

Modelo Resiliente y Sostenible para Optimizar la Trazabilidad en la Cadena de Suministro de la Carne

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. En este trabajo se optimiza la trazabilidad en la cadena de suministro de la carne (CSC) considerando no solo aspectos económicos y ambientales sino también estrategias de resiliencia para reducir su vulnerabilidad en un contexto incierto. El problema se formula como un modelo multiobjetivo de programación mixta entera lineal (MOMILP) que busca optimizar simultáneamente la dispersión total de lotes, los beneficios totales y las emisiones de CO₂ considerando interrupciones en la cadena e incertidumbre en la demanda de productos. Para resolver el modelo propuesto se emplea el método de Programación por Metas (PPM), obteniéndose un conjunto reducido de soluciones entre las cuales el encargado de la toma de decisión seleccionará la que mejor se adapte a sus preferencias. La formulación permite realizar el seguimiento de lotes generados a lo largo de la CSC identificando los lotes de animal que forman parte de cada lote de producto elaborado y seleccionar alternativas frente a diferentes eventos disruptivos para satisfacer la demanda de los minoristas.

Palabras claves: Cadena de Suministro de la Carne, Dispersión por Lotes, Trazabilidad, Sostenibilidad, Resiliencia.

1 Introducción

La industria alimentaria ha experimentado numerosas crisis de seguridad en las que, la credibilidad de la cadena de suministro (CS) de los alimentos, se ha visto amenazada. Entre los eventos de trascendencia mundial se pueden mencionar la enfermedad de las vacas locas, la fiebre aftosa, la peste porcina africana y los brotes de enfermedades transmitidas por los alimentos como Salmonella, Campylobacter y E-coli [1]. En respuesta a esto y a las crecientes presiones de los clientes, las empresas han implementado sistemas de trazabilidad que permiten el seguimiento, rastreo y control de los alimentos, no solo para mejorar su calidad y seguridad, sino también para cumplir con estándares internacionales y requisitos de certificación [2]. Además, en caso de que sea necesario, los sistemas de trazabilidad ayudan a los productores a retirar lotes de alimentos contaminados, pero no reducen la cantidad de productos a retirar del mercado.

La trazabilidad de los alimentos procesados implica mayores complicaciones ya que para obtener lotes de producto se requiere la mezcla de lotes de materia prima

provenientes de distintos proveedores, con calidades y precios diferentes [3]. En particular, en la CS de la Carne (CSC) se llevan a cabo, además, procesos de desarmado y armado durante la elaboración de los productos cárnicos. Esto incrementa, no solo la probabilidad de contaminación del alimento, sino también la complejidad de su rastreo (trazabilidad hacia atrás) y seguimiento (trazabilidad hacia adelante). Para abordar la trazabilidad de este tipo de alimentos es apropiado el enfoque de la dispersión por lotes. Un trabajo pionero en tratar este problema mediante el desarrollo de un modelo de optimización fue realizado por Dupuy y col. [4]. 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 de lotes con tamaños fijos, para limitar el costo e impacto mediático en caso de tener que retirar productos del mercado.

Posteriormente, varios estudios han incorporado cambios al problema de dispersión por lotes planteado en [4]. Una de las primeras mejoras propuestas fue considerar variable el tamaño del batch. En [5] y [6] la implementan para un único producto, reduciendo los costos de dispersión en el primero, y la pérdida esperada en las ganancias de los accionistas y otros costos operativos durante la crisis del retiro en el segundo. En [7] consideran múltiples productos teniendo en cuenta factores de riesgo. En [8] se emplea un sistema de grafo para representar la conexión entre los nodos (lotes) en el proceso de producción. Finalmente, en [9] se extiende el problema de tres niveles planteado en [4] a uno de cinco niveles.

Dado que el sistema alimentario es responsable de un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [3], varios investigadores han recurrido a la programación matemática para modelar el impacto ambiental en las CS agroalimentarias y dar respuesta a las preocupaciones de la sociedad sobre la preservación del medio ambiente. Concretamente, para el sector cárnico, Soysal y col. [10] propusieron un modelo MILP bi-objetivo para abordar un problema logístico en la CSC vacuna que minimiza el costo y las emisiones de CO₂ causadas por el transporte. En [11] se desarrolla un modelo MOMILP difuso para diseñar una CSC verde de tres niveles considerando a los costos, demandas y niveles de capacidad de las instalaciones como parámetros inciertos. Este modelo minimiza el costo total de transporte, las emisiones de CO₂ liberadas por el transporte y el tiempo de distribución a la vez que maximiza la tasa promedio de entrega de productos para satisfacer sus demandas. En [12] se presenta un modelo MOMILP multiperíodo para diseñar la CSC minimizando los costos totales y las emisiones de CO₂ y maximizando el uso de la capacidad de las instalaciones.

Por otro lado, el creciente número de disrupciones en las CS alimentarias, así como la incertidumbre en la demanda de sus productos, hace necesario que los encargados de la toma de decisión (TD) establezcan estrategias de resiliencia para garantizar la entrega de los alimentos. La resiliencia en la CS se define como la capacidad de la cadena de sobrevivir y mantener sus funciones básicas frente a cualquier cambio [13]. Los riesgos que pueden afectar las CS pueden ser de Alta Probabilidad con Bajo Impacto (APBI) o raros, es decir, de Baja Probabilidad con Alto Impacto (BPAI). Los primeros refieren a incertidumbres y eventos disruptivos propios del sistema como la contaminación de algún lote particular mientras que los BPAI corresponden a interrupciones severas debidas a catástrofes naturales como sequías, incendios o inundaciones [14]. Para superar

estos desafíos, los modelos de optimización deben considerar la capacidad de las CS para hacer frente a eventos disruptivos a fin de mantener la funcionalidad del sistema. Klibi y Martel [15] emplean un enfoque de programación estocástica para modelar la resiliencia en el diseño de CSs que operan bajo incertidumbre y facilitar la evaluación del tipo de riesgo, su severidad y ubicación. Estos autores definieron tres tipos de eventos para describir entornos futuros plausibles: aleatorios, peligrosos y profundamente inciertos. En [16] se propone un modelo MILP posibilístico bi-objetivo de dos etapas y basado en escenarios, para abordar el problema de selección de proveedores y asignación de pedidos con el fin de construir una CS resiliente bajo riesgos operativos y interrupciones naturales como terremotos, inundación e incendio. En [14] se desarrolla un modelo estocástico MILP de dos etapas considerando la perecibilidad del alimento. El modelo maximiza el beneficio esperado seleccionando estrategias óptimas de gestión de riesgos y decisiones de planeamiento táctico en la CS de la agroindustria. Particularmente, para la CSC, Jiang y col. [17] desarrollaron un modelo de programación mixto entero estocástico y resiliente en un entorno de demanda incierto, empleando el algoritmo de descomposición de Benders para resolver el problema de diseño de la CSC. Además, proponen un índice medible para comparar la resiliencia de diferentes estructuras de la cadena desde el punto de vista de la complejidad de la misma. Ghomami-Zanjani y col. [18] propusieron un modelo estocástico MILP bi-objetivo para abordar la planificación del inventario de la CSC en una red compuesta por centros de cría, mataderos y minoristas. Las funciones objetivo del estudio consisten en maximizar el beneficio total y minimizar las emisiones de CO₂ causadas por el transporte, el inventario y el manejo de los alimentos a lo largo de toda la cadena. Además, los autores utilizaron dos estrategias de resiliencia como la asignación múltiple y consideración de proveedores de respaldo, para protegerse contra posibles interrupciones durante la producción.

En el contexto mencionado y, de acuerdo a nuestro conocimiento, no se ha abordado aun en la bibliografía el problema de dispersión por lotes junto a aspectos sostenibles en la CSC empleando estrategias de resiliencia para enfrentar un ambiente incierto. Por esta razón, en este trabajo, se presenta un modelo multiobjetivo de programación mixta entera lineal (MOMILP) para optimizar la trazabilidad en la CSC considerando sostenibilidad y eventos disruptivos en un entorno de demanda incierta. Así, la formulación propuesta evalúa simultáneamente tres funciones objetivo: (i) la dispersión total de los lotes a lo largo de la cadena, (ii) el beneficio total y (iii) las emisiones de CO₂ generadas en la CSC, para diferentes escenarios. Además, se considera incertidumbre en la demanda y estrategias de resiliencia para hacer frente a interrupciones de APBI, como la contaminación física de un producto durante su elaboración y de BPAI como, por ejemplo, un incendio que afecta una determinada zona geográfica. El problema consiste en decidir qué actores participan en la cadena en cada escenario y determinar el tamaño y número de lotes producidos en cada uno de ellos y realizar su seguimiento hasta los minoristas. El modelo multicriterio propuesto se resuelve utilizando tres variantes del método de PPM que genera varias soluciones de compromiso teniendo en cuenta las preferencias del TD.

2 Descripción del Problema

La estructura de la CSC en estudio está compuesta por cuatro niveles, como se muestra en la Fig. 1. En cada granja $g \in \{1, \dots, G\}$ se cría, de forma extensiva o intensiva, una o más especies animales $a \in \{1, \dots, A_g\}$ con el fin de abastecer a los frigoríficos. Luego, 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 especie animal proveniente de cada granja. Las medias reses producidas se venden a los establecimientos elaboradores $e \in \{1, \dots, E\}$ cuyo desposte genera $i \in \{1, \dots, I_{me}\}$ lotes de materias primas $m \in \{1, \dots, M_e\}$. Dichas materias primas se cortan para obtener los componentes $c \in \{1, \dots, C_e\}$ que, posteriormente, se mezclan en las proporciones adecuadas, siguiendo una receta conocida, para obtener los lotes $k \in \{1, \dots, K_{pe}\}$ de los productos $p \in \{1, \dots, P_e\}$ elaborados en cada establecimiento e . Finalmente, dichos productos p se distribuyen a los minoristas $r \in \{1, \dots, R\}$ a fin de satisfacer sus demandas D_{prs} para los diferentes escenarios $s \in \{1, \dots, S\}$ en un horizonte de tiempo HT .

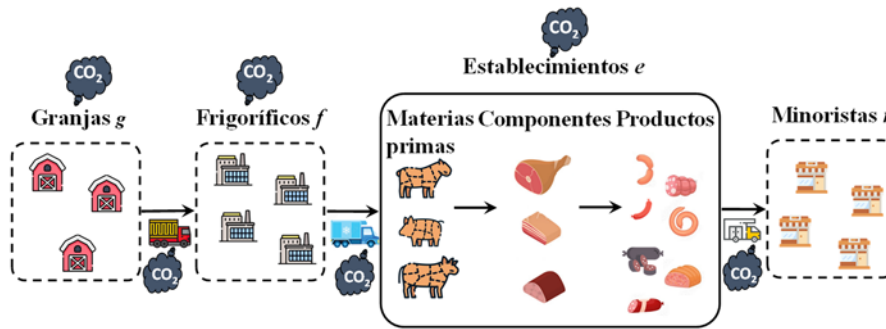


Fig. 1. Estructura de la CSC bajo estudio.

Las funciones objetivo del problema consisten en minimizar tanto la dispersión de los lotes como y el impacto ecológico de las emisiones de CO₂ y maximizar los beneficios en una CSC resiliente. El modelo propuesto permite determinar el número y tamaño de los lotes de animal, materia prima y producto generados en la CSC seleccionando la granja y el frigorífico proveedor e identificando los lotes de animal que son suministrados a cada planta y los lotes de producto entregados por estas últimas a cada minorista considerando diferentes escenarios que contemplan incertidumbre en la demanda y posibles eventos disruptivos.

3 Formulación Matemática

En esta sección se describen las restricciones del modelo MOMILP propuesto para la CSC. Por cuestiones de espacio no se presenta la formulación matemática completa. Para más detalle ver Schmidt y Moreno [19].

Se definen 2 restricciones en las granjas. La primera calcula la cantidad total de animal vivo (Qav_{gas}) como la suma de todas las cantidades que serán procesadas en el batch h de cada frigorífico f para cada tipo de animal a mientras que la segunda establece que el tamaño del batch h de animal a en el frigorífico f es igual a la suma de todas las cantidades de animal a enviado de la granja g al batch h del frigorífico f , teniendo en cuenta el rendimiento de cada animal luego de la faena (Pv_a).

Para los frigoríficos, la variable binaria x_{haf_s} se utiliza para indicar si el batch h de animal a se genera en el frigorífico f en el escenario s . Se definen restricciones que establecen las cotas para el tamaño del batch y que aseguren que los lotes y la selección de sus tamaños se realice en orden ascendente. Aquí se calcula la cantidad total de cada animal procesada en cada frigorífico f y la cantidad de animal a en el lote h enviado desde el frigorífico f al establecimiento e contenida en el lote i de materia prima m en el escenario s .

En los establecimientos, para indicar la generación de lotes i de materia prima m en cada establecimiento e se introduce la variable binaria w_{ime} . En caso de no generarse bachadas h del animal a , no se podrán generar lotes i de materias primas m en ningún establecimiento e . Se calcula el tamaño del batch i de materia prima m en el establecimiento e en el escenario s , el cual, a su vez, estará delimitado por sus cotas superior e inferior. Se agregan restricciones para garantizar que los lotes de materia prima y sus tamaños se generen en orden ascendente evitando así soluciones alternativas. Aquí también se expresa el proceso de desarmado de cada materia prima m en los cortes de carne c y se calcula la cantidad total de materia prima disponible. La suma de las cantidades de todos los componentes c obtenidos a partir los lotes i no podrá ser mayor que la cantidad total de materia prima m a partir de la cual se originan. Además, se establecen relaciones entre la cantidad de componente c producida en el establecimiento con los lotes i de las materias primas m y la que se procesa para generar los lotes k de producto final p , respectivamente. 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. Se establecen cotas para el tamaño del batch k de producto p en el establecimiento e en el escenario s . Con la incorporación de 2 restricciones se obliga a que tanto las bachadas de producto como sus tamaños se generen en orden creciente. La elaboración o armado del producto debe respetar la proporción Pc_{cp} . Se establecen balances de masa para los batch k de producto p y cantidad de componente c .

Para los minoristas r , se establece que la demanda del producto p puede o no ser satisfecha en cada escenario s , originándose una pérdida en la venta (ls_{prs}) en el último caso. Se establecen relaciones para la cantidad de producto p perteneciente al lote k producido en el establecimiento e que se envía a los minoristas r en el escenario s con los tamaños de lote y la cantidad de producto p disponible en el establecimiento. La cantidad de producto p vendida al minorista r en el escenario s será igual a la cantidad de producto p del lote k del establecimiento e enviado a r en el escenario s o la cantidad de producto sustituto p' elaborado en la misma planta e enviado a r en el escenario s . Además, la cantidad de producto sustituto será igual a la cantidad que se requiera de dicho producto p' más la cantidad de producto p que sustituye ($Qps_{pp'ers}$). Para indicar que un determinado producto p se elabora en la planta e se utiliza la variable binaria

n_{pes} que, a su vez, tomará valor 0 cuando no hay generación de lotes k de producto p ($Z_{kpes} = 0$). Se establece que la cantidad de producto total p en el establecimiento sea menor a su cota superior si el producto p se elabora en el establecimiento e en el escenario s ($n_{pes} = 1$). Se utilizan 2 restricciones para establecer que $Qps_{pp'ers}$ será menor que su cota superior si el producto sustituto p' se elabora en el establecimiento e en el escenario s ($n_{p'es} = 1$) y si el producto p no se elabora en el establecimiento e en el escenario s ($n_{pes} = 0$).

Para manejar la utilización de batchadas en la CSC se definen las siguientes variables binarias: u_{gafhs} que determina si el animal a de la granja g se envía al batch h del frigorífico f en el escenario s , $v_{hafimes}$ que determina si el batch h de animal a del frigorífico f es utilizado en el batch i de materia prima m en el establecimiento e en el escenario s , $y_{imckpes}$ que determina 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 en el escenario s . Se establecen relaciones entre dichas variables y las asociadas a la generación de lotes (x_{hafhs} , w_{imes} y Z_{kpes}). Se asegura que cada batch h de animal a en el frigorífico f provenga de una única granja g y 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. Se garantiza que los lotes i de materias primas m provenientes del lote h del animal a se utilicen secuencialmente.

Para las conexiones entre los actores de la CSC se definen las siguientes variables binarias: o_{gfs} que determina si la granja g abastece el frigorífico f , s_{fes} que determina si el frigorífico f provee al establecimiento e y t_{ers} que determina si el establecimiento e satisface la demanda del minorista r , en cada escenario s . Si al menos un tipo de animal proveniente de la granja g forma parte de un lote h en el frigorífico f , entonces $o_{gfs} = 1$. La variable s_{fes} es igual a 1 solo cuando al menos un lote h de animal a se utiliza en la producción de cualquier lote i de materia prima m en la planta e y 0 en caso contrario. Si no se produce en la planta e ningún lote k del producto p requerido por el minorista r , t_{ers} toma valor cero. Gracias a estas variables se calculan la cantidad total de animal a que envía la granja g a cada frigorífico f en el escenario s (Qa_{agfs}), la cantidad total de animal a que envía el frigorífico f al establecimiento e en el escenario s (Qa_{afes}) y la cantidad total de producto p que entrega el establecimiento e al minorista r en el escenario s (Qs_{pers}).

3.1 Funciones Objetivo

Minimizar la dispersión de los lotes:

$$\begin{aligned}
 Z_1 = & \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left(\sum_g \sum_f \sum_{a \in A_f \cap A_g} \sum_{h \in H_{af}} u_{ghafs} \right. \\
 & + \sum_f \sum_{a \in A_f} \sum_{h \in H_{af}} \sum_e \sum_{m \in MR_{ae}} \sum_{i \in I_{me}} v_{hafimes} \\
 & + \sum_e \sum_{m \in MS_{ce}} \sum_{i \in I_{me}} \sum_{c \in CR_{pe}} \sum_{p \in P_e} \sum_{k \in K_{pe}} y_{imckpes} \\
 & \left. + \sum_{p,r} \alpha \cdot ls_{prs} + \sum_{p,p',r,e} \beta \cdot Qps_{pp'ers} \right) \tag{1}
 \end{aligned}$$

El objetivo Z_1 del problema consiste en minimizar el valor esperado de la dispersión de lotes de producción en toda la CSC contemplando la probabilidad de ocurrencia del escenario s (π_s). Los tres primeros términos se refieren al uso de animales y sus diferentes lotes en los lotes de materias primas y productos finales mediante el empleo de las variables binarias u_{ghafs} , $v_{hafimes}$, $y_{imckpes}$. El cuarto y quinto término sopesan la cantidad de pérdida de venta del producto p y la cantidad de producto p que ha sido sustituido por el producto p' , respectivamente, siendo α y β constantes.

Maximizar el beneficio total:

$$\begin{aligned}
 Z_2 = & \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left(\sum_{e,p \in P_{e,r}} CVP \cdot Qprod_{pes} \right) \\
 & - \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \left(\sum_{gfa} CV_{ag} \cdot Qal_{agfs} + \sum_{fea} CR_{af} \cdot Qad_{afes} + \right. \\
 & \left. \sum_{gfa} TCV \cdot TDV_{gf} \cdot Qal_{agfs} + \sum_{fea} TCR \cdot TDR_{fe} \cdot Qad_{afes} \right. \\
 & \left. + \sum_{e,r,p} TCP \cdot TDP_{er} \cdot Qs_{pers} + \sum_{ga} OCG_{ga} \cdot Qavi_{ags} \right. \\
 & \left. + \sum_{fa} OCF_f \cdot Qan_{afs} + \sum_{e,p} OCE_e \cdot Qprod_{pes} \right. \\
 & \left. + \sum_{p,r} \gamma \cdot ls_{prs} + \sum_{p,p',r,e} \delta \cdot Qps_{pp'ers} \right) \tag{2}
 \end{aligned}$$

El criterio Z_2 es el valor esperado del beneficio y se compone de 2 términos, afectados por la probabilidad de ocurrencia de cada escenario (π_s). El primero refiere al ingreso total por la venta de productos, donde CVP_p es el precio de venta por kg de producto p ,

mientras que el segundo se refiere al costo total y está compuesto por diez términos. El costo de compra de animales a las granjas y a los frigoríficos, donde CV_{ag} es el precio por kg de animal a en pie en la granja g , CR_{af} es el precio por kg de media res de animal a en el frigorífico f corresponden al primer y segundo término. El tercer, cuarto y quinto término refieren al costo de transporte de los animales vivos de las granjas a los frigoríficos, las medias reses desde los frigoríficos a los establecimientos y al transporte de productos desde los establecimientos a los minoristas siendo TDV_{gf} , TDR_{fe} y TDP_{er} las distancia en km entre los actores y TCV el costo asociado al traslado de animales en pie por km y kg, TCR el costo de traslado por km y kg de media res de animal y TCP es el costo unitario de traslado por km y por kg de producto. Del sexto al octavo término se consideran los costos referidos al consumo energético de las granjas, los frigoríficos y los establecimientos donde OCG_{ga} es el costo correspondiente al consumo por kg de animal a dependiente de la forma de cría, OCF_f es el costo asociado al consumo de energía por kg de animal faenado y OCE_e por kg de producto elaborado. Los últimos términos corresponden a los costos asociados a la pérdida de venta de producto p y a la sustitución de producto p por p' , siendo γ y δ constantes.

Minimizar el impacto ambiental:

$$Z_3 = \sum_{s \in S} \pi_s \left(\begin{aligned} &ITV \cdot \sum_{gfa} TDV_{gf} \cdot Qa_{l_{agfs}} + ITR \cdot \sum_{fae} TDR_{fe} \cdot Qa_{d_{afes}} + \\ &ITP \cdot \sum_{erp} TDP_{er} \cdot Qs_{per} + \sum_{ag} FEGE_{ag} \cdot Qavi_{ags} + \\ &IE \cdot \left(\sum_{ag} ECV_{ag} \cdot Qavi_{ags} + \sum_{af} ECR_a \cdot Qan_{af} + \sum_{ep} ECP_p \cdot Qprod_{pes} \right) \\ &+ \sum_{pr} \theta \cdot ls_{prs} + \sum_{p,p',re} \rho \cdot Qps_{pp'ers} \end{aligned} \right) \quad (3)$$

En la Ec. (3) los primeros 3 términos refieren a las emisiones causadas por el transporte de animales en pie, medias reses y productos finales, donde ITR , ITR e ITP representan el factor de emisión asociado a vehículos pesados, semi-pesados y para vehículos livianos, respectivamente, expresados en kg equivalentes de CO₂ por km y kg de animal (kg CO_{2EQ}/km). El cuarto término contempla las emisiones generadas por los distintos animales durante su tiempo de vida en las granjas de acuerdo al tipo de cría utilizado ($FEGE_{ag}$) y el quinto término refiere a emisiones indirectas, como es el caso de la energía consumida por los actores de la cadena, siendo ECV_{ag} el consumo energético por tipo de animal a criado en la granja g , ECR_a el consumo energético por kg de animal faenado y ECP_p por kg 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). Los últimos dos términos contemplan la cantidad de perdida de venta

y la sustitución de producto, siendo θ y ρ las constantes asociadas. Todos estos términos están afectados por una probabilidad de ocurrencia π_s .

4 Método de resolución

Para abordar la resolución del problema MOMILP, se implementó el método de PPM [20]. Existen diferentes variantes de PPM dependiendo de la función de objetivo a minimizar. Las más utilizadas son PPM Mínmax (PPMM), PPM Ponderado (PPMP) y PPM Extendido (PPME) [21]. Como característica principal, la formulación PPMP implica el máximo logro agregado de las metas consideradas (máxima eficiencia) pero las soluciones pueden estar sesgadas, mientras que el enfoque PPMM proporciona soluciones más balanceadas entre el logro de los diferentes objetivos (máxima equidad) pero con un pobre rendimiento agregado entre ellos. Por último, la variante PPME ofrece un buen compromiso entre los enfoques PPMP y PPMM.

En la formulación genérica de PPME se incluyen variables de desviación negativa y positiva que representan el nivel por el cual no se alcanza o se excede el valor objetivo de cada criterio, respectivamente, una variable que determina la desviación máxima entre todos los objetivos, preferencias o pesos del TD para cada función objetivo, constantes de normalización y un parámetro de control, cuyo ajuste en el intervalo $[0,1]$ permite abordar los diferentes enfoques. Cuando este parámetro es igual a cero, se obtiene el enfoque PPMM, mientras que cuando es igual a 1 se obtiene el enfoque PPMP. Para otros valores del parámetro dentro del intervalo $(0,1)$ se pueden obtener soluciones intermedias (PPME).

5 Ejemplo y discusión de resultados

En esta sección, el modelo propuesto se aplica a una CSC que consta de 3 granjas, 3 frigoríficos, 2 establecimientos productores y 3 minoristas. En la granja g1 se crían cerdos (a1) de manera intensiva (en espacios cerrados y alimentados con alimento balanceado), en la granja g2 se crían ambas especies (a1) y (a2) en forma extensiva (en espacios abiertos amplios, alimentados a base de pasturas en el caso de las vacas y a granos y frutas y verduras desechadas en el caso de los cerdos) y en la granja g3 se crían vacas (a2) en feedlot (espacios abiertos reducidos y alimentados a base de alimentos balanceados). En el frigorífico f1 se faenan cerdos (a1), en el frigorífico f2 se faenan vacas (a2) y en el frigorífico f3 se faenan ambas especies (a1 y a2). La planta e1 produce los productos p1, p2 y p3 y e2 elabora p2, p4-p6. Los productos son: chorizo puro cerdo pechera (p1), chorizo puro cerdo (p2), morcilla (p3), chorizo mezcla (p4), salame picado fino (p5) y salame picado grueso (p6). En la producción de estos productos se utilizan 8 materias primas y 12 componentes. El número máximo de lotes de animales es $H_{a1f1}=5$ para f1, $H_{a2f2}=2$ para f2 y $H_{a1f3}=4$ y $H_{a2f3}=2$ para f3. El valor correspondiente para las materias primas y los productos en las plantas es $I_{me}=4$ y $K_{pe}=3$, respectivamente.

No se conocen con certeza las demandas de productos a lo largo del horizonte de planificación considerado de un mes, pero la incertidumbre puede representarse

mediante los escenarios s . Se consideran tres posibles escenarios de demanda: baja, media y alta. Además, se tienen en cuenta dos eventos disruptivos, incendio en la zona serrana, afectando la granja g3, frigorífico f2 y minorista r2 y contaminación física del producto p5. Los escenarios correspondientes a la demanda se combinan con el caso sin interrupciones y con los dos posibles eventos disruptivos, obteniéndose un total de 9 escenarios. La probabilidad de que cada escenario tenga lugar se refleja en π_s , con $\sum_{s \in S} \pi_s = 1$.

Los factores de emisión son: $IE = 0,37$ kg CO_{2EQ}/kWh, $ITV = 7,06 \cdot 10^{-5}$ kg CO_{2EQ}/(km kg), $ITR = 1,51 \cdot 10^{-4}$ kg CO_{2EQ}/(km kg) e $ITP = 2,94 \cdot 10^{-4}$ kg CO_{2EQ}/(km kg) y los costos unitarios de transporte son: $TCV = 0,05$ \$/(km kg), $TCR = 0,06$ \$/(km kg) y $TCP = 0,08$ \$/(km kg). Las emisiones asociadas a la fermentación entérica y gestión del estiércol de los animales ($FEGE_{ag}$) son: 0,23 kg CO_{2EQ}/kg en g1 y 0,12 kg CO_{2EQ}/kg en g2 para cerdo y 6,94 kg CO_{2EQ}/kg en g2 y 5,00 kg CO_{2EQ}/kg en g3 para vacas. En el frigorífico, el rendimiento de cada animal es del 73% para a1 y 58% para a2. Por cuestiones de espacio no se muestran los datos de rendimiento de animales, desarmado de animales y materias primas y armado de productos (Pa_{am} , Pm_{mc} , Pc_{cp}), las distancias entre los actores de la CSC y los costos de compra de animales en pie y media res y los precios de venta de los productos.

La formulación se implementó en el software GAMS 32.2.0 empleando el código CPLEX 12.10.0.0 y se ejecutó en una PC Intel(R) Core (TM) i7-6700, 3.4 GHz, 8 GB RAM. El problema involucra 63337 ecuaciones, 20558 variables continuas y 8400 binarias. Se emplea una diferencia de integralidad de 0% en todos los casos resueltos para garantizar la optimalidad global de la solución.

Los valores esperados ideales y anti-ideales para cada meta se reportan en la llamada matriz de compensación que se muestra en la Tabla 1. Los valores ideales de las metas en la diagonal principal de esta matriz (negrita) se obtienen resolviendo el modelo optimizando cada objetivo individualmente. Además, en cada fila de la Tabla 1 se calculan, a partir de los resultados de la solución óptima encontrada, los valores de los criterios restantes, correspondiendo los valores anti-ideales de cada meta al peor valor encontrado (cursiva).

Como se observa en la Tabla 1, existen conflictos entre los criterios analizados, dado que los valores ideales para las diferentes metas no se pueden lograr de manera simultánea. En este trabajo, los niveles de aspiración se definen como los valores ideales para cada función objetivo. Los factores de normalización para cada criterio se obtienen mediante la fórmula: $k_q = Z_q^* + 0.3 \cdot (Z_{q*} - Z_q^*)$, donde Z_q^* y Z_{q*} son los valores ideal y anti-ideal, respectivamente, para la función objetivo Z_q , mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz de compensación.

	Dispersión	Beneficio total (\$)	Emisiones (kg CO _{2EQ})
Dispersión	36,8	<i>-17720000</i>	<i>151280,0</i>
Beneficio total (\$)	<i>202,3</i>	18748000	<i>116980,0</i>
Emisiones (kg CO _{2EQ})	<i>161,9</i>	<i>-7535000</i>	41049,1

Los pesos para cada criterio se determinaron en un proceso de comparación por pares [20]. Para ejecutar este análisis se utiliza información que aporta el TD, construyendo

así la matriz de comparaciones que evalúa los criterios por pares. Luego, se normaliza la matriz, obteniéndose los siguientes pesos: $w_1 = 0,5$, $w_2 = 0,33$ y $w_3 = 0,17$.

Posteriormente, para cada escenario se resuelve el método PPM, para diferentes valores del parámetro de control λ en el intervalo [0-1] con incrementos de 0,25. La Tabla 2 muestra el parámetro λ y la solución de compromiso encontrada para cada criterio.

Tabla 2. Soluciones del método PPM.

λ	Valor esperado de los objetivos		
	Dispersión	Beneficio total $\times 10^6$ (\$)	Emisiones (kg CO _{2EQ})
0	64,4	0	88212,1
0,25	59,4	3,7656	69270,2
0,50	49,3	4,7539	67213,9
0,75	52,5	10,447	93805,9
1	53,6	8,5181	70059,3

Para asistir al TD en el proceso de selección de una solución, los resultados se evalúan con el método Min-Max [11] que permite encontrar la mejor solución de compromiso. Aplicando este método, la mejor solución corresponde al valor de 0,5 del parámetro de control. En esta solución los valores esperados del beneficio, las emisiones y de la dispersión total son \$4.753.900, 67.213,9 kg CO_{2EQ} y 49,3, respectivamente, contemplando la probabilidad de ocurrencia de cada escenario. En la Fig. 2, se muestra la configuración de la CSC para el escenario sin interrupciones y demanda alta (s3). Como se puede observar la granja g1 abastece de cerdo al frigorífico f1 quien proveerá a las plantas e1 y e2 con el lote h1. La g3 abastece de vaca (a2) al f2, el cual provee al establecimiento e2 con el lote h1. En este caso, ambos establecimientos (e1 y e2) envían productos a los 3 minoristas para satisfacer su demanda. En esta solución de compromiso se seleccionaron granjas de cría intensiva (g1 y g3) para abastecer la CSC.

En la Fig. 3 se muestra la selección de los actores en caso de que un incendio afecte la zona donde se encuentran la granja g3, el frigorífico f2 y el minorista r2 y se tenga demanda media (s5). En este caso, las granjas g1 y g2 abastecen de cerdo (a1) a f1 y f3, mientras que la granja g2 abastece, además, de vaca (a2) al frigorífico f3. El f1 proveerá de a1 con el lote h1 al establecimiento e2 mientras que el frigorífico f3 envía el lote h1 de cerdo (a1) a la planta e1 y el lote h2 a e2 y el lote h1 de vaca al establecimiento e2. En este caso, ambos establecimientos (e1 y e2) envían productos a los minoristas r1 y r3 para satisfacer su demanda. Como se puede observar, la selección de los actores difiere con el objeto de lidiar con la interrupción y mantener la funcionalidad del sistema.

Finalmente, en el escenario 7 con demanda baja, la interrupción que afecta la CSC es la contaminación física del producto p5 en el establecimiento 2. La incorporación accidental de material contaminante en el producto durante su elaboración puede dañar al consumidor impidiendo su venta. Como conducta resiliente se propone la sustitución del producto afectado por otro de características similares, el producto p6, siempre que el minorista acepte el reemplazo. En este caso, se elaboran 2975 kg de p6 para cubrir la demanda de 1785 kg de p5 y 1190 kg de p6.



Fig. 2. Solución de compromiso para $\lambda=0,5$ y s_3 .

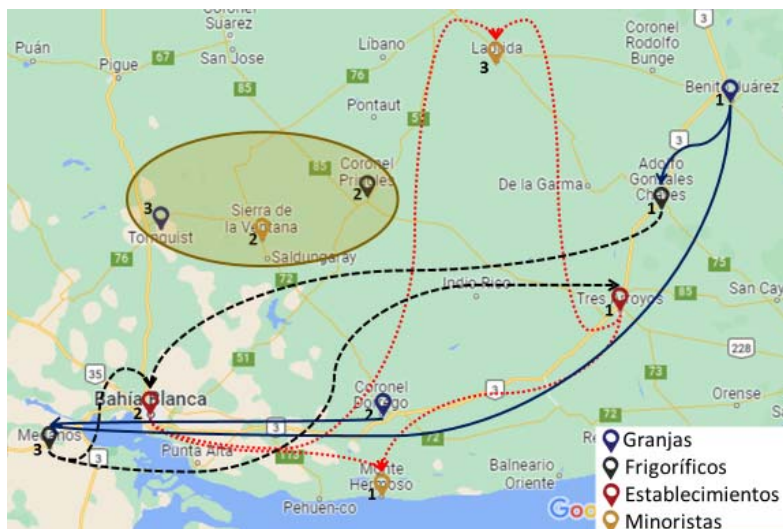


Fig. 3. Solución de compromiso para $\lambda=0,5$ y s_5

6 Conclusiones

En este estudio se propuso un modelo MOMILP resiliente para optimizar la trazabilidad en la CSC minimizando la dispersión de lotes, a la vez que se maximizan los beneficios obtenidos y se minimiza el impacto ambiental. La CSC está conformada por 4 niveles: granjas, frigoríficos, establecimientos y minoristas. Se tiene en cuenta, además, la incertidumbre en la demanda de los productos cárnicos que junto a los eventos disruptivos

generan diferentes escenarios. Para la resolución del problema multiobjetivo se utiliza el método de PPM que proporciona un conjunto de soluciones de compromiso, entre las cuales el TD elige aquella que se adapte mejor a sus preferencias.

Para su validación, el modelo fue aplicado a un ejemplo y 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 la granja que provee a cada frigorífico y el establecimiento que abastece a cada minorista en cada escenario. Asimismo, se obtienen los beneficios y las emisiones totales de la CSC para cada escenario y se evidencia la capacidad del modelo para lidiar con eventos disruptivos.

La optimización simultánea de los tres objetivos permite obtener soluciones de compromiso que determinaran tanto los actores intervinientes en la cadena como del número de lotes generados en cada eslabón y para cada escenario.

La programación estocástica ofreció un marco eficiente para aplicar las estrategias resilientes y representar la incertidumbre en la demanda, proporcionando valores esperados para los criterios analizados.

Referencias

1. Zhou, X., Xu, Z.: Traceability in food supply chains: a systematic literature review and future research directions. *International Food and Agribusiness Management Review*, 25 (2), 173-196 (2022).
2. Trujillo, M. T., Orjuela Castro, J. A., Herrera, M. M.: Challenges in the modeling of traceability in food supply chains. *Ingeniería*, 0121-750X, 26.2 (2021).
3. 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).
4. Dupuy, C., Botta-Genoulaz, V., Guinet, A.: Batch dispersion model to optimise traceability in food industry. *Journal of Food Engineering* 70, 333–339 (2005).
5. Rong, A., Grunow M.: A methodology for controlling dispersion in food production and distribution. *OR Spectrum*, 32, 957–978 (2010).
6. Memon, M. S., Lee, Y. H., Mari, S. I.: Analysis of. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 896239, 8 pages (2015).
7. Wang, X., Li, D., O'brien, C., Li, Y.: A production planning model to reduce risk and improve operations management. *International Journal Production Economics*, 124 (2), 463–474 (2010).
8. Dabbene, F., Gay, P.: Food traceability systems: Performance evaluation and optimization. *Computers and Electronics in Agriculture* 75, 139–146 (2011).
9. 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).
10. 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).
11. 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).

12. Mohebalizadehgashti, F., Zolfagharinia, H., Amin, S. H.: Designing a green meat supply chain network: A multi-objective approach. *International Journal of Production Economics* 2020, 219, 312–327 (2020).
13. Pettit, T. J., Fiksel, J., Croxton, K. L.: Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework". *Journal of Business Logistics*, 31.1, 1-21 (2010).
14. Behzadi, G., O'Sullivan, M. J., Olsen, T. L., Scrimgeour, F., Zhang, A.: Robust and resilient strategies for managing supply disruptions in an agribusiness supply chain. *International Journal of Production Economics*, 191, 207-220 (2017).
15. Klibi, W., Martel, A.: Scenario-based supply chain network risk modeling. *European Journal of Operational Research*, 223.3, 644-658 (2012).
16. Torabi, S. A, Baghersad, M., Mansouri, S. A.: Resilient supplier selection and order allocation under operational and disruption risks. *Transportation Research Part E*, 79, 22-48 (2015).
17. Jiang, Y., Zhao, L., Sun, S.: A Resilient strategy for meat-food supply chain network design. *Proceedings of the 2009 IEEE IEEM* (2009).
18. 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).
19. Schmidt, B. V., Moreno, M. S.: Traceability Optimization in the Meat Supply Chain with Economic and Environmental Considerations. *Computers & Industrial Engineering*, 108271. (2022).
20. Jones, D., Tamiz, M.: *Practical goal programming*. Springer, New York (2010).
21. Romero, C. A general structure of achievement function for a goal programming model. *European Journal of Operational Research* 2004, 153 (3), 675–686 (2004).