

Modelo Multiobjetivo para Optimizar la Trazabilidad en la Cadena de Suministro de la Carne Considerando Aspectos Económicos y Ambientales

Bárbara V. Schmidt¹ y M. Susana Moreno¹[0000-0001-5744-5586]

¹Planta Piloto de Ingeniería Química - PLAPIQUI (Universidad Nacional del Sur - CONICET),
Bahía Blanca 8000, Argentina
bschmidt@plapiqui.edu.ar

Resumen. El objetivo de este trabajo es presentar una herramienta cuantitativa para optimizar la trazabilidad en la cadena de suministro (CS) sostenible de productos cárnicos. El problema se formula como un modelo multiobjetivo de programación mixta entera lineal (MOMILP) que busca minimizar simultáneamente la dispersión total de lotes, los costos operativos y las emisiones de CO₂ en la cadena. Para resolver el modelo propuesto se emplea el método AUGMECON, obteniéndose como resultado el conjunto de soluciones óptimas de Pareto. La formulación permite no sólo determinar el número y tamaño de lotes generados a lo largo de la CS sino también identificar los lotes de animal que forman parte de cada lote de producto elaborado.

Palabras claves: Cadena de Suministro de la Carne, Dispersión por Lotes, Trazabilidad, Modelo MOMILP, Impacto Ambiental.

1 Introducción

Luego de los impactantes casos de enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs) ocurridos en los años 90 como el mal de las vacas locas, la preocupación de la sociedad por la seguridad alimentaria ha aumentado considerablemente. En respuesta a ello, los productores han implementado sistemas de trazabilidad que permitan el seguimiento, rastreo y control de los alimentos a lo largo de su CS, constituyendo una herramienta clave para garantizar la seguridad y calidad de los mismos y para satisfacer las normativas vigentes. En la industria alimentaria más de la mitad de los productos vendidos en el mundo son alimentos procesados que, en muchas ocasiones, involucran la mezcla de lotes generando nuevos desafíos para su trazabilidad [1]. Es en estos casos que, ante algún problema, los sistemas de trazabilidad permiten limitar su riesgo, pero no reducen la cantidad de productos a retirar del mercado.

En el problema de dispersión, lotes de materia prima, provenientes de diversos proveedores, con distinto precio y calidad, se mezclan para obtener lotes de productos finales. Particularmente, en la CS de la Carne (CSC) se llevan a cabo, además, procesos de desarmado y armado durante la elaboración de productos cárnicos. Esto incrementa

la probabilidad de contaminación del alimento, la cual podría ocasionar el retiro de partidas del mercado, así como la complejidad de su rastreo (trazabilidad hacia atrás) y seguimiento (trazabilidad hacia adelante).

Para abordar el problema de dispersión de lotes, se han desarrollado modelos de optimización, siendo uno de los trabajos pioneros el realizado por Dupuy y col. [2]. Con el fin de optimizar la trazabilidad a nivel planta, los autores desarrollaron un modelo de programación mixta entera lineal (MILP) que minimiza la dispersión durante la producción de salchichas reduciendo la mezcla y tamaños de lotes, para limitar el costo e impacto mediático en caso de tener que retirar productos del mercado. Dabbene y col. [3] utilizan un grafo que representa la conexión entre los nodos (lotes) en el proceso de producción para desarrollar una formulación MILP que emplea el costo de retiro del mercado para el peor caso como criterio para optimizar la trazabilidad. Recientemente, Maity y col. [4] ampliaron el modelo de dispersión propuesto en [2] al proponer un modelo de optimización estocástico de dos etapas que considera incertidumbre en las demandas en el proceso de elaboración de salchichas.

Por otra parte, un tercio de las emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) provienen del sistema alimentario [1]. Es por ello que, en estos últimos años, se ha enfatizado el estudio e implementación de modelos de optimización que incorporen diferentes aspectos de la sostenibilidad en las CS agroalimentarias. Específicamente, para la CSC Soysal y col. [5] desarrollaron un modelo multiobjetivo de programación lineal (MOLP) para abordar el problema de una red logística genérica de carne de res. Se minimizan los costos logísticos, así como las emisiones de GEI generadas por el transporte y se emplea el método de ε -constraint para resolver el modelo propuesto. Mohammed y Wang [6] desarrollaron un modelo difuso MOMILP para diseñar una CSC de tres niveles minimizando el costo total de transporte, las emisiones de CO₂ generadas por los vehículos y los tiempos de distribución de los productos al mismo tiempo que se maximiza la tasa de entrega promedio de los mismos para satisfacer la demanda. Por último, Gholami-Zanjani y col. [7] propusieron un modelo MILP estocástico de dos etapas para abordar la planificación del inventario en una CSC de tres niveles donde estudiaron dos objetivos: maximizar el beneficio total y minimizar las emisiones de CO₂ causadas por el transporte, el mantenimiento de inventarios y el manejo de los alimentos. Además, incorporaron dos estrategias de resiliencia para protegerse de las posibles interrupciones durante la producción.

Teniendo en cuenta los avances mencionados anteriormente, en este trabajo se presenta un nuevo modelo MOMILP para optimizar la trazabilidad en la CSC considerando, además, aspectos económicos y ambientales. Así, la formulación propuesta minimiza simultáneamente tres objetivos: la dispersión de lotes, los costos operativos que involucran la compra de animales y los costos de energía, y las emisiones de CO₂ originadas por el consumo eléctrico y el transporte de animales y productos. En base a estos criterios contrapuestos, el problema consiste en decidir qué actores participarán en la CS, determinar el tamaño y número de lotes generados en cada eslabón identificando los lotes que cada frigorífico entrega a los establecimientos y los que éstos últimos envían a los minoristas. El modelo se resuelve mediante el método AUGMECON que encuentra un conjunto de soluciones óptimas de Pareto permitiendo seleccionar una de ellas de acuerdo a las preferencias del decisor.

2 Descripción del Problema

La Fig. 1 muestra la estructura de la CSC bajo estudio. En cada frigorífico $f \in \{1, \dots, F\}$ se faena una o más especies animales $a \in \{1, \dots, A_f\}$ generándose $h \in \{1, \dots, H_{af}\}$ lotes para cada una. Estos animales se venden a los establecimientos elaboradores $e \in \{1, \dots, E\}$ en forma de media res cuyo desposte en $m \in \{1, \dots, M_e\}$ materias primas genera $i \in \{1, \dots, I_{me}\}$ lotes. Dichas materias primas se cortan en la siguiente etapa de la planta para obtener los $c \in \{1, \dots, C_e\}$ componentes que, una etapa posterior, se mezclan en las proporciones adecuadas para obtener los $k \in \{1, \dots, K_{pe}\}$ lotes de los $p \in \{1, \dots, P_e\}$ productos elaborados en cada establecimiento e siguiendo una receta conocida. En última instancia, los productos p se distribuyen a $r \in \{1, \dots, R\}$ minoristas con el fin de satisfacer sus demandas D_{pr} en un horizonte de tiempo HT .

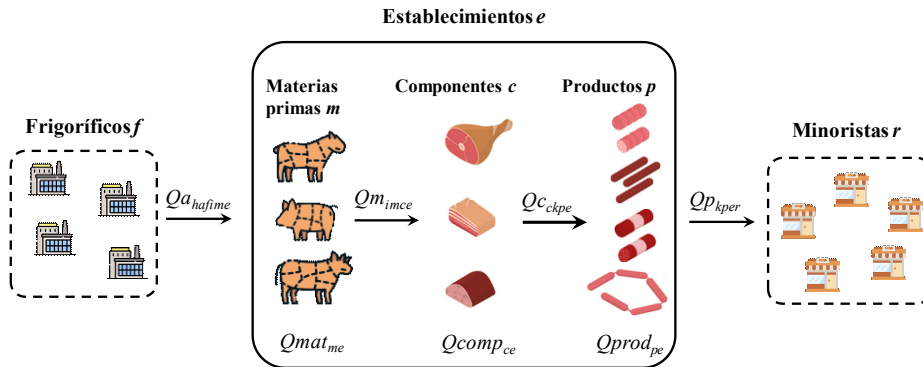


Fig. 1. Estructura de la CSC tomada como referencia en este trabajo.

En este trabajo, el máximo número de lotes de animal, materia prima y producto (H_{af} , I_{me} y K_{pe}) se calculan en base a los datos de demanda y al mínimo tamaño posible de lote para cada uno de ellos (bt_{af}^{min} , b_{me}^{min} , bs_{pe}^{min}).

Las funciones objetivo del problema consisten en minimizar la dispersión de lotes, los costos operativos y el impacto ecológico en la CSC. El modelo propuesto permite determinar el número y tamaño de los lotes de animal, materia prima y producto generados en la CSC seleccionando el frigorífico proveedor e identificando los lotes de animal que son suministrados a cada establecimiento y los lotes de producto entregados por estos últimos a cada minorista. En otras palabras, la formulación permite seguir el lote de animal que finalmente formará parte de cada lote de producto entregado a cada minorista representando así su trazabilidad.

4

3 Formulación Matemática

3.1 Restricciones de los frigoríficos

$$bt_{af}^{min} \cdot x_{haf} \leq BT_{haf} \leq bt_{af}^{max} \cdot x_{haf} \quad \forall h \in H_{af}, a \in A_f, f \quad (1)$$

$$x_{h+1,af} \leq x_{haf} \quad \forall 1 \leq h < H_{af}, a \in A_f, f \quad (2)$$

$$BT_{h+1,af} \leq BT_{haf} \quad \forall 1 \leq h < H_{af}, a \in A_f, f \quad (3)$$

$$Qan_{af} = \sum_{h \in H_{af}} BT_{haf} \quad \forall a \in A_f, f \quad (4)$$

$$Pa_{am} \cdot BT_{haf} = \sum_e \sum_{i \in I_{me}} Qa_{hafime} \quad \forall h \in H_{af}, a \in A_f, f, m \in MR_{ae} \quad (5)$$

$$\sum_e \sum_{m \in MR_{ae}} \sum_{i \in I_{me}} Qa_{hafime} \leq Qa_{af}^{max} \cdot x_{haf} \quad \forall h \in H_{af}, a \in A_f, f \quad (6)$$

La Ec. (1) establece que el tamaño del batch h de animal a en el frigorífico f (BT_{haf}) deberá estar entre su cota inferior y superior ($bt_{af}^{min}, bt_{af}^{max}$). Para ello se define la variable binaria x_{haf} que tomará el valor 1 si el batch h de animal a se genera en el frigorífico f , y 0 en caso contrario. Las Ecs. (2) y (3) aseguran que la generación de los lotes y la selección de sus tamaños, respectivamente, sigan un orden creciente. La Ec. (4) define la cantidad total de animal a procesada en el frigorífico f (Qan_{af}) como la suma de los lotes generados. La Ec. (5) mediante la variable continua Qa_{hafime} , representa el proceso de despostado de la media res para obtener los cortes de materia prima de acuerdo a la proporción conocida Pa_{am} . Si el batch h existe ($x_{haf} = 1$), la Ec. (6) asegura que dicha variable no supere la cantidad máxima de animal que se puede procesar en el frigorífico (Qa_{af}^{max}).

3.2 Restricciones de los establecimientos

$$w_{ime} \leq \sum_f \sum_{h \in H_{af}} x_{haf} \quad \forall a \in A_f, i \in I_{me}, m \in M_e, e \quad (7)$$

$$b_{me}^{min} \cdot w_{ime} \leq B_{ime} \leq b_{me}^{max} \cdot w_{ime} \quad \forall i \in I_{me}, m \in M_e, e \quad (8)$$

$$w_{i+1,me} \leq w_{ime} \quad \forall 1 \leq i < I_{me}, m \in M_e, e \quad (9)$$

$$B_{i+1,me} \leq B_{ime} \quad \forall 1 \leq i < I_{me}, m \in M_e, e \quad (10)$$

$$B_{ime} = \sum_f \sum_{a \in A_f} \sum_{h \in H_{af}} Q a_{hafime} \quad \forall i \in I_{me}, m \in M_e, e \quad (11)$$

$$\sum_f \sum_{a \in A_f} \sum_{h \in H_{af}} Q a_{hafime} \leq Q a_{af}^{max} \cdot w_{ime} \quad \forall i \in I_{me}, m \in M_e, e \quad (12)$$

$$P m_{mc} \cdot B_{ime} \geq Q m_{imce} \quad \forall i \in I_{me}, m \in M_e, c \in CS_{me}, e \quad (13)$$

$$Q m_{imce} \leq Q m_{me}^{max} \cdot w_{ime} \quad \forall i \in I_{me}, m \in M_e, c \in CS_{me}, e \quad (14)$$

$$Q mat_{me} = \sum_{i \in I_{me}} B_{ime} \quad \forall m \in M_e, e \quad (15)$$

$$Q mat_{me} \geq \sum_{c \in CS_{me}} \sum_{i \in I_{me}} Q m_{imce} \quad \forall m \in M_e, e \quad (16)$$

$$Q comp_{ce} = \sum_{m \in MS_{ce}} \sum_{i \in I_{me}} Q m_{imce} \quad \forall c \in C_e, e \quad (17)$$

$$Q comp_{ce} = \sum_{p \in PS_{ce}} \sum_{k \in K_{pe}} Q c_{ckpe} \quad \forall c \in C_e, e \quad (18)$$

$$b S_{pe}^{min} \cdot z_{kpe} \leq B S_{kpe} \leq b S_{pe}^{max} \cdot z_{kpe} \quad \forall k \in K_{pe}, p \in P_e, e \quad (19)$$

$$z_{k+1,pe} \leq z_{kpe} \quad \forall 1 \leq k < K_{pe}, p \in P_e, e \quad (20)$$

$$B S_{k+1,pe} \leq B S_{kpe} \quad \forall 1 \leq k \leq K_{pe}, p \in P_e, e \quad (21)$$

$$P c_{cp} \cdot B S_{kpe} = Q c_{ckpe} \quad \forall c \in CR_{pe}, k \in K_{pe}, p \in P_e, e \quad (22)$$

$$Q c_{ckpe} \leq Q c_{ce}^{max} \cdot z_{kpe} \quad \forall c \in CR_{pe}, k \in K_{pe}, p \in P_e, e \quad (23)$$

$$Q prod_{pe} = \sum_{k \in K_{pe}} B S_{kpe} \quad \forall p \in P_e, e \quad (24)$$

$$Q prod_{pe} = \sum_{c \in CR_{pe}} \sum_{k \in K_{pe}} Q c_{ckpe} \quad \forall p \in P_e, e \quad (25)$$

Para indicar la generación de lotes en cada establecimiento e se introduce la variable binaria w_{ime} la cual adopta el valor 1 si el batch i de materia prima m se genera y 0 en otro caso. La Ec. (7) establece que la generación de lotes i de materias primas m que provienen de un determinado animal a en los establecimientos implican la generación previa de los lotes h de ese animal a en los frigoríficos. El tamaño del lote i de materia prima m en el establecimiento e (B_{ime}) está delimitado por sus cotas superior b_{me}^{max} e inferior b_{me}^{min} como lo establece la Ec. (8). Las Ecs. (9) y (10) garantizan que los lotes de materia prima y sus tamaños se generen en orden ascendente evitando así soluciones alternativas. En la Ec. (11) se calcula el tamaño del lote de materia prima sumando todos los lotes de un dado animal que llegan desde los distintos frigoríficos. Si el batch

existe ($w_{ime} = 1$), la Ec. (12) establece que la cantidad Qa_{hafime} no debe superar su cota superior (Qa_{af}^{max}).

Utilizando la proporción Pm_{mc} , la Ec. (13) expresa el proceso de desarmado de la materia prima m en los cortes de carne c en los establecimientos, donde Qm_{imce} es la cantidad de componente c que proviene del lote i . La Ec. (14) limita esta variable a la máxima cantidad de materia prima que se puede procesar en el establecimiento (Qm_{me}^{max}). La Ec. (15) define la cantidad total de materia prima disponible en cada establecimiento ($Qmat_{me}$) mientras que la Ec. (16) establece que la suma de las cantidades de todos los componentes obtenidos a partir de ella no podrá superar este valor. Cabe resaltar que cada materia prima permite obtener distintos componentes. Las Ecs. (17) y (18) definen la cantidad total del corte c en cada establecimiento ($Qcomp_{ce}$) en relación con los lotes de materias primas que se procesaron en la planta, (Qm_{imce}) y con las cantidades de componente c utilizadas para la elaboración de los lotes de productos (Qc_{ckpe}), respectivamente.

Con el objeto de determinar la generación de lotes de producto se define la variable binaria z_{kpe} , que tomará el valor 1 si el batch k de producto p se genera en el establecimiento e y 0 en caso contrario. La Ec. (19) establece que el tamaño del batch k de producto p en el establecimiento e (BS_{kpe}) no puede exceder sus límites máximos y mínimos, bs_{pe}^{max} y bs_{pe}^{min} . Las Ecs. (20) y (21) obligan a que tanto las bachadas de producto como sus tamaños se generen en orden ascendente, reduciendo así el espacio de búsqueda. La elaboración o armado del producto expresada en la Ec. (22) calcula la cantidad de componente c que formará parte del lote k de producto p en un dado establecimiento e (Qc_{ckpe}) respetando la proporción Pc_{cp} dada por la receta de producción. Por otro lado, si el lote existe ($z_{kpe} = 1$) la Ec. (23) impide que esta cantidad supere la cantidad máxima de componente que se puede procesar en el establecimiento (Qc_{ce}^{max}). Los balances de masa de las Ecs. (24) y (25) establecen que la cantidad total de producto p elaborado en el establecimiento e ($Qprod_{pe}$) sea igual a la suma de todos los lotes k y todos los componentes c que lo conforman, respectivamente.

3.3 Restricciones de los minoristas

$$D_{pr} = \sum_e \sum_{k \in K_{pe}} Qp_{kper} \quad \forall p \in P_e, r \quad (26)$$

$$\sum_r Qp_{kper} \leq BS_{kpe} \quad \forall k \in K_{pe}, p \in P_e, e \quad (27)$$

$$\sum_{k \in K_{pe}} \sum_r Qp_{kper} \leq Qprod_{pe} \quad \forall p \in P_e, e \quad (28)$$

La Ec. (26) asegura la satisfacción de la demanda del producto p en los distintos minoristas r . Las Ec. (27) y (28) establecen que la cantidad de producto p perteneciente al lote k producido en el establecimiento e que se envía a los minoristas r (Qp_{kper}) no

puede superar el tamaño de lote (BS_{kpe}) ni la cantidad de producto p disponible en el establecimiento, respectivamente.

3.4 Restricciones de conexión y utilización de bachadas

$$Qad_{afe} = \left(\sum_{h \in H_{af}} \sum_{i \in I_{me}} \sum_{m \in MR_{ae}} Qa_{hafime} \right) / \sum_{m \in M_e} Pa_{me} \quad \forall a \in A_f, f, e \quad (29)$$

$$Qs_{per} = \sum_{k \in K_{pe}} Qp_{kper} \quad \forall p \in P_e, e, r \quad (30)$$

$$v_{hafime} \leq x_{haf} \quad \forall h \in H_{af}, a \in A_f, f, i \in I_{me}, m \in MR_{ae}, e \quad (31)$$

$$v_{hafime} \leq w_{ime} \quad \forall h \in H_{af}, a \in A_f, f, i \in I_{me}, m \in MR_{ae}, e \quad (32)$$

$$Qa_{hafime} \leq Qa_{af}^{\max} \cdot v_{hafime} \quad \forall h \in H_{af}, a \in A_f, f, i \in I_{me}, m \in MR_{ae}, e \quad (33)$$

$$\sum_{ii} v_{fahe,ii,mm} \geq v_{faheim} \quad \forall h \in H_{af}, a \in A_f, i \in I_{me}, (m \wedge mm) \in MR_{ae}, e \quad (34)$$

$$y_{imckpe} \leq w_{ime} \quad \forall i \in I_{me}, m \in MS_{ce}, c \in CR_{pe}, k \in K_{pe}, p \in P_e, e \quad (35)$$

$$y_{imckpe} \leq z_{kpe} \quad \forall i \in I_{me}, m \in MS_{ce}, c \in CR_{pe}, k \in K_{pe}, p \in P_e, e \quad (36)$$

$$Qmcp_{imckpe} \leq Qcomp_{ce}^{\max} \cdot y_{imckpe} \quad (37)$$

$$\forall i \in I_{me}, m \in MS_{ce}, c \in CR_{pe}, k \in K_{pe}, p \in P_e, e$$

$$\sum_{p \in PS_{ce}} \sum_{k \in K_{pe}} Qmcp_{imckpe} = Qm_{imce} \quad \forall i \in I_{me}, m \in MS_{ce}, c \in C_e, e \quad (38)$$

$$\sum_{m \in MS_{ce}} \sum_{i \in I_{me}} Qmcp_{imckpe} = Qc_{ckpe} \quad \forall c \in CR_{pe}, k \in K_{pe}, p \in P_e, e \quad (39)$$

Las Ecs. (29) y (30) rigen las conexiones entre los actores de la CS indicando la cantidad total de animal a que envía el frigorífico f al establecimiento e (Qad_{afe}) y la cantidad total de producto p que entrega el establecimiento e al minoristas r (Qs_{per}), respectivamente.

Por otra parte, las restricciones (31) a (39) rigen la utilización de bachadas en la CSC. Para determinar si el batch h de animal a del frigorífico f es utilizado en el batch i de materia prima m en el establecimiento e se define la variable binaria v_{hafime} . Así, para que el lote h de animal a se pueda asignar al lote i de materia prima m en alguno de los establecimientos e de la CS, previamente se deben generar el lote h del animal a

en el frigorífico f ($x_{haf} = 1$) y el lote i de materia prima m en el establecimiento e ($w_{ime} = 1$) como lo establecen las Ecs. (31) y (32). La Ec. (33) asegura que Qa_{hafime} no supere la cantidad máxima de animal que se puede procesar en el frigorífico. La Ec. (34) garantiza que se generen todas las materias primas m , distribuidas en los lotes i , en el establecimiento e , correspondientes a cada lote h de animal a proveniente del frigorífico f , si al menos una materia prima m es requerida para la elaboración del producto. Con el fin de seguir el alimento dentro del establecimiento, se incorpora la variable binaria y_{imckpe} cuyo valor será igual a 1 si el batch i de materia prima m genera el componente c y este es utilizado en el batch k de producto terminado p en el establecimiento e y 0 en caso contrario. Las Ecs. (35) y (36) aseguran que la variable binaria y_{imckpe} tomará valor 1 solo si se generan el batch i de materia prima m ($w_{ime} = 1$) y el batch k de producto p en el establecimiento e ($z_{kpe} = 1$), respectivamente. La variable continua $Qmcp_{imckpe}$ se define con el fin de rastrear el lote i de materia prima m que forma parte del lote k de producto final p en el establecimiento e y mediante las Ecs. (37) a (39) se vincula con la variable binaria y_{imckpe} , con la cantidad de materia prima m que se transforma en componente c y con la cantidad de componente c que se utiliza para elaborar el producto p , respectivamente.

3.5 Funciones Objetivo

Minimizar la dispersión de los lotes:

$$Z_1 = \sum_f \sum_{a \in A_f} \sum_{h \in H_{af}} \sum_e \sum_{m \in MR_{ae}} \sum_{i \in I_{me}} v_{hafime} + \sum_e \sum_{m \in MS_{ce}} \sum_{i \in I_{me}} \sum_{c \in CR_{pe}} \sum_{p \in P_e} \sum_{k \in K_{pe}} y_{imckpe} \quad (40)$$

Minimizar el costo total:

$$Z_2 = \sum_f \sum_e \sum_{a \in A_f} CR_{af} \cdot Qad_{afe} + \sum_f \sum_e TCR \cdot TDR_{fe} \cdot \sum_{a \in A_f} Qad_{afe} + \sum_f OCF \cdot \sum_{a \in A_f} Qan_{af} + \sum_e OCE \cdot \sum_{p \in P_e} Qprod_{pe} + \sum_e \sum_r TCP \cdot TDP_{er} \cdot \sum_{p \in P_e} Qs_{per} \quad (41)$$

El criterio Z_2 se compone de 5 términos. El primero incluye el costo de compra de animales a los frigoríficos, donde CR_{af} es el precio por kg de animal a en el frigorífico f . El segundo término refiere al costo de transporte de las medias reses desde los frigoríficos a los establecimientos, siendo TDR_{fe} la distancia en km desde el frigorífico f al establecimiento e y TCR el costo de traslado por km y kg de animal. El tercer y el cuarto término consideran los costos referidos al consumo energético de los frigoríficos y los establecimientos, respectivamente, donde OCF es el costo asociado al consumo de energía por kg de animal faenado y OCE por kg de producto elaborado. El último término representa el costo asociado al transporte de productos desde los establecimientos a los

minoristas donde el parámetro TDP_{er} es la distancia en km entre el establecimiento e y el minorista r y TCP es el costo unitario de traslado por km y por kg de producto.

Minimizar el impacto ambiental:

$$Z_3 = ITR \cdot \sum_{a \in A_f} \sum_f \sum_e TDR_{fe} \cdot Qad_{afe} + ITP \cdot \sum_{p \in P_e} \sum_e \sum_r TDP_{er} \cdot Qs_{per} + IE \cdot \left(\sum_{a \in A_f} \sum_f ECR_a \cdot Qan_{af} + \sum_{p \in P_e} \sum_e ECP_p \cdot Qprod_{pe} \right) \quad (42)$$

En la Ec. (42) se consideran las dos fuentes principales de emisiones de GEI las que corresponden al transporte y al consumo de energía en la CSC. El primer y segundo término refieren a las emisiones causadas por el transporte de las medias reses desde los frigoríficos a los establecimientos, y de productos, desde los establecimientos a los minoristas, donde ITR e ITP representan el factor de emisión asociado a vehículos pesados y para vehículos livianos, respectivamente, expresados en kg equivalentes de CO_2 por km y kg de animal (kg CO_{2EQ} /km). El último término refiere a emisiones indirectas, como es el caso de la energía consumida por los actores de la cadena, siendo ECR_a el consumo energético por unidad de animal faenado y ECP_p por unidad de producto elaborado. El parámetro IE es el factor de impacto antropogénico asociado a dicho consumo para industrias productoras de alimentos (en kg CO_{2EQ} /kWh).

4 Método de resolución

Los métodos de optimización multiobjetivo se pueden clasificar en a priori, progresivos, a posteriori y sin articulación según la etapa de decisión en la que el decisor expresa sus preferencias sobre los objetivos [8]. Entre los métodos con articulación posterior de preferencias, la técnica ε -constraint ha sido utilizada en multiplicidad de aplicaciones. Para resolver el problema MOMILP, en este trabajo se utiliza una versión mejorada de este método denominada AUGMECON (*augmented ε -constraint method*) [9] que siempre genera soluciones de Pareto eficientes. La implementación del método incluye la elección de una función objetivo como criterio principal. A continuación, se utiliza la optimización lexicográfica para generar la tabla de pagos que permite encontrar el rango (valor máximo y mínimo) de cada función objetivo. Luego, se divide cada rango en intervalos iguales, en los que se resuelve un subproblema cuyo resultado es la solución óptima de Pareto. La selección de la cantidad de intervalos permite controlar la densidad del conjunto de soluciones eficientes. Como resultado, se obtiene un conjunto de soluciones óptimas de Pareto.

5 Ejemplo y discusión de resultados

Para analizar el comportamiento del modelo se presenta como ejemplo una CSC que consta de 4 frigoríficos, 2 establecimientos y 5 minoristas. En ella se faenan 2 tipos de animales y se elaboran 7 productos utilizando 8 cortes de carne (materias primas) y 12

subcortes de estos últimos (componentes). Los productos son: chorizo puro cerdo (p1), salame (p2), morcilla (p3), mortadela (p4), salchicha de viena (p5), jamón cocido (p6) y chorizo de segunda calidad o mezcla (p7). En particular, en el frigorífico f1 se faenan cerdos (a1) con un precio de 223 \$/kg, en f2 vacas (a2) a un precio de 348 \$/kg, en f3 ambas especies (a1 y a2) cuyos precios son 117 \$/kg y 281 \$/kg y en f4 también a1 y a2 a un precio de 173 \$/kg y 220 \$/kg cada uno. La planta e1 elabora los productos p1, p2, p4 y p6 y e2 produce p3, p5, p6 y p7. El número máximo de lotes de animal es $H_{f1}= 7$ para f1, $H_{f2}= 3$ para f2, $H_{f3}= 4$ para f3 y $H_{f4}= 4$ para f4 y el valor correspondiente para materias primas y productos en los establecimientos es $I = 5$ y $K = 4$, respectivamente.

En la Tabla 1 se presentan las demandas de los minoristas correspondientes al horizonte de un mes. Los datos de desarmado de animales y materias primas, de armado de productos (Pa_{am} , Pm_{mc} , Pc_{cp}) y de distancias entre los actores de la CS no se reportan por cuestiones de espacio. Los factores de emisión son: $IE= 0,37$ kg CO_{2EQ}/kWh, $ITR= 4,89 \times 10^{-6}$ kg CO_{2EQ}/(km kg) e $ITP= 3,77 \times 10^{-6}$ kg CO_{2EQ}/(km kg).

Tabla 1. Demandas de cada producto.

	D_{pr} (kg)				
	r1	r2	r3	r4	r5
p1	250	750	50	200	100
p2	2000	200	50	550	50
p3	150	1000	0	250	150
p4	1100	0	50	150	0
p5	2250	0	50	450	0
p6	1750	0	50	175	50
p7	100	300	0	50	50

La formulación se implementó en el software GAMS 35.1.0 empleando el código CPLEX 20.1.0.1 y se ejecutó en una PC Intel(R) Core (TM) i7-6700, 3.4 GHz, 8 GB RAM. El problema involucra 9.031 ecuaciones, 4.090 variables continuas y 1.758 binarias. Considerando la dispersión de lotes como objetivo principal en el método AUGMECON y dividiendo el rango de cada criterio en 10 intervalos, se obtuvieron 22 puntos de Pareto en un tiempo de resolución total de 48.340 CPU s con una diferencia de integralidad de 0% en todas las iteraciones.

Las Figs. 2, 3 y 4 muestran las soluciones óptimas al minimizar los criterios de costos, emisiones de CO₂ y dispersión, respectivamente y la matriz de pagos se presenta en la Tabla 2. Como se puede ver en la Fig. 2, al minimizar el costo total se selecciona a f3 y a f4 para abastecer a las plantas de a1 y a2, respectivamente, principalmente debido a que ofrecen los menores precios por kg de animal. En cambio, en la Fig. 3 se observa que f1 y f2 son los que abastecen a la CSC dado que las distancias entre dichos frigoríficos y los establecimientos son menores que la distancia de estos últimos con f3 y f4, lo que equivale a menores emisiones generadas por el transporte de medias reses. El valor de 42 obtenido al minimizar la dispersión implica que los 4 lotes h de a1 y a2 obtenidos en f2, f3 y f4 se dispersan en 16 lotes i de materias primas los que después, forman parte de 8 lotes k de producto final generados en e1 y e2. Si en la Fig. 4 se rastrea la elaboración de los 1300 kg de p4 (mortadela), se puede ver que se generó un

solo batch k1 en la planta e1 donde se utilizan 130 kg de c3 provenientes del lote i1 de m3, 260 kg de c7 aportados por el lote i1 de m6, 520 kg de c9 correspondientes al lote i1 de m7 y 390 kg de c11 generados a partir del batch i1 de m8. Asimismo, se puede observar que el lote i1 de m3 y el lote i1 de m6 se generan a partir del lote h1 de cerdo (a1) proveniente de f3, mientras que el lote i1 de m7 y m8 es generado por el lote h1 de vaca (a2) de f4.

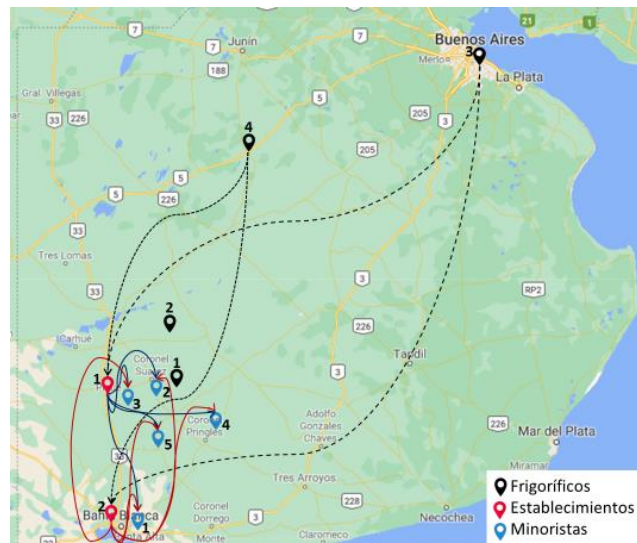


Fig. 2. Solución óptima al minimizar el costo total.

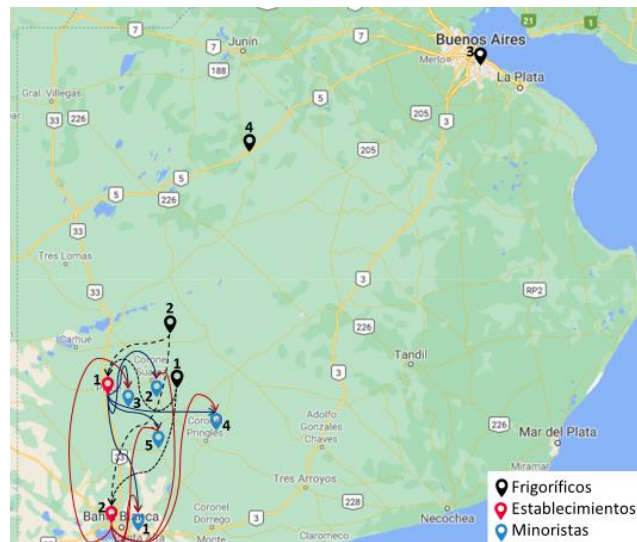


Fig. 3. Solución óptima al minimizar el impacto ambiental.

Tabla 2. Tabla de pagos.

	Dispersión	Costo operativo (\$)	Emisiones (kg CO ₂ EQ)
Dispersión	42	12.243.760	2166,2
Costo operativo (\$)	51	11.944.500	2162,1
Emisiones (kg CO ₂ EQ)	73	12.663.510	2071,4

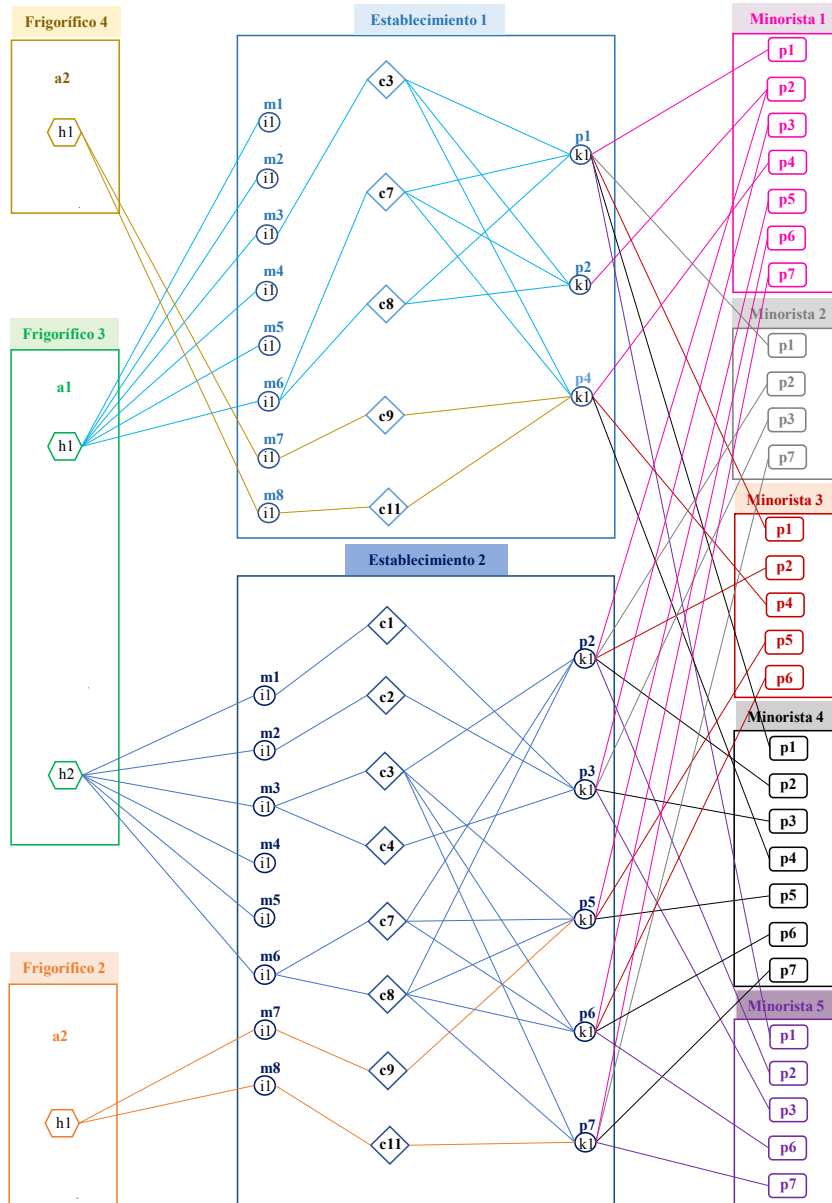


Fig. 4. Solución óptima al minimizar la dispersión.

Finalmente, en la Fig. 5 se representan los puntos óptimos de Pareto obtenidos al resolver el modelo multiobjetivo, entre los cuales el tomador de decisión podrá seleccionar la mejor solución del problema en base a sus preferencias. Cualquiera que sea elegida es una buena representación ya que las soluciones son valores óptimos. A modo de ejemplo, si se selecciona como solución de compromiso el punto señalado en la Fig. 5 se obtiene un valor para la dispersión de 46, un costo operativo de 12.447.810 \$ y un total de emisiones de 2150,63 kg CO_{2EQ}, el cual presenta un incremento del 9,52% para Z₁, 4,21% para Z₂ y 3,82% para Z₃ respecto al valor óptimo para cada criterio. En esta solución, f1 abastece de a1 a e2, f3 provee de a1 a ambos establecimientos y f4 suministra a2 a e1 y e2. El valor de 46 para Z₁ indica que 4 lotes *h* de a1 y a2 provenientes en f1, f3 y f4 se dispersan en 16 lotes *i* de materias primas para formar los 7 lotes *k* de producto final en e1 y e2. En la Tabla 3, se pueden observar los productos que elabora cada establecimiento junto al lote y cantidad con que se abastece a cada minorista.

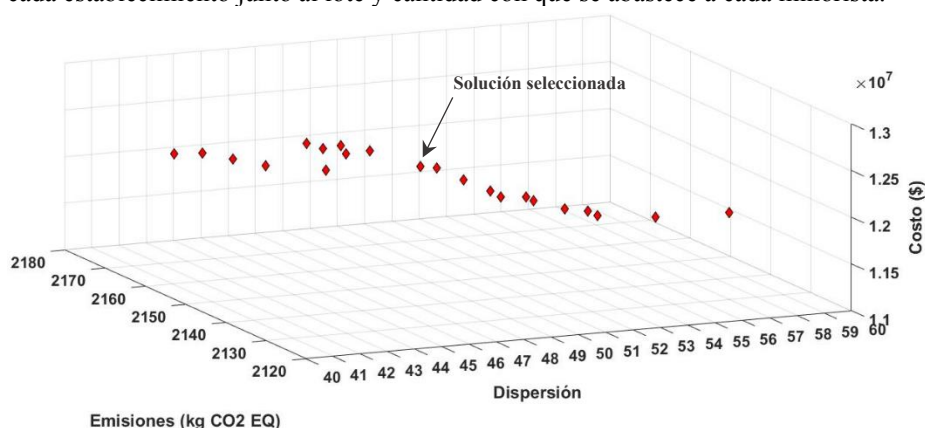


Fig. 5. Conjunto de soluciones de Pareto.

Tabla 3. Valores de Qp_{kper} .

	Qp_{kper} (kg)						
	Establecimiento 1		Establecimiento 2				
	p1 k1	p4 k1	p2 k1	p3 k1	p5 k1	p6 k1	p7 k1
r1	250	1100	2000	150	2250	1750	100
r2	750	0	200	1000	0	0	300
r3	50	50	50	0	50	50	0
r4	200	150	550	250	450	175	50
r5	100	0	50	150	0	50	50

6 Conclusiones

En este estudio se propuso un modelo MOMILP para optimizar la trazabilidad en la CS de productos cárnicos combinando tres criterios de desempeño orientados a disminuir la dispersión de los lotes, el costo total y el impacto ambiental. Se considera una CSC

de 3 niveles, conformada por frigoríficos, establecimientos y minoristas. Para resolver el problema multiobjetivo se utiliza el método AUGMECON que obtiene el conjunto de soluciones eficientes, entre las cuales el decisor elige aquella que se adapte mejor a sus preferencias.

El modelo desarrollado fue aplicado a un ejemplo para su validación. Los resultados muestran la capacidad de esta herramienta para abordar la trazabilidad a través del seguimiento de los lotes, permitiendo determinar los actores intervinientes en la cadena, los lotes generados para cada animal en los frigoríficos y los lotes de materias primas y productos en los establecimientos identificando el establecimiento que abastece a cada minorista. Asimismo, se obtienen los costos asociados a la compra de animal, transporte y energía y las emisiones inherentes al consumo energético durante la producción y aquellas emitidas por los vehículos durante el transporte de las medias reses de animal y la distribución de los productos.

Al minimizar la dispersión total, el número y tamaño de los lotes seleccionados garantizan que la cantidad de producto a retirar del mercado, en caso de problemas, sea la menor posible. La optimización simultánea de costos, emisiones GEI y trazabilidad, permite abordar las relaciones de compromiso entre estos objetivos que influirán tanto en la elección de los actores intervinientes en la cadena como en la determinación del número de lotes generados en cada eslabón.

Referencias

1. Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., Leip, A.: Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2, 198–209 (2021).
2. Dupuy, C., Botta-Genoulaz, V., Guinet, A.: Batch dispersion model to optimise traceability in food industry. *Journal of Food Engineering* 70, 333–339 (2005).
3. Dabbene, F., Gay, P.: Food traceability systems: Performance evaluation and optimization. *Computers and Electronics in Agriculture* 75, 139–146 (2011).
4. Maity M., Tolooie A., Sinha A. K., Tiwari M. K.: Stochastic batch dispersion model to optimize traceability and enhance transparency using Blockchain. *Computers & Industrial Engineering* 154, 107134 (2021).
5. Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Van Der Vorst, J. G.: Modelling food logistics networks with emission considerations: The case of an international beef supply chain. *International Journal of Production Economics*, 152, 57-70 (2014).
6. Mohammed, A., Wang, Q.: The fuzzy multi-objective distribution planner for a green meat supply chain. *International Journal of Production Economics*, 184, 47-58 (2017).
7. Gholami-Zanjani, S. M., Jabalameli, M. S., Pishvae, M. S.: A resilient-green model for multi-echelon meat supply chain planning, *Computers & Industrial Engineering*. *Computers & Industrial Engineering* 152, 107018 (2021).
8. Hwang, C. L., Paidy, S. R., Yoon, K., Masud, A. S. M.: Mathematical programming with multiple objectives: a tutorial. *Computers and Operations Research*, 7, 5-31 (1980).
9. Mavrotas, G.: Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied Mathematics and Computation* 213, 455–465 (2009).