RESUMEN

Las grandes cadenas comerciales presentan estrategias que han permitido la expansión de las tiendas a conveniencia que se encuentran en áreas de alto tráfico peatonal, además de responder a los cambios demográficos en las grandes ciudades. Con el surgimiento de esta forma de comercio, se han presentado problemas logísticos para la distribución de diferentes productos; por lo cual, en este trabajo se desarrolló un modelo de optimización basado en programación entera mixta para la asignación multiproducto proyectando el uso de plataformas logísticas para la distribución de tres familias de productos lácteos para una hipertienda en la ciudad de Bogotá en Colombia, que cuenta con 42 centros de venta. De esta manera se estableció como resultado del modelo y bajo el análisis de escenarios, que era mejor utilizar 2 de 3 plataformas logísticas como asignación óptima de despacho con el uso del vehículo de menor capacidad para abastecer todos los centros de consumo con un costo operacional de US\$15314 diarios aproximadamente; es importante anotar que en el modelo se tuvo en cuenta: dos tipos de vehículos con sus respectivas capacidades, atención exclusiva por plataforma, costos por producto y costos fijos de transporte por tipo de vehículo y disponibilidad máxima de capital para solventar los costos fijos por plataforma.

Palabras clave: Asignación multiproducto, Bogotá, logística de distribución, plataformas logísticas, productos lácteos, programación entera mixta, tiendas a conveniencia.

¹Universidad de La Salle. Departamento de Ingeniería Industrial. Bogotá, Colombia, orcid.org/0000-0002-0001-8804.

²Universidad de La Salle. Departamento de Ingeniería Industrial. Bogotá, Colombia, orcid.org/0000-0001-6675-2115, pbedoya28@unisalle.edu.co

³Universidad de La Salle. Departamento de Ingeniería Industrial. Bogotá, Colombia, orcid.org/0000-0001-9641-7414, nobando10@unisalle.edu.co

♦Autor para correspondencia : ojherrera@unisalle.edu.co

ABSTRACT

Large commercial chains present strategies that have allowed the expansion of convenience stores located in areas with high pedestrian traffic, in addition to responding to demographic changes in large cities. With the emergence of this form of commerce, logistical problems have arisen for the distribution of different products; Therefore, in this work an optimization model based on mixed integer programming was developed for multiproduct allocation, projecting the use of logistics platforms for the distribution of three families of dairy products for a superstore in the city of Bogotá in Colombia, which with 42 sales centers. In this way, it was established as a result of the model and under the analysis of scenarios, that it was better to use 2 of 3 logistics platforms as optimal dispatch allocation with the use of the lowest capacity vehicle to supply all consumption centers with an operational cost of US\$15314 per day approximately; It is important to note that the model took into account: two types of vehicles with their respective capacities, exclusive service per platform, costs per product and fixed transport costs per type of vehicle, and maximum availability of capital to cover fixed costs per platform.

Keywords: Multi-product allocation, Bogotá, distribution logistics, logistics platforms, dairy products, mixed integer programming, convenience stores.

INTRODUCCIÓN

Frente a la adecuada planificación de la cadena de suministro, se debe tener en cuenta que las actividades que la integran inciden en su eficiencia y en la mantenibilidad de la calidad de los productos que se transportan y más si son alimentos. Así, la adecuada definición de la red de distribución es un factor clave para garantizar la competitividad del sector y poder contribuir a que los productos tengan altos estándares de calidad y que se minimicen los tiempos de envío (Musavi & Bozorgi-Amiri, 2017). Así mismo, la incorrecta planificación entre los entes que interactúan en la cadena de abastecimiento genera sobrecostos y gastos adicionales, por lo cual el uso de modelos de optimización basados en programación entera cuyo objetivo es minimizar los costos de transporte cobra relevancia a la hora de gestionar dicha cadena (Mogale *et al.*, 2017). De esta manera, se propuso un modelo de asignación de cargas basado en Programación Entera Mixta para evaluar un potencial uso de plataformas logísticas como centros de distribución para el abastecimiento de tres familias de productos lácteos de un hipermercado que cuenta con 42 clientes o tiendas a conveniencia (establecimiento con menos de 500m² y que opera los 365 días del año con horario comercial igual o superior a 18 horas), distribuidas en la ciudad de Bogotá, proyectándose de esta manera la elección adecuada de la cantidad de plataformas como instalaciones logísticas necesarias para este fin.

La definición de este propósito se debió a que la empresa planea estratégicamente a corto plazo, cambiar su esquema de distribución mediante el uso de estas plataformas como centros de distribución para una mejor operación de abasto de sus clientes, además de servir como sitios de resguardo temporal para la descongestión en el manejo de sus productos. Debido a esto y a la información suministrada por la empresa, este trabajo se enfocó específicamente en la definición de uso de tres posibles plataformas ubicadas estratégicamente para atender

a todos los clientes del sistema bajo las condiciones establecidas en el mismo y que se presentaran en el siguiente capítulo.

De otra forma y como aspecto característico del modelo de distribución, se considera el uso de vehículos teniendo en cuenta su capacidad y la cantidad disponible de ellos, además de incluir restricciones de capacidad, atención exclusiva a clientes y costos fijos máximos permitidos por plataforma. De esta manera, y por tratarse de un modelo de optimización, este contribuye a que la distancia recorrida sea menor y así los vehículos generen menos CO₂, lo cual ayuda a mejorar las condiciones medioambientales en la distribución de los productos, un factor de alta importancia en el abastecimiento urbano como ha sido mencionado en Mogale *et al.* (2017). Por otro lado, el que se trate de productos alimenticios cobra más importancia si se tiene en cuenta que sólo el 10 % de los productos perecederos se refrigeran y en la actualidad hasta un 30 % de los alimentos producidos se pierde a lo largo de la cadena de suministro antes de llegar a los consumidores, lo que implica grandes problemas económicos, ambientales y éticos, (Accorsi *et al.*, 2017). Además, el carácter perecedero crea incertidumbre muchas veces para el comprador con respecto a la calidad de los alimentos, la seguridad y fiabilidad del suministro, además impone nuevas restricciones sobre la cantidad de inventario a manejar por el proveedor como en el minorista (Li *et al.*, 2016).

Modelos para el Análisis de la Cadena de Suministro

La eficiencia de los sistemas en el que se involucre el transporte de productos depende de cómo se utilizan los recursos y a parte de la innovación que se ha dado a nivel técnico, es decir, avances en motores, tipo de combustible utilizado y tecnologías de la información, el área de la planificación logística muestra ser uno de los aspectos de mayor repercusión en su productividad, por lo tanto, un manejo adecuado de la red que compone la cadena de suministro garantiza un mayor valor añadido al producto que se le entrega al cliente (Moen, 2016) y más para la manipulación de productos alimenticios como lo son los lácteos, los cuales tienen una vida útil relativamente corta y comienza a deteriorarse una vez el producto ha sido producido. El ser perecedero, hace que se deban tener en cuenta en la gestión de la cadena de suministro, aspectos como el uso de embalajes especiales para mayor protección de los productos, transporte refrigerado y envasado especial.

Frente al transporte de productos en el área urbana se ha vuelto más complejo con el paso del tiempo, ya que la logística de la ciudad como un concepto que aborda el problema de las zonas urbanas se convierten estructuralmente más densa a medida que disminuye el espacio para el transporte, mientras que el volumen de mercancías transportadas ha aumentado continuamente (Moen, 2014). Por otro lado, la literatura frente a este tema es muy variada, teniéndose así que los modelos de asignación de rutas para la distribución de alimentos consideran la capacidad del vehículo y el deterioro de los mismos, lo que garantiza la calidad y frescura de los productos para dar confianza al cliente y garantizar la seguridad alimentaria (Davis *et al.*, 2014). El manejo de productos perecederos y más para su distribución, requiere de un alto grado de coordinación entre los diferentes agentes involucrados en la cadena de suministro para que dichos productos se conserven en un alto grado de calidad y para que se cumplan las condiciones de seguridad alimentaria en una determinada población. Así se tiene por ejemplo, investigaciones enfocadas en determinar la homogeneidad en los tipos de producto como requisito en los pedidos de los clientes y la trazabilidad de deterioro del producto en el tiempo (Grillo *et al.*, 2017). En este contexto, Sel *et al.* (2015), han trabajado con la vida útil mínima de los productos requerida por los clientes como elemento de pérdida si se disminuye a lo largo de la cadena de suministro.

De otra forma, y teniendo en cuenta que por tratarse de distancias cortas y por manejarse

los productos bajo condiciones refrigeradas para su distribución en este estudio, no se contemplara la condición de deterioro del producto en el modelo, teniéndose de esta manera algunas aplicaciones de modelos de optimización para el transporte de productos alimenticios que no incorporan en ellos el carácter perecedero. Así por ejemplo, está un modelo de asignación de cargas para la distribución de productos en zona urbana que se diseñó para una cadena minorista líder en Europa, donde se tuvo una disminución del 6% de los costos operativos totales y del 10 % para costos de transporte a través de la asignación de proveedores a los diferentes centros de consumo (Holzapfel *et al.*, 2016). También se tienen configuraciones que optimizan la localización de las instalaciones de almacenamiento de los productos que posteriormente se distribuirán mediante la determinación del número óptimo de las instalaciones de almacenamiento, capacidad y ubicación geográfica, de tal manera que el costo en la red se reduce al mínimo y la demanda del cliente es satisfecha (Tang *et al.*, 2016).

Otro aspecto importante por considerar es el concepto de cross-docking, el cual es una estrategia relativamente nueva en el área de logística en la cual se mueven los productos desde los proveedores hasta los clientes a través de centros especializados sin tenerlos en almacenamiento en un largo plazo. Esta estrategia reduce los costos totales y mejora la eficiencia en la cadena de suministro mediante la eliminación de almacenamiento y recuperación. La idea principal es transferir los productos de los proveedores a los clientes a través de los centros de almacenamiento no teniendo los productos en reserva por un periodo superior a 24 horas (Küçükoğlu & Öztürk, 2017).

Frente a las técnicas de solución, las más trabajadas son las exactas a través de modelos basados en programación matemática lineal y entera, teniéndose como parámetros de entrada para la asignación de productos los límites de capacidad de los lugares de almacenamiento, costos de transporte de los productos y capacidad de los vehículos. Luego de esto, se ejecutan los modelos en programas de optimización para finalmente obtener como variables de salida la asignación de los productos que serán distribuidos desde los centros de almacenamiento hasta los centros de consumo (Aydinela *et al.*, 2008). De esta manera, el uso de modelos de optimización arrojan soluciones donde se acortan el número de procesos intermedios y se concentran las actividades logísticas en zonas donde se reduce la complejidad del proceso de distribución y facilita el logro de múltiples objetivos, tales como conservación del medio ambiente, calidad y trazabilidad de los productos (Sellitto *et al.*, 2018). En la Tabla 1, se presenta una breve descripción de algunos de los modelos matemáticos encontrados para la optimización de procesos de distribución en la cadena de suministro teniendo en cuenta su enfoque de análisis y técnica utilizada.

Tabla 1. Antecedentes sobre Modelos para la Optimización de Distribución de Productos

Fuente	Modelo de Programación	Función objetivo	Programa utilizado
Musavi y Bozorgi-Amir (2017)	Metaheurístico	Multi-objetivo. Minimizar costos de transporte, Maximizar la calidad del producto, Minimizar emisiones de carbono	Algoritmo Genético II, NSGA-II
Mogale <i>et al.</i> (2017)	Modelo de programación no lineal entero mixto	El objetivo de minimizar el transporte, el manejo y el costo de almacenamiento.	Algoritmo HP-CRO Modelo mejorado -Chemical Reaction Optimization
Tang <i>et al.</i> (2016)	Problema lineal de entero mixto	Minimización de costos. Asignación de ubicación de centros de distribución.	CPLEX 12.6
Torres <i>et al.</i> (2011)	Programación lineal entera y entera mixta	Minimización de costos de enrutamiento	GAMS-CPLEX
Nieto <i>et al.</i> (2012)	Programación Entera Mixta.	Minimización de distancias.	CPLEX 10.5
Davis <i>et al.</i> (2014)	Problema de cobertura de conjunto capacitado (CSCP). Programación lineal entera	Minimiza puntos de entrega de alimentos. Asignación de agencias a un punto de entrega de alimentos	GAMS / CPLEX en Core2 Quad 2,40
Holzapfel <i>et al.</i> (2016)	Un problema de asignación generalizada (GAP) (Programación de enteros mixtos no lineales de fuente abierta básica	Minimiza la suma de los costos operacionales y logísticos totales	GAMS y aplicado BONMIN
Pinar (2016)	Programación Entera Mixta.	Minimización de costos del ruteo de vehículos.	Concorde TSP
Herrera <i>et al.</i> (2016)	Programación Entera Mixta.	Minimización de costos fijos y variables de transporte.	GAMS aplicando CBC
Gholamian y Taghazadeh (2017)	Modelo MILP Modelo lineal de programación entera.	Minimización de costos totales desde producción hasta distribución	GAMS 24.1.3

Como se puede observar, la principal técnica utilizada para la planeación de la operación de distribución de diversos productos en la cadena de suministro ya sea como modelos de asignación de cargas, modelos de ruteo de vehículos y modelos de ubicación y reparto de mercancías, es la programación entera mixta como técnica de optimización exacta, esto siempre y cuando el problema combinatorial no sea tan grande que lo haga demorado computacionalmente.

De esta manera, se determinó analizar el problema en cuestión desde la perspectiva de distribución con un modelo de asignación basado en programación matemática entera mixta, sin tener en cuenta el aspecto perecedero de los alimentos, (ya que los vehículos cuentan con cámaras de refrigeración y que los tiempos de traslado son cortos, con lo cual no se ve afectada la cadena de frío de los productos; esto debido a que las distancias no son largas y a que las cantidades a entregar por tienda son relativamente pequeñas con lo cual se hace rápida la entrega por cliente), además, el modelo se construyó con el criterio de optimizar las distancias a través de los costos de desplazamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño del modelo matemático, se enfocó en la asignación de tres familias de productos lácteos desde tres posibles plataformas logísticas con el uso dos tipos de vehículos para la distribución hacia 42 tiendas a conveniencia de una hipertienda en la ciudad de Bogotá Colombia. Dicho modelo tiene en cuenta parámetros como la capacidad de almacenamiento, capacidad de los vehículos a utilizar, número de vehículos disponibles por plataforma, demanda de los centros de consumo, oferta de las plataformas logísticas y costos fijos y variables asociados al transporte.

La metodología utilizada para la consecución del estudio se puede apreciar en la Figura 1.

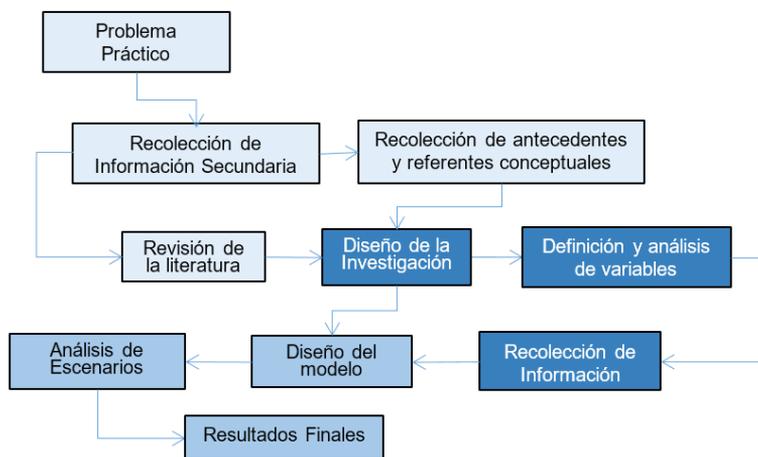


Figura 1. Esquema de la Metodología Utilizada en el Proyecto.

Aquí se aprecia tres etapas generales diferenciadas por la tonalidad de color; la primera, comprendió la recolección de información secundaria, de antecedentes y referentes conceptuales y de revisión de la literatura disponible; en la segunda etapa se definió el diseño de la investigación donde se estableció la información a recoger directamente de la unidad de análisis, el diseño de los instrumentos de recolección y su aplicación; y finalmente en la última etapa, se analizaron las variables más incidentes acorde al problema teórico-práctico en cuestión, diseñando posteriormente el modelo matemático respectivo, después se analizaron los resultados obtenidos del modelo evaluando escenarios de actuación para finalmente proponer la mejor opción como planeación prospectiva de la distribución de los productos en referencia.

Frente al análisis de las variables más incidentes para la asignación de vehículos y rutas de distribución a los almacenes a conveniencia, se muestra en la Tabla 2 la forma de obtención de la información más relevante:

Tabla 2. Fuente, forma de obtención y herramienta utilizada en la búsqueda de información

Tipo de dato	Tipo de fuente	Forma de obtención	Medio o herramienta utilizada
Distancias entre plataformas logísticas y centros de consumo	Información secundaria	Aplicación web	Google Maps
Demanda Oferta	Información primaria	Visita a tiendas de conveniencia	Observación directa en tiendas de conveniencia
Costos fijos de almacenamiento y transporte de productos	Información secundaria. Aplicación computacional	Páginas Web	Excel (Prorrato de los costos)
Precio de los productos	Información primaria	Visita a tiendas de conveniencia	Observación directa en tiendas de conveniencia
Capacidad de vehículos y plataformas	Información secundaria	Páginas web	Páginas Institucionales
Asignación de plataformas a centros de consumo	Modelo de optimización	Aplicación computacional	GAMS, CBC

Planteamiento del Modelo Matemático

El modelo fue diseñado contemplando el uso de tres potenciales plataformas logísticas ubicadas en puntos estratégicos a los 42 centros de consumo (tiendas a conveniencia), la primera se encuentra en la carrera 127 con calle 55, la segunda en la carrera 35 con calle 63 y la tercera plataforma en Pensilvania (zona industrial) en Bogotá. Estas ubicaciones posibles de las plataformas, está definida según la concentración de los centros de consumo, ya que éstos aplican una estrategia que está basada en la ubicación en áreas de alto tráfico peatonal, siendo estas zonas de oficinas, comercio o residencial, lo que permite la gran acogida de estas tiendas por los consumidores finales, Revista Dinero (2010). La ubicación geográfica de estas tiendas en el mapa de la ciudad, al igual que las posibles ubicaciones de las respectivas plataformas se aprecia en la Figura 2.

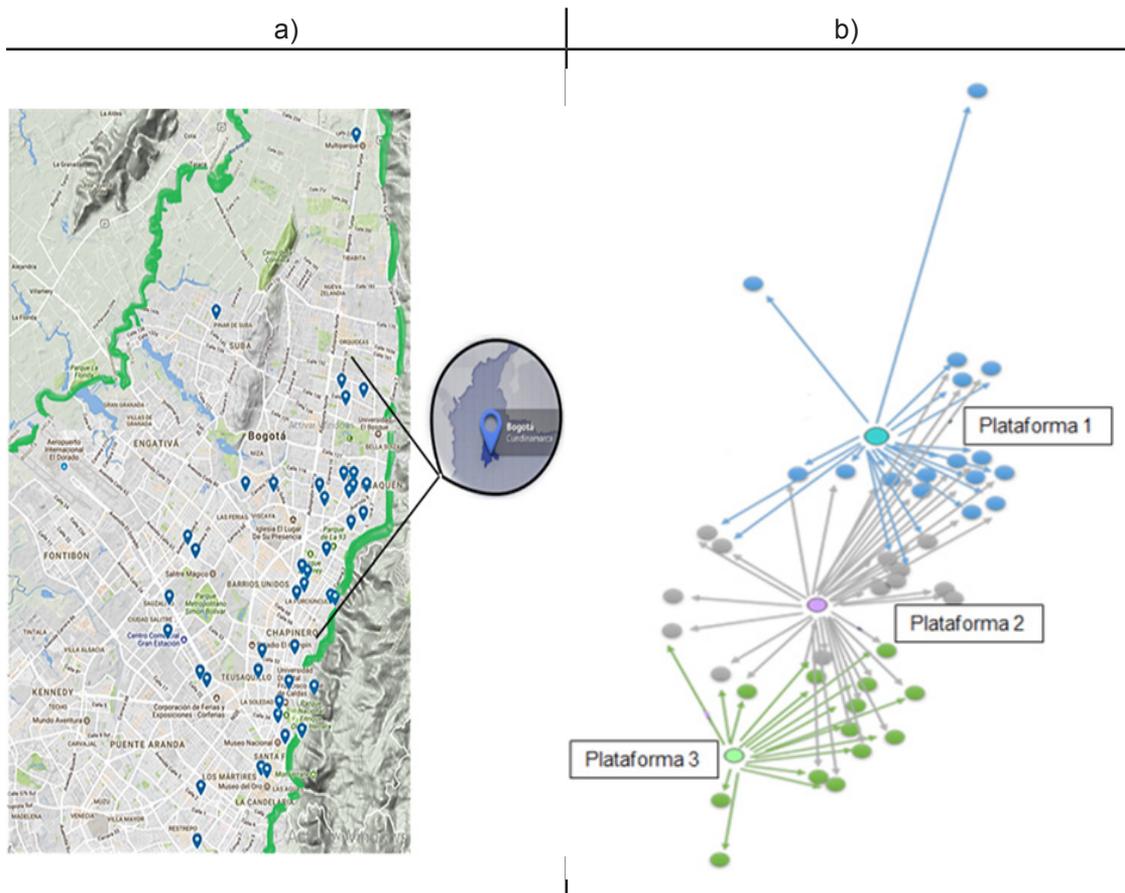


Figura 2. a) Ubicación de clientes (Tiendas a Conveniencia) en la ciudad de Bogotá y b) Posibles asignaciones a clientes por Plataforma

Como característica de suministro en el modelo, se tiene que cada cliente podrá ser atendido por una sola plataforma logística y usándose para todo el sistema de transporte dos tipos de vehículos denominados NKR I y NKR II, con capacidad de carga máxima de 2200 y 3000 unidades respectivamente y acondicionados con equipo de refrigeración. El modelo consiste en asignar las m fuentes o plataformas a n clientes o tiendas a conveniencia con el menor uso de recursos (vehículos), bajo las restricciones del sistema y al menor costo de operación posible. Dentro de estos, se incluyeron costos de operación de las plataformas y de traslado tanto variables como fijos. Los alimentos a transportar se componen de tres tipos de productos lácteos: (leche en polvo; quesos mozzarella y doble crema; y derivados lácteos varios como: leche condensada, crema de leche y mantequilla).

Supuestos y Limitaciones del Modelo Propuesto

- El modelo, aunque se trabajó para productos perecederos, no tiene en su diseño como tal, una diferenciación con el uso de productos no perecederos; ya que, al ser el horizonte de planeación de un día, por tratarse de trayectos cortos y por tener sistema de refrigeración los vehículos, no se requiere incorporar esta condición en el modelo.

- Para mayor eficiencia en la distribución a través del uso del recurso de los vehículos, cada cliente será atendido desde una sola plataforma con el uso de un solo vehículo del mismo tipo, esto implica que se lleven mezclados los diferentes tipos de productos por vehículo.
- La unidad de medida de los tres productos son unidades, en la cual está definida la demanda, capacidades de las plataformas y de los vehículos, teniendo en cuenta para estos últimos el peso máximo de carga que tienen.
- Las plataformas tienen una estimación de su capacidad de 6000, 8200 y 5000 unidades respectivamente entre los tres tipos de productos por día, en donde el producto 1 representa aproximadamente el 50 % de la capacidad, mientras el producto 2 el 20 % y el tercero el restante 30 % aproximadamente en cada plataforma.
- El periodo de tiempo como referencia del modelo es el día, siendo este mismo el periodo en el que se encuentran los parámetros de las capacidades, demandas y ofertas.
- No se incluyeron restricciones particulares como horarios (ventanas de tiempo) o condiciones en el manejo de los productos por parte de los clientes.
- Por otro lado, los costos fijos de la operación logística de distribución están dados por el alquiler de los vehículos, los cuales son de US\$74 y US\$102 respectivamente para el vehículo tipo 1 o NKR I y tipo 2 o NKR II, además por el uso de los recursos conductor y gastos generales por la movilidad de dichos vehículos, lo cual está relacionado con la distancia de las plataformas a los respectivos clientes. Los costos fijos de la operación de cada plataforma, son independientes a estos costos debido a políticas de manejo autónomo de rubros logísticos de la empresa. Además, se tiene una restricción de disponibilidad de capital para la operación de transporte por estos gastos fijos de la operación de distribución.

De otra forma, en la Tabla 3 se presenta el valor promedio de algunos de los de costos, demandas y capacidades del sistema por día:

Tabla 3. Costos (US\$ Dólares), Demandas y Capacidades (kg) del Sistema

		Producto 1	Producto 2	Producto 3
Costo unitario de transporte		US\$0,8	US\$2,4	US\$1,5
Demanda Promedio por tienda		116	61	82
		Plataforma 1	Plataforma 2	Plataforma 3
Costo Fijo de Operación por plataforma		US\$140	US\$150	US\$130
Oferta del producto tipo i en la plataforma j	Producto 1	2700	3700	2200
	Producto 2	1400	1900	1200
	Producto 3	1900	2600	1600
		Veh. Tipo I	Veh. Tipo II	
Costo fijo promedio de transporte por vehículo		US\$9,5	US\$10	

A continuación, se muestra la estructura específica del modelo planteado basado en programación entera mixta ya que utiliza variables no negativas y variables binarias (Taha, 2012):

Conjuntos:

- ρ = Tipo de vehículo. $\forall \rho = 1 \dots S$
- i = Tipo de producto a transportar. $\forall i = 1 \dots n$
- j = Plataforma logística. $\forall j = 1 \dots m$
- k = Clientes o tiendas a conveniencia $\forall k = 1 \dots K$

Variables del modelo:

- $X_{ijk\rho}$ = Cantidad de unidades a transportar del producto tipo i desde la plataforma j al cliente k en el vehículo ρ en un día de referencia.
- $Y_{jk\rho}$ = Variable binaria que activa la utilización de la plataforma j para atender al cliente k en el vehículo ρ en un día de referencia.
- Z_j = Variable binaria que activa los costos fijos de operación de la plataforma j en un día de referencia.
- $N_{v\rho j}$ = Numero de vehículos tipo ρ utilizados por la plataforma j en un día de referencia.

Definición de parámetros del modelo:

- $C_{fjk\rho}$ = Costo fijo por el envío desde la plataforma j al cliente k en el vehículo ρ
- $CF_{\rho j}$ = Costos fijos por el uso (alquiler) del vehículo ρ desde la plataforma j en un día de referencia.
- CF_{maxj} = Costo fijo máximo permitido para el transporte por la plataforma j
- $C_{ijk\rho}$ = Costos unitario del producto tipo i enviado desde la plataforma j al cliente k en el vehículo ρ .
- H_{fj} = Costo fijo de operación de la plataforma j en un día de referencia
- a_{ij} = Oferta o capacidad por tipo de producto i en la plataforma j
- b_{ik} = Demanda por tipo de producto i por el cliente k
- $V_{m\rho}$ = Capacidad del vehículo tipo ρ (en unidades de producto)
- $V_{\rho j}$ = Disponibilidad de vehículos tipo ρ en la plataforma j en un día de referencia

Modelo General

$$\text{F.O. Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K \sum_{\rho=1}^S C_{ijk\rho} X_{ijk\rho} + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K \sum_{\rho=1}^S C_{fjk\rho} Y_{jk\rho} + \sum_{\rho=1}^S \sum_{j=1}^m CF_{\rho j} N_{v\rho j} + \sum_{j=1}^m H_{fj} Z_j$$

sujeto a:

Restricción de conectividad

$$\sum_{j=1}^m \sum_{\rho=1}^S Y_{jk\rho} = 1 \quad \forall k$$

Restricción de costo fijo máximo permitido para la distribución

$$\sum_{\rho=1}^S CF_{\rho j} N_{v\rho j} + \sum_{k=1}^K \sum_{\rho=1}^S C_{fjk\rho} Y_{jk\rho} \leq CF_{maxj} \quad \forall j$$

Restricción de oferta

$$\sum_{k=1}^K \left[\sum_{\rho=1}^S X_{ijk\rho} \right] \leq a_{ij} \quad \forall i, j$$

Restricción de demanda

$$X_{ijkp} = b_{ik} Y_{jkp} \quad \forall i, j, k, p$$

Restricción de uso de vehículos

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K X_{ijkp} \leq Vmp Nv_{pj} \quad \forall j, p$$

Restricción de activación de costo fijo por uso de plataforma

$$\sum_{k=1}^k \sum_{p=1}^s Y_{jkp} \leq MZ_j \quad \forall j$$

Restricción de activación de costos fijos de distribución

$$\sum_{i=1}^n X_{ijkp} \leq MY_{jkp} \quad \forall j, k, p$$

Restricción de número de vehículos disponibles

$$Nv_{pj} \leq V_{pj} \quad \forall p, j$$

Restricción de no negatividad

$$X_{ijkp} \geq 0 \quad \forall i, j, k, p$$

Variables binarias

$$Y_{jkp}, Z_j \in \{0, 1\} \quad \forall j, k, p$$

De esta manera, la ecuación (1) representa la función objetivo donde se quiere minimizar los costos totales, compuesta por los costos unitarios y fijos de envío, costos fijos por el uso del vehículo específico en cada plataforma y finalmente el costo de operación de la plataforma respectiva. La ecuación (2) de conectividad, establece que un cliente o tiendas a conveniencia solo puede ser abastecido por una sola plataforma logística; (3) fija un tope de costo máximo que se puede tener por los costos fijos de envío y por el uso del vehículo específico en cada plataforma; (4) es la restricción de oferta y garantiza que la cantidad de productos distribuida desde cada una de las plataformas logísticas a los clientes sea igual o inferior a la capacidad de dicha plataforma; (5) hace referencia a la activación de las cantidades de producto a distribuir desde las plataformas para suplir la demanda de cada cliente si se activa el uso de una respectiva plataforma para cada cliente en un determinado vehículo; (6) representa las cantidades de productos y clientes que son abastecidos por cada plataforma en una cantidad de vehículos específicos para suplir sus demandas; (7) determina la activación del costo fijo de operación por cada una de las plataformas; (8) activa los costos fijos por la operación de distribución desde cada plataforma hacia un cliente y vehículo específico; (9) hace referencia a la disponibilidad de vehículos de cada tipo por cada plataforma para la distribución de los productos; (10) restricción de no negatividad de la variable de cantidad y (11) hace referencia a la naturaleza de variables binarias.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

El modelo que fue corrido en el software GAMS 24.7. y solver CBC, arrojando que la distribución de las plataformas hacia los clientes no es proporcional a razón de que las tiendas a conveniencia en su mayoría se encuentran más cercanas a la plataforma logística número 2, enviándose desde está 7290 unidades entre los tres tipos de productos a 28 clientes con un uso de su capacidad del 89 %, teniéndose además un uso de 3 de los 5 vehículos disponibles en todo el sistema. Esto, más el uso de los diferentes tipos de vehículos por plataforma se puede apreciar en las figuras 3 y 4 que a continuación se presentan.

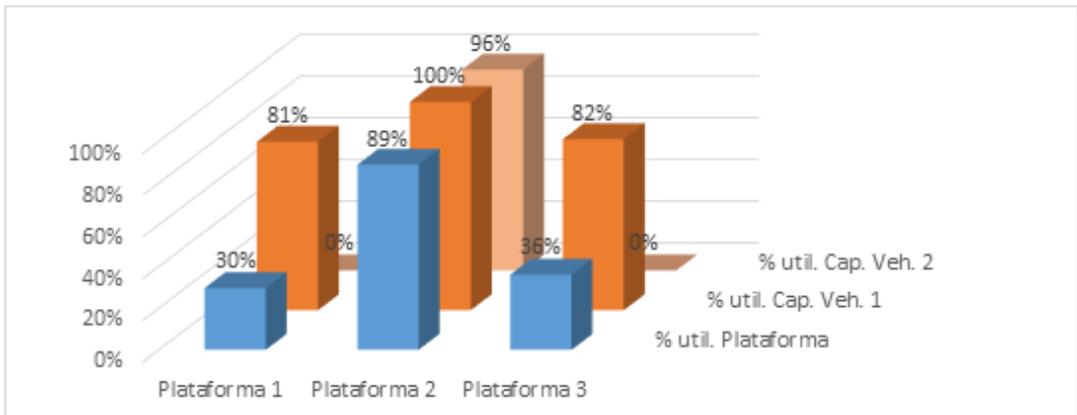


Figura 3. Porcentaje de Utilización de la Capacidad de los Vehículos (Util. Cap. Veh.) y Utilización de Capacidad de Plataformas (Util. Plataforma)

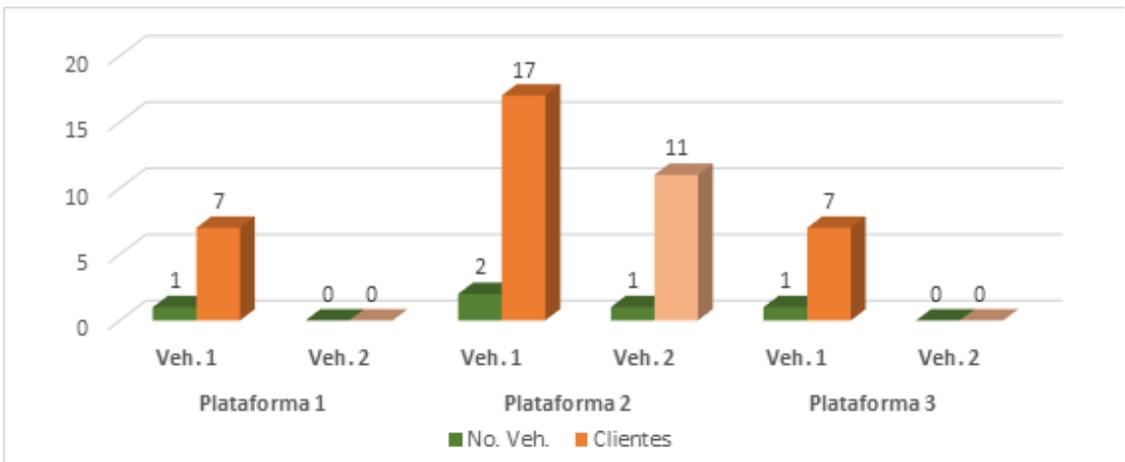


Figura 4. Cantidad de Vehículos (Veh.) por tipo y No. de Clientes asignados por Plataforma

Como resultado del modelo, se tiene un costo total de US\$15417,6 por día en la función objetivo; además, el uso de las plataformas 1 y 3 están en un tercio de su capacidad aproximadamente, con la utilización de un (1) solo vehículo tipo 1 en cada una de ellas y adicionalmente 2 vehículos del tipo 2 en la plataforma 2. De esta manera, se establece diferentes aspectos a tener en cuenta:

1. La plataforma 2 se aproxima al uso de su capacidad total, siendo la que mayor

cantidad de productos moviliza. Esto seguramente debido a que es la que mayor capacidad tiene representando el 42 % del total de productos disponibles, ya que la plataforma 1 representa el 31 % y la 3 el 27 % aproximadamente de la capacidad del sistema. Por otro lado, la plataforma 2 es la que más opciones y cercanía tiene de abastecimiento hacia los diferentes clientes del sistema con respecto a las otras dos plataformas.

2. Se tiene también, que la plataforma 1 abastece con los 3 tipos de productos al 17 % de las tiendas o clientes del sistema y que están ubicados al norte de la ciudad, la plataforma 2 abastece al 67 % que se encuentra en la zona central y occidental y la plataforma 3 abastece al 16 % que se encuentra hacia sur de la ciudad.
3. Se da preferencia al uso del vehículo tipo 1 de menor capacidad, usándose 4 de 5 disponibles, mientras solo se requiere de 1 de mayor capacidad de los dos disponibles entre las tres plataformas. Esto debido al menor costo fijo para la operación de distribución, especialmente por el valor de alquiler.
4. La eficiencia en el uso de los vehículos es alta, pues todos están por encima del 80% de su capacidad, además y basados en estos resultados, se establece que la cantidad de vehículos proyectos en el modelo es la adecuada con respecto a la demanda manejada en la actualidad por la empresa.

Definición de Escenarios

Con base a la solución obtenida, se establecieron algunos escenarios prospectivos como forma de evaluar diferentes opciones favorables para la empresa en cuanto a la operación de distribución de sus productos a través del respectivo modelo, de esta manera se definieron los siguientes escenarios:

Escenario 1: Dado que el uso de las plataformas 1 y 3 es bajo, se estableció el utilizar solo una de estas dos. Para este escenario se probó el uso de la plataforma 3 permitiendo la posibilidad de que la plataforma 2 cubra los clientes que tenía la plataforma 1. Esto se hizo manteniendo los demás parámetros originales, solo que los vehículos que estaban en la plataforma 1 se distribuyeron entre la 2 y 3 de forma proporcional.

Escenario 2: En este escenario se estableció el uso de las plataformas 1 y 2, en donde la plataforma 2 cubra los clientes que tenía la plataforma 3. Esto se hizo manteniendo los demás parámetros originales, solo que los vehículos de la plataforma 3 se distribuyeron entre la 1 y 2 de forma proporcional.

Escenario 3: De acuerdo al mejor desempeño entre los dos escenarios anteriores con respecto a los costos de la operación de distribución, se halló más económico el uso de las plataformas 2 y 3, de tal manera que en este nuevo escenario se quiso definir la cantidad óptima de vehículos a utilizar por tipo, para lo cual se dejó con un valor grande esta restricción para que el modelo sea el que defina este valor óptimo.

Escenario 4: De otra forma, y de acuerdo a la buena receptividad de los productos en el mercado ciudadano, se estableció el supuesto de incrementar del número de clientes en 8 para así completar un total de 50 en el sistema de distribución. Por otro lado, este escenario se evaluó bajo las condiciones óptimas evaluadas en los escenarios anteriores, o sea con el uso de las plataformas 2 y 3 y permitiendo que sea el modelo quien determine la cantidad

óptima de vehículos por tipo a utilizar en cada una de las plataformas tenidas en cuenta. Se aclara que los 8 clientes que se tomaron están ubicados en diferentes partes de la ciudad sin sesgar una zona en especial, asumiendo que cualquiera de las dos plataformas puede cubrir o abastecer a estos clientes adicionales.

De esta forma se tienen los siguientes resultados comparativos entre los diferentes escenarios.

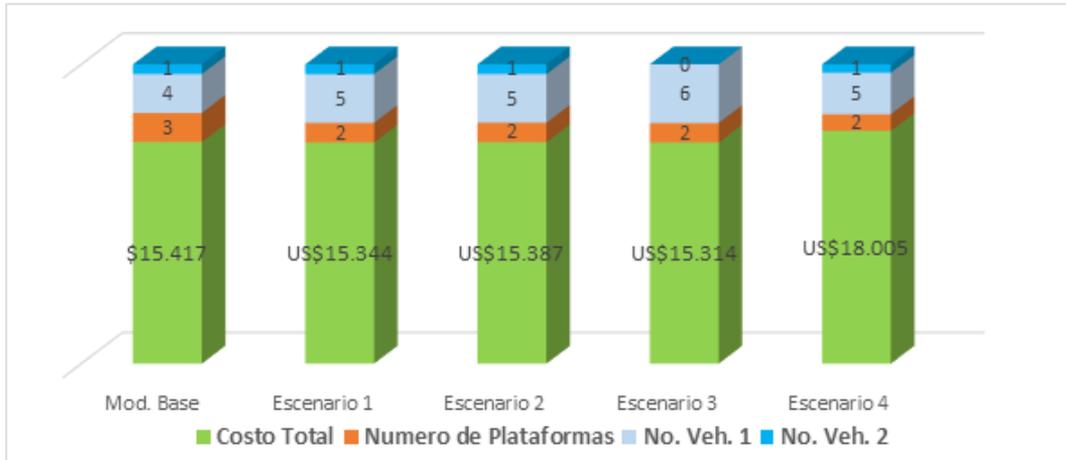


Figura 5. Costos Totales, Número de Plataformas y Número Vehículos por Escenarios

De acuerdo a estos resultados, se establece que el mejor desempeño del sistema en cuanto al menor costo posible es utilizar las plataformas 2 y 3 como se aprecia en el escenario 1 y 3, además de utilizarse únicamente los vehículos tipo 1 evidenciado en el escenario 3 que da el menor costo frente a la posibilidad de utilizar las 3 plataformas al tiempo -lo cual era la evaluación de partida para el estudio definido por la empresa-, presentándose de esta manera un ahorro diario de US\$103, lo que al año representaría un ahorro de US\$37080. Por otro lado y teniendo en cuenta este resultado, al evaluar el escenario 4 se observa -y como era de esperarse-, un incremento en el uso de la capacidad del sistema con las condiciones del modelo de referencia, presentándose de esta manera un costo general de US\$360,1 por unidad frente a US\$367,1 sin el incremento de la demanda, con lo cual se evidencia un aumento de la eficiencia del sistema sin necesidad de adquirir más recursos para el desarrollo de la operación de distribución.

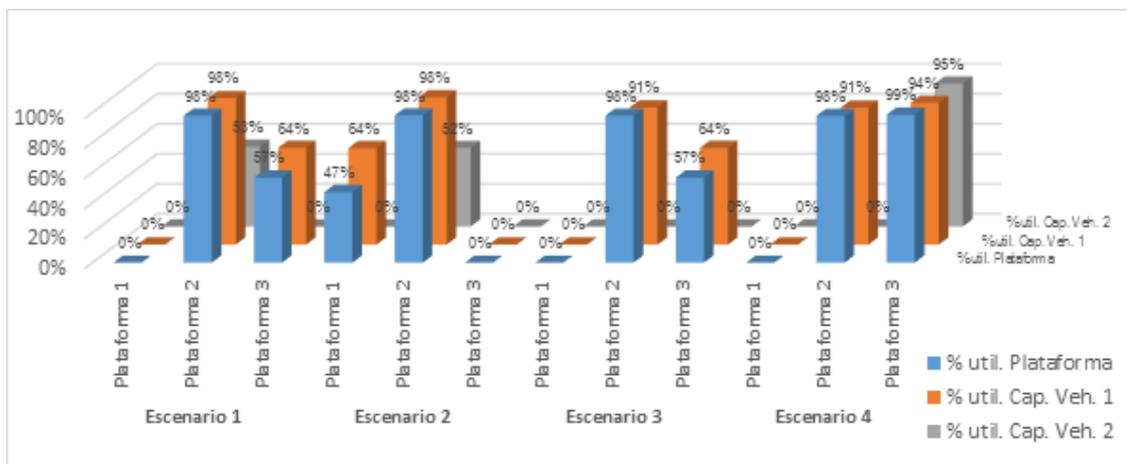


Figura 6. Porcentaje Utilización de Plataformas (% util. Plataforma) y Utilización de Capacidad de Vehículos (% util. Cap. Veh.) por Escenarios

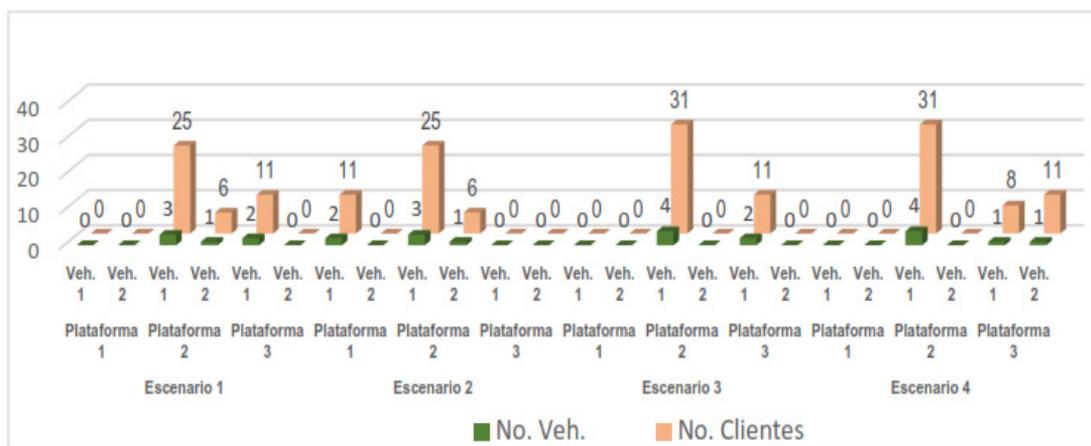


Figura 7. Cantidad de Vehículos (Veh.) por tipo y Número de Clientes asignados por Plataforma para cada uno de los Escenarios

De otra forma y como se observa en las figuras 6 y 7, se tiene que la plataforma 2 tiene un uso de casi el 100% de su capacidad cubriendo el 74 % de los clientes del sistema, estableciéndose definitivamente su preeminencia como fuente para hacer la distribución. También se define que de forma óptima se debe usar cuatro vehículos en la plataforma 2 y dos de la plataforma 3, con preferencia del tipo 1, debido muy seguramente a que tiene el costo fijo más bajo -dado por su alquiler y costo de operación-, además se aclara que éste solo difiere en 800 kg con respecto al de mayor capacidad.

Como ya se había mencionado, lo desarrollado en este trabajo es a modo de prospección estratégica por parte de la empresa debido al incremento moderado de la demanda de los últimos años, por lo cual, no se puede realizar un comparativo con la operación actual de distribución que desarrolla la empresa, pero si se puede establecer algunos elementos de análisis con respecto al modelo desarrollado.

En cuanto a los resultados:

- a. El modelo optimiza la asignación de la fuente de distribución hacia los clientes con respecto al menor costo de dicha operación, teniendo en cuenta como fuente, (3) tres posibles plataformas logísticas ubicadas estratégicamente en la ciudad de Bogotá, y en donde según los resultados obtenidos, se presenta la necesidad innegable del uso de solo las plataformas que están ubicadas en el centro y sur de la ciudad. Esto se puede explicar principalmente a la redistribución de la demanda en estas zonas de la ciudad, a la suficiencia de capacidad de las plataformas definidas en estas zonas y las distancias favorables entre fuentes y destinos, con lo cual se obtiene un menor costo comparativamente con el uso de la plataforma ubicada en el norte de la ciudad.

Esto se corrobora con el análisis de los escenarios propuestos, ya que tres de los cuatro, establecen menor costo con el uso de las plataformas 2 y 3 pertenecientes a las zonas mencionadas anteriormente, aun con incremento de clientes distribuidos proporcionalmente en toda la ciudad. Aquí es importante anotar que a pesar de que la plataforma 1 ubicada al norte de la ciudad es la segunda con mayor capacidad, se prefiere la que está ubicada al sur debido a que esta última tiene en promedio 12,5 % menor el costo unitario con respecto a la plataforma del norte, y a su vez, esto se sustenta debido a que en la zona sur, están los estratos socio económicos medios y bajos de la ciudad.

- b. Por otro lado, y con respecto al uso de los vehículos, la preferencia en su selección del vehículo de menor capacidad tipo 1, se debe principalmente a que tiene un costo de alquiler diario de US\$28 más bajo con respecto al vehículo tipo 2, presentándose una diferencia de capacidad del 26 % entre estos. Adicionalmente y que no está incorporado en el modelo, el que sea un poco más pequeño resulta beneficioso para la operación de distribución el uso de este tipo de vehículo, ya que con este se puede acceder con mayor facilidad a donde están ubicados algunos clientes, en especial en el centro de la ciudad en el que está el centro histórico y cultural y en donde las calles son muy angostas y el acceso no se hace nada fácil con vehículos relativamente grandes.

En cuanto a la estructura del modelo:

- a. El modelo usa una restricción de costos fijos por la operación de distribución, en la que se incluyen los costos de alquiler y el recurso conductor, además de gastos operacionales por cada tipo de vehículo desde cada plataforma específica en el respectivo periodo de referencia. Esto se daría por disponibilidad de capital para esta operación desde cada plataforma, además de ser establecida como política de trabajo por la empresa. De esta forma, esta condición se convierte en un caso particular de esta aplicación frente a los modelos de asignación logística encontrados en la revisión de la literatura.
- b. Por otro lado, se usan restricciones en cuanto al número de vehículos y capacidad de los mismos, así como la de disponibilidad de estos por plataforma; todo esto como complemento a la restricción de costos de operación de cada vehículo, lo cual permite que el modelo sea muy completo a la hora de hacer la asignación de la fuente más adecuada para la distribución dada las características del recurso vehículo disponible por cada una de las fuentes o plataformas evaluadas.
- c. En cuanto al uso de las estructuras de la programación matemática entera, también presenta un manejo adecuado en cuanto a la adaptación de las características propias del sistema, en especial de los costos fijos tanto de operación por plataforma como de transporte a través del uso de los vehículos, a través del enfoque de cargos fijos evidenciados con el uso de las variables binarias destinadas para esto; ya que permite de manera sencilla, la articulación de las variables de decisión de asignación con la activación de estos costos fijos sin depender del nivel de dicha actividad. Esto también se evidencia con el uso de una ecuación de variables excluyentes a través de la restricción de conectividad, en donde se establece la exclusión de activación de solo una de las variables de asignación por plataforma a través del uso de las variables binarias para esto.
- d. Aunado a lo anterior, se tiene adicionalmente la condición de modelamiento multi-producto, con lo cual permite al tomador de decisiones evaluar diferentes opciones al tenerse diferenciado la demanda por tipo de producto en los diferentes clientes del sistema, convirtiéndose en una ayuda muy importante a la hora de asignar recursos de transporte para suplir a los clientes al menor costo posible.

En cuanto a trabajos relacionados:

Frente al uso de este tipo de modelos, en otros contextos según revisión de la literatura, se encuentra que en la mayoría de trabajos se han enfocado en costos variables para la asignación de cargas basados en programación entera mixta (Tang *et al.*, 2016; Torres *et al.*, 2011; Davis *et al.*, 2014; Gholamian & Taghazadeh, 2017); de acuerdo a nuestro conocimiento se ha encontrado una investigación en donde Herrera *et al.* (2016) han utilizado adicionalmente costos fijos con restricciones, mientras que Avraamidou y Pistikopoulos (2017) han evaluado la distribución en dos niveles, con demanda fija y variable. Otros trabajos, han utilizado programación no lineal (Holzapfel *et al.*, 2016; Mogale *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2017) y otros en menor cuantía, utilizan criterios multiobjetivo, con lo cual se puede establecer con la revisión realizada, que el presente trabajo es relevante como aporte al problema de asignación de cargas para sistemas con las condiciones aquí tratadas, como son las distancias entre plataformas logísticas y centros de consumo, costos inherentes al uso de vehículos tanto fijos como variables; costos fijos que comprenden el arrendamiento de las bodegas de almacenamiento en las plataformas logísticas; capacidad de los vehículos y restricciones de conectividad en donde un centro de consumo solo puede ser abastecido por una plataforma logística.

En cuanto a posibilidades futuras:

- a. Dado que el modelo actual hace énfasis en el uso de vehículos por el sistema, en donde se define el número de camiones disponibles por plataforma con sus respectivas capacidades dependiendo su tipo, además de los costos fijos de transporte por clasificación del vehículo, es que sería importante para un futuro trabajo, definir la posibilidad de evaluar el número de viajes por tipo de vehículo desde cada plataforma con alguna restricción de viajes máximos por día. Esto con la finalidad de analizar la viabilidad de utilizar un número menor de vehículos con la eventualidad de poderlos utilizar para más de un viaje en el día. Para esta condición, se podría evaluar algunos escenarios ampliando la jornada de trabajo y previendo un aumento de la demanda de los productos para los clientes actuales. Esto se fundamenta especialmente a los altos costos fijos por el alquiler diario de los vehículos, con lo cual se podría llegar a utilizar menor cantidad de vehículos y así reducir el costo por este rubro.
- b. Otro aspecto importante a evaluar en un futuro trabajo, es la posibilidad de incluir en el modelo la asignación de cargas a distribuir desde la planta de procesamiento, de tal manera que el modelo incluya toda la cadena de abastecimiento; aguas arriba como aguas abajo y así el modelo se más integral a la hora de planear la operación completa de distribución de sus productos desde la planta de procesamiento hasta la puesta en tienda de venta final.

CONCLUSIONES

La planeación prospectiva de la distribución de productos lácteos hacia los diferentes centros de consumo mediante un modelo de asignación multiproducto, proporciona resultados que podrían mejorar la operación futura del abastecimiento hacia las tiendas a conveniencia a las cuales suministra actualmente la empresa. De esta forma, se garantiza que los alimentos transportados se distribuyan de manera eficiente y por lo tanto, minimizando los costos asociados a esta operación. Por otro lado, el análisis del sistema mediante una técnica cuantitativa de optimización, permite hacer una planeación óptima de las operaciones logísticas de distribución facilitando la gestión de esta actividad y así formular soluciones efectivas ante la dinámica subyacente de dicha operación, dada la variabilidad por los cambios en la oferta y restricciones en el uso de los recursos de transporte.

Por otra parte y de manera específica, el evaluar el abastecimiento mediante el modelo planteado con el uso potencial de plataformas logísticas ubicadas en puntos estratégicos a los centros de consumo, conlleva a la definición o elección eficiente de operar el sistema con las plataformas 2 y 3 mediante la evaluación de escenarios. De igual manera, se pudo definir el vehículo tipo NKR I como la mejor opción para realizar el transporte dentro la actividad logística de distribución, esto dado por su bajo costo fijo de operación comparado con el vehículo de mayor capacidad. De esta manera se tendría un costo total diario de US\$15314,2 presentando un ahorro de US\$37080 por año con respecto al uso inicialmente propuesto por la empresa de trabajar con tres plataformas. Por otro lado, al definirse el uso más adecuado –en cuanto a costos se refiere- de los recursos plataformas y vehículos a utilizar para el abastecimiento, se podría hacer un análisis de costos para así definir la conveniencia de bajar los precios de los productos al público consumidor, de tal forma que se alcance ventajas competitivas en el mercado.

Por otro lado, al establecer la asignación para la distribución multiproducto de alimentos lácteos a través de un modelo matemático de programación lineal entera mixta que integrara parámetros de costos fijos además de costos variables de acuerdo con las distancias recorridas desde las plataformas logísticas a los centros de consumo, restricciones de capital para la distribución, uso de vehículos diferenciables por su capacidad y disponibilidad por plataforma, además de las ofertas y demandas; se logra una evaluación más integral del sistema, permitiendo tomar decisiones más enfocadas al uso de los recursos disponibles por la compañía.

REFERENCIAS

- ACCORSI, R., GALLO, A. y MANZINI, R. (2017). A Climate Driven Decision-Support Model for the Distribution of Perishable Products. *Journal of Cleaner Production* [en línea] 165,917-929. Disponible: <https://doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.170>
- AVRAAMIDOU, S. y PISTIKOPOULUS, E. (2017). A multiparametric mixed-integer bi-level optimization strategy for supply chain planning under demand uncertainty. IFAC. 10178-10183.
- AYDINELA, M., SOWLATIB, T., CERDA, X., COPEA, E. y GERSCHMAN, M. (2008). Optimization of production allocation and transportation of customer orders for a leading forest products company. *Mathematical and Computer Modeling* (48), 1158-1169.
- DAVIS, L. B., SENGUL, I., IVY, J. S., BROCK III, L. G. y MILES, L. (2014). Scheduling Food Bank Collections and Deliveries to Ensure Food Safety and Improve Access. *Socio-Economic Planning Sciences* [en línea] 48,175-188. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2014.04.001>
- Revista Dinero. La revolución de las tiendas de conveniencia, (2010). [en línea] Disponible: <http://www.dinero.com/edicion-impresa/negocios/articulo/la-revolucion-tiendas-conveniencia/106420>.
- GHOLAMIAN, M.R. y TAGHANZADEH, A.H., (2017). Integrated Network Design of wheat Supply Chain: A Real Case of Iran. *Computers and Electronics in Agriculture* 140,139-147.
- GRILLO, H., ALEMANY, M., ORTIZ, A. y FUERTES-MIQUEL, V. (2017). Mathematical Modeling of the Order-Promising Process for Fruit Supply Chains Considering the Perishability and Subtypes of Products. *Applied Mathematical Modelling* 49, 255-278.
- HERRERA OCHOA, O.J., MAYORGA TORRES, O. y SANTIS, A. (2016). The Design of The Logistics Operation of food Distribution in Different Localities in the South of Bogotá Based on a Multistage Model. En: *Modeling And Simulation In Engineering, Economics And Management*. Teruel: Springer. pp. 112-122.
- HOLZAPFEL, A., KUHN, H. y STERNBECK, M. (2016). Product Allocation to Different types of Distribution Center in Retail Logistics Networks. *European Journal of Operational Research* 264, 948-966.
- KÜÇÜKOĞLU, İ. y ÖZTÜRK, N. (2017). Two-Stage Optimization Method for Material Flow. *International Journal of Production Research* 55(2):410-429.
- LI, Y., CHU, F., MEMBER, S., CHU, C., ZHOU, W., y ZHU, Z. (2016). Integrated Production Inventory Routing Planning With Time Windows for Perishable Food. *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 2651-2656.
- Li, S., Li, X., Zhang, D., y Zhou, L. (2017). Joint optimization of distribution network design and two-echelon inventory control with stochastic demand and co2 emission tax charges, *PLoS ONE*, vol. 12.

MOEN, O. (2014). Co-Distribution of Municipal Goods in Sweden - Procurement From a new Standpoint. *Procedia - Social And Behavioral Sciences* 125, 484-495.

MOEN, O. (2016). The Five-Step Model – Procurement to increase Transport Efficiency for an Urban Distribution Of Goods. *Transportation Research Procedia* 12, 861-873.

MOGALE, D.G., KUMAR, S.K. y TIWARI, M.K. (2017). An MINLP Model to Support the Movement and Storage Decisions of the Indian Food Grain Supply Chain. *Control Engineering Practice* 70, 98-113.

MUSAVI, M. y BOZORGI-AMIRI, A. (2017). A Multi-Objective Sustainable Hub Location-Scheduling Problem for Perishable Food Supply Chain. *Computers & Industrial Engineering* 113, 766-778.

NIETO ISAZA, S., LÓPEZ FRANCO, J. y HERAZO PADILLA, N. (2012). Desarrollo y Codificación de un Modelo Matemático para la Optimización de un Problema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Depósitos. Panama City, *LACCEI Inc.* pp.1-10.

PINAR, K. (2016). An Optimization Algorithm for a Capacitated Vehicle Routing Problem with time windows. *Sadhana - Academy Proceedings In Engineering Sciences* 41(5), 519-529.

SEL, B., BLOEMHOF-RUWAARD, J. y VORST, J.V.D. (2015). Multi-bucket optimization for integrated planning and scheduling in the perishable dairy supply chain. *Computers & Chemical Engineering* 77, 59-73.

SELLITTO, M.A., VIAL, L. A.M. y VIEGAS, C.V., (2018). Critical Success Factors in Short Food Supply Chains: Case Studies With Milk And Dairy Producers From Italy And Brazil. *Journal of Cleaner Production* 170, 1361-1368.

TAHA, H. A. *Investigación de Operaciones* (Novena ed., pp. 200-208). México: Pearson. 2012.

TANG, X., LEHUÉDÉ, F. y PÉTON, O. (2016). Location of Distribution Centers In a Multi-Period Collaborative Distribution Network. *Electronic Notes In Discrete Mathematics* 52, 293-300.

TORRES PÉREZ, C.E., OLIVARES BENITEZ, E. y MARTÍNEZ FLORES, J.L. (2011). Revisión y Programación de Modelos de Optimización como una Plataforma en GAMS-CPLEX para Problemas de Ruteo de Vehículos. Puebla, México, S.N.