

Solución del problema de ruteamiento de vehículos en la distribución de papa en Colombia

Solution of the vehicle routing problem for the potatoe distribution in Colombia

Eliana Mirledy Toro Ocampo, Jhon Jairo Santa Chávez, Mauricio Granada Echeverri

Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

elianam@utp.edu.co

jsanta@utp.edu.co

magra@utp.edu.co

Resumen— Los costos de transporte tienen alta incidencia en los valores finales de productos de todo tipo que deben pagar los consumidores. En este artículo se aborda el problema de diseño de rutas óptimas que permitan atender la demanda de papa en ciudades capitales de Colombia considerando el modelamiento de una red de transporte donde se tienen nodos de oferta, nodos de demanda y posibles caminos de conexión entre ellos. El objetivo es diseñar una ruta que minimice los trayectos en vacío (sin carga) de la flota de vehículos. La solución del problema se realizó mediante diferentes estrategias, tales como: el algoritmo de transporte, la heurística del vecino más cercano, y la técnica Colonia de Hormigas.

Palabras clave— Transporte de papa, colonia de hormigas, ruteamiento de vehículos, Optimización.

Abstract— The transportation costs have high incidence in the final values of the products that the costumers must pay. This paper addresses the problem of designing the optimal routes that allow fulfil the potatoe's demand in the main cities of Colombia considering the modeling of a transport network having offer nodes, demand nodes and alternative paths of connection between them. The goal is to design a route that minimizes the paths of the vehicle fleet when this one is empty (without load). The solution of the problem was developed through different strategies: the transportation algorithm, the heuristic of the closest neighbor and the ant colony technique

Key Word — Transportation potato, ant colony, routing of vehicles, Optimization

I. INTRODUCCIÓN

La papa se constituye en el cuarto alimento de mayor consumo en el mundo y al contrario de los otros tres, maíz, trigo y arroz, tiene una marcada tendencia al aumento en su consumo. En Colombia, hace parte de la canasta familiar de los diferentes estratos sociales y su producción se distribuye en los diferentes departamentos, pero los principales productores en el 2009, fueron: Cundinamarca

(37.74%), Boyacá (26.26%), Nariño (17.30%), Antioquia (6.53%) y Santander (5.64%).

Mientras sea más costoso llevar mercancías de los centros de origen a los destinos que el valor mismo de los productos, será inútil hablar de competitividad de los sectores productivos colombianos. El sector de infraestructura vial es uno de los que más oportunidades de crecimiento tienen en el país, teniendo en cuenta el acelerado dinamismo de la economía colombiana en los últimos años, los aspectos a tener en cuenta deben involucrar factores como: diseñar un plan maestro de transporte que establezca prioridades, con criterios claros de rentabilidad económica y social; tener estudios de factibilidad que permitan conocer las características fundamentales de los proyectos, entre otros.

Colombia sigue teniendo serias fallas en competitividad, las características geográficas y económicas hacen que nuestro caso sea especialmente sensible al tema logístico. Según el informe elaborado por el Foro Económico Mundial, en el 2011 ocupábamos el puesto 68 entre 142 países en términos generales y el puesto 105 en infraestructura de carreteras. Estos datos demuestran que aunque hemos mejorado en algo nuestra competitividad en términos de inserción en la economía global, en infraestructura y logística de transporte no hemos avanzado. El problema de ruteamiento de vehículos es un eslabón importante dentro de este proceso que debe ser resuelto de forma eficiente.

El problema de ruteamiento de vehículos (VRP, acrónimo en inglés de vehicle routing problem) consiste en, dado un conjunto de clientes y depósitos dispersos geográficamente, tratar de determinar la ruta de una flota de vehículos para atender la demanda de un conjunto de clientes. Las características de los clientes, depósitos y vehículos así como diferentes restricciones operativas sobre las rutas, dan lugar a diferentes variantes del problema.

El VRP en el contexto del transporte de papa en Colombia es de gran interés tanto para la comunidad académica como para el

sector empresarial. La importancia académica radica en que este tipo de problema está inmerso dentro de la Optimización Combinatorial de la clase NP-Hard, por lo que se torna un problema de difícil solución de alta complejidad matemática y computacional, donde las técnicas heurísticas, metaheurísticas y de matemática exacta tienen cabida. Así, una propuesta de solución es atractiva para el sector empresarial dada la practicidad, aplicabilidad y relevancia en el área logística de las organizaciones donde aparece el problema de distribuir productos desde ciertos depósitos a sus consumidores finales. La adecuada planificación puede reflejarse en grandes ahorros, se estima que los costos de transporte representan entre el 10% y 20% del costo final de los bienes[1].

En las últimas décadas han aparecido diferentes propuestas para resolver estos problemas. En 1959, Dantzing y Ramser [2] realizaron por primera vez una formulación del problema para una aplicación de distribución de combustible. Cinco años más tarde Clarke and Wright [3] propusieron el primer algoritmo que resultó efectivo para su solución, el denominado algoritmo del ahorro. Ellos se constituyen en los artículos seminales que han dado lugar a una gran cantidad de modelos matemáticos que incorporan cada vez más características de la realidad, y por otro lado, a una búsqueda de algoritmos que permitan resolver los problemas de forma eficiente.

En este artículo se presenta un estudio de la red de distribución de papa en Colombia tomando como base la producción y demanda mensual, se definen cuatro nodos fuentes de producción, 23 nodos de demanda y 1 nodo ficticio que representa el consumo industrial. Para encontrar solución al problema se proponen diversas estrategias para plantear y resolver el problema explorando alternativas como redes de transporte, problema del agente viajero, problema de multidepósito y recorriendo desde técnicas exactas, heurísticas y la metaheurística de Colonia de Hormigas.

Este documento tiene la siguiente estructura:

En la sección 2 se muestra un breve panorama de los problemas de ruteamiento de vehículos, en la sección 3 se hace una revisión en cuanto a las técnicas de solución empleadas para resolver el VRP, en la sección 4 se explica el caso de prueba empleado en el análisis, en la sección 5 se muestra la codificación y técnicas de solución implementadas, en la sección 6 se presentó el análisis de resultados finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

II. PROBLEMA DE RUTEAMIENTO DE VEHÍCULOS

Dado que el VRP tiene como origen el problema del agente viajero (TSP: travelling salesman problem), en la tabla 1 se muestra una clasificación desde este punto de vista.

Problema	Objetivo	Optimizar
Transporte	Diseñar una red de distribución donde se tienen definidos nodos de origen y nodos de destino.	Minimizar los costos de los fletes cumpliendo con las restricciones de oferta y demanda.
TSP	Una ruta para un único vehículo que visita todos los nodos a partir de un único origen.	Distancia recorrida. Costos de fletes.
m-TSP	Diseñar las rutas de m vehículos que tienen que pasar por n nodos a partir de un único origen.	Distancia total de las m rutas.
VRP con un depósito	Diseñar las rutas de m vehículos que visitan cada uno de los n nodos a partir de un único origen.	Función de costo del problema.
VRP con más de un depósito	Se tienen k depósitos, se deben diseñar m rutas que atiendan las demandas de todos los nodos	Función de costo del problema.

Tabla 1. Clasificación de los problemas de VRP.

El problema de ruteamiento de vehículos con Backhauls (VRPB) es una extensión del VRP que involucra nodos de demanda y oferta de mercancía y la posibilidad de devolver mercancía desde la demanda [2].

El VRPB puede ser definido como el problema de determinar un conjunto de rutas que visitan todos los consumidores con las siguientes características: Cada vehículo desarrolla una sola ruta; cada ruta empieza y finaliza en el depósito; clientes Linehaul (clientes a los que se les entrega mercancía): Cliente L ; Clientes Backhaul (clientes a los que se le recoge mercancía): Cliente B .

El problema puede ser formulado a través de un modelo de teoría de grafos, donde cada consumidor corresponde a un vértice. Sea $G=(V,A)$ donde $V=\{0, \dots, n\}$ es el conjunto de vértices y A es el conjunto de arcos, con el conjunto de vértices $V = \{0\} \cup L \cup B$. L corresponde al subconjunto de clientes al que se le entrega mercancías $L=\{1, \dots, n\}$ y B corresponde al conjunto de clientes al que se le recoge $B=\{n+1, \dots, n+m\}$.

Una cantidad no negativa d_j de productos debe ser entregada o recogida, la cual se asocia a cada vértice $j \in V \setminus \{0\}$. El vértice 0 corresponde al depósito (con una demanda ficticia $d_0=0$), donde existen K vehículos idénticos con una capacidad dada C . C_{ij} es un costo dado no negativo asociado con el arco $(i, j) \in A$, con $c_{ii} = +\infty$ para cada $i \in V$ y con $c_{ij} = c_{ji}$ para cada $i, j \in V$ tal

que $i \neq j$. El objetivo es encontrar el menor costo de una colección de K circuitos simples, donde se cumpla que:

- i. Cada circuito visita el vértice 0 ;
- ii. Cada vértice $j \in V \setminus \{0\}$ es visitado exactamente una vez.
- iii. la suma de las demandas de los vértices de recogidas y la suma de las demandas de los vértices de entregas de un circuito no deben exceder, separadamente la capacidad del vehículo C ;
- iv. En cada circuito los vértices L preceden a los vértices B .
El objetivo es minimizar el costo total de ruteamiento, definido como la suma de los costos de los arcos que pertenecen a los circuitos. [2]

III. METODOLOGÍAS DE SOLUCIÓN

Debido al interés y complejidad del VRP han sido muchas las técnicas de solución desarrolladas para resolver problemas de este tipo. Estas técnicas son divididas en tres categorías básicas: técnicas exactas, heurísticas y metaheurísticas.

A. Técnicas exactas.

Estas técnicas son apropiadas si se tiene un modelo matemático que representa la situación a resolver, generalmente se basan en búsquedas exhaustivas por tanto son ineficientes en instancias de problemas de gran tamaño aquí se consideran todos los algoritmos basados en el método simplex tales como el algoritmo de transporte, Branch and Bound (Ramificación y Acotamiento)[4], Danzing Wolfe, Branch and Cut [5] y Branch and Price. Compendios sobre este tipo de métodos de solución aplicados al problema de VRP se pueden consultar en [6] y [7].

B. Heurísticas

Estos métodos realizan una exploración relativamente limitada en el espacio de búsqueda y comúnmente producen soluciones de buena calidad dentro de tiempos de cómputo razonables. Las heurísticas para resolver el VRP se dividen en tres clases: de construcción, de dos fases y de mejora iterativa. Las más conocidas son el método de ahorros de Clarke y Wright. [3], los algoritmos de “agrupa primero, rutea después” [8]. Las heurísticas de construcción y de dos fases parten de un problema y una solución “vacía” para que a partir de ella se pueda construir una solución factible. Las heurísticas de mejora iterativa, por lo general, reciben como entrada la salida de una solución proporcionada por otra heurística para que mediante movimientos de clientes, dentro de una ruta o

entre rutas, se pueda optimizar el costo de dicha solución. En [9], [10] aparece una completa revisión de estas técnicas.

C. Metaheurísticas

Las técnicas metaheurísticas se basan en un conjunto de conceptos algorítmicos que tienen como finalidad guiar procesos heurísticos para evitar la convergencia prematura y explorar regiones del espacio de búsqueda que contienen soluciones de alta calidad. Una metaheurística puede ser aplicable a un conjunto amplio de diferentes problemas, por lo cual es considerado un método heurístico de propósito general el cual puede ser aplicado a diferentes problemas de optimización teniendo que hacerse relativamente pocas modificaciones o adaptaciones al algoritmo para poder ser aplicado a un problema específico.

Tres de las técnicas metaheurísticas que han dado mejores resultados en la solución de los problemas del tipo VRP son los algoritmos de Colonia de Hormigas [11],[12], Búsqueda Tabú[13],[14] y Algoritmos genéticos [15],[16],[17]

IV. DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE PAPA EN COLOMBIA

El caso del presente estudio consiste en el transporte de la producción mensual de papa en Colombia con cuatro fuentes de producción y veintitrés centros de consumo y un nodo ficticio que representa la producción que se dedica a la Producción Industrial, se aplica inicialmente la heurística del vecino más cercano y la metaheurística de Colonia de Hormigas, posteriormente los modelos de Transporte y el Cartero Viajante, y se combinan con el tipo de backhauling o aprovisionamiento al final del recorrido, esto para determinar en qué grado se disminuye el recorrido de los vehículos en vacío (sin carga), costos que son asumidos por los transportadores. Se analizaron los efectos que tendría el utilizar una o múltiples rutas en la determinación del valor de la función objetivo. Los costos se calculan desde el punto de vista del cliente o usuario razón por la cual se utilizan los actuales costos de fletes de transporte de carga terrestre en Colombia, se realizan también los cálculos de las distancias recorridas por los vehículos que afectan los costos de operación de las empresas transportadoras, finalmente se consideran capacidades ilimitadas en vehículos.

Para este estudio el consumo de papa en Colombia fue determinado por el Censo de Población del DANE [18]. Se determinan las fuentes de distribución de restarle a la producción de cada departamento su consumo local, al realizar esta operación se tienen cuatro fuentes de distribución, así: Bogotá (nodo 1), Bucaramanga (nodo 2), Pasto (nodo 15) y Tunja (nodo 22) y los restantes nodos o ciudades se definen como nodos que demandan papa. Debido a que se tiene el 90% de la papa para consumo en estado fresco, se reserva el otro 10% de la producción total de papa mensual para la Industria. (Tabla 2). Los valores positivos corresponden a nodos de oferta y los negativos a demanda.

El transporte terrestre es el medio más utilizado para la distribución de mercancía y el Ministerio del Transporte fijó la tasa de fletes, a través de la resolución No.000888 [19], la cual fue expedida el 13 de marzo de 2006, donde se determinaron “los criterios en las relaciones económicas entre los remitentes de la carga, las empresas de transporte y los propietarios y/o poseedores o tenedores de los vehículos de transporte público terrestre automotor de carga”. Al indexarlas al año 2012 y realizar el promedio de los costos por tonelada por kilometro movilizado se obtuvo \$152.68/Ton.km.

En las soluciones presentadas del modelo se conserva la numeración propuesta en la Tabla 2.

No.	Capital	Producción Neta Mensual (Ton/mes)
1	Armenia	-2.689
2	Barranquilla	-11.547
3	Bogotá	44.914
4	Bucaramanga	4.198
5	Buenaventura	-1.625
6	Cali	-19.663
7	Cartagena	-9.853
8	Cúcuta	-244
9	Florencia	-2.205
10	Ibagué	-2.965
11	Manizales	-3.979
12	Medellín	-13.979
13	Montería	-7.943
14	Neiva	-5.374
15	Pasto	35.012
16	Pereira	-4.536
17	Popayán	-1.599
18	Quibdó	-2.362
19	Riohacha	-4.254
20	Sincelejo	-4.022
21	Santa Marta	-5.953
22	Tunja	59.371
23	Valledupar	-4.824
24	Villavicencio	-4.411
25	Arauca	-1.234
26	Mocoa	-1.621
27	Yopal	-1.643
28	Industria	-24.959

Tabla 2: Producción Neta Mensual en Colombia - Año 2009

V. CODIFICACIÓN Y TÉCNICAS DE SOLUCIÓN IMPLEMENTADAS.

Se consideraron varias estrategias para diseñar la red óptima:

- i. Red de transporte
- ii. Heurística del vecino más cercano con múltiples orígenes (uno por cada fuente de producción de papa)
- iii. Heurística del vecino más cercano con un solo origen elegido aleatoriamente (vecino más cercano con reaprovisionamiento)
- iv. Cartero viajante y heurística del vecino sin considerar la carga para determinar la distancia recorrida mínima.
- v. Metaheurística Colonia de Hormigas con y sin reaprovisionamiento.

La codificación del problema tanto en la heurística como en la metaheurística se realizó con vectores que almacenaban los arcos o distancias que se recorren hasta completar las rutas obtenidas, en el caso de reaprovisionamiento el vector en la primera posición contiene la fuente elegida aleatoriamente para iniciar el proceso de distribución de la producción y en la posición final nuevamente este punto fuente inicial para cerrar la ruta, contendrá solamente una vez cada fuente, en el caso que no hay aprovisionamiento el vector debe contener dos veces el nodo de cada fuente indicando que los vehículos no se reaprovisionan y deben volver a su nodo origen, esto se refleja en la dimensión de este. Tal como se muestra en la figura 1.

Fuente	Nodo	Nodo	....	Fuente	Nodo	....	Fuente
1	i	i+1		2	k		1

Figura 1. Codificación de una alternativa de solución.

La dimensión del vector dependerá si el modelo sea n rutas (n flotas) o una sola ruta.

La matriz que almacena la información se interpreta de la siguiente forma:

Columna 1: Número del nodo.

Columna 2: Cantidad de producción o de consumo.

Columna 3: True indica que es un nodo de producción, False que es un nodo de consumo.

Columna 4: True indica que el nodo ya fue visitado temporalmente, False caso contrario.

Columna 5: True indica que el nodo ya fue agregado al vector solución, False caso contrario. En la figura 2 se muestra un ejemplo de la matriz.

$$fuente_destino = \begin{bmatrix} 1 & -2689 & F & F & F \\ 2 & -11547 & F & F & F \\ 4 & 44914 & T & F & F \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

Figura 2. Matriz fuente_destino

A. Heurística Del Vecino Más Cercano

Es una heurística constructiva sencilla de implementar donde el principal objetivo es elegir la ciudad más cercana desde el nodo actual, el procedimiento es el siguiente:

- 1) Se empieza por un tour parcial trivial que contenga una ciudad cualquiera.
- 2) La próxima ciudad elegida es la más cercana a la última del tour siempre que no esté aún incluida en el tour.
- 3) Repetir el paso 2, hasta que todas las ciudades estén en el tour. [20]

Se utilizó inicialmente esta metodología para la búsqueda del camino más corto entre los nodos y poder hallar el recorrido completo entre las ciudades de fuente y destino, que sirviera de referencia para posteriormente hacer comparación con otros métodos.

B. Modelo De Transporte

El modelo de transporte busca determinar un plan de transporte de una mercancía de varias fuentes a varios destinos. Teniendo en cuenta la información de la tabla 3 y considerando la siguiente información relevante:

x_{ij} = Es la cantidad de mercancía a enviar desde el nodo i hacia el nodo j .

c_{ij} = Corresponde al costo de enviar una unidad de mercancía desde el nodo i , hacia el nodo j .

a_i = Representa la cantidad de mercancía disponible para ser enviada desde el nodo i hacia el nodo j . con j variando de 1 a n .

b_j = Indica la demanda del nodo j

	1	2	.....	n	Demanda
1	$C_{11} \cdot x_{11}$	$C_{12} \cdot x_{12}$			b_1
2					b_2
.				.	
.				.	
.				.	
n				$C_{nn} \cdot x_{nn}$	b_n
Oferta	a_1	a_2		a_n	

Tabla 3. Estructura de la información para implementar el algoritmo de transporte.

El problema lineal a resolver se plantea mediante el siguiente modelo matemático:

$$Min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

s.a

Restricciones de oferta

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = a_i \quad \forall i, \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

Restricciones de demanda

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = b_j \quad \forall j, \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{3}$$

$$x_{ij} \geq 0 \tag{4}$$

La ecuación (1) representa la función de minimización de costos con base en las cantidades enviadas. La ecuación (2) representa las restricciones de oferta que indican que se debe despachar como máximo la cantidad ofertada en cada nodo. La ecuación (3) indica que se debe satisfacer la demanda de cada nodo destino y finalmente la restricción (4) corresponde a la restricción de positividad de las variables de decisión.

C. Metaheurística Colonia de Hormigas

El sistema por colonia de hormigas es una metaheurística basada en el comportamiento natural de las hormigas cuando estas se encuentran en la búsqueda de su alimento. La tendencia lógica de cada individuo es reducir el esfuerzo y el tiempo necesario para recolectar el alimento, lo cual logra al disminuir la distancia entre ambos puntos. Una hormiga es un individuo relativamente simple, y llevar a cabo esta labor resulta altamente complejo. El éxito radica en la interacción de muchos individuos con el ambiente y la comunicación indirecta entre ellos por medio de sustancias químicas conocidas como feromonas.

Este comportamiento es usado para encontrar soluciones de buena calidad a problemas de optimización caracterizados por un espacio de solución bastante amplio y complejo. Para esto se debe hacer una equivalencia entre la colonia de hormigas naturales y un sistema artificial que se mueve dentro de un ambiente computacional. En la actualidad, esta técnica no ha sido puesta a prueba para resolver el problema de asignación de horarios, pero ha mostrado un alto desempeño en problemas de alta complejidad como son el problema del Cartero Viajero, Asignación Generalizada y Ubicación de condensadores. En el caso en estudio, se tienen dos hechos:

El primero, la Hormiga Artificial inicia su recorrido aleatoriamente en cualquiera de los nodos o ciudades fuentes y debe moverse a una ciudad destino o consumo, esta decisión se toma en función de la preferencia heurística, marcada por un componente dependiente de la distancia y el otro componente natural llamado feromona, según la regla probabilística de transición que define la probabilidad con la que la hormiga k , situada en la ciudad r , decide moverse hacia la ciudad s , tal como se muestra en la ecuación (5).

$$p_k(r, s) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{[\tau_{rs}]^\alpha [\eta_{rs}]^\beta}{\sum_{u \in J_k(r)} [\tau_{ru}]^\alpha [\eta_{ru}]^\beta}, \text{ si } s \in J_k(r) \\ 0, \text{ en otro caso} \end{array} \right\} \quad (5)$$

Donde:

τ_{rs} es la feromona del arco a_{rs} , η_{rs} es la información heurística del arco a_{rs} , α y β son pesos que establecen la importancia relativa entre la información heurística y los niveles de feromona, $J(r)$ es el conjunto de nodos alcanzables desde r no visitados aún por la hormiga k .

1. Identificación de valores de los parámetros α y β

Si $\alpha=0$ las ciudades más cercanas son las que tienen más probabilidad de ser escogidas (algoritmo clásico del gradiente con múltiples puntos de partida).

Si $\beta=0$ solo se tienen en cuenta los niveles de feromona, generalmente da lugar a resultados bastante pobres, especialmente si $\alpha > 1$, situación que da lugar a la denominada situación de estancamiento (stagnation), en la que todas las hormigas siguen el mismo camino, proporcionando en general soluciones subóptimas

El segundo hecho, es la Actualización de la Matriz de Feromonas, que marcara la diversidad en la toma de decisiones por parte de la Hormiga para los siguientes recorridos. Se tiene inicialmente el hecho de que una hormiga transita por un camino deposita ciertos niveles de feromona, la cual se va evaporando con el tiempo.

Se usa una retroalimentación positiva para reforzar en el futuro los componentes de las buenas soluciones mediante un aporte adicional de feromona. Cuanto mejor sea la solución, más feromona se aporta.

Se usa la evaporación de feromona para evitar un incremento ilimitado de los rastros de feromona y para permitir olvidar las malas decisiones tomadas. La evaporación es la misma para todos los rastros, eliminándose un porcentaje de su valor actual: $0 \leq \rho \leq 1$. Es un mecanismo de evaporación más activo que el natural, lo que evita la perduración de los rastros de feromona y permite al algoritmo olvidar malas decisiones tomadas previamente.

La actualización de la matriz de feromonas se realiza con la ecuación (6).

$$\tau_{rs}(t) = (1 - \rho) \cdot \tau_{rs}(t-1) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{rs}^k \quad (6)$$

Donde:

$\Delta \tau_{rs}^k$ es la cantidad de feromona que la hormiga k deposita en los arcos que visita, calculado mediante la ecuación (7).

$$\Delta \tau_{rs}^k = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{C(s_k)}, \text{ si la hormiga } k \text{ ha visitado el arco } a_{rs} \\ 0, \text{ en otro caso} \end{array} \right\} \quad (7)$$

$C(S_k)$: Es el coste de la solución generada por la hormiga k , es decir, la longitud del circuito S_k , m es el número de hormigas, y ρ es la rata de evaporación.

NOTA: Los arcos visitados por hormigas en la iteración actual (arcos prometedores) reciben un aporte extra de feromona y los no visitados por ninguna hormiga (poco prometedores) la pierden.

2. El algoritmo de Sistema de Hormigas (Ant System) (AS)

Se trata de una metaheurística en la que una colonia de hormigas artificiales coopera para encontrar buenas soluciones en problemas de optimización discretos estáticos y dinámicos.

Se propusieron tres versiones distintas (Dorigo et al., 1991; Coloni et al. 1992; Dorigo, 1992): ant-density, ant-quantity y ant-cycle.

Las dos primeras la actualización de las feromonas se realiza después de cada movimiento entre una ciudad y otra adyacente, mientras que en la tercera las feromonas solo se actualizan una vez que las hormigas han terminado de construir sus caminos. Las dos primeras versiones proporcionaban peores resultados. La actualización de la Matriz de feromona se realiza, así: Asignar un valor ligeramente superior a la feromona depositada por las hormigas en una iteración. Una posible estimación del mismo se expresa mediante la ecuación (8)

$$\tau_{ij} = \tau_o = \frac{m}{C_{mn}} \quad (8)$$

Donde m es el número de hormigas y C_{mn} es la longitud del camino obtenido mediante la heurística del vecino más cercano.

En la figura 3. Se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de Colonia de Hormigas. Donde se relaciona la secuencia de pasos a seguir. Teniendo en cuenta que se lanza el proceso

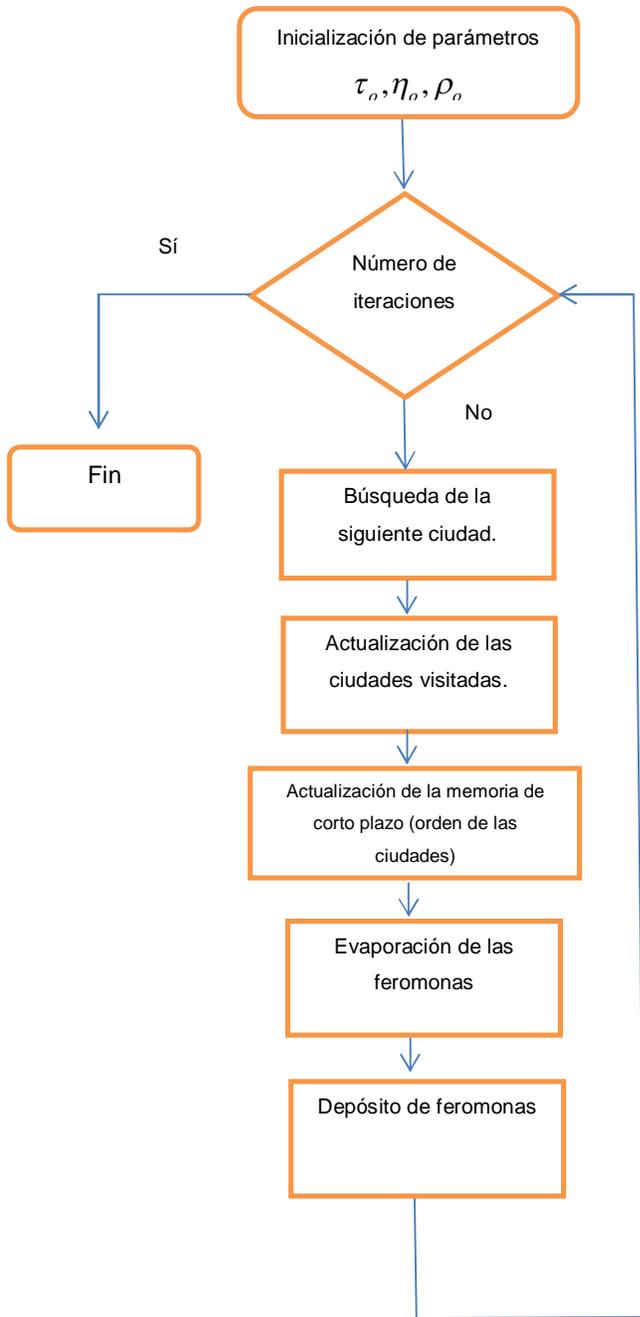


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo Colonia de Hormigas.

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se ubicaron las capitales como referencia para la toma de distancias. En la figura 4 se muestra la ubicación de los nodos.



Figura 4. Definición de nodos de caso de prueba.

Se considera capacidad de transporte ilimitado, con el fin de presentar una aproximación a las consecuencias económicas que trae el movilizar vehículos sin carga, que en el medio de transporte es llamado compensación.

Se aplica inicialmente el algoritmo de transporte teniendo en cuenta la información de la tabla 1 para los valores de oferta y demanda y los valores de la referencia [22], considerando el costo por tonelada transportada en \$152.68/Ton. Km. La información se organizó como se plantea en la tabla 4.

	Armenia	B/quilla	.....	Industria	Oferta
Bogotá	C ₁₁				44.914
Bucaramanga					4.198
Pasto					35.012
Tunja					59.371
Demanda	2689	11547		24.959	

Tabla 4. Disposición de la información para el modelo de transporte.

Se plantea el modelo matemático considerando las ecuaciones (1),(2),(3) y (4). Los resultados obtenidos fueron, un costo mínimo de \$ 33.698.425.572 y una distancia de 14.183 km, es importante resaltar que los vehículos deben retornar a las fuentes vacíos, es decir recorrerán vacíos estos mismos 14.183 km, encareciendo el transporte de la producción.

En la tabla 5 se hace una comparación de los resultados obtenido. Aplicando la Heurística del Camino más Corto, generando una ruta de distribución por cada fuente de origen, el resultado obtenido fue una distancia total recorrida fue de 9.864 km, es importante resaltar que los vehículos deben retornar a las fuentes vacíos para culminar su recorrido, es decir recorrieron vacíos 3.231 km de los 9.864 km totales, encareciendo el transporte de la producción.

Si en la Heurística anterior, se varía el hecho de que no sean cuatro rutas independientes, sino, que la flota de vehículos realice una sola ruta, iniciando en los cuatro posibles fuentes de

producción y buscando una nueva fuente cuando el transporte no alcance a abastecer el siguiente centro de consumo, el mejor resultado obtenido fue saliendo de Bucaramanga, una distancia total recorrida de 8.806 km, es importante resaltar que los vehículos solo deben desplazarse vacíos en la búsqueda de la siguiente fuente para continuar su recorrido, es decir recorrieron vacíos

2.356 km de los 8.806 km totales, encareciendo el transporte de la producción.

Aplicando la Metaheurística de Colonia de Hormigas, comparando el resultado obtenido en la secuencia de recorrido de fuentes 4 - 3 - 22 y 15 (Bucaramanga,

Método/Modelo	Costo mensual	Distancia	Acarreo Vacío	Porcentaje Distancia Vacío	RUTA	Parámetros ACO
Modelo Transporte	33.698.425.572	28.366	14.183	50,00%	Fuente 3: Destinos: 24, 7, 20, 13, 12, 12, 11, 1, 10 y 24. Fuente 4: Destino 7; Fuente 15: Destinos 5, 6, 7, 9 y 26; Fuente 22: Destinos: 14, 27, 25 8, 19, 23, 21, 2, 18 y 16	
Heurística Vecino Más Cercano Sin Reaprovisionamiento		9.864	3.231	32,76%	Ruta 1: 3, 24, 27, 25, 8, 23, 21, 2, 7, 20 y 3. Ruta 2: 4, 10 y 4. Ruta 3: 15, 26, 9, 14, 17. 6. 5, 1, y 15. Ruta 4: 22, 11, 16, 12, 18, 13, 19 y 22.	
Heurística Vecino Más Cercano Con Reaprovisionamiento		10.752	3.224	29,99%	Inicio en Bogotá: 3, 24, 27, 25, 8, 23, 21, 2, 7, 20, 4, 10, 22, 1, 16, 11, 12, 18, 5, 6, 17, 14, 9, 15, 26, 13, 19 y 3.	
Heurística Vecino Más Cercano Con Reaprovisionamiento		8.806	2.356	26,75%	Inicio en Bucaramanga: 4, 8, 25, 27, 22, 24, 10, 1, 16, 11, 12, 18, 5, 6, 17, 15, 26, 9, 14, 13, 20, 7, 3, 23, 21, 2, 19 y 4.	
Heurística Vecino Más Cercano Con Reaprovisionamiento		11.939	4.096	34,31%	Inicio en Pasto: 15, 26, 9, 14, 10, 1, 16, 11, 5, 17, 24, 27, 25, 8, 4, 20, 3, 6, 12, 18, 13, 22, 23, 21, 2, 7, 19 y 15.	
Heurística Vecino Más Cercano Con Reaprovisionamiento		10.444	2.229	21,34%	Inicio en Tunja: 22, 27, 24, 10, 1, 16, 11, 12, 18, 5, 6, 25, 8, 4, 9, 26, 15, 17, 14, 13, 20, 7, 21, 3, 23, 19, 2 y 22	
Colonia de Hormigas - Regreso a cada origen	10.759.200.000	9.008	2.889	32,07%	4-21-4-3-24-27-25 8-23-19-2-7-20-13-3-22-10-1-16-11-12-18-5-6-17-22-15-26-9-14-15	M=100, $\alpha=1$, $\beta=1$ y $\rho=0.5$
Colonia de Hormigas - Backhauling y regreso a la Ciudad Inicial	10.759.200.000	8.407	742	8,83%	4-21-3-24-27-25-8-23-19-2-7-20-13-22-10-1-16-11-12-18-5-6-17-15-26-9-14-4	
Heurística del Vecino Más Cercano - Sin Carga		6.907			3-24-27-22-4-8-25-14-9-26-15-17-6-5-1-16-11-10-12-18-13-20-7-2-21-19-23-3	
Colonia de Hormigas - Cartero Viajante Sin Carga		6.243			15-26-9-14-10-1-16-11-3-24-27-22-4-8-25-23-19-21-2-7-20-13-12-18-5-6-17-15	
ACO-Backhauling (Reaprovisionamiento)	12.010.800.000	7.702	1.557	20,22%	3-16-1-10-14-9-26-17-5-6-24-22-27-25-8-23-19-21-2-7-20-13-18-12-15-11-3	M=100.000, $\alpha=1$, $\beta=1.2$ y $\rho=0.5$
ACO-Backhauling (Reaprovisionamiento)	12.164.100.000	7.833	1.580	20,17%	22-25-8-23-19-21-2-7-20-13-11-16-1-3-24-27-9-26-17-6-5-18-12-15-14-10-22	M=100.000, $\alpha=1$, $\beta=1.2$ y $\rho=0.5$
ACO-Backhauling (Reaprovisionamiento)	10.473.000.000	9.301	3.999	43,00%	4-7-3-24-27-25-8-23-19-21-2-20-13-15-26-9-14-17-6-22-10-1-16-11-12-18-5-4	M=100.000, $\alpha=0.5$, $\beta=1.2$ y $\rho=0.5$
ACO-Backhauling (Reaprovisionamiento)	10.685.100.000	8.688	3.533	40,67%	4-21-22-10-1-16-11-12-18-5-6-17-14-3-24-27-25-8-23-19-2-7-20-13-15-26-9-4	M=100.000, $\alpha=0.5$, $\beta=1.2$ y $\rho=0.5$

Tabla 5. Resultados de los procedimientos implementados.

Bogotá, Pasto y Tunja). Primero, con retorno en cada fuente se obtuvo una distancia recorrida de 9.008 km y un costo de \$10.759.200'400.000, es importante resaltar que los vehículos se debieron desplazarse vacíos nuevamente a la fuente de origen, es decir recorrieron vacíos 2.889 km de los 9.008 km totales, encareciendo el transporte de la producción con un solo retorno al final de la ruta, se obtuvo una distancia recorrida de 8.407 km y un costo de \$10.759.200'400.000, es importante resaltar que los vehículos transitan vacíos, en el último tramo de regreso a la fuente inicial, es decir recorrieron vacíos 742 km de los 8.407 km totales.

Sin considerar la carga a distribuir, se aplicó la Heurística del Camino de Costo Mínimo, obteniéndose una distancia total de 6.907 km, y con el Método del Cartero Viajante la distancia fue 6.243 km, ambas distancias son mucho menores que las obtenidas, cuando se consideran las cargas de papa.

Finalmente, se aplicó la Metaheurística de Colonia de Hormigas para buscar mejores resultados a los anteriormente hallados, obteniéndose una distancia mínima 7.702 km, lo cual favorece al transportador, y un costo mínimo de 10.473, con altos porcentajes de transporte en vacío del 40,67%, en detrimento del transportador y favoreciendo al usuario o cliente productor.

El valor mínimo de recorrido con la Heurística de Colonia de Hormigas con el modelo del Cartero Viajante de 6.243 km, está muy alejado de la mejor respuesta obtenida de 7.702 km con Colonia de Hormigas, situación que se desprende del hecho que la producción de papa reside en el sur y Centro del país, mientras que en la Costa Atlántica y en los Santanderes hay un alto consumo y la producción es mínima.

VII. CONCLUSIONES

Se resuelve el problema de transporte de papa en Colombia desde diferentes enfoques: inicialmente como un problema de transporte que involucra nodos de origen y nodos destino, se planteó luego como un problema de agente viajero que fue resuelto usando la heurística del vecino más cercano con reaprovisionamiento considerando diferentes orígenes.

Los problemas de distribución de mercancía tienen un alto impacto en la cadena logística, debido a que los costos de transporte afectan directamente los precios finales que pagan los consumidores, así que cualquier mejora en este aspecto es significativo y puede ser elemento diferenciador frente a la competencia.

Este problema puede ser resuelto usando otras técnicas heurísticas o metaheurísticas e incluso planteando híbridos

entre ambas a fin de evaluar el desempeño y medir la calidad de las respuestas.

Las mejores respuestas obtenidas aplicando Colonia de Hormigas y backhauling fueron: En distancia total recorrida 7.702 km y \$10.473 mil millones de pesos/mes en procesos o ejecuciones diferentes.

Es un hecho evidente que los intereses económicos de los productores y transportadores no son los mismos, así que el panorama de la optimización multiobjetivo se plantea como estrategia promisoría en la búsqueda de resultados para el problema.

Los modelos tradicionales del Cartero Viajante, Modelo de Transporte, Heurística o Metaheurística de Colonia de Hormigas, sin considerar Backhauling encarecen los costos de transporte de la mercancía o producción.

Cuando se distribuye totalmente la carga de una de las fuentes se buscaba o recargaba el transporte con la siguiente fuente, se podría mejorar las respuestas si se consideraran otros criterios, por ejemplo que se recargue cuando haya capacidad de transporte disponible y se esté ubicado cerca de una fuente de producción.

REFERENCIAS

- [1] Toth, p, Vigo D.: An overview of Vehicle Routing problems. Monographs on Discrete Mathematics and Applications. In: The Vehicle Routing Problem. SIAM(2000) 1-26
- [2] P.Toth, D.Vigo. The Vehicle Routing problem. Università degli Studi di Bologna, Bologna, Italy, 2002, p.195-3] G. Clarke, J.W: Wright. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations Research 12 (1964), 568-581.
- [3] N.Christofides, A. Mingozzi, P. Toth. Exact Algorithms for the vehicle routing problem based on spanning tree and shortest path relaxations. Mathematical Programming. 1981 255-282.
- [4] D. Naddef., G. Rinaldi. Vehicle routing. Filadelfia:SIAM.2001.
- [5] G. Laporte. The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms. European Journal of Operational Research 59. 1992. 345-358.
- [6] G. Laporte. Y. Norbert. Exact algorithms for the vehicle routing problema. Annals of Discrete Mathematics 31. 1987. 147-184.

- [7] G. Laporte; F. Semet. The Vehicle routing problem. Monographs on Discrete Mathematics and Applications. SIAM, Philadelphia, 2002, ch. Classical heuristics for the Capacitated VRP, pp 109-128
- [8] J. Cordeau. G. Laporte, Savelsbergh M.; D. Vigo. Transportation, Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol 14. Elsevier, Amsterdam, 2007. Vehicle Routing, pp 367-428.
- [9] G. Laporte. Fifty years of vehicle routing. Transportation Science 43,4(2009), 408-416.
- [10] B. Bullnheimer, R. Hard. Applying the ant system to the vehicle routing problem. Proceedings of the 2nd International Conference on Metaheuristics. 1997. pp 297-309.
- [11] B. Bullnheimer, R. Hard. An improved ant system for the vehicle routing problem. Annals of Operations Research 89. 1999. 319-328.
- [12] I. Osman. Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for combinatorial optimization problems. London: Ph.D. Thesis, The Management school, Imperial College. 1991.
- [13] Y. Rochat; R. Taillard. Probabilistic diversification and intensification in local search of vehicle routing. Journal of Heuristics 1 (1995). 147-167.
- [14] L. Ochi. L.; D. Vianna. L. Drummond. A. Victor. A parallel evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with heterogeneous fleet. Parallel and Distributed Processing 1388 (1998), 216-224
- [15] C. Prins. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. Computers and Operations Research 31, 12 (2004), 1985-2002.
- [16] F. Zhao; J. Sun; S. Li; W. Li. A hybrid genetic algorithm for the traveling salesman problem with pickup and delivery. International Journal of Automation and computing 6, 1(2009)97-102.
- [17] http://www.finagro.com.co/html/i_portals/index.php?p_origin=internal&p_name=content&p_id=MI-197&p_options=
- [18] <http://www.mintransporte.gov.co/documentos.php?id=14&colorder=fecha&order=ASC&offset=5>
- [19] B. Golden, L. Bodin, T. Doyle y W. Stewart Jr. Approximate traveling salesman algorithms. Operations Research, vol 28, No 3, part 2 (1980), 674-711.
- [20] <http://www.jstor.org/stable/170036>.
- [21] M. Dorigo, Optimization, Learning and Natural Algorithms, Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Italia, 1992.
- [22] <http://www.mahe.com.co/documents/dist.pdf>