

Trabajo de grado en modalidad de aplicación

Diseño de una meta-heurística para la programación del procesamiento de pedidos y ruteo de vehículos en la comercializadora Agrobels S.A.S.

Laura Bibiana Casallas Sánchez 1^{a,c}, Carolina Chica Montañez 2^{a,c}, María Angélica Mora Cadavid 3^{a,c},

Juan Carlos García Díaz, Ph.D.^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Summary

This thesis seeks to develop an integrated model for the order processing scheduling and vehicle routing in the agricultural products trading company Agrobels S.A.S, taking into account restrictions such as **due date** and vehicle capacity. The above was achieved through the design and implementation of a genetic algorithm that minimizes the total tardiness by means of VBA (Visual Basic Application) addressed with the ISO 9126 which collects the daily information of the orders made by the company's customers and outputs the results by means of a Gantt chart, guaranteeing an efficient and flexible structure for the user.

To evaluate the efficiency of the proposed technique, a comparison was made with a mathematical model, additional instances of 30 days were run and the results showed improvement with respect to the current times simulated under the dispatch policy (Earliest Due Date) where the results improved by 67.98% per order and the execution times range between 0.65 and 14.3 seconds.

According to the results obtained, it is concluded that the application contributes to an improvement in the reduction of total tardiness that additionally impacts in a reduction in percentages of returns and unsatisfied demand.

1. Justificación y planteamiento del problema

Los procesos de producción y distribución dentro de la industria agrícola se ven afectados por un sinnúmero de aspectos, tanto externos como internos, los cuales son determinantes en la calidad y durabilidad del producto. Los factores externos, entendidos como aquellos que dependen de las condiciones ambientales o de la naturaleza del producto, no pueden ser controlados fácilmente, y los factores internos, aquellos que son consecuencia del

manejo dado a lo largo del ciclo de vida de dicho producto, cuyo impacto negativo puede ser disminuido por medio de la mejora de los diferentes procesos.

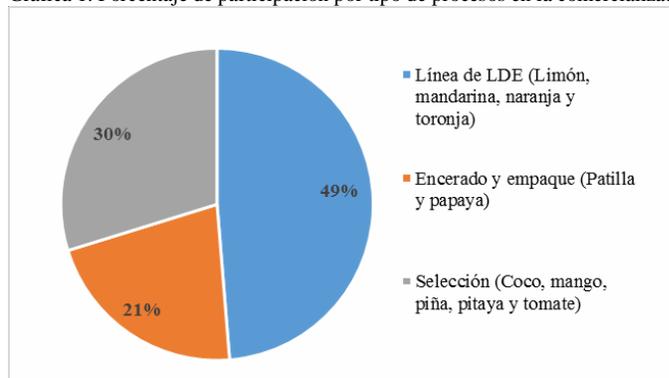
Los factores mencionados anteriormente inciden de manera directa en la calidad del producto, más aún cuando el bien se caracteriza por su naturaleza perecedera. Amorim, Meyr, Almeder, & Almada-Lobo (2013) afirman que un producto es perecedero cuando cumple alguna de las siguientes condiciones: (1) su estado físico empeora notablemente (p.ej. decadencia, deterioro o descomposición), y/o (2) su valor disminuye debido a la percepción del cliente (interno o externo) y/o (3) existe peligro referente a su disminución en funcionalidad a futuro.

Dado lo anterior, los productos agrícolas en su condición de perecederos poseen una vida útil corta, la cual varía según los factores internos y externos que se presentan a lo largo de los procesos. Según Amorim, Günther, & Almada-Lobo (2012) estos productos se clasifican en aquellos con vida útil fija la cual está pre-especificada y aquellos con vida útil aleatoria que depende de cierta probabilidad de deterioro. Los primeros se ejemplifican con productos como leche, yogurt y bancos de sangre y los segundos con productos como vegetales, frutas, químicos y componentes electrónicos.

El presente estudio se desarrollará con base en los productos clasificados como aquellos que poseen una vida útil aleatoria. Para la puesta en marcha de este, se usará como punto de partida la distribuidora de productos agrícolas Agrobela S.A.S, la cual mediante su política corporativa de calidad y cumplimiento busca encaminarse hacia el futuro expandiendo su clientela a nivel nacional e internacional. Así mismo, se encuentra comprometida con la mejora continua de la organización, cumpliendo con los requerimientos de sus clientes y contando con un equipo humano idóneo.

Alineando este proyecto a los objetivos organizacionales, se llevó a cabo un análisis histórico de las condiciones de la empresa. En primera instancia, se evaluó el porcentaje de participación según el volumen de demanda y la cantidad de procesos a los que debe someterse cada producto. Como se muestra en la gráfica 1 los productos con mayor participación pertenecen a la línea de cítricos, los cuales son: limón, mandarina, naranja y toronja debido a su alto volumen de demanda, siendo este de un 49%, además son aquellos que poseen un procesamiento más complejo respecto al resto de productos ofrecidos ya que deben someterse a un mayor número de operaciones.

Gráfica 1. Porcentaje de participación por tipo de procesos en la comercializadora Agrobela S.A.S.



Fuente: Construcción de los autores con base en la información histórica de Agrobela S.A.S.

Adicionalmente se determinó el comportamiento de la demanda de los productos seleccionados en cuanto a su cantidad y frecuencia. Teniendo en cuenta que las operaciones de la compañía se realizan en su totalidad bajo pedido, es decir, un producto es procesado solo cuando hace parte del pedido de un cliente, se considera que la demanda sigue un comportamiento determinístico. Lo anterior indica que cada pedido solicitado por cualquiera de los clientes es conocido al momento de llevar a cabo su programación, la cual deberá realizarse según los requerimientos y las condiciones de la línea de procesamiento, considerando principalmente la fecha y hora de entrega solicitada.

En cuanto al comportamiento del tiempo de procesamiento, se establece que este se presenta de forma determinística debido a que la mayoría de las operaciones son realizadas por una máquina la cual conserva sus características determinantes como velocidad y capacidad en el procesamiento de cada uno de los pedidos.

En este sentido se realizaron 3 estudios para evaluar la eficiencia en las operaciones de procesamiento y distribución de los pedidos: el primero corresponde a las horas de tardanza promedio por pedido, teniendo en cuenta que cada cliente tiene horarios preestablecidos de recepción diferentes, el segundo corresponde al cálculo del porcentaje de pérdidas por descomposición o deterioro el cual está representado en devoluciones realizadas por el cliente final y por último el porcentaje de demanda no satisfecha. En la tabla 1 se evidencian los resultados obtenidos de cada uno de los estudios mencionados.

Tabla 1. Indicadores de eficiencia en Agrobel S.A.S.

<i>Estudio N°</i>	<i>Variable analizada</i>	<i>Horizonte de estudio</i>	<i>Resultado</i>
1	Tiempo promedio de tardanza por pedido	1/Julio/17 al 30/Agosto/17	3,66 horas
2	Porcentaje de devoluciones	1/Febrero/17 al 31/Agosto/17	8,5 %
3	Porcentaje promedio mensual de demanda no satisfecha	1/Julio/17 al 30/Agosto/17	37,59 %

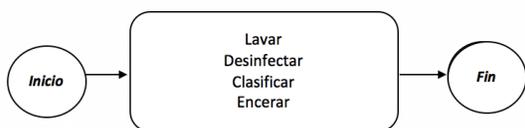
Fuente: Construcción de los autores con base en la información histórica de Agrobel S.A.S

Teniendo en cuenta los resultados correspondientes a cada estudio y las características del manejo que deben tener los productos perecederos, se identifican tres de las principales problemáticas que se presentan frecuentemente en la comercializadora Agrobel S.A.S: demoras durante el procesamiento y permanencia en bodega previa al despacho, limitaciones en capacidad de procesamiento y la inadecuada priorización de los pedidos, las cuales conllevan al deterioro de la calidad del producto, al incumplimiento de los requerimientos de los clientes e igualmente a la falta de disponibilidad de los camiones requeridos para la distribución.

Para abordar dichas problemáticas, es importante considerar que solo se cuenta con una línea de procesamiento en la que se realizan consecutivamente las operaciones de lavado, desinfección, clasificación y encerado, cada vez que los procesos mencionados previamente se ejecutan, el producto procede a la siguiente etapa gracias a una banda transportadora .

De acuerdo a lo descrito previamente ,se puede inferir que se presenta un ambiente single machine en el cual existen ciertas restricciones que limitan las capacidades de producción. Cabe aclarar que el desarrollo de dichas operaciones es semejante al presentado en una línea de producción, por lo cual se considerarán soluciones relacionadas a la programación de las operaciones en ese contexto. A continuación, se presenta el diagrama de flujo correspondiente a las operaciones de procesamiento de los cítricos:

Diagrama 1. Diagrama de procesos máquina de productos cítricos.



Fuente: Construcción de los autores

Debido a que el problema se desarrolla en un ambiente single machine, algunas de las restricciones existentes son: Cada trabajo es procesado hasta concluirse, una vez que se inicia una operación esta se interrumpe solamente cuando se concluye, la máquina no puede procesar más de un trabajo a la vez. Cabe aclarar que en este contexto un trabajo se denota como un lote de productos cítricos pertenecientes a un mismo pedido.

Teniendo en cuenta que las restricciones mencionadas anteriormente generan un gran impacto en la capacidad y tiempo de procesamiento, es necesario establecer una priorización adecuada de los pedidos que permita satisfacer la demanda a tiempo, procurando que no se generen excesos de inventario y que los productos permanezcan la menor cantidad de tiempo posible antes de su distribución. Adicionalmente, es indispensable identificar rutas adecuadas para los vehículos que permitan disminuir los tiempos de tardanza en la entrega de los pedidos, y así satisfacer los requerimientos de cada cliente.

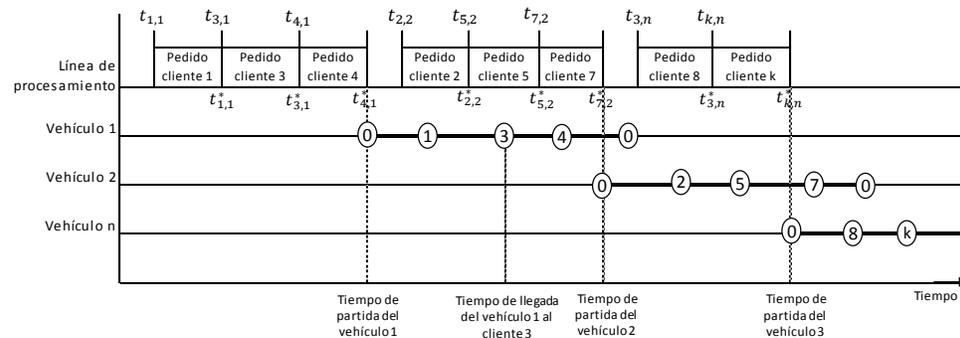
En cuanto a la disponibilidad de los camiones para la distribución, es importante aclarar que, al presentarse entregas tardías, en la mayoría de los casos se debe incurrir en un tiempo de espera de atención para el descargue de la mercancía lo cual inhabilita su uso, por el contrario, si esta opción no es considerada por el cliente, este realiza la devolución de la mercancía generándose igualmente incrementos en los costos. Por esta, y cada una de las problemáticas mencionadas anteriormente se hace necesario la utilización de herramientas de ingeniería que hagan posible la reducción del impacto negativo a lo largo de los procesos desarrollados en Agrobels S.A.S.

Para evaluar el impacto con un mayor grado de efectividad es importante realizar una propuesta integrada que busque eliminar tiempos de espera entre las actividades previamente mencionadas (Programación de la producción y ruteo de vehículos). Según afirma Amorim et al. (2012), las ventajas de utilizar un enfoque integrado se potencian debido a que cuando se está utilizando un enfoque desintegrado y los productos están sujetos a una alta perecibilidad, los errores en la planificación de la producción serán difícilmente corregidos por los procesos de distribución debido a que el tiempo de espera entre esas dos actividades se reduce por la pequeña cantidad de tiempo que los productos pueden permanecer almacenados.

Según lo anterior, es necesario el diseño de una propuesta de solución integrada en los procesos de programación de la producción y ruteo de vehículos del producto final a los retailers, debido a la naturaleza perecedera de los mismos. Un aspecto importante a tener en cuenta para la elaboración del ruteo de los vehículos tiene que ver con el hecho de que estos no inician su recorrido hasta que todos los productos que conforman el pedido están listos, incluyendo aquellos que no pertenecen a la línea de cítricos.

En cuanto a la partida de cada vehículo, esta debe llevarse a cabo en un tiempo mínimo luego de ser cargado, puesto que, a diferencia de productos no perecederos, estos no pueden almacenarse por un largo tiempo y tienen que ser distribuidos en el menor tiempo posible. De lo contrario, si el producto permanece en bodega más de lo adecuado, el margen de ganancia se reduce proporcionalmente hasta el punto de poder llegar a perder el producto en su totalidad.

Diagrama 2. Diagrama del plan de producción y enrutamiento de vehículos en Agrobels S.A.S.



$t_{k,n}$ = tiempo de inicio de procesamiento del pedido del cliente k asignado al camión n
 $t_{k,n}^*$ = tiempo de fin de procesamiento del pedido del cliente k asignado al camión n

Fuente: Construcción de los autores.

Para facilitar el entendimiento de la propuesta diseñada, se muestra un ejemplo considerando 7 clientes y 2 vehículos, en donde los vehículos 1 y 2 entregan pedidos a clientes 1,3,4 y 2,5,6 respectivamente. El diagrama 2, representa el programa de producción y el plan de enrutamiento de los pedidos que distribuyen los vehículos, sin embargo, cabe recalcar que para un correcto desarrollo de las actividades en bodega se debe tener en cuenta

que la hora de salida de los vehículos se verá afectada por las cantidades y los tiempos de finalización del procesamiento de los cítricos.

Considerando lo anterior, la empresa Agrobel S.A.S requiere implementar técnicas de planeación de la producción, así como de distribución para la línea de productos cítricos, encaminadas a la disminución en tardanzas y demanda insatisfecha. “Se debe tener en cuenta que el problema de planificación integrada operativa de producción y distribución es un problema muy difícil, y hasta ahora, no solucionable utilizando métodos exactos incluso para problemas con un pequeño número de productos y clientes” (Belo-Filho et al., 2015); [lo cual permite afirmar que se trata de un problema NP- hard](#).

De acuerdo a lo expuesto previamente, la pregunta de investigación que se resuelve en este proyecto es:

¿Cómo diseñar un modelo de solución integrado para la programación de las actividades de procesamiento de los pedidos y ruteo de vehículos utilizados para la distribución de estos a los clientes en la comercializadora agrícola Agrobel SAS de manera que se reduzca la tardanza de entrega, devoluciones y demanda insatisfecha consideradas en la misma función objetivo?

2. Antecedentes

En cuanto a la literatura referente a la mejora de los procesos que intervienen a lo largo de la cadena de suministro de productos perecederos, y gracias a la evolución en herramientas y métodos de solución de los diferentes casos de estudio, se ha logrado profundizar en la investigación relacionada con dichos temas. Como consecuencia, actualmente se puede evidenciar gran variedad de métodos de solución planteados por distintos autores.

La literatura estudiada fue clasificada en tres grupos. En primer lugar, aquella relacionada con la programación de la producción de productos perecederos, en segundo lugar, la información referente al ruteo de vehículos de productos con esta misma clasificación y finalmente la literatura que involucra los dos métodos de solución mencionados anteriormente.

Con respecto a la literatura relacionada con la programación de la producción, existen diferentes técnicas de solución dependiendo de las características del sistema por lo cual los intereses de los investigadores varían. Shirvani, Ruiz, & Shadrokh (2014) proponen un modelo matemático multiobjetivo y un algoritmo híbrido para resolver el problema teniendo en cuenta tanto la frescura del producto, así como las ventanas de tiempo. Monahan (1976) plantea un modelo de programación lineal entera en donde incluye el costo por devoluciones relacionadas con el deterioro del producto. Entrup, Günther, Van Beek, Grunow, & Seiler (2005) desarrollan tres modelos de programación lineal entera mixta basándose en la producción de yogurt integrando los problemas de vida útil. Arbib, Pacciarelli, & Smriglio (1999) estudian el problema de asignación de un número máximo de productos a una línea de producción por medio de un algoritmo de tiempo polinómico. Billaut (2011) propone un modelo de programación lineal entera mixta para el problema de una sola máquina con trabajos de igual longitud. Finalmente, Randhawa & Juwono (1994) exponen una heurística para resolver los problemas de programación de sistemas multi-etapas y programación de máquinas paralelas.

Por otro lado, los problemas que involucran ruteo teniendo en cuenta restricciones con ventanas de tiempo han sido discutidos de diferentes maneras. Amorim et al. (2013) plantean un modelo de búsqueda por vecindarios, teniendo en cuenta vehículos heterogéneos con múltiples ventanas de tiempo. Ropke & Pisinger, (2006) proponen sub heurísticas competidoras con ventanas de tiempo como un modelo de extensión de la búsqueda por vecindarios. Hwang (1999) plantea un algoritmo genético para resolver el problema de la entrega de frutas entre 13 ciudades de la provincia de Jiangsu, en este no sólo se plantea una solución de VRPTW, sino que además considera la relación con las magulladuras de frutas y vegetales por irregularidades de las carreteras. Tarantilis & Kiranoudis (2001) plantean el enrutamiento de vehículo de flota fija heterogénea (HFFVRP) teniendo en cuenta umbrales y la programación semanal para satisfacer las demandas de una de las compañías de leche más grandes de Grecia.

En la misma línea, Osvald & Stirn (2008) desarrollan un algoritmo de enrutamiento con ventanas de tiempo (VRPTWTD) en donde miden el impacto que genera el estado del producto en los costos de distribución mediante un enfoque de búsqueda tabú. Gong & Fu (2010) utilizan una meta-heurística de colonia de hormigas (ACO) para resolver un problema de VRPTW, estos realizan una clasificación ABC agrupa a los clientes en tres grupos diferentes donde varía el nivel de satisfacción con respecto a las ventanas de tiempo exigidas. Hsu, Hung, & Li (2007) por su parte, amplían el modelo básico de VRPTW, en este busca principalmente disminuir costos relacionados a la obtención de rutas de entrega óptimas, cargas y despachos para entrega oportuna a los centros de distribución de sus clientes. Sin embargo, la mayoría de propuestas abren la posibilidad de tener un mayor grado de acercamiento mediante la integración de métodos.

En lo referente a la bibliografía que integra las metodologías de solución alineadas con la programación de la producción y ruteo de vehículos, varios autores han estudiado diferentes metodologías de solución. En la tabla 2 se presenta la descripción de dichas técnicas.

Tabla 2. Referencias bibliográficas que integran la planeación de la producción y el ruteo de vehículos.

<i>Búsqueda</i>	<i>Autor</i>	<i>Objetivo</i>	<i>MetaHeurística</i>
Scheduling & VRPTW	(J. Abraham, 2015)	Problema de distribución de la producción con múltiples plantas y productos en un horizonte de planificación con períodos de tiempo variables.	Algoritmo Genético
	(Cheol Min Joo, 2016)	Programación integrada para máquinas paralelas no relacionadas, lotes y camiones de entrega heterogéneos	Algoritmo Genético
	(Christian A. Ullrich, 2013)	Programación de producción y distribución para minimizar la tardanza total.	Algoritmo Genético
	(Farahani, 2012)	Método aplicado a la industria del servicio, buscando minimizar tiempo entre producción y entrega	Búsqueda de vecindario
	(Belo-Filho et al., 2015)	Método de corrección y optimización, considerando la secuencia de ventanas de tiempo del cliente en el horizonte de planificación	Búsqueda de vecindario adaptativo (ALNS).
	(Chen, Hsueh, & Chang, 2009)	Método de solución con restricciones de ventanas de tiempo	Algoritmo Genético
	(Mohammad Ali Beheshtiniya, 2017)	Problema de programación de una sola máquina usando dos enfoques diferentes. Se comparan con soluciones existentes.	Algoritmo Genético

Fuente: Construcción de los autores.

En cuanto a la literatura que mejor se adapta a las necesidades del problema planteado en la comercializadora Agrobels S.A.S se encuentra el artículo *Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows* en el cual Ullrich (2013) propone un algoritmo genético que busca reducir la tardanza total resolviendo la programación de la producción y el ruteo de vehículos representados en un mismo cromosoma.

Adicionalmente, otros de los autores que plantean un método de solución a un problema que se presenta de manera muy similar al existente en la comercializadora Agrobels S.A.S son Belo-Filho et al. (2015) quienes en su artículo denominado *An adaptive large neighbourhood search for the operational integrated production and distribution problem of perishable products* abordan la programación de la producción y el ruteo de vehículos proponiendo una búsqueda adaptativa de grandes vecindarios (*Adaptive Large Neighbourhood Search ALNS*), la cual supera los procesos tradicionales llamados métodos exactos ya que optimiza en términos de calidad de la solución y el tiempo computacional requerido para llegar a esta.

Dado lo anterior se puede afirmar que se han empleado diversas heurísticas y meta-heurísticas para la solución del problema propuesto. En el presente estudio se analizó de manera detallada el alcance y aproximación de cada una de las soluciones propuestas con el propósito de seleccionar aquella que fuera la más apropiada para el modelo en la empresa Agrobel S.A.S. En ese sentido se plantearon los siguientes criterios de selección para la meta-heurística del método de solución:

- Regularidad de implementación de la heurística o meta-heurística en problemas **similares, con el fin de tener información que ayude a modelar el problema y a prevenir posibles errores.**
- Nivel de eficiencia reportado en la literatura, en cuanto al cumplimiento de los objetivos.
- Nivel de adaptabilidad de la meta-heurística con los requerimientos del problema, **teniendo en cuenta restricciones propias de la empresa.**

3. Objetivos

- *Objetivo general*

Diseñar una técnica de solución integrada para la programación del procesamiento de pedidos y ruteo de vehículos destinados a su distribución en la comercializadora Agrobel S.A.S.

- *Objetivos específicos*

Nº1. Realizar un análisis del contexto del procesamiento de pedidos y ruteo de vehículos en Agrobel S.A.S con el fin de establecer los parámetros, variables, restricciones y supuestos necesarios para la selección de la meta-heurística apropiada.

Nº2. Identificar y desarrollar la meta-heurística que mejor se adapta a las condiciones del problema a partir de la literatura existente con el propósito de disminuir el tiempo promedio de tardanza, devoluciones y la demanda insatisfecha.

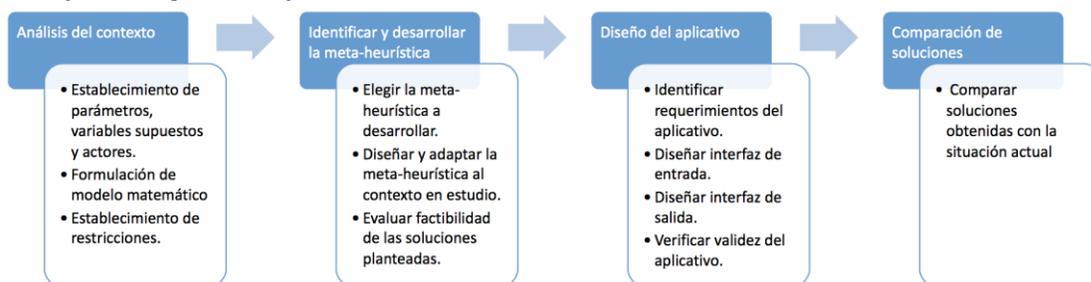
Nº3. Diseñar un aplicativo basado en la meta-heurística desarrollada que permita dar solución a la programación de operaciones de alistamiento y ruteo de vehículos.

Nº4. Medir el impacto del modelo propuesto con respecto a la disminución del tiempo promedio de tardanza en la entrega de pedidos.

4. Metodología

Para llevar a cabo la descripción de la metodología utilizada se presenta el desarrollo de cada uno de los objetivos, así como su resultado final. En el diagrama 3 se resumen cada una de las etapas desarrolladas, así como las actividades necesarias para su cumplimiento.

Diagrama 3. Etapas metodología.



Fuente: Construcción de los autores.

4.1. Análisis del contexto

Para llevar a cabo el análisis del contexto, se desarrolló el planteamiento de un modelo matemático el cual permitió identificar los parámetros, variables, supuestos y actores, así como establecer las restricciones necesarias para lograr la validez de las soluciones obtenidas.

Para conocer la situación actual de los procesos evaluados y la tardanza existente, se llevó a cabo la recolección de datos de 2 meses (febrero y marzo de 2018), en los cuales se tomó un conjunto de 50 datos para estimar el tiempo promedio de proceso de cada producto cítrico, así como 30 datos para hallar los tiempos de carga y descarga promedio de cada pedido. Adicionalmente se diseñó un formato para los vehículos encargados de la distribución de los pedidos, el cual permitió recolectar información de 40 días hábiles, en los cuales se registró la hora de salida de cada uno de estos de Agrobel S.A.S., su llegada a cada cliente para la entrega de los pedidos asignados al mismo, la hora de atención y la hora de salida de cada cliente.

Bajo la implementación de dichos formatos se determinó que los datos recolectados no constituían una comparación 100% real con el método de solución planteado debido a su alta variabilidad y dependencia de variables externas al proceso, por lo cual, se llevaron a cabo entrevistas con los jefes de planta y bodega para determinar una regla de despacho desarrollada actualmente que permitiera una comparación veraz con el algoritmo genético propuesto.

La regla de despacho identificada consiste en la priorización de pedidos por tamaño y hora de entrega. En la actualidad se evalúan aquellos pedidos con un tamaño mayor a 1000 kilogramos y se ordenan según su hora de entrega, posteriormente se procesan aquellos pedidos que no cumplen dicha capacidad siguiendo la misma lógica de ordenamiento (EDD, Earliest Due Date). Posterior a la determinación de la regla de despacho actual, se seleccionaron 30 días de operación para su análisis respecto al método de solución propuesto.

Otro de los parámetros necesarios para el análisis del contexto se refiere al cálculo del tiempo requerido para el desplazamiento entre cada uno de los clientes y Agrobel S.A.S. Para realizar dicha estimación, se hizo uso de la herramienta Google Maps, en la cual se evaluó cada uno de los recorridos en las horas típicas de operación para encontrar el tiempo promedio de desplazamiento entre cada uno de los nodos existentes.

Por medio de la recolección de datos mencionada anteriormente fue posible identificar los siguientes parámetros:

- Tiempo promedio de proceso por kilogramo de cada producto cítrico.
- Tiempo promedio de carga por canastilla
- Tiempo promedio de descarga por canastilla
- Tiempo promedio de transporte por canastilla de la zona de procesamiento a la zona de carga
- Tiempo de desplazamiento entre nodos (Agrobel S.A.S y 25 clientes).
- Tiempo de atención en cada uno de los clientes (tiempo transcurrido entre la llegada al cliente y el inicio de la descarga del pedido)

4.1.1 Formulación del Modelo Matemático

Con el fin de modelar el problema se empleó la programación lineal en donde se pueden identificar las siguientes definiciones:

Tabla 3. Conjuntos del modelo matemático.

Expresión	Descripción
$C: \{0 \dots 25\}$	Conjunto de clientes en donde el elemento 0 hace referencia a la bodega de Agrobel S.A.S
$V: \{1 \dots 9\}$	Conjunto de vehículos disponibles para la entrega de pedidos

Fuente: Construcción de los autores

Tabla 4. Parámetros del modelo matemático.

Símbolo	Parámetro
$Proce_c$	Tiempo de proceso del pedido del cliente $c \in C$ (minutos)

D_c	Hora límite de entrega del pedido del $c \in C$ (minutos)
U_c	Kilos totales que componen el pedido del cliente $c \in C$ (kilos)
TV_{cw}	Tiempo de viaje del cliente $c \in C$ al cliente $w \in C$ (minutos)
TC_c	Tiempo de carga del pedido del cliente $c \in C$ (minutos)
TD_c	Tiempo de descarga del pedido del cliente $c \in C$ (minutos)
TS_c	Tiempo de servicio del cliente $c \in C$ (minutos)
Cap	Capacidad de los vehículos (6000 kilos)

Fuente: Construcción de los autores.

Tabla 5. Variables del modelo matemático.

Símbolo	Variable
I_c	Tiempo de inicio de procesamiento del pedido de cliente $c \in C$ (minutos)
IP_c	Binaria, 1 Si el pedido del cliente $c \in C$ es el primero en procesarse, 0 de lo contrario
FP_c	Binaria, 1 Si el pedido del cliente $c \in C$ es el último en procesarse, 0 de lo contrario
Z_{cw}	Binaria, 1 Si el pedido del cliente $c \in C$ se procesa antes del pedido del cliente $w \in C$, 0 de lo contrario
Y_{vc}	Binaria, 1 Si el vehículo $v \in V$ lleva el pedido del cliente $c \in C$, 0 de lo contrario
B_{vc}	Tiempo de salida del vehículo $v \in V$ del cliente $c \in C$ (minutos)
A_{vc}	Tiempo de llegada del vehículo $v \in V$ al cliente $c \in C$ (minutos)
X_{vcw}	Binaria, 1 Si el vehículo $v \in V$ recorre el nodo del cliente $c \in C$ al cliente $w \in C$, 0 de lo contrario
WT_{vc}	Tiempo en que el pedido $c \in C$ está listo para cargarse en el vehículo $v \in V$
$TCarga_v$	Tiempo de carga del vehículo $v \in V$ (minutos)
T_c	Tardanza del pedido del cliente $c \in C$

Fuente: Construcción de los autores.

La función objetivo busca minimizar la tardanza total de los pedidos (1).

$$\text{minimizar Tardanza: } \sum_{c \in C} T_c \quad (1)$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$I_w \geq I_c + Proce_c - 10000 * (1 - Z_{cw}) \quad \forall c \in C/c \geq 1, c \neq w, \quad \forall w \in C/w \geq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{c \in C \\ c \neq w \\ c \geq 1}} Z_{cw} - \sum_{\substack{c \in C \\ c \neq w \\ c \geq 1}} Z_{wc} = FP_w - IP_w \quad \forall w \in C/w \geq 1 \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{w \in C \\ w \geq 1}} FP_w = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{w \in C \\ w \geq 1}} IP_w = 1 \quad (5)$$

$$FP_w + IP_w \leq 1 \quad \forall w \in C/w \geq 1 \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{c \in C \\ c \neq w \\ c \geq 1}} Z_{cw} = 1 * (1 - IP_w) \quad \forall w \in C/w \geq 1 \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{c \in C \\ c \neq w \\ c \geq 1}} Z_{wc} = 1 * (1 - FP_w) \quad \forall w \in C/w \geq 1 \quad (8)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{\substack{c \in C \\ c \neq w}} X_{vcw} = 1 \quad \forall w \in C/w \geq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{\substack{c \in C \\ c \neq w}} X_{vcw} \leq 1 \quad \forall v \in V, \forall w \in C/w = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{\substack{w \in C \\ w \geq 1}} X_{v0w} \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (11)$$

$$\sum_{\substack{c \in C \\ c \neq h}} X_{vch} - \sum_{\substack{w \in C \\ w \neq h}} X_{vhw} = 0 \quad \forall v \in V, \forall h \in C \quad (12)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{\substack{w \in C \\ w \geq 1}} U_c * X_{vcw} \leq Cap \quad \forall v \in V \quad (13)$$

$$B_{v0} \geq WT_{vc} + TCarga_v \quad \forall v \in V, \forall c \in C/c \geq 1 \quad (14)$$

$$WT_{vc} \geq (I_c + Proce_c) - (1 - Y_{vc}) * M \quad \forall v \in V, \forall c \in C/c \geq 1 \quad (15)$$

$$WT_{vc} \leq Y_{vc} * M \quad \forall v \in V, \forall c \in C/c \geq 1 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \sum_{v \in V} Y_{vc} &= 1 & \forall c \in C / c &\geq 1 & (17) \\ Y_{vw} &= \sum_{\substack{c \in C \\ c \neq w}} X_{vcw} & \forall v \in V, \forall w \in C / w &\geq 1 & (18) \\ B_{vc} &\geq A_{vc} + (TS_c + TD_c) * Y_{vc} & \forall v \in V, \forall c \in C / c &\geq 1 & (19) \\ A_{vc} &\leq Y_{vc} * M & \forall v \in V, \forall c \in C & & (20) \\ A_{vw} &\geq TV_{cw} + B_{vc} - M * (1 - X_{vcw}) & \forall v \in V, \forall c \in C, \forall w \in C & & (21) \\ TCarga_v &= \sum_{c \in C} TC_c * Y_{vc} & \forall v \in V & & (22) \\ T_c &\geq A_{vc} - d_c & \forall v \in V, \forall c \in C & & (23) \\ T_c &\geq 0 & \forall c \in C & & (24) \end{aligned}$$

Estas restricciones buscan garantizar que: El tiempo de inicio de proceso del pedido del cliente w debe ser mayor al tiempo de inicio de proceso más el tiempo de proceso del pedido del cliente c siempre y cuando el pedido del cliente c preceda al pedido del cliente w (2). Si un pedido no es el primero ni el último en ser procesado debe entonces encontrarse antes y después de otro pedido (3). Solo un pedido debe ser el último en procesarse (4). Solo un pedido debe ser el primero en procesarse (5). Un pedido puede ser el primero o el último en ser procesado (6). Si un pedido c es el primero en procesarse entonces no tiene precedencia (7). Si un pedido es el último en procesarse no se puede procesar ninguno otro pedido (8). Todos los clientes deben ser visitados (9). Todos los vehículos deben volver a la bodega de la empresa ($c=0$) al finalizar la entrega de pedidos (10). Cada vehículo debe empezar su recorrido en la bodega de la empresa (11). Si un vehículo v va desde el cliente c hacia el cliente h , posteriormente deberá iniciar su recorrido desde el cliente h hacia otro cliente w (12). No se puede superar la capacidad de carga de los vehículos (13). El tiempo de salida de cada vehículo de la bodega de la empresa debe ser mayor al tiempo de carga de los pedidos al camión y el tiempo en que sale de proceso el ultimo pedido de los que van ese camión (14). El tiempo en el que el pedido del cliente c está listo para cargarse en el vehículo v corresponde al tiempo de inicio de procesamiento más el tiempo de procesamiento del pedido del cliente c , solo si el vehículo v lleva el pedido del cliente c (15). El tiempo en el que el pedido c está listo para cargarse al vehículo toma valores solo si ese vehículo lleva el pedido del cliente c (16). Cada pedido c debe ir en solo un vehículo (17). Si el pedido del cliente c va en el vehículo v entonces el vehículo debe llegar al cliente c desde cualquier otro cliente w (18). El tiempo de salida del vehículo v del cliente c debe ser mayor a la hora de llegada más el tiempo de descarga y el tiempo de servicio de ese cliente (19). El tiempo de llegada del vehículo v al cliente c toma valores solo si ese vehículo lleva el pedido de ese cliente (20). Si el vehículo v va del cliente c al cliente w entonces el tiempo de llegada del vehículo v al cliente w debe ser mayor al tiempo de viaje entre el cliente c y el cliente w y la hora de salida del vehículo v del cliente c (21). El tiempo de carga del vehículo v es igual a la suma de los tiempos de carga de los pedidos que van en ese camión (22). **La tardanza del pedido de cliente c es mayor o igual al tiempo de llegada del vehículo v al cliente c menos la hora límite de entrega del cliente c . La tardanza debe tomar valores mayores o iguales a 0 (23).**

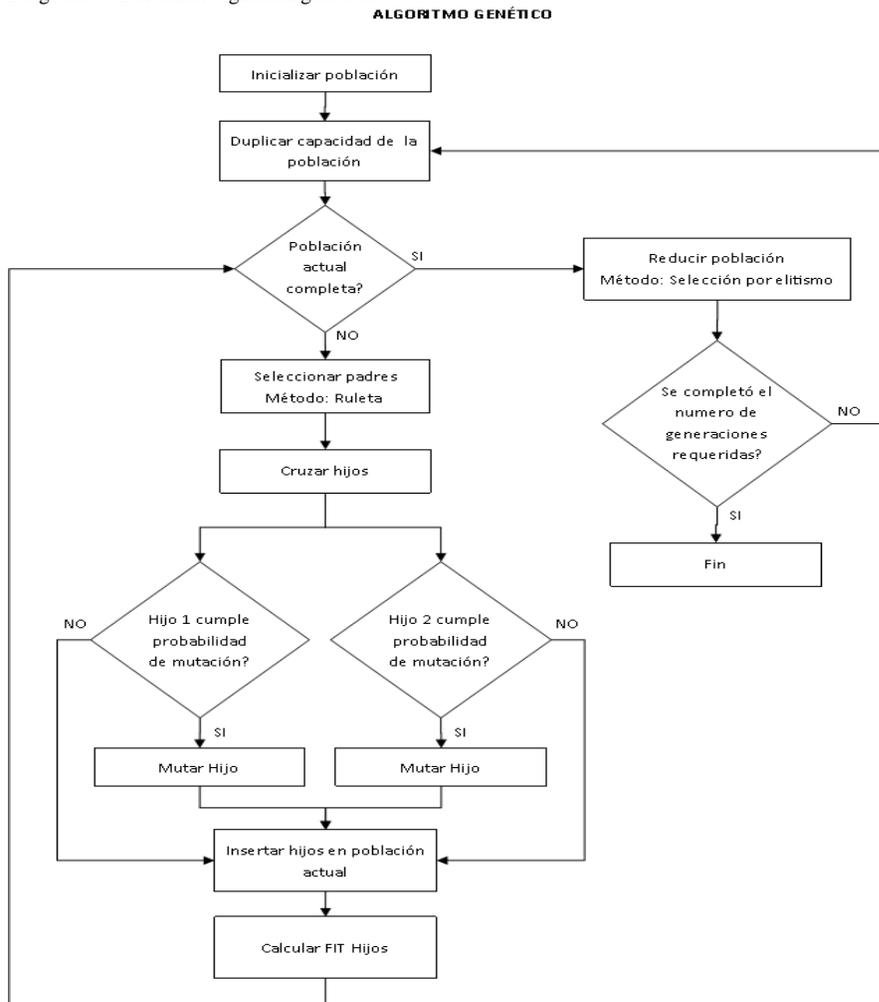
4.2. Identificación y desarrollo de la meta-heurística

La selección de la Meta-heurística a desarrollar se realizó por medio de la identificación de los métodos de solución implementados por diferentes autores para problemas similares. La tabla 2 presentada en los antecedentes resume la información recolectada, en la cual se evidencia que el 71% de los autores utilizaron un algoritmo genético para solucionar problemas que involucraban los procesos de programación de la producción y ruteo de vehículos de manera integrada, **lo cual permite tener una mayor disponibilidad de información sobre la cual basar el modelamiento y la solución de posibles errores.**

Según lo anterior, y teniendo en cuenta los criterios de selección establecidos para la elección de la meta-heurística, se decidió implementar un algoritmo genético para dar solución al problema en estudio.

Una vez establecidos los parámetros, variables y restricciones por medio del modelo matemático y la recolección de datos, se llevó a cabo el diseño de la técnica de solución en la herramienta Visual Basic For Application de Microsoft Excel. En el diagrama 4 se representa el desarrollo del algoritmo genético planteado.

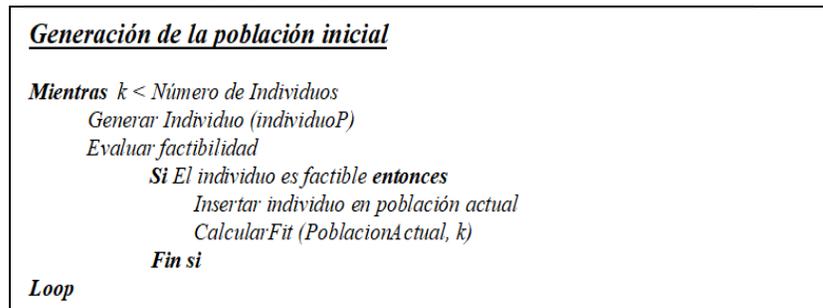
Diagrama 4. Desarrollo algoritmo genético.



Fuente: Construcción de los autores.

El pseudocódigo de la estructura principal del algoritmo genético diseñado se presenta de la siguiente manera:

Ilustración 1. Pseudocódigo algoritmo genético.



Generación de nuevas poblaciones

Establecer probabilidad de mutación

Para Cada generación

Para $i = 1$ To NumIndividuos / 2

 Seleccionar Padres (Papa1, Papa2, PoblacionActual)

 Cruzar (PoblacionActual, Papa1, Papa2, H1, H2)

 Reparar el Hijo 1 (H1)

 Reparar el Hijo 2 (H2)

 Generar probabilidad de mutacion hijo 1

Si El hijo 1 cumple la probabilidad de mutacion **Entonces**

 Mutacion (PoblacionActual, H1)

 ReparacionHijo (H1)

Fin si

 Generar probabilidad de mutacion hijo 2

Si El hijo 2 cumple la probabilidad de mutacion **Entonces**

 Mutacion (PoblacionActual, H2)

 ReparacionHijo (H2)

Fin si

 Insertar hijos en población actual

Siguiente i

Reduccion (PoblacionDoble, PoblacionActual)

Siguiente Generación

Fuente: Construcción de los autores.

a. Generación de la población inicial

Cada uno de los individuos presentes en el algoritmo genético presenta un cromosoma el cual contiene la información del orden de procesamiento de pedidos y el ruteo de vehículos de la siguiente manera:

Ilustración 2. Cromosoma.

M	2	5	4	7	1	3	6	2								V1	
								5	7	3							V2
								1	6								
								4									V4
	Programación de pedidos							Ruteo de vehículos									

Fuente: Construcción de los autores.

En la ilustración 2 se presenta el orden de cada uno de los pedidos tanto en la máquina como en los diferentes vehículos. Así mismo, es necesario tener en cuenta que el número de pedidos varía cada día, así como la cantidad de vehículos disponibles para la distribución.

Para la construcción de los individuos que conforman la población inicial, se ordenaron aleatoriamente los pedidos para ser procesados y posteriormente fueron ubicados en cada uno de los vehículos construyendo la ruta que se deberá ejecutar según la ubicación del cliente correspondiente a cada pedido. Lo anterior se desarrolló asegurando que se cumplieran las restricciones de factibilidad las cuales son la capacidad de carga del vehículo y la distribución de todos los pedidos. Adicionalmente se debe tener en cuenta que cada vehículo iniciara su ruta con todos los pedidos asignados desde Agrobels S.A.S y solo regresará a esta cuando se haya visitado la totalidad de los clientes asignados.

b. Operadores genéticos

Para llevar a cabo la generación de nuevas generaciones se presentaron las siguientes etapas.

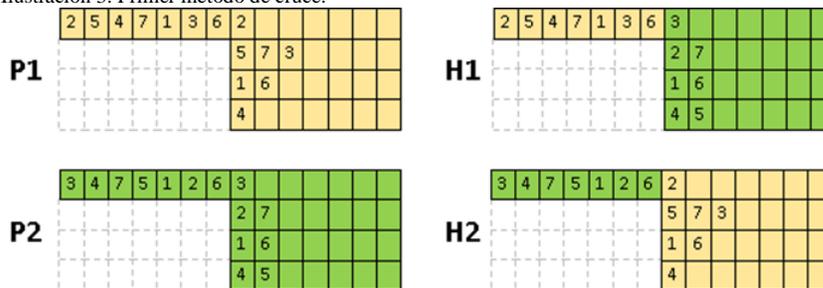
1) Cruce

Una vez generada la población inicial, se implementó el método de Ruleta para seleccionar los padres a ser cruzados. Posteriormente se plantearon dos métodos de cruce, ambos con la misma probabilidad de ocurrencia.

Primer Método:

En este método, el orden de producción del papa 1 fue heredado al hijo 1 mientras que el ruteo de los vehículos con los diferentes pedidos se heredó al hijo 2. En el caso del papa 2 ocurrió lo contrario, el hijo 2 heredó su orden de procesamiento mientras que el ruteo de vehículos correspondió al hijo 1. La ilustración 3 ilustra la descripción de este procedimiento.

Ilustración 3. Primer método de cruce.



Fuente: Construcción de los autores.

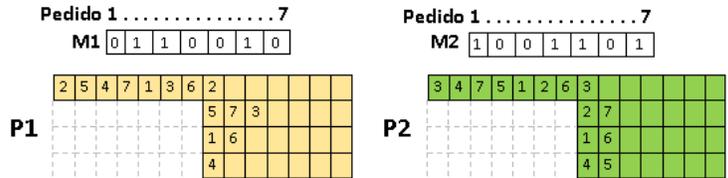
Segundo Método:

Para el desarrollo del segundo método se construyeron 2 máscaras binarias, cada una con cardinalidad igual al número de pedidos. El cruce consistió en identificar el número existente en cada posición de la máscara binaria (1 o 0), la cual representa los diferentes pedidos, y así mismo asignar dicho pedido al hijo correspondiente. Como ejemplo de esto, para un caso de 7 pedidos, se generan las siguientes máscaras binarias: M1(0,1,1,0,0,1,0) y M2(1,0,0,1,1,0,1). Cabe aclarar que ambas máscaras deben tener valores diferentes para la misma posición y una vez generadas, se seguirán los siguientes pasos.

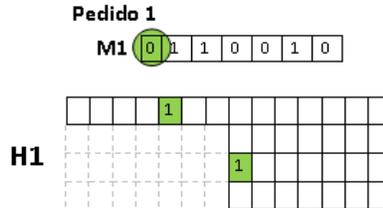
- 1) Recorrer las posiciones de ambas máscaras e identificar el número que posee en cada posición.
- 2) Si la máscara 1 posee el número 1 en una posición, el pedido de la correspondiente posición se ubica en el hijo 1 en las mismas casillas a las que pertenece en el papa 1, por el contrario, si el numero en dicha posición es 0, el pedido de la casilla se replica en el hijo 1 en la misma ubicación donde se encontraba en el papa 2.

De forma similar ocurre con la máscara 2, la cual guarda relación con el hijo 2. Si la máscara 2 posee el número 1 en una posición, la ubicación del pedido asignado a esa posición sea heredada del papa 1, por el contrario, será heredada del papa 2.

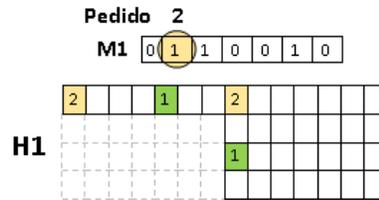
[A continuación, se presenta el desarrollo detallado de este método.](#)



- 1) Dado que la posición 1 de la máscara binaria 1 posee un 0, para el hijo 1 el pedido 1 será heredado del padre 2 de la siguiente manera:



- 2) Debido que la posición 2 de la máscara binaria 1 posee un 1, para el hijo 1 el pedido 2 será heredado del padre 1 de la siguiente manera:



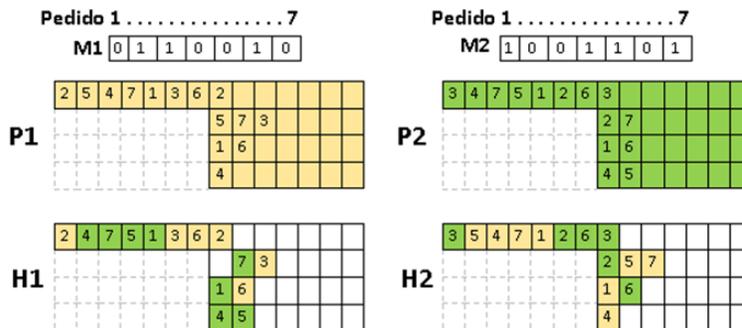
- 3) De la forma mencionada en los pasos 1 y 2 ocurre para el resto de los pedidos. Cabe aclarar que si una posición a asignar se encuentra ocupada, se ubicará el pedido en la siguiente posición disponible. En el caso de los vehículos, el pedido se ubicará en la siguiente posición disponible que respete la capacidad de los mismos

En el caso del hijo 2 el procedimiento se presenta de la misma manera teniendo en cuenta la máscara binaria número 2.

Como se puede evidenciar en el método de cruce expuesto anteriormente, no se presentan repeticiones en los pedidos asignados ni algún tipo de infactibilidad que requiera llevar a cabo un proceso de reparación.

La ilustración 4 muestra el resultado del presente método de cruce.

Ilustración 4. Segundo método de cruce.



Fuente: Construcción de los autores.

Para asegurar la factibilidad del presente método se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Si la posición en la que se insertará un trabajo en la máquina se encuentra ocupada, el trabajo se ubicará en la siguiente posición que se encuentre libre.
- Si la capacidad restante de un vehículo es insuficiente para insertar el trabajo asignado, el trabajo se ubicará en el siguiente vehículo con capacidad disponible.
- Si la posición en la que se insertará el trabajo en un vehículo se encuentra ocupada, el trabajo se ubicará en la siguiente posición que se encuentre libre.
- Si en la solución final existen posiciones libres en la máquina o el vehículo antes de una posición ocupada, las posiciones libres se eliminarán.

2) Mutación

Una vez llevado a cabo el cruce, cada uno de los hijos es sometido a una probabilidad de mutación la cual se puede presentar de dos formas distintas, la primera de ellas consiste en construir un cromosoma totalmente aleatorio con una probabilidad de ocurrencia de $1/J$ (J : Número de trabajos), la segunda posee una probabilidad de $(J-1)/J$ de ser seleccionada y su desarrollo se describe a continuación:

1. Generar un número aleatorio el cual representa el trabajo a modificar.
2. Generar un número aleatorio que determina si la mutación se llevara a cabo en la programación de la producción o en el ruteo de los vehículos.

La probabilidad de ocurrencia de cada uno de los métodos de mutación mencionadas anteriormente dependerá de la proporción entre el número de máquinas y vehículos existentes, por lo tanto, la probabilidad de que la mutación se presente en la programación de la producción corresponde a $1/(1+V)$ siendo 1 el número de máquinas y V el número de vehículos disponibles. Así mismo la probabilidad de que el ruteo de vehículos presente una mutación será de $V/(1+V)$.

- Mutación generada en la programación de la producción:

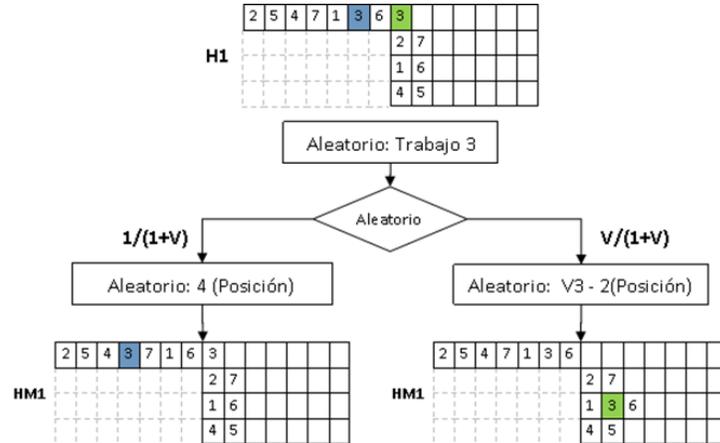
Una vez se decide que la mutación se llevará a cabo en la programación de la producción se genera un número aleatorio que determina la posición donde será insertado el trabajo. Una vez ubicado, los trabajos adyacentes se trasladarán una posición en la dirección correspondiente.

- Mutación generada en el ruteo de vehículos:

Para llevar a cabo la mutación en el ruteo de vehículos se generan dos números aleatorios los cuales determinan el vehículo y el turno en el vehículo en el cual será ubicado el trabajo seleccionado con anterioridad.

Si la posición seleccionada se encuentra ocupada, el pedido ubicado en ella deberá ser trasladado a la siguiente posición, en el caso en que la capacidad del vehículo sea insuficiente, el trabajo se insertará en el siguiente vehículo con capacidad adecuada. La ilustración 5 representa la metodología de mutación explicada anteriormente.

Ilustración 5. Mutación del algoritmo genético.



Fuente: Construcción de los autores.

3. Selección

El método para la construcción de una nueva generación se basó en la selección por elitismo la cual conserva a los mejores individuos de cada generación permitiendo que la calidad de la solución no disminuya al construir nuevas generaciones.

5. Componente de Diseño en ingeniería.

El diseño principal de esta propuesta es un aplicativo basado en la implementación del método de solución, para realizar la programación de los pedidos y el ruteo de vehículos. Teniendo en cuenta la norma ISO 9126 para el desarrollo del software.

5.1 Declaración de Diseño

La propuesta desarrollada en este proyecto se encaminó a diseñar una técnica de solución para la programación de la producción y ruteo de vehículos en la línea de productos cítricos de la empresa Agrobel S.A.S. Para esto se tuvieron en cuenta variables como horas de entrega exigidas por los clientes y demanda determinística. Por medio de los resultados se espera que la solución planteada arroje una mejora en el desempeño de políticas a nivel operacional relacionadas con la disminución en la tardanza total. Finalmente, el impacto de la propuesta fue medido y comparado con la situación actual de la empresa.

5.2 Proceso de Diseño y cumplimiento del estándar

Se diseñó un aplicativo en la herramienta VBA (Visual Basic for Applications) en Excel para la puesta en marcha de la solución propuesta. Este aplicativo fue dividido en tres fases para su correcta implementación.

1) Interfaz de entrada.

Como se muestra en la ilustración 6, la interfaz de entrada busca recolectar la información necesaria referente a los pedidos y al número de camiones disponibles mediante la estructura de un formulario, para garantizar la fiabilidad y funcionalidad de esta etapa se presentaron las siguientes condiciones:

- a) De acuerdo con el número de productos pedidos, se activa el mismo número de casillas para digitar información del nombre del producto y la cantidad solicitada.
- b) Manejo de listas desplegables para elección del cliente y productos existentes dentro del portafolio ofrecido por Agrobel SAS.

- c) El formulario notifica errores en el proceso de registro mediante avisos que informan el tipo de error, en caso de no ser corregidos la información correspondiente no será registrada.
- d) Se solicita el número de camiones disponibles una vez registrados todos los pedidos a procesar.

Ilustración 6. Interfaz de entrada.

The screenshot shows a web-based input form with three main columns: 'Cliente', 'Producto', and 'Cantidad'. Each column contains a series of input fields. The 'Cantidad' column has a vertical scroll bar. Below the columns, there is a section titled 'Cantidad de productos' with a small grid of input fields and a vertical scroll bar. At the bottom left, there are two buttons: 'RegistrarPedido' and 'Salir'.

Fuente: Construcción de los autores.

1) Procesamiento- Algoritmo genético

La información recolectada de la interfaz de entrada se almacena en una tabla dinámica que permite la lectura eficiente de la información, así mismo permite su portabilidad y facilita el análisis de la información ingresada. En esta etapa los datos registrados se codifican para que puedan ser interpretados por el algoritmo genético diseñado.

Otros parámetros necesarios para la ejecución de la meta-heurística son:

- a) Datos de clientes (Horas de entrega y tiempos de desplazamiento entre clientes).
- b) Datos internos (Tiempos de procesamiento, carga, descarga, etc.).
- c) Estandarización de cantidades convertidas en kilos.
- d) Selección de tipo de producto clasificado en cítrico y no cítricos.

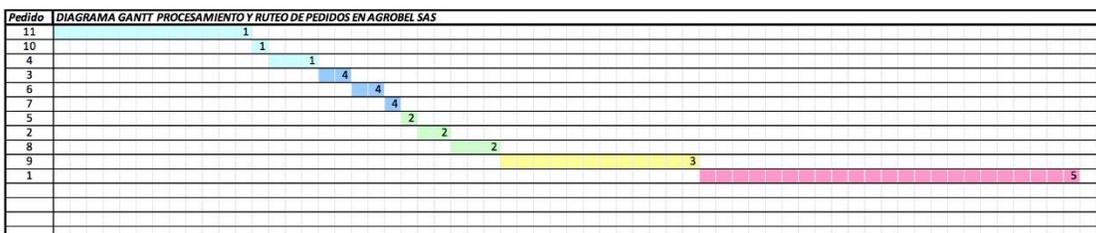
2) Interfaz de Salida

Finalmente, se presentan los resultados mediante un diagrama de Gantt y una tabla resumen como se muestra en la ilustración 7. El primero representa de manera sencilla el orden en el cual deben ser procesados los pedidos y el camión donde deben ser cargados. La segunda presenta de manera detallada el registro por pedido de los tiempos de proceso, finalización, salida de Agrobels S.A.S y llegada al cliente, así como el camión en el cual debe ser despachado.

Ilustración 7. Interfaz de salida.



Tardanza total		793,5678848			
Pedido	Tiempo de proceso	Tiempo de finalización	Tiempo de llegada al cliente	Vehículo	Tiempo salida Agrobels
1	220,752	914,1752	993,88312	5	942,88312
2	18,6	559,2272	738,0469039	2	576,4554
3	17,64	516,0312	671,9818819	4	549,93296
4	22,32	498,3912	522,2832	1	501,2832
5	5	540,6272	657,7054195	2	576,4554
6	14,88	530,9112	748,7258116	4	549,93296
7	4,716	535,6272	580,93296	4	549,93296
8	15,252	574,4792	592,4554	2	576,4554
9	118,944	693,4232	754,49368	3	713,49368
10	4,62	476,0712	582,1124969	1	501,2832
11	111,4512	471,4512	686,447868	1	501,2832



Los numeros al final de cada color representan el vehiculo

Fuente: Construcción de los autores.

Los criterios de usabilidad, mantenibilidad y portabilidad se validaron de la siguiente manera:

Las personas que harán uso del aplicativo encontraron que este es sencillo de usar y la información presentada permite leer los resultados con facilidad. Adicionalmente, se evidencio que se requiere poco esfuerzo por parte de la empresa para mantener su uso y las fallas que pueden ocurrir son eliminadas desde la fase 1 mediante el buen registro de la información. Para finalizar, se realizaron pruebas al aplicativo, ejecutándolo en varias plataformas y/o sistemas operativos que no presentaron falla alguna.

5.3 Requerimientos de desempeño

La técnica de solución estará sujeta a los siguientes requerimientos:

- La capacidad de los camiones es homogénea.
- Existe disponibilidad de producto previo al procesamiento en bodega.
- Deben tenerse en cuenta los tiempos de vida útil del producto.

Según el jefe de bodega de la compañía (Nelson Casallas) un producto de la clasificación estudiada (cítricos) posee un tiempo de descomposición posterior a su procesamiento de aproximadamente cinco días.

Debido a lo anterior se considera que el tiempo de vida útil del producto no debe ser un requerimiento de desempeño debido a que la materia prima disponible para ser procesada posee una calidad adecuada y el tiempo que transcurre entre el inicio del procesamiento y la entrega al cliente no supera los cinco días.

- El incumplimiento de las horas de entrega es penalizable.
- Cuando el trabajo termina en una máquina se dirige a la siguiente disponible.

Una vez se da inicio al procesamiento de la materia prima, esta es trasladada en una banda transportadora a través de las diferentes etapas del proceso (lavado, desinfección, clasificación y encerado) y el producto pasa por cada una de estas sin detenerse, por lo cual se considera que, aunque existe presencia de cuatro procesos,

todos se desarrollan en una sola máquina. Por lo anterior se considera que el requerimiento planteado no es necesario.

Por otro lado, se realizará una comparación entre los resultados arrojados por la propuesta y la situación actual de la empresa, lo que permitirá medir la calidad de la solución encontrada. Aspectos adicionales a tener en cuenta:

- El tiempo de corrida de la meta-heurística propuesta no debe superar los 60 minutos.
- El modelo computacional debe proporcionar una solución factible para el problema encontrado.
- El despacho de los productos debe realizarse bajo una fecha establecida dependiendo de los requerimientos del cliente.
- El aplicativo debe disponer de una interfaz amigable con el usuario con el fin de facilitar el ingreso de los datos, el cálculo y posterior interpretación de los resultados.

5.4 Pruebas de rendimiento

Con el fin de garantizar que el aplicativo diseñado cumpla con los requerimientos de desempeño deseados, se realizaron pruebas de comparación con cinco instancias adaptadas, las cuales se solucionaron por medio del modelo matemático para evaluar su desempeño respecto a las soluciones obtenidas con el algoritmo genético. Adicionalmente, se planteó una solución para diez instancias reales ejecutando el modelo matemático durante 7.200 segundos, esto para asegurar que el algoritmo genético arrojará soluciones iguales o mejores a las del modelo matemático.

5.5 Restricciones

- La principal restricción del proyecto corresponde al suministro y pertinencia de la información de la empresa ya que actualmente no cuenta con bases de datos para consignarla ni tampoco con registros organizados. Así mismo, la información es consignada de manera física, lo cual conlleva a falencias en su verificación, así como pérdidas en determinados lapsos de tiempo.
- La empresa no está dispuesta a adquirir ningún software o programa externo para implementar la propuesta.
- El diseño del aplicativo únicamente involucra los productos críticos en su análisis.

Debido a las restricciones nombradas anteriormente se desarrollaron diferentes alternativas para disminuir su impacto negativo, por tal motivo se llevó a cabo la recolección de los datos necesarios en un horizonte de tiempo actual, con lo cual se garantizó la fiabilidad de los mismos, adicionalmente el aplicativo fue diseñado en la herramienta Microsoft Excel lo cual permite que la compañía no deba incurrir en costos adicionales para su adquisición y uso. En cuanto a los productos involucrados en el análisis, se debe tener en cuenta que cada pedido también posee productos de otras clasificaciones, los cuales deben ser trasladados en los vehículos, es por esto que el aplicativo tiene en cuenta los tiempos de carga y descarga, así como el volumen requerido para el transporte de estos.

6. Resultados

6.1. Resultados de pruebas de rendimiento

En cuanto a las pruebas de rendimiento realizadas respecto al modelo matemático, se obtuvieron los siguientes resultados:

Por medio de la comparación de las cinco pruebas realizadas por medio de instancias adaptadas se determinó que el 80% lograban obtener la misma solución que el modelo matemático, por otro lado, el 20% estuvo alejado de la solución del modelo matemático en un 3,56%. (Ver tabla 6).

Tabla 6. Resultados de pruebas con instancias adaptadas

<i>Instancias prueba</i>	<i>Pedidos</i>	<i>Camiones</i>	<i>A. Genético (min)</i>	<i>Valor óptimo (min)</i>	<i>% Diferencia óptimo vs A. Genético</i>
27/02	4	4	73,7428	73,7428	0,00%
13/03	4	4	89,46556	89,46556	0,00%
09/02	6	5	0	0	0,00%
08/03	4	3	66,8324	64,53404	3,56%
15/03	5	4	19,17544	19,17544	0,00%

Fuente: Construcción de los autores.

Adicionalmente, respecto a las soluciones obtenidas mediante las pruebas con 10 instancias reales en comparación con el modelo matemático, el 80% de los resultados alcanzados por medio del algoritmo genético lograron obtener el mismo resultado, el 10% obtuvieron mejores soluciones y el 10% restante obtuvieron soluciones de menor calidad. En la Tabla 7 es posible evidenciar dichos resultados.

Tabla 7. Resultados de pruebas con instancias reales.

<i>Fecha</i>	<i>Modelo (min)*</i>	<i>Tiempo de ejecución modelo (seg)</i>	<i>Cota inferior (min)**</i>	<i>Diferencia resultado - cota inferior (min)</i>	<i>Genético (min)</i>	<i>Tiempo de ejecución Genético (seg)</i>	<i>Diferencia (%)</i>
09-02-2018	47,69	7200	0	47,69	47,69	1,82	0,000%
14-02-2018	793,04	7200	28,91	764,13	755,13	3,88	4,781%
27-02-2018	183,66	7200	165,30	18,35	183,66	4,25	0,000%
08-03-2018	60,38	7200	58,48	1,90	60,38	3,92	0,000%
13-03-2018	158,71	7200	142,88	15,83	159,72	3,48	-0,640%
15-03-2018	59,25	7200	0	59,25	59,25	4,28	0,000%
24-03-2018	159,72	7200	144,26	15,45	159,72	3,38	0,000%
02-04-2018	237,36	7200	213,63	23,72	237,36	3,28	0,000%
09-04-2018	356,51	7200	0	356,51	356,51	4,76	0,000%
17-04-2018	116,84	7200	0	116,84	116,84	5,55	0,000%

* Valor reportado por el modelo matemático después del tiempo de ejecución

**Cota inferior calculada por el solver después del tiempo de ejecución (7.200 segundos)

Fuente: Construcción de los autores.

Es necesario aclarar que, al transcurrir 7.200 segundos de ejecución del modelo matemático, ninguna de las instancias logró alcanzar la solución óptima, por lo cual se presentan resultados del método de solución propuesto capaces de superar la calidad de dichas soluciones.

Como resultado del análisis desarrollado anteriormente, es posible evidenciar que el método de solución propuesto logra alcanzar resultados óptimos gracias a la comparación realizada respecto al modelo matemático y adicionalmente arroja soluciones que garantizan su factibilidad.

6.1. Resultados de la técnica de solución diseñada.

Con el fin de conocer el impacto obtenido por medio del método de solución diseñado, se realizaron pruebas para los 30 días seleccionados, comparando los resultados en cuanto a tardanza y tiempo de corrida respecto a las condiciones actuales.

Tabla 8. Resultados de la técnica de solución diseñada.

<i>Fecha</i>		<i>Heurística Agrobela S.A.S</i>	<i>Algoritmo Genético</i>	

	N Pedidos	Tardanza (min)	Tiempo de ejecución (seg)	Tardanza (min)	Tiempo de ejecución (seg)	Porcentaje de mejora Modelo propuesto
09-02-2018	7	422,06	0,58	47,69	1,82	88,70%
14-02-2018	9	1.950,92	0,13	755,13	3,88	61,29%
16-02-2018	11	0,00	1,33	0,00	4,03	0,00%
19-02-2018	9	1.654,42	0,45	441,22	6,5	73,33%
26-02-2018	9	1.169,31	0,60	377,01	5,86	67,76%
27-02-2018	6	833,85	1,43	183,66	4,25	77,97%
01-03-2018	11	1.312,32	1,59	509,66	5,73	61,16%
05-03-2018	7	254,55	0,12	0,37	0,65	99,85%
07-03-2018	6	50,32	0,55	0,16	3,3	99,67%
08-03-2018	6	580,29	0,48	60,39	3,92	89,59%
09-03-2018	7	828,78	0,60	270,59	4,2	67,35%
12-03-2018	6	1.169,31	0,35	0,15	1,23	99,99%
13-03-2018	6	167,15	0,36	159,72	3,48	4,44%
15-03-2018	7	404,07	0,27	59,26	4,28	85,34%
17-03-2018	8	2.430,63	0,55	798,71	3,96	67,14%
21-03-2018	6	67,15	0,22	0,00	3,65	100,00%
22-03-2018	9	3.482,83	1,02	1032,24	5,56	70,36%
24-03-2018	6	547,34	1,13	159,73	3,38	70,82%
26-03-2018	6	146,64	0,81	0,00	3,5	100,00%
28-03-2018	9	2.221,60	0,55	764,95	5,49	65,57%
02-04-2018	6	434,56	0,46	237,36	3,28	45,38%
03-04-2018	6	0,00	0,22	0,00	10,76	0,00%
04-04-2018	6	138,61	1,44	0,07	3,68	99,95%
05-04-2018	8	455,34	0,55	415,39	4,83	8,78%
07-04-2018	8	1.119,92	0,33	358,54	5,48	67,99%
09-04-2018	7	1.307,19	0,50	356,51	4,76	72,73%
11-04-2018	7	793,48	0,60	326,54	6,13	58,85%
13-04-2018	7	534,21	0,42	171,09	4,78	67,97%
16-04-2018	7	936,79	0,37	114,73	14,3	87,75%
17-04-2018	8	576,07	0,60	116,85	5,55	79,72%
					Porcentaje promedio de mejora	67,98%

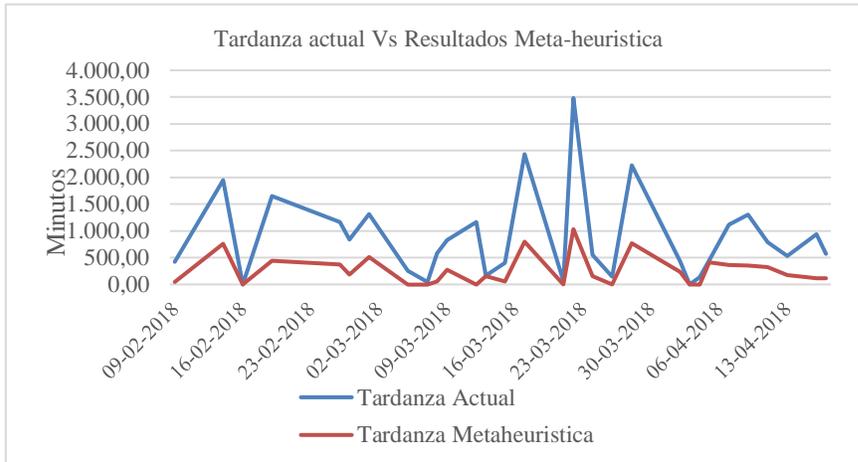
Fuente: Construcción de los autores.

De acuerdo a la tabla 8 el porcentaje promedio de mejora diaria es del 67,98%. Adicionalmente la tardanza promedio por pedido se redujo en un 75%, pasando de 2 horas a 0,5 horas mediante el algoritmo genético,

también es importante resaltar que la solución propuesta logra mejorar o igualar la solución actual en la totalidad de los casos (ver gráfica 2).

Por otro lado, el tiempo máximo de ejecución de la meta-heurística no superó los 60 minutos. En la tabla 8 se puede evidenciar que los valores oscilan entre 0,65 y 14,3 segundos.

Gráfica 2. Tardanza actual Vs Resultados Meta-heurística diseñada.



Fuente: Construcción de los autores.

Con respecto a la disminución del porcentaje de devoluciones, se debe tener en cuenta que la reducción de la tardanza implica una reducción del mismo. Lo anterior debido a que según Nelson Casallas (Jefe de bodega) el 80% de las devoluciones se presentan debido al incumplimiento en tiempos de entrega.

Por otro lado, la reducción en el porcentaje de demanda insatisfecha se ve afectado de igual manera por la disminución en la tardanza, debido a que al optimizar la programación de la producción es posible que la mayor cantidad de pedidos se procesen en su totalidad.

Teniendo en cuenta la pregunta de investigación planteada y según lo anterior, la reducción en la tardanza se ve directamente relacionada con la disminución en el porcentaje de devoluciones y demanda insatisfecha lo cual permite disminuir el impacto negativo de las tres problemáticas evidenciadas.

6.2. Medición del Impacto

En cuanto al impacto generado por la implementación del aplicativo propuesto se pueden considerar los siguientes aspectos:

Al incrementar el cumplimiento de las horas de entrega de cada pedido y reducir los niveles de demanda insatisfecha, se logra fortalecer las relaciones con los clientes y así garantizar futuras relaciones con los mismos. Al optimizar la programación de la producción se logra la reducción de tiempos ociosos lo cual permite disminuir los costos por capacidad instalada que no era usada en su totalidad, adicionalmente es posible reducir las horas extras de trabajo requeridas para finalizar pedidos que no eran programados adecuadamente, lo cual también se ve reflejado en la reducción de dichos costos.

Al llevar a cabo la optimización en el ruteo de vehículos, es posible reducir el número de camiones a usar lo que conlleva a minimizar los costos de su operación, así mismo influye en el impacto negativo generado al medio ambiente debido a que un mínimo de vehículos operando permite reducir las emisiones y consecuencias negativas al entorno.

Gracias a la funcionalidad y usabilidad de la interfaz diseñada además de su rápida generación de resultados el encargado de realizar la programación de pedidos no requerirá invertir una gran cantidad de tiempo en esta

tarea y adicionalmente se podrá planificar la operación con anterioridad reduciendo la probabilidad de errores en el proceso.

7. Conclusiones y recomendaciones.

El presente trabajo propone el diseño de una técnica de solución integrado para la programación de las actividades de procesamiento de los pedidos y ruteo de vehículos utilizados para la distribución de productos en la comercializadora agrícola Agrobela S.A.S. El interrogante surgió luego de identificar las tres principales problemáticas que se presentan frecuentemente en la organización: demoras durante el procesamiento y permanencia en bodega previa al despacho, limitaciones en capacidad de procesamiento y la inadecuada priorización de los pedidos, las cuales conllevan al deterioro de la calidad del producto, al incumplimiento de los requerimientos de los clientes e igualmente a la falta de disponibilidad de los camiones requeridos para la distribución.

Debido a la complejidad del problema se decidió abordarlo haciendo uso de una meta-heurística para la elaboración de la técnica de solución. En este sentido se empleó un algoritmo genético con el fin de obtener soluciones veraces que cumplan con las restricciones y requerimientos propios de la empresa. En este sentido se evaluó el desempeño de la técnica de solución con respecto al modelo matemático. Por tanto, es evidente que el 80% de las soluciones obtenidas con instancias pequeñas e instancias reales alcanzan a las arrojadas por el modelo matemático, **cabe aclarar que el modelo matemático planteado logró arrojar soluciones para instancias pequeñas, por el contrario, en el caso de las instancias reales, el modelo matemático no logró alcanzar la solución óptima. Es por esto que es posible categorizar el problema como NP-Hard.**

Posteriormente se comparó la técnica de solución propuesta con la política de producción y ruteo actual de la empresa. Gracias a la técnica de solución es posible reducir la tardanza promedio en un 75%, pasando de 2 horas a 0,5 horas. Así mismo el porcentaje de mejora de la técnica de solución contra la situación actual de la empresa es del 67,98%. Por tanto, es posible evidenciar que la técnica de solución propuesta logra alcanzar resultados óptimos gracias a la comparación realizada respecto al modelo matemático y la política actual de la empresa.

En cuanto a las recomendaciones que se consideran pertinentes para la implementación adecuada de la propuesta realizada y en general para el buen funcionamiento de los procesos de la compañía se encuentran:

- Implementar un sistema de información que permita recolectar la información necesaria de forma veraz y oportuna, esto con el fin de optimizar el control de los procesos, reducir errores y garantizar la calidad de la información para futuros estudios y propuestas de mejora en la compañía.
- Llevar a cabo la capacitación a todos los empleados de la compañía respecto a cualquier cambio realizado en los procesos, y en especial en la implementación de la propuesta de mejora planteada con el fin de obtener el mayor beneficio y alinear cada una de las actividades hacia el mismo objetivo.
- Fortalecer las relaciones con los proveedores actuales que presenten resultados favorables, con el fin de asegurar la calidad y tiempo de entrega del producto y así minimizar el riesgo de fallas que impacten negativamente el desarrollo de la planeación obtenida por medio del aplicativo diseñado.
- Ampliar el horizonte de análisis, teniendo en cuenta que en ocasiones existen pedidos que son solicitados en el transcurso del día para el cual el cliente requiere su entrega y su procesamiento y distribución afectan las operaciones planeadas con anterioridad.
- **Profundizar el caso de estudio analizando las posibles soluciones que se puedan presentar en el caso de que existan eventualidades que obstruyan la planeación establecida mediante el método de solución planteado.**
- **Se recomienda realizar pruebas del método de solución propuesto mediante la ejecución de instancias de mayor tamaño para asegurar el desempeño de la meta-heurística.**

8. Glosario

- **Heurística:** Trata de la resolución de problemas aplicando soluciones parciales, a menudo intuitivas. Se evalúan los resultados intermedios obtenidos para aproximarse poco a poco al resultado o solución final. Algunas de las estrategias de solución de problemas consisten en: organizar, experimentar, explorar, introducir elementos auxiliares, dividir el problema, buscar regularidades y suponer el problema resuelto (Molero & Salvador, 2016).
- **Meta-heurística:** Estrategias inteligentes que permiten diseñar y mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto rendimiento (Moreno, 2004).
- **Producto perecedero:** Aquel producto cuyo estado físico empeora notablemente, su valor disminuye debido a la percepción del cliente y existe peligro referente a su disminución en funcionalidad a futuro (Belo-Filho et al., 2015).
- **Ruteo:** Conocido también como enrutamiento, consiste en determinar un conjunto de rutas al costo mínimo o la menor distancia posible en una red de nodos conectados (Pedezert Nuñez, Barreiro Piana, & Sosa Andriolo, 2000)
- **ALNS (Adaptative large neighbourhood search):** Esta meta-heurística es bien conocida por ser efectiva para problemas de enrutamiento de vehículos. El enfoque se basa en modelos y herramientas de programación lineal de enteros mixtos (Belo-Filho et al., 2015).
- **LNS (Large neighbourhood search):** Este algoritmo hace posible encontrar mejores soluciones para el problema de enrutamiento de vehículos en cada iteración (Farahani et al., 2012).
- **NP-Hard:** Problemas que no tienen algoritmos polinomiales por lo que un algoritmo que los resuelva en forma exacta puede tardar un tiempo prohibitivo (Devapriya et al., 2017).
- **IPDSP (Integrated production and distribution scheduling problem):** Problemas donde se llevan a cabo de manera integrada la programación de la producción y el ruteo de vehículos (Devapriya et al., 2017).
- **PDP-FSL (Production distribution problem-Fixed shelf life):** Problemas donde se integra la planificación de la producción y distribución con vida útil fija (Amorim et al., 2012).
- **CPLEX:** Solucionador mediante programación matemática de alto rendimiento de problemas de programación lineal, programación entera mixta y programación cuadrática (Agustina et al., 2014).
- **VRSP-CZHTW (Vehicle routing and scheduling problem model with customer zones and hard time windows):** Este problema integra el ruteo de vehículos con la programación de la producción teniendo en cuenta las zonas de los clientes y las ventanas de tiempo estrictas (Agustina et al., 2014).

Referencias

- Abraham, A. J., Kumar, K. R., Sridharan, R., & Singh, D. (2015). A genetic algorithm approach for integrated production and distribution problem doi:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.03.213>
- Agustina, D., Lee, C. K. M., & Piplani, R. (2014). Vehicle scheduling and routing at a cross docking center for food supply chains. *International Journal of Production Economics*, 152, 29-41. doi:10.1016/j.ijpe.2014.01.002
- Amorim, P., Günther, H. -, & Almada-Lobo, B. (2012). Multi-objective integrated production and distribution planning of perishable products. *International Journal of Production Economics*, 138, 89- 101. doi:10.1016/j.ijpe.2012.03.005
- Amorim, P., Meyr, H., Almeder, C., & Almada-Lobo, B. (2013). Managing perishability in production distribution planning: a discussion and review. doi:<https://doi.org/10.1007/s10696-011-9122-3>
- Arbib, C., Pacciarelli, D., & Smriglio, S. (1999). A three-dimensional matching model for perishable production scheduling. *Discrete Applied Mathematics*, 92, 1-15. doi:10.1016/S0166-218X(98)00148-6
- Beheshtiniya, M., Aarabi, A. (2017). A Genetic Algorithm for Integration of Vehicle Routing Problem and Production Scheduling in Supply Chain (Case Study: Medical Equipment Supply Chain). *Journal of Industrial Engineering*, 51(2), 147-160. doi: 10.22059/jieng.2017.62209
- Belo-Filho, M., Amorim, P., & Almada-Lobo, B. (2015). An adaptive large neighbourhood search for the operational integrated production and distribution problem of perishable products. *International Journal of Production Research*, 53(20), 6040-6058. doi:10.1080/00207543.2015.1010744
- Billaut, J. -. (2011). New scheduling problems with perishable raw materials constraints. 2011 IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETF), , 1.

- Chen, H., Hsueh, C., & Chang, M. (2009). Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products. *Computers and Operations Research*, 36, 2311-2319. doi:10.1016/j.cor.2008.09.010
- Chen, H., Hsueh, C., & Chang, M. (2009). Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products doi:https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.09.010
- Devapriya, P., Ferrell, W., & Geismar, N. (2017). Integrated production and distribution scheduling with a perishable product. *European Journal of Operational Research*, 259(3), 906-916. doi:10.1016/j.ejor.2016.09.019
- Entrup, M. L., Günther, H. -, Van Beek, P., Grunow, M., & Seiler, T. (2005). Mixed-integer linear programming approaches to shelf-life-integrated planning and scheduling in yoghurt production. *International Journal of Production Research*, 43(23), 5071-5100. doi:10.1080/00207540500161068
- Farahani, P., Grunow, M., & Günther, H.-O. (2012). Integrated production and distribution planning for perishable food products. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(1), 28-51. doi:10.1007/s10696-011-9125-0
- Fonseca-Reyna, Y., Martínez-Jiménez, Y., & Nowé, A. (2017). Q-learning algorithm performance for m-machine, n-jobs flow shop scheduling problems to minimize makespan. *Investigacion Operacional*, 38(3), 281-290.
- Gong, W., & Fu, Z. (2010). ABC-ACO for Perishable Food Vehicle Routing Problem with Time Windows. *International Conference on Computational and Information Sciences*, 1261-1264. doi: http://doi.org/10.1109/ICCIS.2010.311
- Hsu, C., Hung, S., & Li, H. (2007). Vehicle routing problem with time-windows for perishable food delivery. *Journal of Food Engineering*, 80, 465-475. doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.05.029
- Hwang, H. (1999). A food distribution model for famine relief doi:https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00087-X
- Joo, Cheol & Soo Kim, Byung. (2016). Rule-based meta-heuristics for integrated scheduling of unrelated parallel machines, batches, and heterogeneous delivery trucks. *Applied Soft Computing*. 53. 10.1016/j.asoc.2016.12.038.
- Molero, M., & Salvador, A. (2016). Resolución de problemas Método heurístico. Obtenido de http://www2.camino.upm.es/Departamentos/matematicas/Fdistancia/PIE/Problemas/METODO_HEURISTICO.pdf
- Monahan, J. P. (1976). Production scheduling of perishable products. *International Journal of Production Research*, 14(6), 689-697.
- Moreno, J. A. (2004). Meta-heurísticas:Concepto y propiedades. Obtenido de <http://www.tebadm.ulpgc.es/almacen/seminarios/MH%20Las%20Palmas%202.pdf>
- Osvald, A., & Stirn, L. Z. (2008). A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food. *Journal of Food Engineering*, 85(2), 285-295. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.07.008
- Randhawa, S. U., & Juwono, C. (1994). Scheduling in multistage flowshop systems: An application in the food processing industry. *Industrial Management & Data Systems*, 94(5), 16.
- Ropke, S., & Pisinger, D. (2006). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, (4), 455.
- Shirvani, N., Ruiz, R., & Shadrokh, S. (2014). Cyclic scheduling of perishable products in parallel machine with release dates, due dates and deadlines. *International Journal of Production Economics*, 156, 1-12. doi:10.1016/j.ijpe.2014.04.013
- Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2001). A meta-heuristic algorithm for the efficient distribution of perishable foods. *Journal of Food Engineering*, 50, 1-9. doi:10.1016/S0260-8774(00)00187-4
- Ullrich, C. A. (2013). Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows doi:https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.049