Mejoramiento en el sistema de transporte de café aplicando heurísticas de ruteo vehicular en el departamento del cauca

Molina Fernández David Enrique, Lopez Daza Victor Hugo

Introducción

Indiscutiblemente, uno de los temas más relevantes en la gestión de las cadenas de abastecimiento es el transporte, no solamente por la capacidad de integrar el sistema físico facilitando el transporte de los materiales entre los eslabones de la cadena, sino también por la importancia en la economía y el desarrollo de las industrias. Existen tres entidades que conforman un sistema de transporte; el expedidor *(shippper)* quien posee la carga y la prepara para su transporte, el portador *(carrier)* quien se encarga del transporte de la carga, y el destinatario (*consignee)* quien recibe la carga. En este caso las tres entidades son parte de la misma empresa.

Con el propósito de diseñar una ruta más eficiente en el transporte de café en cereza, optimizar la capacidad de transporte de los vehículos de la empresa y reducir los costos de transportar el café entre los proveedores y la planta de producción en esta cadena de suministro se aplicará un método heurístico que involucra principios simplificados para encontrar soluciones aproximadas en un tiempo razonable, denominado como el algoritmo de ahorros o el algoritmo de clarke and wright es uno de los métodos heurísticos aplicados utilizados para resolver problemas en los modelos de ruteo vehicular también son conocidos por sus siglas en inglés como VRP (vehicle routing problem) con el objetivo de diseñar las rutas más eficientes para la flota de vehículos disponibles de la empresa que deben recoger el café cosechado en seis puntos diferentes en el departamento del Cauca y llevarlos a la planta de producción ubicada en el norte de Popayán.

Optimizar las rutas del sistema de transporte de café en cereza en el departamento del Cauca y establecer protocolos para el cumplimiento de los objetivos en un modelo de transporte eficiente que se adapte a las condiciones de las diferentes épocas del año es un reto que puede ser alcanzado si se implementan métodos como el presentado en esta investigación.

El Departamento Nacional de Planeación (DNP) realizó la Encuesta Nacional Logística (ENL) 2022, un referente del desempeño logístico del país, logrando realizar una aproximación a las complejidades, necesidades y retos de las principales operaciones logísticas en Colombia.De manera general, la encuesta mide aspectos de la logística, relacionados con: el costo logístico empresarial, el nivel de tercerización de servicios logísticos, la prospectiva en servicios logísticos, y el desempeño logístico regional.

La ENL 2022 permitió determinar que el costo logístico representa, en promedio, 17,9 % de las ventas, es decir, de cada $100 que factura una empresa $17,9 los destina a la operación logística. Los componentes que conforman el costo logístico

en las empresas corresponden al transporte con un 35,9 %; inventarios con un 25,5 %; almacenamiento con un 25,1 %; administración con un 10,2 %; y otros costos con un 3,3 %. A lo largo de los años, los resultados de esta encuesta han sido fundamentales en la construcción de la Política Nacional Logística, permitiendo identificar oportunidades para disminuir los costos y tiempos logísticos del país.

Según the Supply-Chain Council (SCC), las cadenas de suministros presentan cinco procesos principales de gestión para satisfacer la demanda de un cliente, los cuales son: planificación (plan), aprovisionamiento (source), manufactura (make), distribución (deliver) y devolución (return), (Calderon & Lario, 2005).

Tanto los investigadores como los expertos se centran en las soluciones tecnológicas y técnicas, la rentabilidad y la aplicación fragmentada en un punto de entrada de la cadena (por ejemplo, la logística).

Dentro de la cadena de suministros, el proceso de aprovisionamiento se encarga de realizar la identificación y análisis de las fuentes de suministro de bienes y servicios esenciales para el proceso, y así, evaluar y seleccionar a la red de proveedores, ya sea locales, nacionales o internacionales. De igual modo, se encarga de la programación de los procesos de acopio, gestión de inventario, bienes y la administración de datos, (Castellanos, 2012).

En este orden de ideas, se puede hablar de la logística de aprovisionamiento, que, agrupada con la logística de planta, conforman la logística de producción, y ésta a su vez se agrupa con la logística de distribución, para conformar todo el sistema logístico que, mediante la articulación de sus componentes, genera un flujo que permite dar respuestas veloces a una demanda cambiante y cada vez más exigente.

En este sentido, la logística de aprovisionamiento comprende la planificación, ejecución y control del flujo eficiente y rentable de las materias primas necesarias para el funcionamiento de la organización, (Govindan, Soleimani, & Kannan, Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future, 2014).

Palabras clave: Transporte, logística, cadena de suministros, optimización, costo logístico.

Objetivo general

Diseñar un modelo lógico-matemático basado en un algoritmo de matrices de ahorro para optimizar la logística de transporte en la recolección de café en cereza en el departamento del Cauca, considerando variables como distancias, prioridades en la recolección, capacidad de los vehículos, cantidad de producto en los puntos de acopio y las condiciones de las vías, con el propósito de reducir costos y mejorar la eficiencia del traslado de la materia prima hacia la planta de producción en Popayán.

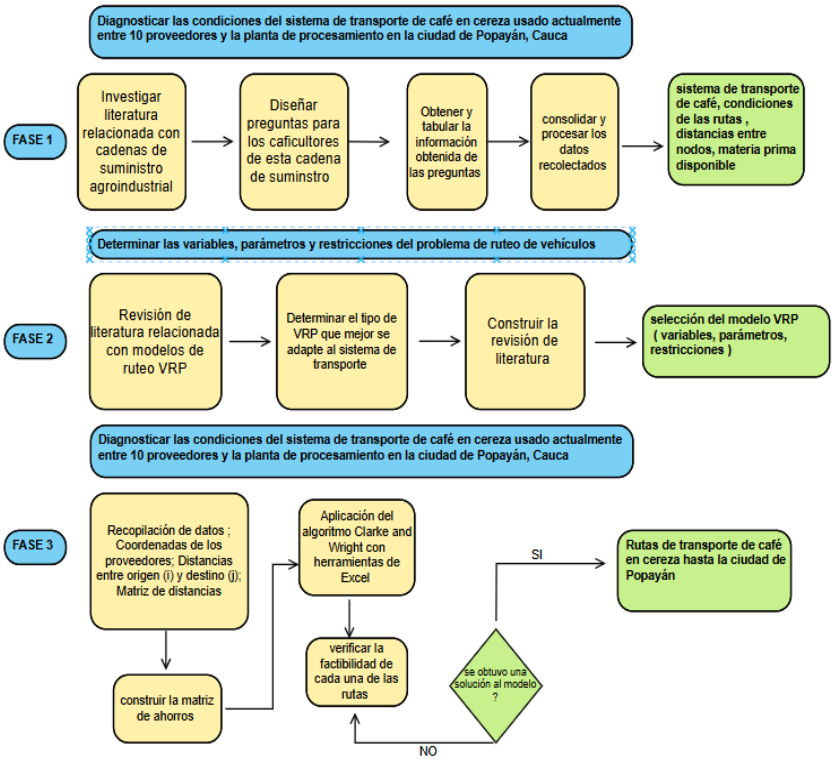
Mejoramiento en el sistema de transporte de café aplicando heurísticas de ruteo vehicular en el departamento del cauca

Objetivos Específicos

1. Identificar y modelar las rutas de transporte más eficientes desde los puntos de acopio rurales hasta la planta de producción en Popayán, utilizando un algoritmo de matrices de ahorro.
2. Analizar las variables que impactan la logística del transporte, como las distancias, la disponibilidad de materia prima, la capacidad de los vehículos y las condiciones de las vías, para planificar una recolección eficiente.
3. Reducir los costos asociados al transporte de café en cereza mediante la implementación de estrategias logísticas que agreguen valor al proceso de recolección en las zonas rurales del departamento del Cauca.

Metodología

Figura 1: Metodología



Fuente: Elaboración propia (Visual paradigm online) El desarrollo de esta metodología ha sido adaptado de la metodología desarrollada en el artículo, “The Organization of Fruit Collection Transport in Conditions of Extreme Rurality: A Rural CVRP Case” (2019).

El objetivo principal es aplicar un modelo de ruteo vehicular para la logística de transporte de materia prima desde los proveedores hasta la planta de procesamiento en la ciudad de Popayán. Los objetivos específicos son; Caracterizar

las distancias del transporte de materias primas hasta la planta de producción (DC) ; Determinar la mejor ruta de transporte de materia prima y evaluar el impacto en la reducción de la distancia recorrida. Para ello se determina adaptar metodologías aplicadas en la aplicación de algoritmos heurísticos

Las técnicas para su solución son: Optimización, considerando una jerarquía de problemas y su correspondiente colección de técnicas de solución; Complejidad computacional, esta se enfoca en el costo de la resolución del problema.; Heurística o procedimiento simple, basado en el sentido común que ofrece una buena solución a problemas difíciles de un modo fácil y rápido; Metaheurística o procedimiento maestro de alto nivel, que guía y modifica otras heurísticas para explorar soluciones más allá de la simple optimalidad local.

Este enfoque garantiza una optimización práctica, considerando las particularidades del contexto rural colombiano, como la dispersión geográfica, la infraestructura limitada y las demandas específicas del sector. La aplicación de la metodología seleccionada se comprende en el universo de las heurísticas de ruteo y como objetivo principal desarrollar un modelo capaz de disminuir los costos asociados al transporte implementando matrices de ahorros también conocidas como el algoritmo de Clarke y Wright, con el fin de optimizar las rutas de recolección de café.

- Crear una matriz de distancias: Elaborar una matriz que contenga las distancias entre el depósito y cada punto de recolección, así como las distancias entre cada par de puntos de recolección.
- Construir una matriz de ahorros: Calcular los ahorros obtenidos al combinar rutas y almacenarlos en una matriz.
- Implementar el algoritmo de Clarke y Wright en VBA: Desarrollar un programa en Excel que permite iterar sobre la matriz de ahorros para construir las rutas óptimas.
- Visualizar las rutas: Crear una representación gráfica de las rutas optimizadas utilizando las herramientas de gráficos de Excel.

En las heurísticas si existen dos rutas diferentes, éstas pueden ser combinadas para formar una nueva ruta con el propósito de generar un ahorro (en distancia) que está dado por: $S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij}$. En este algoritmo se parte de una solución inicial y se realizan las uniones que den mayores ahorros , sin infringir las restricciones del problema.

Mejoramiento en el sistema de transporte de café aplicando heurísticas de ruteo vehicular en el departamento del cauca

Revisión de la literatura

El problema de enrutamiento de vehículos capacitados (CVRP) ha sido ampliamente estudiado debido a su relevancia en la optimización logística. En un caso particular analizado en 2008, se buscó determinar el mínimo número de vehículos necesarios para satisfacer la demanda de 20 clientes con un total de 523 unidades. El problema fue modelado bajo el enfoque SALBP-1, utilizando el algoritmo COMSOAL, originalmente diseñado para balancear líneas de ensamble, con el fin de calcular el número óptimo de vehículos. Además, la heurística R fue empleada para definir rutas eficientes, lo que permitió reducir costos al generar seis rutas optimizadas. Los resultados demostraron que la combinación del método COMSOAL y la heurística R es efectiva y factible para abordar el CVRP, destacando la adaptabilidad de métodos tradicionales de balanceo de líneas en problemas de enrutamiento.

En 2016, se desarrolló un modelo de optimización para la planificación de la infraestructura y operaciones en la empresa productora y comercializadora de café Café Botero, con el objetivo de minimizar los costos de su cadena de suministro. El modelo, basado en programación lineal, permitió optimizar la ubicación de centros de producción, almacenamiento y canales de transporte, abordando decisiones estratégicas clave. Este enfoque destacó por su capacidad para manejar la complejidad de la cadena logística, utilizando pronósticos de demanda elaborados en R para garantizar precisión y eficiencia. Los resultados obtenidos mostraron ahorros significativos de entre el 5% y el 25% en costos logísticos, validando más de 5.6×10205.6 \times 10^{20}5.6×1020 configuraciones posibles. Además, el modelo incorporó escenarios de demanda para mitigar riesgos, fomentando la sostenibilidad y rentabilidad en la industria cafetera. Los resultados sugieren que la incorporación de modelos estocásticos podría mejorar aún más la gestión de la incertidumbre en el contexto logístico.

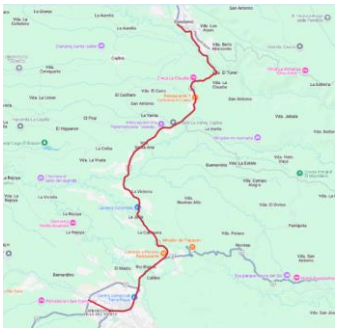
En 2018, se desarrolló una propuesta para la localización de plataformas logísticas rurales y el diseño de un sistema de ruteo orientado a consolidar la carga de pequeños y medianos productores frutícolas en el departamento de Boyacá. La metodología utilizada incluyó el método Greedy para generar una solución inicial y la búsqueda Tabú para mejorar iterativamente la solución, evitando ciclos mediante una lista tabú de 10 movimientos y 100 iteraciones. Ambos métodos fueron implementados en Java, utilizando código disponible en GitHub de Nikolaos Michail. Los resultados permitieron la creación de dos centros de acopio en los municipios de Jenesano y Chiquinquirá, los cuales consolidan la producción de 32 y 17 municipios, respectivamente. Este sistema de ruteo optimizado incrementa los márgenes de ganancia de los pequeños y medianos productores al mejorar la eficiencia logística y reducir costos de distribución.

Mejoramiento en el sistema de transporte de café aplicando heurísticas de ruteo vehicular en el departamento del cauca

Configuraciones experimentales/numéricas

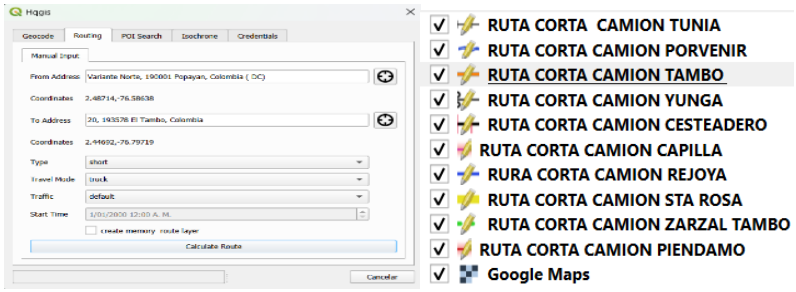
Inicialmente se realiza un mapeo de los puntos geográficos donde están ubicados los proveedores de café de la empresa, para este proceso se emplean API para el software QGIS con la extensión HQgis donde es posible determinar mediante una configuración previa si la ruta se realizará en camión , en auto o a pie y al mismo tiempo determinar si se tienen o no se tienen en cuenta las variables relacionadas al tráfico , y que por medio de esta aplicación se permite conocer las coordenadas y la posición de cada uno de los puntos investigados. (ver tabla 1.1) y (gráfico 1.1)

Gráfico 1: Ruta desde centro de distribución (DC) hasta el proveedor (PIENDAMÓ)



Fuente: Elaboración propia (Qgis)

Figura 2: Tablas de configuración de parámetros para calcular la ruta y Tabla de relacion de proveedores



RUTA CORTA CAMION TAMBO — Objetos Totales: 1, Filtrados: 1, Seleccionados: 0

123 id = 123

	id	distance	time	mode	traffic	timestamp	type
1	0	41,151	4887	truck	default	NULL	short

DC :	Popayán	X	Y						
	VARIANTE NORTE	2,48714	-76,58638						
		COORDENADAS		Km	TIEMPO DE RUTA CORTA				CAMION
ORIG.	PROV.	DESTINO	X	Y	DISTANCIA	SEGUNDOS		MINUTOS	HORAS	Vel. Prom.
DC	1	PIENDAMO	2,62563	-76,51225	30,18	2754	60	46	0,77	39 Km/ H
					Km	TIEMPO DE RUTA CORTA				CAMION
ORIG.	PROV.	DESTINO	X	Y	DISTANCIA	SEGUNDOS		MINUTOS	HORAS	Vel. Prom.
DC	2	ZARZAL	2,45631	-76,73552	23,86	2251	60	38	0,63	38 Km/ H
					Km	TIEMPO DE RUTA CORTA				
ORIG.	PROV.	DESTINO	X	Y	DISTANCIA	SEGUNDOS		MINUTOS	HORAS	Vel. Prom.
DC	3	TUNIA	2,677	-76,53414	31,80	2638	60	44	0,73	43 Km/ H
					Km	TIEMPO DE RUTA CORTA				
ORIG.	PROV.	DESTINO	X	Y	DISTANCIA	SEGUNDOS		MINUTOS	HORAS	Vel. Prom.
DC	4	SANTA ROSA	2,62169	-76,57077	7,96	623	60	10	0,17	46 Km/ H
					Km	TIEMPO DE RUTA CORTA				
ORIG.	PROV.	DESTINO	X	Y	DISTANCIA	SEGUNDOS		MINUTOS	HORAS	Vel. Prom.
DC	5	REJOYA	2,52837	-76,60566	7,66	720	60	12	0,20	38 Km/ H
					Km	TIEMPO DE RUTA CORTA				
ORIG.	PROV.	DESTINO	X	Y	DISTANCIA	SEGUNDOS		MINUTOS	HORAS	Vel. Prom.
DC	6	YUNGA	2,52506	-76,74714	26,83	2631	60	44	0,73	37 Km/ H
		RUTA MAS CORTA EN CAMION			Km	TIEMPO DE RUTA CORTA				
ORIG.	PROV.	DESTINO	X	Y	DISTANCIA	SEGUNDOS		MINUTOS	HORAS	Vel. Prom.
DC	7	PORVENIR	2,5331	-76,67512	12,04	943	60	16	0,26	46 Km/ H
					Km	TIEMPO DE RUTA CORTA				
ORIG.	PROV.	DESTINO	X	Y	DISTANCIA	SEGUNDOS		MINUTOS	HORAS	Vel. Prom.
DC	8	CAPILLA	2,58468	-76,62443	18,19	2078	60	35	0,58	32 Km/ H
					Km	TIEMPO DE RUTA CORTA				
ORIG.	PROV.	DESTINO	X	Y	DISTANCIA	SEGUNDOS		MINUTOS	HORAS	Vel. Prom.
DC	9	CESTEADERO	2,53331	-76,73715	21,89	1863	60	31	0,52	42 Km/ H
					Km	TIEMPO DE RUTA CORTA				
ORIG.	PROV.	DESTINO	X	Y	DISTANCIA	SEGUNDOS		MINUTOS	HORAS	Vel. Prom.
DC	10	TAMBO	2,44692	-76,79719	41,15	4887	60	81	1,36	30 Km/ H

Fuente: Elaboración propia **(Qgis)** (Excel)

Con la implementación de la API HQgis en el software Qgis se ha calculado la distancia entre el DC y cada uno de los nodos (kilómetros) y el tiempo que se tarda un camión con un tráfico normal (segundos) como se indica en la *(figura 2)*, a partir de esta configuración se hace posible recopilar datos que permiten calcular la matriz de distancias y la matriz de ahorros.

Los cálculos de estas interacciones pertenecen al algoritmo de Clarke and Wright. Las distancias entre cada uno de los nodos se mide en distancias euclidianas tal como lo indica este algoritmo, puesto que para un desarrollo futuro de esta aplicación de heurísticas se espera poder trabajar con las distancias medidas en Qgis incluyendo la variable TRÁFICO en este modelo de transporte, las distancias medidas bajo estos parámetros permitirán obtener datos más cercanos a la realidad y la simulación de los eventos será cada vez más aproximada a los valores reales, es decir en el sentido de optimización del modelo la disminución del error calculado será cada vez menor y el modelo tendrá una versión mejorada.

Figura 3: Gráfico de localización de nodos según sus coordenadas

Fuente: Elaboración propia **(Excel 365)**

Cómo es posible observar en la *(Figura 3)* las coordenadas calculadas con el software de geolocalización Qgis se llevan a un plano cartesiano en Excel donde se transponen las imágenes y es posible escalar las coordenadas a un nuevo plano de localización. Desde el centro de distribución hasta cada uno de los puntos donde están ubicados los caficultores, una vez que se han calculado todas las coordenadas es posible localizar cada uno de los puntos en el mapa y para ello se requiere de un trabajo mixto entre el mapa creado en Qgis y herramientas para la localización de coordenadas en excel. Posteriormente se realiza una tabla base para la gestión de las nuevas coordenadas y se adiciona una columna nueva que contiene las demandas correspondientes a cada uno de los proveedores, las demandas se determinan como a la cantidad de café disponible para ser recogido en cada nodo en la próxima ruta , de esta manera se podrá determinar cuántos sacos de café en cereza en presentación de (50 kilogramos) serán recogidos en ese nodo, tal como se indica en la (*figura 4).*

Figura 4: Tabla de coordenadas de ubicación

	Coordenadas de ubicación			
	NODO	Longitud	Latitud	Demanda
0	DC	37	33	0
1	TAMBO	10	24	30
2	ZARZAL	18	26	25
3	YUNGA	17	43	10
4	CESTEADERO	18	48	10
5	SILVIA	65	65	20
6	PIENDAMO	46	64	50
7	CAPILLA	31	56	25
8	REJOYA	34	43	25
9	PORVENIR	25	43	15
10	TUNIA	43	76	25

Fuente: Elaboración propia

Para realizar los cálculos correspondientes a las distancias desde el centro de distribución (DC) hasta cada uno de los puntos donde están localizados los proveedores, estas distancias son medidas como la raíz de la suma de las potencias de las coordenadas X - Y, es decir en distancias euclidianas como se observa en la *(figura 6).*

Figura 5: Tabla de datos para el cálculo de r(S)

$r(S)=\lceil(\sum_{(i\in S)} d_i)/C\rceil$ | 1 SACO = x 50 kilogramos | d_i:demanda cliente i | C:Capacidad del vehículo

Capacidad máxima de cada camión	100	300	5000	5
	sacos		kilogramos	tonelada
r(S) : Número mínimo de camiones (o rutas) =	3			
$\sum_{(i\in S)\ i}$: Total demanda =	235		11750	11,75
Capacidad utilizada general =	78,33%			

Fuente: Elaboración propia

Figura 6: Matriz de distancias euclidianas

PASO 1: Matriz de distancias euclidianas

C_{ij}	DC	TAMBO	ZARZAL	YUNGA	CESTEADERO	SILVIA	PIENDAMO	CAPILLA	REJOYA	PORVENIR	TUNIA
DC	0,0	28,5	20,2	22,4	24,2	42,5	32,3	23,8	10,4	15,6	43,4
TAMBO	28,5	0,0	8,2	20,2	25,3	68,6	53,8	38,3	30,6	24,2	61,6
ZARZAL	20,2	8,2	0,0	17,0	22,0	61,1	47,2	32,7	23,3	18,4	55,9
YUNGA	22,4	20,2	17,0	0,0	5,1	52,8	35,8	19,1	17,0	8,0	42,0
CESTEADERO	24,2	25,3	22,0	5,1	0,0	50,0	32,2	15,3	16,8	8,6	37,5
SILVIA	42,5	68,6	61,1	52,8	50,0	0,0	19,0	35,2	38,0	45,7	24,6
PIENDAMO	32,3	53,8	47,2	35,8	32,2	19,0	0,0	17,0	24,2	29,7	12,4
CAPILLA	23,8	38,3	32,7	19,1	15,3	35,2	17,0	0,0	13,3	14,3	23,3
REJOYA	10,4	30,6	23,3	17,0	16,8	38,0	24,2	13,3	0,0	9,0	34,2
PORVENIR	15,6	24,2	18,4	8,0	8,6	45,7	29,7	14,3	9,0	0,0	37,6
TUNIA	43,4	61,6	55,9	42,0	37,5	24,6	12,4	23,3	34,2	37,6	0,0

Fuente: Elaboración propia

Una vez se tiene completa la matriz de distancias euclidianas es posible desarrollar los (savings) o ahorros que hay entre cada una de las interacciones entre cada nodo, incluyendo las interacciones de cada proveedor con el centro de distribución (DC), los ahorros se pueden calcular como la suma de (distancia desde DC a cada proveedor menos la como se observa en la *(figura 7).*

Figura 7: Matriz de ahorros (savings) generados entre nodos

PASO 2: Matriz de ahorros (Savings)

Cálculo de los ahorros

$$S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij} \quad \forall\ i \neq j$$

$C_{i,0}$: Distancia desde el nodo i al DC (DC se designa con 0).

$C_{0,j}$: Distancia desde el DC al nodo j (DC se designa con 0).

$C_{i,j}$: Distancia desde el nodo i al nodo j.

$S_{i,j}$: Ahorro desde el nodo i al nodo j.

S_{ij}	TAMBO	ZARZAL	YUNGA	CESTEADERO	SILVIA	PIENDAMO	CAPILLA	REJOYA	PORVENIR	TUNIA
TAMBO										
ZARZAL	10,46									
YUNGA	30,57	25,58								
CESTEADERO	27,37	22,46	41,47							
SILVIA	2,38	1,70	12,08	16,75						
PIENDAMO	6,93	5,33	18,84	24,24	55,77					
CAPILLA	13,95	11,32	27,03	32,71	31,12	39,05				
REJOYA	8,29	7,34	15,80	17,88	14,95	18,53	20,87			
PORVENIR	19,87	17,48	29,98	31,23	12,49	18,20	25,07	17,06		
TUNIA	10,29	7,76	23,77	30,09	61,34	63,33	43,86	19,65	21,45	
45	K ésimo mayor =		1,69531							

Fuente: Elaboración propia (Excel)

Los ahorros deben ser ordenados de manera descendente tal como se indica en la *figura 8* , de esta manera es posible vincular los nodos adyacentes entre sí procurando que la suma de sus demandas no supere la capacidad de cada vehículo de la flota homogénea , cada vehículo tiene la capacidad de transportar toneladas, lo cual se traduce en 100 sacos de café en cereza.

Figura 8: Tabla de interacciones entre nodos

PASO 3:		**PASO 4:**						
Ordenar ahorros de		**Analizar par de nodos por iteración**						
K	K^{th} mayor	Par de nodos de la iteración K		Demanda total del par de nodos	¿Factible crear nueva ruta o conectar con ruta existente?	Estado	**NODO**	**Demanda**
1	63.33	TUNIA	PIENDAMO	75	Sí	Fin del algoritmo	**DC**	0
2	61.34	TUNIA	SILVIA	45	Sí	Siguiente iteración (K)	**TAMBO**	30
~~3~~	~~55.77~~	~~PIENDAMO~~	~~SILVIA~~	~~70~~	dos ya conectad	Siguiente iteración (K)	**ZARZAL**	25
~~4~~	~~43.86~~	~~YUNGA~~	~~TUNIA~~	~~50~~	No	Siguiente iteración (K)	**YUNGA**	10
5	41.47	YUNGA	CESTEADERO	20	Sí	Siguiente iteración (K)	**CESTEADEF**	10
6	40.46	TAMBO	ZARZAL	55	Sí	Siguiente iteración (K)	**SILVIA**	20
~~7~~	~~39.05~~	~~PIENDAMO~~	~~CAPILLA~~	~~75~~	No	Siguiente iteración (K)	**PIENDAM(**	50
8	32.71	CESTEADERO	CAPILLA	35	Sí	Siguiente iteración (K)	**CAPILLA**	25
9	31.23	CESTEADERO	PORVENIR	25	Sí	Siguiente iteración (K)	**REJOYA**	25
~~10~~	~~31.12~~	~~SILVIA~~	~~CAPILLA~~	~~45~~	No	Siguiente iteración (K)	**PORVENII**	15
~~11~~	~~30.57~~	~~YUNGA~~	~~TAMBO~~	~~40~~	No	Siguiente iteración (K)	**TUNIA**	25
~~12~~	~~30.09~~	~~YUNGA~~	~~CAPILLA~~	~~35~~	No	Siguiente iteración (K)		
~~13~~	~~29.98~~	~~PORVENIR~~	~~REJOYA~~	~~25~~	dos ya conectad	Siguiente iteración (K)		
~~14~~	~~27.37~~	~~CESTEADERO~~	~~TAMBO~~	~~40~~	dos ya conectad	Siguiente iteración (K)		
~~15~~	~~27.03~~	~~CAPILLA~~	~~YUNGA~~	~~35~~	dos ya conecta	Siguiente iteración (K)		

Fuente: Elaboración propia

1. Resultados y discusión

Figura 9: Rutas de transporte de café en cereza

PASO 5: Asignar nodos a las rutas según restricción de capacidad de los camiones homogéneos

SOLUCIÓN

Área del gráfico

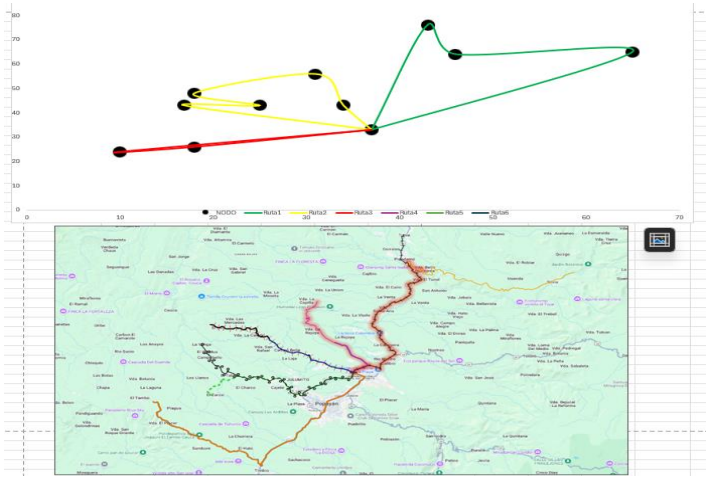
Ruta/ Camión	Nodos de la ruta (inicia con y debe terminar con)								Demanda total cubierta	Distancia de la ruta	% Capacidad utilizada por camión
1	DC	TUNIA	PIENDAMO	SILVIA	DC				95	117,33	95,00%
2	DC	YUNGA	PORVENIR	CESTEADERO	CAPILLA	REJOYA	DC		85	70,01	85,00%
3	DC	TAMBO	ZARZAL	DC					55	56,96	55,00%
4									0		
5									0		
6									0		
7									0		
8									0		
									0		
n									0		
							Total		235	244,30	78,33%

Fuente: Elaboración propia

Se determina que la solución está constituida por tres vehículos, cada vehículo con capacidad de 100 sacos de café, tal como se muestra en la *figura 9*. Como se observa en la *figura 10* la ruta 1 en verde , la 2 en amarillo y la 3 en rojo.

La Ruta 1 (DC - TUNIA - PIENDAMO - SILVIA - DC) con 95 sacos de café recogidos, 117.3 kms de distancia recorridos y con una capacidad utilizada del 95%; Mientras que la Ruta 2 (DC - YUNGA - PORVENIR - CESTEADERO - CAPILLA - REJOYA - DC) con 85 sacos de café recogidos, 70 kms de distancia recorridos y con una capacidad utilizada del 85% y finalmente la Ruta 3 (DC - TAMBO - ZARZAL - DC) con 55 sacos de café recogidos, 57 kms de distancia recorridos y con una capacidad utilizada del 55%. La capacidad promedio utilizada con este modelo de ruteo vehicular es de 78.33% recorriendo en total 244.3 kilómetros y con una demanda total cubierta del 100% con 235 sacos de 50 Kg de café en cereza recogidos en 10 diferentes puntos del departamento del Cauca y transportados al centro de distribución (DC) de la empresa Café Norte ubicado en la intersección entre la vía a la tetilla y la variante de la ciudad de Popayán.

Figura 10: solución gráfica con algoritmo de ahorros



Fuente: Elaboración propia (Excel 365)

Conclusiones y Beneficios

Desde el punto de vista logístico, el transporte es una actividad clave en el desempeño competitivo de la compañía, generando utilidad de lugar y utilidad de

tiempo, entendiendo que está relacionada con la capacidad que tiene la compañía de ubicar sus productos en el lugar y el plazo pactado con los clientes. Al lograr reducir la distancia recorrida por cada uno de los vehículos se logra disminuir los costos asociados al transporte de materia prima desde los proveedores hasta el centro de distribución de la empresa Café Norte, al reducir la distancia se reducen los tiempos de desplazamiento y por ende se aumentan los niveles de servicio de la empresa, con la aplicación del modelo de planificación de las rutas se pueden establecer diferentes simulaciones de eventos según se comporten las cosechas a través del año , de esta manera se podrá obtener un patrón que defina las mejores rutas según las épocas del año y según la cantidad de café en cereza disponible en cada uno de los nodos de acopio.

Para la implementación natural de los algoritmos de ahorro en los sistemas de transporte de materia prima en las cadenas de suministro agroalimentarias se identifican algunas limitaciones como: altos costos de transporte (35% de los costos totales en la gestión logística), reduciendo los márgenes de utilidad. Algunos de estos costos son generados por ineficiencia en la gestión logística, por ejemplo, el mal estado de las vías aumenta el consumo de combustible y prolonga los tiempos de entrega. También existen limitaciones a nivel de infraestructura, el estado de deterioro de las vías que acceden a las fincas y plantaciones de café dificulta el traslado eficiente de la producción hacia los centros de procesamiento y distribución. También durante la temporada de lluvias, este problema empeora ya que las carreteras se vuelven aún más difíciles de transitar. Además, existe en el departamento del Cauca una limitación frente a los bloqueos en la vía por manifestantes, cuando los manifestantes impiden el transporte de café al bloquear la vía Panamericana, impacta negativamente en la economía local, nacional y de exportación. Los caficultores sufren pérdidas importantes debido a esta situación, lo que dificulta la distribución eficiente del producto en los mercados nacionales e internacionales. El sector cafetero del departamento del Cauca ha limitado su competitividad y obstaculizado su desarrollo socioeconómico debido a la falta de acceso fluido a las principales vías de transporte. La falta de coordinación logística en los procesos internos de la empresa hace que no estén sincronizados, provocando la gestión ineficiente de recursos y una planificación deficiente de las rutas de transporte. Las consecuencias de esto son tiempos de espera prolongados, esfuerzos duplicados y oportunidades de mejora perdidas para poder optimizar la capacidad de carga de los vehículos.

La falta de planes de acción y control de calidad en el transporte de abastecimiento hace que la calidad del café durante su transporte sea difícil de mantener para la empresa, debido a que los sistemas actuales no son adecuados ni inteligentes como para monitorear y controlar las condiciones ambientales o las variables más

influyentes como tiempo, temperatura y humedad. El café puede sufrir daños físicos que deterioran su apariencia, su sabor y su aroma, lo cual se traduce como un resultado que afecta negativamente su valor de mercado. Se espera que, al mejorar la logística de transporte, el proyecto aporte al desarrollo económico de la región impulsando a la creación de empleos y aumentando los ingresos de los productores de café. También aportar en una visión sostenible al reducir el desperdicio de recursos y minimizar el impacto ambiental del transporte contribuyendo mediante una logística optimizada. Se espera que haya un posicionamiento de subproductos de café del Cauca gracias a una logística eficiente, el café del Cauca podrá tener una mejor presencia en los mercados internacionales, resaltando por su calidad y confiabilidad en la entrega. Se espera que el impacto del proyecto se vincule con las necesidades reales y actuales de la economía (bioeconomía) en desarrollo para Colombia, se entiende que para la evolución y la adaptación de los modelos económicos alrededor del aprovechamiento de residuos la tarea debe estar liderada por manos expertas, capaces de brindar oportunidades a partir del aprovechamiento de los desperdicios en las cadenas de suministro de alimento del país.

El algoritmo de Clarke and Wright es una heurística que proporciona una solución que no es óptima pero que es factible y que resulta eficiente para el problema, mientras que ajustar los modelos a la simulación de eventos discretos permite evaluar y refinar esta solución en un entorno dinámico y realista. Al simular el sistema de transporte, podemos observar cómo se comportan las rutas generadas por el algoritmo de Clarke and Wright bajo diferentes condiciones, como variaciones en la demanda, incidentes en el tráfico o cambios en las restricciones operativas. Esto nos permite identificar posibles mejoras en las rutas, ajustar los parámetros del algoritmo y evaluar el impacto de diferentes estrategias de ruteo en términos de eficiencia, costo y nivel de servicio.

El VRP a lo largo del tiempo ha ido aumentando su complejidad para tratar de dar soluciones a problemas reales dentro de la cadena de suministros; uno de estos problemas es cuando el vehículo debe recoger productos (Pickup), pero, además, debe hacer entregas (Delivery) en la misma ruta, lo que genera una variante del VRP denominada Pickup and Delivery (VRPPD).

Esta nueva variante se enmarca en la denominada logística verde o Green Logistic, la cual tiene como principales actividades medir el consumo de energía durante el transporte de productos y disminuirlo, al igual que las contaminaciones de suelo, aire y agua para minimizar así el impacto ambiental, (Reyes, Zabala, & Gálvez, 2008).

Mejoramiento en el sistema de transporte de café aplicando heurísticas de ruteo vehicular en el departamento del cauca

Bibliografía

G. Clarke y J. W. Wright, "Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points," *Operations Research*, vol. 12, no. 4, pp. 568–581, 1964. *(Referencia al algoritmo de Clarke and Wright utilizado para optimizar las rutas de transporte).*

A. Reyes, M. Zabala, y C. Gálvez, "Green Logistics: A Sustainable Approach to Transport Management," *Environmental Management Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 223-234, 2008. *(Referencia sobre logística verde y su relación con el VRP Pickup and Delivery).*

N. Michail, "Tabu Search Algorithm for Optimization Problems," GitHub Repository, 2018. [Online]. Available: https://github.com/nikolaosmichail *(Referencia al código fuente de búsqueda Tabú empleado en la localización de plataformas logísticas rurales).*

J. Botero y P. Sánchez, "Optimización de la infraestructura y operaciones en cadenas de suministro: Un modelo aplicado al sector cafetero colombiano," *Logistics Research Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 45–62, 2016. *(Estudio de caso sobre Café Botero y su modelo de optimización logística basado en programación lineal).*

Instituto de Geografía y Cartografía, *Manual de uso del software QGIS para proyectos de logística*, Bogotá, Colombia, 2018. *(Referencia al uso del software QGIS y la extensión HQgis para calcular rutas y distancias en proyectos logísticos).*

A. Reyes, C. Gálvez, y M. Zabala, "Optimizing Transportation Systems Through Pickup and Delivery in Green Logistics," *Journal of Sustainable Supply Chains*, vol. 15, no. 4, pp. 320–336, 2008. *(Referencia sobre la variante VRPPD y su aplicación en logística sostenible).*

H. Gutiérrez y J. López, "Análisis de métodos heurísticos en el VRP capacitado: Un enfoque práctico," *Ingeniería y Competitividad*, vol. 11, no. 1, pp. 35–49, 2008. *(Estudio del CVRP con el algoritmo COMSOAL y heurística R para optimización de rutas).*

R. Martínez, "Metodologías de Optimización Logística Aplicadas a Sectores Rurales en Colombia," *Revista de Ingeniería Industrial*, vol. 14, no. 2, pp. 78–92, 2018. *(Referencia al enfoque heurístico y metaheurístico para consolidación de carga y optimización logística).*