

PROGRAMACIÓN DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE EN LA CADENA DE
SUMINISTROS DE POLLOS DE ENGORDE MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA

MARÍA ALEJANDRA TASCÓN VELASCO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI

2024

PROGRAMACIÓN DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE EN LA CADENA DE
SUMINISTROS DE POLLOS DE ENGORDE MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA

MARÍA ALEJANDRA TASCÓN VELASCO

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Logística y Gestión de Cadena de
Abastecimiento

Director:

Andrés Mauricio Paredes Rodríguez

Mgtr.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI

2024

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	8
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GENERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 MARCO REFERENCIAL	13
4 DESARROLLO METODOLÓGICO	17
4.1 CARACTERIZACIÓN CADENA DE SUMINISTRO AVÍCOLA.	17
4.1.1 Método actual de programación de transporte de pollo de engorde.	18
4.1.2 Decisiones logísticas en la programación de transporte de pollo de engorde.	19
4.2 FORMULACIÓN MODELO MATEMÁTICO.....	21
4.3 VALIDACIÓN MODELO MATEMÁTICO.....	28
5 CONCLUSIONES	33
6 FUTURAS INVESTIGACIONES.....	35
BIBLIOGRAFÍA.....	36
ANEXOS.....	38

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. DURACIONES EN CADA ETAPA DE VIAJE DEL TRANSPORTE DE POLLOS DE ENGORDE.	14
TABLA 2. RESUMEN REVISIÓN LITERARIA.	15
TABLA 3. DEFINICIÓN DE LOS CONJUNTOS PRIMER MODELO MATEMÁTICO.	22
TABLA 4. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS PRIMER MODELO MATEMÁTICO.	22
TABLA 5. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES PRIMER MODELO MATEMÁTICO.	22
TABLA 6. DEFINICIÓN DE LOS CONJUNTOS SEGUNDO MODELO MATEMÁTICO. ..	24
TABLA 7. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS SEGUNDO MODELO MATEMÁTICO.	25
TABLA 8. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES SEGUNDO MODELO MATEMÁTICO.	25
TABLA 9. CLASIFICACIÓN POLLOS POR HUACAL.	29
TABLA 10. CAPACIDAD DE LOS VEHÍCULOS.	29
TABLA 11. TIEMPOS Y TASAS RELACIONADAS.	30
TABLA 12. COMPARACIÓN CUADRILLAS ASIGNADAS.	30
TABLA 13. COMPARACIÓN NÚMERO DE VIAJES.	31

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CADENA DE SUMINISTRO DE POLLO DE ENGORDE.....	9
--	---

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. FORMULARIO DE ENTREVISTA SEMI ESTRUCTURADA PROGRAMACIÓN DE SACRIFICIO DE POLLO DE ENGORDE.....	38
ANEXO 2. FORMULARIO DE ENTREVISTA SEMI ESTRUCTURADA PROGRAMACIÓN DE TRANSPORTE POLLO DE ENGORDE.....	38
ANEXO 3. FORMULARIO DE ENTREVISTA SEMI ESTRUCTURADA PROGRAMACIÓN DE PRODUCCIÓN CARNE DE POLLO.	40

RESUMEN

Actualmente, algunas empresas del sector avícola realizan manualmente la programación de transporte de aves desde las granjas de engorde hasta los centros de sacrificio. Aunque la programación manual satisface la demanda de los centros que realizan el proceso de sacrificio de aves, representa un limitante en la creación de escenarios alternativos que permitan optimizar elementos claves en la toma de decisiones logísticas. El objetivo del presente trabajo integrador es proponer mediante modelación matemática la programación de transporte para la recolección de pollos de engorde en una empresa avícola del departamento del Valle del Cauca, Colombia. Los modelos matemáticos propuestos optimizan el número de viajes para el transporte de aves, así como la asignación de cuadrillas y vehículos. Se resalta la importancia de abordar la priorización de granjas, rotación de cuadrillas y vehículos, y determinación del número óptimo de pollos por huacal para mejorar la toma de decisiones en el campo logístico de transporte del sector avícola.

Palabras clave: *cadena de suministro, decisiones logísticas, programación de recolección y transporte, pollos de engorde, tasa de mortalidad, granjas, centros de sacrificio.*

INTRODUCCIÓN

El sector avícola en Colombia sigue siendo uno de los pilares fundamentales de la economía agroindustrial del país. La Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI) indica para el sector avícola un crecimiento sostenido de 1.2% en el 2023 y proyecta un crecimiento de 1.7% para el 2024. Para cierre de año 2023, la producción total en proteína animal (huevo y pollo) fue de 2,82 millones de toneladas, con un consumo per cápita de 323 unidades para los huevos y 36,7 kilogramos para la carne de pollo (FENAVI, 2024).

El aumento sostenido del sector avícola en el país trae consigo retos en la cadena de suministros relacionados con capacidad de producción, logística y transporte, gestión de inventarios, bienestar animal y sostenibilidad. Por tanto, las empresas requieren estrategias en el corto y largo plazo para una planificación cuidadosa que garantice el crecimiento equilibrado del sector industrial.

Específicamente el campo logístico y de transporte enfrenta retos en la programación de operaciones para atender eficientemente los requerimientos del mercado y cumplir satisfactoriamente la normatividad legal en materia sanitaria y de bienestar animal.

Actualmente, la empresa objeto de estudio realiza gran parte de las programaciones logísticas de forma manual que requieren varias horas durante la jornada laboral para ser ejecutadas, limitando la creación de escenarios óptimos que distribuyan eficientemente los recursos disponibles.

El presente trabajo tiene como objetivo proponer una solución basada en la modelación matemática para la programación de recolección y transporte de pollos de engorde en una empresa avícola del Valle del Cauca, Colombia.

Para alcanzar este objetivo, se caracteriza la cadena de suministros de la empresa avícola en estudio para identificar los factores claves a tener en cuenta en formulación de los modelos matemáticos. Posteriormente, se validan los modelos matemáticos para simular diferentes escenarios y optimizar las decisiones logísticas involucradas.

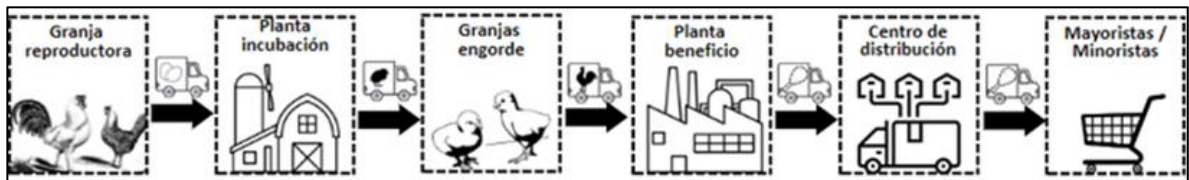
Con esta propuesta, se espera contribuir al mejoramiento de la gestión logística en el sector avícola, mediante propuestas que fortalezcan la confiabilidad y faciliten la toma de decisiones en las operaciones de transporte en las empresas del sector.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con la Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI), el sector avícola en el país presentó una tasa de crecimiento de 7.3% en el año 2022 con una producción de carne de pollo de 1.8 millones de toneladas, que le permite duplicar la producción de carne de res y superar en un 30% la producción de carne de cerdo (FENAVI, 2023).

Al ser la carne de pollo una de las principales proteínas de origen animal consumidas a nivel nacional, son numerosas las condiciones que se deben tener en cuenta en cada una de las etapas de la cadena de suministro para garantizar un alimento de calidad e inocuidad al consumidor final. La cadena de suministro de pollo de engorde abarca desde granjas reproductoras, plantas de incubación, granjas de engorde, plantas de beneficio hasta mayoristas y minoristas (Figura 1).

Figura 1. Cadena de suministro avícola.



Nota: Elaboración propia.

Las granjas reproductoras realizan el apareamiento entre machos y hembras para obtener huevos fértiles, los cuales son transportados a las plantas de incubación donde permanecen el tiempo necesario para completar el desarrollo embrionario y obtener el pollo. Las aves recién nacidas son transportadas a las granjas de pollo de engorde para su etapa de crecimiento y enviadas a las plantas de beneficio o mataderos para su sacrificio una vez cumplen el peso objetivo. Finalmente, las plantas de beneficio elaboran los productos cárnicos que son comercializados por canales mayoristas y minoristas.

Debido a la configuración de la cadena de suministro de pollos de engorde, se reconoce la importancia de optimizar las condiciones de transporte para garantizar un óptimo aprovechamiento del sistema de producción avícola.

Particularmente, el transporte de aves entre las granjas de engorde y la planta beneficio es una fase crítica y estresante del proceso de producción, con problemas de bienestar animal potencialmente graves e implicaciones económicas (Nijdam et al., 2004).

La tasa de mortalidad (DOA%) de las aves es un indicador que permite reconocer las implicaciones económicas en la etapa previa al sacrificio. La llegada de pollos de engorde muertos a al centro de sacrificio representa pérdidas económicas para la empresa al considerarse como aves no aptas para consumo humano. Los factores de riesgo de mortalidad en el transporte de aves incluyen la fisiología del animal, configuración genética, condiciones climáticas, densidad de población en los huacales, diseño de los vehículos, programación de viajes, duración del viaje y de la estabulación, entre otros.

Las condiciones climáticas extremas provocan estrés térmico en las aves durante las etapas de captura, cargue y transporte desde las granjas a la planta de beneficio. Di Martino et al. (2017) establece una relación entre las condiciones climáticas y la densidad de población en los contenedores como factor de riesgo; indicando que, una disminución de la densidad de población durante el clima frío puede reducir la tasa de mortalidad de las aves.

El diseño de los vehículos para el transporte de las aves es un factor que influye en el bienestar ambiental. Los camiones empleados para el transporte deben cubrir los requerimientos de ventilación y calefacción de las aves, permitiendo la circulación constante de aire fresco al interior del vehículo (FENAVI, 2019).

Warriss et al. (1992) determina que el tiempo de viaje de las aves hasta las plantas de procesamiento es uno de los factores que incide en una mayor mortalidad en los pollos de engorde. Cuanto más largo sea el viaje, más posibilidades hay de que un ave muera (a) por una enfermedad crónica que disminuya la capacidad del ave para hacer frente a las condiciones del transporte, (b) por una lesión sufrida durante la captura y la carga o c) por condiciones ambientales extremas, posibilidad agravada por el período sin acceso a alimentos y agua (Caffrey et al., 2017).

De acuerdo con lo anterior, las empresas avícolas deben considerar los factores de riesgo de mortalidad en la programación de las operaciones previas al sacrificio. Para ello, implementan soluciones relacionadas con cambios en las prácticas y procedimientos de transporte, mejoras en el diseño de los contenedores de transporte, vehículos y sus

sistemas de ventilación y la introducción de programas de selección genética para líneas más robustas que sean menos susceptibles al estrés térmico (Mitchell & Kettlewell, 2009).

Para la programación de transporte y recolección de pollos de engorde se debe considerar la información proporcionada en la programación de sacrificio y producción en el centro de sacrificio. La programación de producción establece los días, velocidad de la línea, la hora de inicio del proceso y las horas tentativas para el procesamiento de pollo en los centros de sacrificio teniendo en cuenta las necesidades comerciales. Por su parte, la programación de sacrificio establece la disponibilidad de las granjas de engorde con aves según tipo y peso promedio en los días requeridos para cubrir las necesidades de producción.

Con la información suministrada, la programación de transporte para la recolección y traslado de pollos de engorde realiza la asignación de granjas, efectúa la distribución de cuadrillas de acuerdo con su disponibilidad, realiza la asignación de pedidos y registra las paradas presentes en el proceso.

La empresa del sector avícola bajo estudio es líder en el mercado de carne de pollo en el país. La cadena de suministro de la empresa está compuesta por aproximadamente 50 granjas de engorde distribuidas a lo largo del departamento del Valle del Cauca. La empresa cuenta con planta de beneficio y la posibilidad de contratar maquilas de sacrificio por limitantes de capacidad y disponibilidad en la planta principal.

Actualmente, la empresa realiza la programación de transporte para la recolección de pollo de engorde de forma manual y el personal encargado tarda entre tres y cuatro horas en promedio realizando esta actividad, la cual está sujeta a cambios significativos en la programación de producción o paradas en la planta.

Aunque la programación manual satisface la demanda en los centros de sacrificio, representa un limitante en la creación de escenarios alternativos que permitan disminuir factores que influyen en la mortalidad de las aves considerando la distribución de vehículos, duración del viaje y de la estabulación. Ante esto, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo mejorar las decisiones logísticas en la programación de transporte para la recolección de pollos de engorde en la empresa objeto de estudio? El presente trabajo tiene como objetivo proponer mediante modelación matemática la optimización de las decisiones logísticas relacionadas en la programación de recolección y transporte de pollo de engorde de la empresa.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL.

Proponer la programación de recolección y transporte de pollos de engorde en una empresa avícola del Valle del Cauca mediante modelación matemática.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Caracterizar la cadena de suministro de la empresa avícola identificando los factores claves en las decisiones logísticas de recolección y transporte de pollos de engorde.
- Formular el modelo matemático para la programación de recolección y transporte de pollos de engorde.
- Validar el modelo matemático para la programación de recolección y transporte de pollos de engorde en la empresa avícola.

3 MARCO REFERENCIAL

La investigación de operaciones se ha utilizado a lo largo de la historia para apoyar las decisiones logísticas de las cadenas de suministro de los sistemas de producción pecuaria. La aplicación de la investigación de operaciones para resolver problemas de planificación en industrias cárnicas utiliza técnicas como Programación Lineal (LP), simulación, análisis de riesgo, programación estocástica y metaheurística, entre otras (Solano-Blanco et al., 2023).

Plà-Aragonés (2015) presenta la formulación de un modelo de programación lineal de enteros mixtos estocásticos para la planificación de la producción en la cadena de suministro de carne de cerdo, maximizando los ingresos totales de la cadena. Villalba et al. (2019) plantea una herramienta multicriterio de simulación y optimización para dar soporte a las decisiones de los sistemas de reproducción de ovejas. Los objetivos de la herramienta son económicos y ambientales de las granjas para cría de ovejas en tres submodelos que representan el rumen, la producción y el balance de nutrientes.

Específicamente en el sector avícola, la literatura propone técnicas de programación y métodos metaheurísticos para la planificación de operaciones en la cadena de suministro. Solano-Blanco et al. (2023) propone una metodología basada en la optimización para la integración de granjas y mataderos para planificar la producción bajo incertidumbre de crecimiento de pollos. La metodología incluye dos modelos: (1) un modelo estocástico de dos etapas que respalda las decisiones de gestión de inventario y tamaño de lote mientras considera escenarios de incertidumbre en el crecimiento de los pollos; y (2) un modelo de programación lineal de enteros mixtos que admite la asignación de lotes.

En la planificación de transporte, Milanez (2000) propone una comparación entre los resultados obtenidos en un modelo matemático de programación lineal entera mixta (MILP) y un modelo heurístico para determinar cuándo iniciar la recolección de cada uno de lotes de las granjas asignados para el sacrificio de una sola línea de producción, minimizando el tiempo de espera de los vehículos cargados con aves en la zona de confort. Fernandes et al. (2011) el método metaheurístico GRASP para el enrutamiento y programación de los vehículos que transportan las aves al faenamiento, minimizando el tiempo de espera promedio ponderado de los camiones cargados con aves para el proceso de sacrificio.

Por su parte, Oliveira & Lindau (2012) presentan un marco para programar la recolección de pollos de engorde de las granjas (SCPH) con el objetivo de reducir los tiempos de espera que provocan estrés por calor. El modelo propuesto simula escenarios alternativos para determinar el número de camiones requeridos para la recolección, el orden de las granjas avícolas que se deben visitar durante del día, duración del viaje, horas del día para iniciar el procesamiento de las aves y la asignación de camiones a las granjas.

Fernandes et al. (2011) indica que la optimización del proceso de ruteo y programación de transporte plantea beneficios para la empresa relacionados con reducción de la tasa de mortalidad (DOA%). Por tanto, las técnicas y métodos de planificación de las operaciones en la cadena de suministro de pollos de engorde deben considerar los factores de riesgos en la tasa de mortalidad de las aves.

De acuerdo con la revisión literaria, algunos factores de riesgo de mortalidad de las aves relacionadas con el transporte son la duración del viaje, tiempo de espera del ave para su procesamiento y condiciones climáticas.

Caffrey et al. (2017) considera las duraciones en cada etapa del viaje para medir el riesgo de mortalidad durante el transporte de pollos de engorde para sacrificio (Véase Tabla 1). Los resultados obtenidos muestran que el riesgo de mortalidad aumentó en un 0,045 % por hora durante el viaje y en un 0,044 % por hora cuando se mantuvo en el establo de espera.

Tabla 1. *Duraciones en cada etapa de viaje del transporte de pollos de engorde.*

Duración	Definición
Duración sin alimento antes del cargue	Tiempo desde el retiro del alimento hasta el cargue de las aves en el vehículo.
Duración total sin alimento	Tiempo desde el retiro del alimento en la granja hasta el inicio del proceso de sacrificio.
Duración de la carga	Tiempo desde el inicio hasta el final del cargue de las aves en el vehículo.
Duración del viaje	Tiempo desde el final cargue de las aves en el vehículo hasta la llegada al centro de sacrificio.
Duración en el establo de espera	Tiempo desde que ingresa el vehículo cargado a la zona de neutralidad térmica hasta la salida para el proceso de sacrificio.

Duración total	Tiempo desde el inicio del cargue de las aves en el vehículo hasta la salida de la zona de neutralidad térmica.
----------------	---

Nota. Información obtenida de Caffrey et al. (2017).

El estudio realizado por Vecerek et al. (2006) permite reconocer los efectos de las estaciones del año y las distancias de viaje sobre la mortalidad de los pollos de engorde transportados para el sacrificio. Los resultados indican que las tasas de mortalidad entre los pollos de engorde crecen con distancias y periodos de viaje más largos: la mortalidad de los pollos de engorde durante el periodo de observación fue del 0,247 %, pero varió según la distancia de transporte a la planta de procesamiento del 0,146 % (<50 km) a 0,862% (>300 km). Así mismo, las temperaturas demasiado altas y bajas de la estación del año donde se realiza el transporte de aves influyen negativamente en el bienestar de los pollos de engorde transportados.

Para manejar el factor de riesgo de condiciones climáticas, Di Martino et al. (2017) analizó por regresión cuantil estratificado por temperatura el efecto de la distribución de densidad de población en los contenedores que transportan las aves entre categorías de temperatura. En particular, los resultados muestran que una disminución de la densidad de población durante el clima frío puede reducir la mortalidad de las aves.

Los hallazgos de la revisión literaria se listan en la Tabla 2 con la siguiente clasificación: trabajo, técnica de modelación, decisión logística que abarca y los factores de mortalidad relacionados en la programación.

Tabla 2. *Resumen revisión literaria.*

Trabajo	Modelación	Decisiones logísticas	Factores de mortalidad
Plà-Aragónés (2015)	Programación lineal entera mixta (MILP). Simulación estocástica.	Planificación de la producción en la cadena de suministro de carne de cerdo.	N/A
Villalba et al. (2019)	Modelación multicriterio.	Planificación de la producción de ovejas.	N/A

Solano-Blanco et al. (2023)	Programación lineal entera mixta (MILP). Simulación estocástica.	Planificación de la producción bajo incertidumbre de crecimiento de pollos de engorde.	Fisiología del animal y peso del ave.
Milanez (2000)	Programación lineal entera mixta (MILP). Programación heurística.	Planificación para la recolección de pollos de engorde.	Densidad de población transportada, distancia de las granjas y duración del viaje.
Fernandes et al. (2011)	Programación metaheurística.	Enrutamiento y programación de los vehículos para el transporte de pollos de engorde.	Duración del viaje y duración en zona de confort.
Oliveira & Lindau (2012)	Simulación determinista.	Planificación para la recolección de pollos de engorde.	Densidad de población transportada, distancia de las granjas y duración del viaje.

Nota: Elaboración propia.

La revisión de la literatura permite conocer cómo se han abordado las decisiones logísticas en el sector pecuario mediante diversos enfoques de modelación matemática. Sin embargo, el modelo que se propone en el presente trabajo incluye características y condiciones específicas de la operación de recolección y transporte que se lleva a cabo en la empresa objeto de estudio del sector avícola. Este enfoque personalizado busca reflejar de manera más precisa las particularidades de las operaciones de su cadena de suministro para una mejor adaptación y optimización de sus procesos logísticos involucrados.

4 DESARROLLO METODOLÓGICO

A continuación, se presenta la metodología utilizada para alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo:

4.1 CARACTERIZACIÓN CADENA DE SUMINISTRO AVÍCOLA.

Para la caracterización de la cadena de suministro avícola se consulta la documentación empresarial sobre las operaciones de los procesos misionales y se realiza observación de campo en los centros de trabajo que componen la cadena de suministro de pollos de engorde en la empresa.

La empresa objeto de estudio se dedica a la cría, levante, engorde, procesamiento y comercialización de carne de pollo. La cadena de suministro de pollo inicia en las granjas dónde tiene lugar la reproducción de las aves. Los machos y las hembras son criadas y levantadas en galpones separados por un periodo de seis (6) meses con un estricto régimen de alimentación que permite cumplir los objetivos de peso sugeridos para cada línea genética. En la semana número veintidós (22) de edad se mezclan en un galpón los machos y las hembras para realizar el apareamiento, y solo hasta la semana número (24) de edad inicia la postura del huevo. Posteriormente, se realiza el proceso de selección, desinfección y transporte del huevo desde la granja reproductora hasta la incubadora.

La planta de incubación se encarga de la selección y sentada del huevo apto para el proceso de incubación en los equipos correspondientes. El huevo permanece en los equipos de incubación durante un periodo de dieciocho (18) días y se traslada a las máquinas necedoras hasta el día número veintiuno (21) para completar satisfactoriamente el desarrollo embrionario del pollito. Las aves recién nacidas son sexadas, vacunadas y transportadas a las granjas de engorde de acuerdo con la programación de encasetamiento.

En las granjas de engorde se recibe el pollito de un (1) día e inicia el proceso de cría y engorde durante un periodo de cuarenta y cinco (45) días, proporcionándole al ave un régimen de alimentación con altos estándares nutricionales para lograr el peso objetivo y ser transportadas a la planta de beneficio o maquila de sacrificio según corresponda, de acuerdo con la programación de sacrificio y transporte.

En la planta de beneficio se realiza la recepción del vehículo con pollo de engorde y se trasladan las aves a la zona de descargue para iniciar su procesamiento. Si el vehículo con pollo de engorde no se puede descargar inmediatamente, este debe dirigirse a la zona de confort establecida para que el ave espere hasta su procesamiento con las condiciones de temperatura adecuadas para evitar incremento en la tasa de mortalidad.

El proceso de producción incluye las etapas de sacrificio, escaldado, desplumado, eviscerado, choque de frío y de acuerdo con los requerimientos de producción, el pollo se dirige a la etapa de empaque pollo entero o desprese para obtener productos adobados, fileteados, porcionados, embandejado, entre otros. Finalmente, los productos pasan por la etapa de enfriamiento o congelación según corresponda, almacenamiento y despacho de producto terminado.

La comercialización de productos de carne de pollo se realiza por canales de mayoreo a través de centros de distribución y/o canales al detal a través de puntos de venta propios o de terceros. La Figura 1 ilustra los eslabones mencionados de la cadena de suministro avícola.

4.1.1 Método actual de programación de transporte de pollo de engorde.

En esta sección se diseñan y realizan entrevistas semi estructuradas a los responsables de realizar la programación de sacrificio, transporte de pollo de engorde y producción de carne de pollo (Anexo A, B y C respectivamente) en la empresa objeto de estudio para conocer la metodología que utilizan actualmente en las decisiones logísticas bajo su responsabilidad.

La programación de sacrificio se realiza mínimo tres (3) días antes al inicio del proceso de producción y establece las granjas de pollo de engorde de las cuales se puede obtener aves para dar cumplimiento a los requerimientos de producción en términos de tipo de pollo, rango de peso y cantidad de aves. Para ello, el responsable de establecer la proyección de sacrificio debe tener en cuenta los datos técnicos de la granja: tipo de ambiente (controlado o tradicional), día de encasetamiento, edad del ave, tipo de pollo, peso, mortalidad, conversión, ganancia por día, densidad galpón y número de aves en la granja. Sin embargo, las prioridades de proyección dependen principalmente de los datos técnicos que afecten

significativamente la tasa de mortalidad de la granja, tales como: edad del ave, densidad de galpón, nivel de mortalidad en el galón y ubicación de la granja.

La programación de sacrificio debe garantizar una proyección diaria de 200.000 aves en promedio para plantas de beneficio y 20.000 aves en promedio para maquilas, considerando que la capacidad de la línea de producción es de 13.000 aves/hora y 450 aves/hora respectivamente.

Sin excepción alguna, la programación de sacrificio se encuentra sujeta a cambios por sucesos imprevistos como las paradas o cambios de producción, incluidos la cancelación de pedidos, siniestros, entre otros. Estos sucesos exigen un ajuste inmediato en la programación de sacrificio porque afecta directamente la programación de transporte y recolección del pollo de engorde.

La programación de sacrificio brinda los datos de entrada para elaborar la programación de transporte y recolección de pollo de engorde, relacionando los puntos de origen (granjas) y centros destinos (planta beneficio o maquila), las cantidades y los pesos de aves a transportar. Por su parte, la programación de transporte se realiza dos (2) días antes al inicio del proceso de producción y establece la cantidad de viajes, las cuadrillas encargadas de la recolección de aves en cada granja, los conductores y sus respectivos vehículos, el número de huacales con pollo de engorde en cada viaje, la hora prevista de llegada a la planta o centro maquilador, cantidad de aves y kilos a transportar por viaje.

4.1.2 Decisiones logísticas en la programación de transporte de pollo de engorde.

De acuerdo con lo anterior, las decisiones logísticas de la programación de recolección y transporte de pollo de engorde se compone de tres grandes partes: (1) Organización de las granjas, (2) asignación de cuadrillas y (3) asignación de vehículos.

Organización de las granjas: Las granjas listadas en la programación de sacrificio se deben organizar en el orden cronológico en que se van a sacrificar, priorizando las granjas con mayores factores de mortalidad, por ejemplo: programar al inicio las granjas más lejanas según el tiempo de desplazamiento al centro de sacrificio. Sumado al tiempo de desplazamiento, se debe tener en cuenta el tiempo de cargue en el vehículo para

determinar la hora en que debe iniciar el ayuno del ave, el cual debe ser mínimo un (1) día antes a partir de la hora de sacrificio tentativa.

Por otro lado, la organización de las granjas debe conservar el equilibrio entre los rangos de pesos, programado por separado el pollo de rango pequeño del pollo de rango grande. Esta decisión logística tiene en cuenta los parámetros relacionados con el peso promedio de las aves de la granja, la ubicación de la granja, distancia y tiempo de desplazamiento del vehículo desde la granja hasta el centro maquilador.

Asignación de vehículos: Una vez se ordenan las granjas, se debe determinar la capacidad del vehículo requerido para transportar las aves y el número de viajes por granja y galón. Inicialmente, el peso promedio de las aves define la cantidad de aves por huacal a cargar y la cantidad de aves de la granja determina la cantidad total de huacales. Según los huacales requeridos se asigna el vehículo con la capacidad necesaria, respetando las restricciones de peso de carga en el vehículo.

Para ejemplificar la situación se tiene que, se requiere transportar 2592 aves del galpón de una granja con peso promedio de 2.7 kilos/ave. De acuerdo con la clasificación de pesos de la empresa, se debe cargar 9 pollos por huacal y realizar un solo viaje por la cantidad total de aves de la granja en un vehículo de capacidad máxima de 288 huacales y 6500 kilos.

Entre otras cosas, la asignación de los vehículos considera la cantidad de vehículos con los que se cuenta para realizar los viajes cada día, la rotación de los vehículos y cantidad de viajes mínima o máxima que debe realizar un vehículo al día.

Asignación de cuadrillas: Se debe asignar una cuadrilla para cada viaje programado considerando la cantidad de cuadrillas disponibles en el día, tanto directas como contratistas, la ubicación de la granja y el tiempo de traslado entre granjas para evitar trayectos de desplazamiento largos, la jornada laboral y rotación de las cuadrillas, y restricciones de Seguridad y Salud en el Trabajo relacionadas con el peso de cargue permitido al día por trabajador y cuadrilla.

Al igual que la programación de sacrificio, la programación de transporte tiene como objetivo garantizar la entrega de aves y las cantidades requeridas a los centros de sacrificio para

dar cumplimiento a la programación de producción y los compromisos comerciales de la empresa. Sin embargo, esta última busca entregar las aves al proceso de sacrificio a tiempo, minimizando los tiempos de exposición del ave en el vehículo. Entre más acertadas sean las programaciones de sacrificio y transporte, mejor es el flujo de producción y se minimizan los costos logísticos y de producción asociados, así como la tasa de mortalidad de las aves.

Actualmente, la empresa objeto de estudio realiza las programaciones mencionadas de forma manual, sin algún proceso metodológico estructurado. La programación de sacrificio se registra en el sistema de información de la empresa, mientras que, la programación de recolección y transporte de pollo de engorde se realiza en una hoja de cálculo.

Para interés del presente trabajo de grado, se propone modelar matemáticamente la programación de recolección y transporte de pollo de engorde para fortalecer las decisiones logísticas relacionadas buscando asignar y distribuir los recursos de forma óptima.

4.2 FORMULACIÓN MODELO MATEMÁTICO.

En esta sección se presenta la modelación matemática propuesta para apoyar algunas decisiones logísticas en la programación de recolección y transporte de pollo de engorde de acuerdo con los factores identificados en la caracterización.

La modelación matemática busca apoyar las decisiones logísticas relacionadas con la asignación de cuadrillas y vehículos, así como la programación de los viajes para determinar los horarios de salida de los vehículos, cargue, descargue y procesamiento de las aves en un centro de sacrificio. Por tanto, este modelo considera los factores de riesgos de la mortalidad relacionados con densidades poblaciones en los huacales y tiempos de operación de la programación de viajes.

Se formula un primer modelo matemático con el objetivo de minimizar la cantidad total de viajes requeridos para trasladar la demanda de aves desde sus respectivas granjas y galpones hacia el centro de sacrificio. Así mismo, este modelo permite calcular el número de aves a trasladar en cada viaje, la cantidad de cuadrillas requeridas en cada granja para el cargue de aves, el número de huacales necesarios en cada viaje y el tipo de vehículo, según su capacidad en kilos y huacales.

A continuación, se relaciona la formulación del primer modelo matemático:

Tabla 3. Definición de los conjuntos primer modelo matemático.

Conjuntos	Definición
$I = \{1, 2, \dots, i\}$	Granjas desde donde se deben recoger las aves.
$J = \{1, 2, \dots, j\}$	Galpones en cada granja.
$T = \{1, 2, \dots, t\}$	Viajes para cada galpón en cada granja.
$V = \{1, 2, \dots, v\}$	Tipo de vehículos disponibles.

Tabla 4. Definición de los parámetros primer modelo matemático.

Parámetros	Definición
D_{ij}	Número de aves a ser transportadas desde la granja i galpón j .
PU_{ij}	Peso promedio de las aves en la granja i galpón j .
CK_v	Capacidad máxima en kilogramos para cada tipo de vehículo v .
CH_v	Capacidad máxima en huacales para cada tipo de vehículo v .
AH_{ij}	Número de aves por huacal de la granja i galpón j .
EV	Número estándar de viajes para los vehículos propios de la empresa (tipo de vehículo $v = 1$).
CC	Capacidad diaria de cargue de aves de cada cuadrilla.
M	Número grande utilizado para formular restricciones de enlace.

Tabla 5. Definición de las variables primer modelo matemático.

Variables	Definición
A_{ijtv}	Número de aves transportadas en el viaje t desde la granja i galpón j utilizando el vehículo de tipo de vehículo v .
NV_{ijtv}	Variable binaria que indica si se realiza el viaje t para transportar aves desde la granja i galpón j utilizando el vehículo de tipo de vehículo v .
HV_{ijtv}	Número de huacales transportados en el viaje t desde la granja i galpón j utilizando el vehículo de tipo de vehículo v .
C_i	Número de cuadrillas requeridas para el cargue de aves en la granja i .
T_{ijt}	Variable binaria que indica si se realiza el viaje secuencial t desde la granja i galpón j .

La función objetivo del modelo busca minimizar el número total de viajes necesarios para trasladar todas las aves, formulada como:

$$MIN \text{ DIST} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} NV_{ijtv}$$

Sujeto a

Cumplimiento de la demanda de aves a transportar de la granja i galpón j : Esta restricción asegura que se transporten todas las aves requeridas desde cada granja y galpón.

$$\sum_{t \in T} \sum_{v \in V} A_{ijtv} \geq D_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

Relación entre huacales y aves: Esta restricción garantiza que el número de aves transportadas en cada viaje corresponda al número de huacales usados por la cantidad de aves en cada huacal. Por tanto, establece que los vehículos deben llevar huacales con aves siempre en cada viaje.

$$HV_{ijtv} * AH_{ij} == A_{ijtv} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T, \forall v \in V$$

Vínculo entre viajes y transporte de aves: Esta restricción asegura que se transporten aves si se activa el viaje t de la granja i galpón j en el vehículo tipo v .

$$A_{ijtv} \leq NV_{ijtv} * M \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T, \forall v \in V$$

Restricciones de capacidad de los vehículos: Estas restricciones aseguran que el peso total de las aves y el número de huacales no excedan la capacidad del vehículo.

$$A_{ijtv} * PU_{ij} \leq NV_{ijtv} * CK_v \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T, \forall v \in V$$

$$HV_{ijtv} \leq NV_{ijtv} * CH_v \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T, \forall v \in V$$

Requerimientos de cuadrillas: Esta restricción asegura que la cantidad de cuadrillas asignadas para el cargue de aves sea suficiente para cumplir la demanda total de aves en la granja i .

$$C_i * CC \geq \sum_{j \in J} D_{ij} \quad \forall i \in I$$

Cumplimiento del estándar de viajes para vehículos propios: Garantiza que se realice al menos el número estándar de viajes para los vehículos propios de la empresa.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} NV_{ijtv} \geq EV \quad \text{para } v = 1$$

Vinculación de la secuencia de viajes: Estas restricciones aseguran que, si hay un viaje secuencial, entonces debe haber un viaje específico para al menos un vehículo y viceversa.

$$T_{ijt} \leq \sum_{v \in V} NV_{ijtv} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

$$\sum_{v \in V} NV_{ijtv} \leq T_{ijt} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

Secuencialidad de los viajes: Esta restricción garantiza que si hay un viaje secuencial t , entonces debe haber un viaje secuencial $t-1$.

$$T_{ijt} \leq T_{ijt-1} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \text{ con } t > 1$$

Activación viaje: Esta restricción asegura que se un viaje específico para cada combinación de granja i galpón j viaje t .

$$\sum_{v \in V} NV_{ijtv} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

El primer modelo se centra en optimizar la planificación de viajes para el transporte de aves desde diferentes granjas hacia el centro de sacrificio minimizando el número total de viajes. Los resultados de este modelo, específicamente el número de viajes y aves a trasladar en cada viaje t de la granja i galpón j en el vehículo *tipo* v , se organizan y estructuran para alimentar un segundo modelo matemático.

Por tanto, el siguiente paso consiste en organizar y coordinar los viajes previamente calculados. El segundo modelo matemático aborda la programación de los tiempos de salida, llegada, cargue, descarga y procesamiento de los viajes t de la granja i galpón j calculados en el primer modelo.

A continuación, se relaciona la formulación del segundo modelo matemático:

Tabla 6. Definición de los conjuntos segundo modelo matemático.

Conjuntos	Definición
$I = \{1, 2, 3, \dots, i\}$	Granjas desde donde se deben recoger las aves.
$J = \{1, 2, 3, \dots, j\}$	Galpones en cada granja.

$T = \{1,2,3, \dots, t\}$ | Viajes para cada galpón en cada granja.

Tabla 7. Definición de los parámetros segundo modelo matemático.

Parámetros	Definición
$aves_{ijt}$	Aves para trasladar de la granja i galpón j viaje t .
dis_i	Distancia en kilómetros desde la granja i hasta el centro de sacrificio.
tr_i	Tiempo de recorrido en horas desde la granja i hasta el centro de sacrificio.
tc	Tasa de cargue de aves en la granja (aves por hora).
te	Tiempo máximo de espera permitido en el centro de sacrificio (horas).
td	Tasa de descargue de aves en la planta (aves por hora).
tp	Tasa de procesamiento de aves en la planta (aves por hora).
hip	Hora de inicio del proceso de producción en el centro de sacrificio.

Tabla 8. Definición de las variables segundo modelo matemático.

Variables	Definición
HSP_{ijt}	Hora salida de la planta para el viaje t de la granja i galpón j .
HLG_{ijt}	Hora llegada a la granja para el viaje t de la granja i galpón j .
HIC_{ijt}	Hora inicio de cargue en la granja para el viaje t de la granja i galpón j .
HFC_{ijt}	Hora fin de cargue en la granja para el viaje t de la granja i galpón j .
HSG_{ijt}	Hora salida de la granja para el viaje t de la granja i galpón j .
HLP_{ijt}	Hora llegada a la planta para el viaje t de la granja i galpón j .
HIE_{ijt}	Hora inicio de espera en la planta para el viaje t de la granja i galpón j .
HFE_{ijt}	Hora fin de espera en la planta para el viaje t de la granja i galpón j .
HID_{ijt}	Hora inicio de descargue en la planta para el viaje t de la granja i galpón j .
HFD_{ijt}	Hora fin de descargue en la planta para el viaje t de la granja i galpón j .
HFP_{ijt}	Hora fin proceso en la planta para el viaje t de la granja i galpón j .
TC_{ijt}	Tiempo de cargue en la granja para el viaje t de la granja i galpón j .
TE_{ijt}	Tiempo de espera en la planta para el viaje t de la granja i galpón j .
TD_{ijt}	Tiempo de descargue en la planta para el viaje t de la granja i galpón j .
TP_{ijt}	Tiempo de procesamiento en la planta para el viaje t de la granja i galpón j .

La función objetivo del modelo es minimizar el tiempo total de espera de los vehículos cargados en el centro de sacrificio:

$$MIN\ DIST = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} TE_{ijt}$$

Sujeto a

Hora llegada a la granja: Se define como la hora de salida de la planta más el tiempo de recorrido desde la planta a la granja. A su vez, equivale a la hora inicio de cargue de aves en la granja.

$$HLG_{ijt} = HSP_{ijt} + tr \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

$$HLG_{ijt} = HIC_{ijt} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

Hora fin de cargue: Se define como la hora inicio de cargue más el tiempo de cargue de las aves en la granja. A su vez, equivale a la hora salida de la granja.

$$HFC_{ijt} = HIC_{ijt} + TC_{ijt} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

$$HFC_{ijt} = HSG_{ijt} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

Tiempo de cargue: Se calcula dividiendo la cantidad de aves del viaje en la tasa de cargue.

$$TC_{ijt} = \frac{aves_{ijt}}{tc} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

Hora llegada a la planta: Se define como la hora salida de la granja más el tiempo de recorrido desde la granja a la planta. A su vez, equivale a la hora inicio espera del vehículo antes del procesamiento.

$$HLP_{ijt} = HSG_{ijt} + tr \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

$$HLP_{ijt} = HIE_{ijt} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

Hora fin espera: Se define como la hora de inicio espera más el tiempo de espera del vehículo en la zona de confort antes del descargue y procesamiento de las aves. A su vez, equivale a la hora inicio del descargue de aves en la planta.

$$HFE_{ijt} = HIE_{ijt} + TE_{ijt} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

$$HFE_{ijt} = HID_{ijt} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

Limitación tiempo de espera: El tiempo de espera del vehículo en la zona de confort antes del descargue y procesamiento de las aves no debe superar el tiempo máximo de espera permitido por cada viaje.

$$TE_{ijt} \leq te \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

Hora fin de descargue: Se define como la hora inicio de descargue más el tiempo de descargue de las aves en la planta.

$$HFD_{ijt} = HID_{ijt} + TD_{ijt} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

La hora de inicio de descargue del primer viaje debe corresponder a la hora de inicio del proceso productivo.

$$HID_{111} = hip$$

Tiempo de descargue: Se calcula dividiendo la cantidad de aves del viaje en la tasa de descargue.

$$TD_{ijt} = \frac{aves_{ijt}}{td} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

Hora fin de procesamiento: Se define como la hora inicio descargue más el tiempo de procesamiento de las aves en la planta. Esta relación se establece teniendo en cuenta que, inmediatamente se descargan las aves del vehículo, estas se ubican en la línea de producción para su procesamiento. Por tanto, la hora fin de descargue en esta restricción es despreciable.

$$HFP_{ijt} = HID_{ijt} + TP_{ijt} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

Tiempo de procesamiento: Se calcula dividiendo la cantidad de aves del viaje en la tasa de procesamiento que corresponde a la velocidad de la línea de producción.

$$TP_{ijt} = \frac{aves_{ijt}}{tp} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

Condiciones de secuencialidad: Aseguran la continuidad y secuenciación adecuada de los viajes en los siguientes casos:

- Para viajes intermedios del mismo galpón, la hora fin de descargue del viaje t corresponde a la hora inicio de descargue del viaje $t+1$.

$$HFD_{ijt} = HID_{ijt+1} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

- Para el último viaje de un galpón, pero no el último galpón de la granja, la hora fin de descargue del viaje t corresponde a la hora inicio de descargue del primer viaje del siguiente galpón.

$$HFD_{ijt} = HID_{ij+1,1} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

- Para el último viaje del último galpón, pero no es la última granja, la hora fin de descargue del viaje t corresponde a la hora inicio de descargue del primer viaje del primer galpón de la siguiente granja programada.

$$HFD_{ijt} = HID_{i+1,1,1} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T$$

4.3 VALIDACIÓN MODELO MATEMÁTICO.

En esta sección se presenta la validación del modelo matemático desarrollado para la programación de la recolección y transporte de pollo de engorde en la empresa avícola objeto de estudio. La validación busca demostrar que el modelo puede replicar con precisión las decisiones logísticas planteadas con restricciones reales para proporcionar soluciones óptimas en la gestión de la logística avícola.

Para validar el modelo, se adopta la siguiente metodología:

Recopilación de datos: Se utilizan los datos de recolección y transporte de pollo de engorde de las programaciones realizadas por la empresa durante una semana (lunes a viernes).

Simulación de escenarios: Se utilizan los conjuntos de datos de las programaciones de recolección y transporte de pollo de engorde de la empresa en los modelos matemáticos propuestos para la simulación.

De acuerdo con las programaciones, para el modelo matemático número uno se tiene listada la demanda y el peso unitario de las aves a transportar por cada granja y galpón. El peso unitario de las aves determina la cantidad de pollos por huacal a cargar en cada viaje. Para ello, la empresa tiene establecido los siguientes rangos de peso para determinar el número de pollos por huacal (Ver Tabla 9).

Tabla 9. Clasificación pollos por huacal.

Rango de peso (kg)	Número de pollos por huacal
Peso menor o igual a 2.272	11
Peso entre 2.273 y 2.499	10
Peso entre 2.5 y 2.777	9
Peso entre 2.778 y 3.125	8
Peso entre 3.126 y 3.6	7
Peso mayor o igual a 3.6	6

Para el traslado de aves, la empresa cuenta con dos tipos de vehículos con capacidades en kilos y huacales diferentes, tal como se muestra en la Tabla 10. Además, la empresa tiene establecido el número de viajes diarios que deben realizar los vehículos de la flota propia como unidad productiva de la misma. Actualmente, la empresa cuenta con cinco vehículos propios que deben realizar mínimo quince viajes al día. Según requerimientos de transporte la empresa cuenta con la posibilidad de contratar servicios de transporte ante un tercero; por tanto, no se establecen limitantes de disponibilidad de vehículos.

Tabla 10. Capacidad de los vehículos.

Tipo de vehículo		Capacidad máxima en kilogramos	Capacidad máxima en huacales
1	Propios	7000	244
2	Contratistas	8000	324

La asignación de cuadrillas debe considerar la capacidad máxima de cargue permitida según lineamientos establecidos por Seguridad y Salud en el Trabajo, donde las cuadrillas deben cargar máximo 25.000 aves al día. Actualmente, la empresa cuenta con tres cuadrillas propias y la posibilidad de contratar servicio de cargue ante un tercero según requerimientos; por tanto, no se establecen limitantes de disponibilidad de cuadrillas.

Para el modelo matemático número dos, se obtiene de la programación la hora de inicio del proceso productivo, que corresponde a la ubicación del vehículo en el muelle para el descargue de aves, tiempos de recorrido y tasas de cargue en granja, descargue y procesamiento de aves en el centro de sacrificio (Ver Tabla 11).

Tabla 11. *Tiempos y tasas relacionadas.*

Parámetro	Valor
Tasa de cargue aves	25 aves/min
Tasa de descargue aves	170 aves / min
Tasa de procesamiento aves	217 aves/min
Tiempo de recorrido	Según la ubicación de la granja

Finalmente, la empresa tiene establecido una hora como el tiempo máximo de espera permitido para cada vehículo con aves en la zona de confort en el centro de sacrificio.

Comparación con sistemas existentes: Se comparan los resultados obtenidos en el modelo matemático con los indicados en las programaciones de recolección y transporte de la empresa objeto de estudio.

La Tabla 12 indica en resumen el número de cuadrillas asignadas en la simulación del modelo matemático (número uno) en comparación a los indicados en la programación de recolección y transporte de la empresa.

Tabla 12. *Comparación cuadrillas asignadas.*

Simulación	Número de cuadrillas programación empresa	Número de cuadrillas modelo matemático	Variación
Día 1	7	6	-14,3%
Día 2	8	8	0,0%
Día 3	8	7	-12,5%
Día 4	9	8	-11,1%
Día 5	8	8	0,0%
Total	40	37	-7,5%

El modelo matemático optimiza la asignación de las cuadrillas para la recolección y cargue de pollos de engorde en las granjas. Una reducción del 7.5% en el total de cuadrillas asignadas implica un ahorro significativo en la contratación de este servicio, sin comprometer los requerimientos de las operaciones.

La Tabla 13 indica en resumen el número de viajes obtenido en la simulación del modelo matemático (número uno) en comparación a los indicados en la programación de recolección y transporte de la empresa.

Tabla 13. Comparación número de viajes.

Simulación	Número de viajes programación empresa	Número de viajes modelo matemático	Variación
Día 1	52	53	1,9%
Día 2	70	67	-4,3%
Día 3	64	66	3,1%
Día 4	58	59	2,6%
Día 5	58	60	3,4%
Total	302	305	1,2%

En el total acumulado de los cinco días, el modelo matemático propone un número de viajes muy similar al de la programación de la empresa, con solo un incremento del 1,2% (3 viajes más en total). Esta variación mínima sugiere que el modelo es bastante consistente con la programación actual de la empresa.

La comparación día por día muestra que el modelo puede identificar oportunidades de optimización. Por ejemplo, en el día número dos se propone una reducción del 4,3% en el número de viajes, lo que podría implicar ahorros en costos y tiempos.

Aunque las variaciones diarias pueden parecer pequeñas, en el largo plazo las recomendaciones del modelo pueden tener un impacto significativo en los costos logísticos de la operación.

Por tanto, es importante identificar las causas de estas variaciones para realizar los ajustes pertinentes y mejorar la eficiencia operativa. Para ello, se revisan las programaciones de la empresa y se identifica que en algunos viajes proyectados se han manipulado parámetros operativos por parte del personal responsable de esta actividad, por ejemplo:

- Cantidad de pollos por huacal: Se ajusta manualmente el número de pollos por huacal, sin adherirse estrictamente a los rangos de peso y las capacidades de clasificación establecidos. Esta práctica puede llevar a una sobrecarga de los huacales o a una subutilización de la capacidad de carga, sin considerar los efectos en la tasa de mortalidad de las aves de acuerdo con las condiciones climáticas y la densidad del ave.

Estas prácticas manuales pueden generar una falsa percepción de eficiencia al reducir el número de viajes en el corto plazo, pero pueden comprometer el cumplimiento de estándares a largo plazo.

De acuerdo con lo anterior, la programación manual de la empresa puede parecer más eficiente en términos de número de viajes; sin embargo, el modelo matemático propuesto permite una programación alineada con los parámetros operativos de peso y capacidad establecidos por la empresa. Además, proporciona una herramienta metodológica rápida y fiable para la toma de decisiones logísticas.

Finalmente, el modelo matemático número dos establece la programación de los viajes, indicando las horas de inicio y fin en las etapas del proceso. Este modelo constituye una herramienta operativa que facilita el desarrollo de esta actividad en la empresa, y opera bajo el supuesto del ingreso de datos de los viajes en el orden que se deben programar.

La decisión logística correspondiente a la organización de granjas para la programación de los viajes de acuerdo con el orden cronológico en que se van a sacrificar debe considerar múltiples factores, tales como: distancias y tiempos de viaje, condiciones de las rutas, condiciones ambientales, estado de salud de las aves, entre otros. Por tanto, constituye un problema que se recomienda para futuras investigaciones.

Este modelo busca representar y facilitar la actividad de programación de viajes. Para las cinco simulaciones el modelo matemático arroja un tiempo de espera de cero (0) minutos, programando los viajes de forma consecutiva para evitar que el vehículo se estacione en la zona de confort previo al descargue. Al igual que el modelo matemático propuesto, la programación manual de la empresa establece los viajes de tal manera que el tiempo de espera sea cero (0).

Es importante mencionar que, en este modelo matemático las variables que representan una hora de inicio o fin de etapa del proceso toman valores continuos entre cero (0) y veinticuatro (24) para representar las horas del día. Esto afecta la factibilidad del modelo cuando la hora de inicio del proceso es temprana o cuando se debe programar un gran número de viajes, puesto que, se quiere el cargue y traslado de aves en horas del día anterior o siguiente. Por tanto, las simulaciones de las programaciones no superan 70 viajes al día.

5 CONCLUSIONES

El presente trabajo aborda la complejidad de la programación de recolección y transporte de pollos de engorde en una empresa avícola del departamento del Valle del Cauca, Colombia, para fortalecer la toma de decisiones logísticas de este proceso a través de la formulación y validación de modelos matemáticos.

La caracterización de la cadena de suministro avícola de la empresa, específicamente el eslabón de las granjas de engorde posibilita identificar los métodos y las decisiones logísticas involucradas en la programación de recolección y transporte de pollo de engorde. Esto constituye el punto de partida para la formulación de los modelos matemáticos, determinado los objetivos de priorización, las variables de decisión y las restricciones de operación.

La formulación de los modelos matemáticos permite mejoras en la optimización de los recursos y representa una metodología consistente para facilitar la toma de decisiones logísticas, generando soluciones óptimas en tiempos significativamente menores. En otras palabras, estos modelos ahorran tiempo y minimizan la posibilidad de errores humanos al simular una actividad que requiere entre tres y cuatro horas para ingresar datos y realizar cálculos manuales.

La validación de los modelos matemáticos planteados permite afirmar que son teóricamente sólidos y aplicables en el contexto operativo de la empresa. En comparación con la programación manual de la empresa, los resultados son coherentes y acorde a las limitaciones establecidas por la empresa, sin alteración o manipulación alguna de parámetros para realizar menos viajes.

El primer modelo matemático propuesto prioriza la minimización del número de viajes a realizar para cada granja y galpón de acuerdo con la demanda de aves a transportar y limitantes de recursos. Mientras que, el segundo modelo matemático propuesto prioriza la minimización de los tiempos de estabulación de los vehículos cargados con aves en el centro de sacrificio, factores determinantes en la tasa de mortalidad (DOA%), que se traducen en bienestar animal y menores pérdidas económicas.

Los modelos matemáticos planteados en el presente trabajo no solo proporcionan una herramienta eficiente para la programación de la recolección y transporte de pollos de

engorde, sino que también introducen una metodología que transforma la toma de decisiones logísticas en un proceso más rápido y confiable.

Finalmente, el presente trabajo aporta a las investigaciones del campo de la logística avícola de la región al integrar técnicas de modelación matemática con prácticas operativas específicas de la industria. Los modelos matemáticos propuestos pueden ser adaptados y aplicados en otras empresas del sector avícola según requerimientos, necesidades y características.

6 FUTURAS INVESTIGACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo, se extiende a la comunidad académica la posibilidad de continuar la investigación en campos relacionados con decisiones logísticas en el sector avícola del país.

La priorización de granjas de engorde para establecer el orden en la programación de viajes y sacrificio debe considerar una combinación de factores operativos, logísticos y comerciales, tales como: peso del ave, distancia y tiempo de viaje, ganancia de peso de las aves, condiciones climáticas ambientales, restricciones sanitarias, requerimientos de producción, entre otros. Así mismo, estos y otros factores influyen en la determinación del número óptimo de pollos por huacal que se deben cargar en un vehículo, para asegurar el bienestar animal u minimizar costos operativos.

Incluir en los modelos matemáticos métodos para la priorización de granjas y determinación de número de pollos por huacal más no como parámetro, mejoraría notablemente la toma de decisiones logísticas. Más aún, vincular en los modelos matemáticos los costos logísticos asociados para complementar la gestión de los recursos, de tal manera que se contribuya al rendimiento financiero y la sostenibilidad.

Finalmente, una implementación exitosa de los modelos matemáticos propuestos en la operación diaria de la empresa requiere de capacitación del personal encargado de esta actividad y/o desarrollo de aplicaciones o una interfaz que facilite el ingreso de datos, presentación y análisis de resultados.

BIBLIOGRAFÍA

Caffrey, N. P., Dohoo, I. R., & Cockram, M. S. (2017). Factors affecting mortality risk during transportation of broiler chickens for slaughter in Atlantic Canadá. *Preventive Veterinary Medicine*, 147, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.09.011>

Di Martino, G., Capello, K., Russo, E., Mazzucato, M., Mulatti, P., Ferrè, N., Garbo, A., Brichese, M., Marangon, S., & Bonfanti, L. (2017). Factors associated with pre-slaughter mortality in turkeys and end of lay hens. *Animal*, 11(12), 2295–2300. <https://doi.org/10.1017/S1751731117000970>

FENAVI. (2019). CONFORT ANIMAL.

FENAVI. (2023). FEDERACIÓN NACIONAL DE AVICULTORES DE COLOMBIA-FENAVI. www.fenavi.org

FENAVI (2024). EDICIÓN 308 – 2024 LO QUE VENDRÁ. <https://fenavi.org/revista-avicultores/edicion-308-2024-lo-que-vendra/>

Fernandes, C. R., Carnieri, C., & Barbosa, S. G. (2011). Aplicação da metaheurística GRASP na programação de caminhões para o transporte de aves domésticas. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, 32(2), 245–256. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2011v32n2p245>

Medeiros Milanez, E. (2000). Programação sincronizada do serviço de coleta: uma aplicação ao setor avícola.

Mitchell, M. A., & Kettlewell, P. J. (2009). Welfare of poultry during transport Main lecture Welfare of poultry during transport-a review.

Nijdam, E., Arens, P., Lambooij, E., Decuyper, E., & Stegeman, J. A. (2004). PROCESSING AND PRODUCTS Factors Influencing Bruises and Mortality of Broilers During Catching, Transport, and Lairage.

Oliveira, G. A., & Lindau, L. A. (2012). A framework for delivery scheduling in the poultry industry. *Journal of Scheduling*, 15(6), 757–772. <https://doi.org/10.1007/s10951-012-0267-z>

Plà-Aragonés, L. M. (2015). Handbook of Operations Research in Agriculture and the Agri-Food Industry. In International Series in Operations Research & Management Science. <http://www.springer.com/series/6161>

Solano-Blanco, A. L., González, J. E., & Medaglia, A. L. (2023). Production planning decisions in the broiler chicken supply chain with growth uncertainty. *Operations Research Perspectives*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2023.100273>

Vecerek, V., Grbalova, S., Voslarova, E., Janackova, B., & Malena, M. (2006). Effects of Travel Distance and the Season of the Year on Death Rates of Broilers Transported to Poultry Processing Plants.

Villalba, D., Díez-Unquera, B., Carrascal, A., Bernués, A., & Ruiz, R. (2019). Multi-objective simulation and optimisation of dairy sheep farms: Exploring trade-offs between economic and environmental outcomes. *Agricultural Systems*, 173, 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.011>

Warriss, EA Bevis, SN Brown y JE Edwards (1992) Los viajes más largos a las plantas de procesamiento están asociados con una mayor mortalidad en pollos de engorde, *British Poultry Science*, 33:1, 201-206.

ANEXOS

Anexo 1. Formulario de entrevista semi estructurada programación de sacrificio de pollo de engorde.

TEMA: PROGRAMACIÓN DE SACRIFICIO DE POLLO DE ENGORDE.

OBJETIVO

- Caracterizar el proceso de programación de sacrificio de pollo de engorde en la empresa objeto de estudio.

PREGUNTAS

1. ¿Cuáles son las etapas y/o lineamientos establecidos por la empresa para realizar la programación de sacrificio de pollo de engorde?
2. ¿Cómo se establecen las necesidades de sacrificio de pollo de engorde en la empresa?
3. ¿Cuáles son los factores que se tienen en cuenta para establecer las proyecciones de sacrificio de pollo de engorde?
4. ¿Cuál es el horizonte de tiempo de la programación de sacrificio de pollo de engorde en la empresa?
5. ¿Cómo se registra en el sistema de información de la empresa la programación de sacrificio de pollo de engorde?
6. ¿Qué factores se deben garantizar con la programación de sacrificio de pollo de engorde para un correcto procesamiento en la planta de beneficio?
7. ¿Cuáles son/serían las consecuencias de presentar errores en la programación de sacrificio de pollo de engorde? ¿Cuáles son las medidas establecidas para tratar estas consecuencias?

Anexo 2. Formulario de entrevista semi estructurada programación de transporte pollo de engorde.

TEMA: PROGRAMACIÓN DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE DE POLLO DE ENGORDE.

OBJETIVO

- Caracterizar el proceso de programación de recolección y transporte de pollo de engorde en la empresa objeto de estudio.

PREGUNTAS

1. ¿Cuáles son las etapas y/o lineamientos establecidos por la empresa para realizar la programación de recolección y transporte de pollo de engorde? ¿Cuáles son las partes interesadas en el proceso?
2. ¿Cuál es la información o los factores que se tienen en cuenta para la programación de recolección y transporte de pollo de engorde en la empresa?
3. ¿Cuál es el horizonte de tiempo de la programación de recolección y transporte de pollo de engorde en la empresa?
4. ¿Cómo identifican las granjas en las cuales se debe recolectar el pollo de engorde? ¿Cómo se establece el orden de recolección de pollo de engorde en las granjas de engorde?
5. ¿Cómo calculan o cuáles son los tiempos de viaje, cargue, descargue y espera establecidos? ¿Cómo calculan los tiempos y distancias entre granjas? ¿Cómo calculan los fletes de transporte?
6. ¿Cuántas cuadrillas de recolección hay disponibles para la recolección de pollo de engorde? ¿Cuáles son los turnos de las cuadrillas de recolección? ¿Cuál es la jornada laboral de las cuadrillas?
7. ¿Cuántos vehículos hay disponibles para la recolección de pollo de engorde? ¿Cuántos vehículos son propiedad de la empresa y contratistas? ¿Cuál es la rotación de los vehículos?
8. ¿Cuál es la capacidad de los vehículos? ¿Cuántos huacales se pueden cargar en un vehículo? ¿Cuántas aves se pueden transportar en un huacal? ¿Cómo se establece la cantidad de aves por huacal?
9. ¿Qué factores de mortalidad se buscan minimizar con la programación de recolección y transporte de pollo de engorde?
10. ¿Cómo se registra en el sistema de información de la empresa la programación de recolección y transporte de pollo de engorde en la empresa?
11. ¿Qué factores se deben garantizar con la programación de recolección y transporte de pollo de engorde para un correcto procesamiento en la planta de beneficio?

12. ¿Qué eventos repentinos han ocasionado cambios significativos en la programación de pollo de engorde?

13. ¿Cuáles serían las consecuencias de presentar errores en la programación de Qué eventos recolección y transporte de pollo de engorde? ¿Cuáles son las medidas establecidas para tratar estas consecuencias?

Anexo 3. *Formulario de entrevista semi estructurada programación de producción carne de pollo.*

TEMA: PROGRAMACIÓN DE PRODUCCIÓN CARNE DE POLLO.

OBJETIVO

- Caracterizar el proceso de programación de producción de carne de pollo en la empresa objeto de estudio.

PREGUNTAS

1. ¿Cuáles son las etapas y/o lineamientos establecidos por la empresa para realizar la programación de producción?
2. ¿Cómo se establecen las necesidades de producción en la empresa?
3. ¿Cuáles son los factores que se tienen en cuenta para establecer las proyecciones de producción?
4. ¿Cuál es el horizonte de tiempo de la programación de producción en la empresa?
5. ¿Cómo se registra en el sistema de información de la empresa la programación de producción?
6. ¿Qué factores se deben garantizar con la programación de producción de carne de pollo para un correcto flujo del proceso?
7. ¿Cuáles serían las consecuencias de presentar errores en la programación de producción? ¿Cuáles son las medidas establecidas para tratar estas consecuencias?