

## Modelos de optimización para la planificación de la producción de productos perecederos: una revisión de la literatura

### Optimization models for perishable product scheduling: a literature review

David-Ricardo Maldonado-Porras<sup>1</sup>   Diana-María Cárdenas-Aguirre<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas, Colombia.

## Resumen

**Introducción:** Los problemas de secuenciación han sido ampliamente abordados por la literatura, sin embargo, la variable vida útil solo se ha incorporado recientemente a su modelación, por lo que se considera relevante conocer el tratamiento que ha tenido por parte de los investigadores.  
**Objetivo:** Se busca identificar la forma en que se ha incluido la consideración de vida útil en las decisiones de secuenciación de la producción y los métodos para su tratamiento.  
**Materiales y métodos:** Se realizó una búsqueda de literatura en las bases de datos SCOPUS y WEB OF SCIENCE, sin límites de tiempo, de la cual se obtuvieron 272 documentos que, una vez seleccionados, dejaron un grupo de 35 artículos para el análisis.  
**Resultados:** La revisión permitió identificar cinco casos de agregación de decisiones entre los que sobresale la definición de distribución y ruteo asociado a decisiones de programación, así como tres formas en las cuales se incorpora la condición de perecibilidad de los productos o materias primas en los modelos. También se encuentra que la programación lineal de enteros mixtos es la metodología más usada en los casos presentados.  
**Conclusiones:** La revisión ratifica la importancia que ha ganado la incorporación de la característica de perecibilidad en los problemas de programación de la producción. Adicionalmente, por el riesgo de pérdidas propio de estos entornos, las decisiones de programación suelen ir asociadas a decisiones de tamaño de lote, diseño de rutas y estrategias de costo que buscan minimizar las pérdidas o mejorar la utilidad o la satisfacción del consumidor.

**Palabras clave:** productos perecederos, secuenciación, programación, modelación lineal de enteros mixtos.

## Abstract

**Introduction:** The production scheduling problem has been widely studied in the literature; however, the lifespan variable has only recently been considered for modeling processes. Thus, it is relevant to understand how product lifespan has been addressed by researchers and academic community.

**Objective:** The aim is to identify how lifespan factors have been included in production scheduling decisions as well as the methods applied to their processing.

**Materials and methods:** A literature review process was conducted based on the SCOPUS and WEB OF SCIENCE databases. The search, with no date range, allowed to obtain 272 documents. After the selection stage, a group of 35 articles were filtered for analysis.

**Results:** Five cases of decision aggregation were identified during the review, among which the definition of batch size associated with scheduling decisions is highlighted, as well as three ways in which the perishability condition of products, or raw materials, can be incorporated into the models. Mixed integer linear programming was also found to be the most widely used methodology in the cases reviewed.

**Conclusions:** This study confirms the importance of incorporating perishability into production scheduling problems. In addition, due to the risk of losses that characterizes these environments, scheduling decisions are often associated with batch sizing, route design, and cost strategies, that seek to minimize losses or improve profits or consumer satisfaction.

**Keywords:** perishable products, sequencing, scheduling, mixed-integer linear modeling.

### ¿Cómo citar?

Maldonado-Porras DR, Cárdenas-Aguirre DM. Modelos de optimización para la planificación de la producción de productos perecederos: una revisión de la literatura. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(2) e-30315387

<https://doi.org/10.25100/iyv.v28i2.15387>

Recibido 29/10/25

Revisado: 14/04/26

Aceptado: 15/04/26

Online: 24/06/26

### Correspondencia

damaldonadop@unal.edu.co



### ¿Por qué se realizó este estudio?

Esta revisión forma parte de un proyecto de investigación más amplio cuyo objetivo es diseñar un modelo de programación para operaciones de poscosecha de flores. El estudio busca definir cómo la perecibilidad ha afectado las decisiones de programación de la producción, así como los métodos utilizados para modelar y resolver estos problemas.

### ¿Cuáles fueron los hallazgos más significativos?

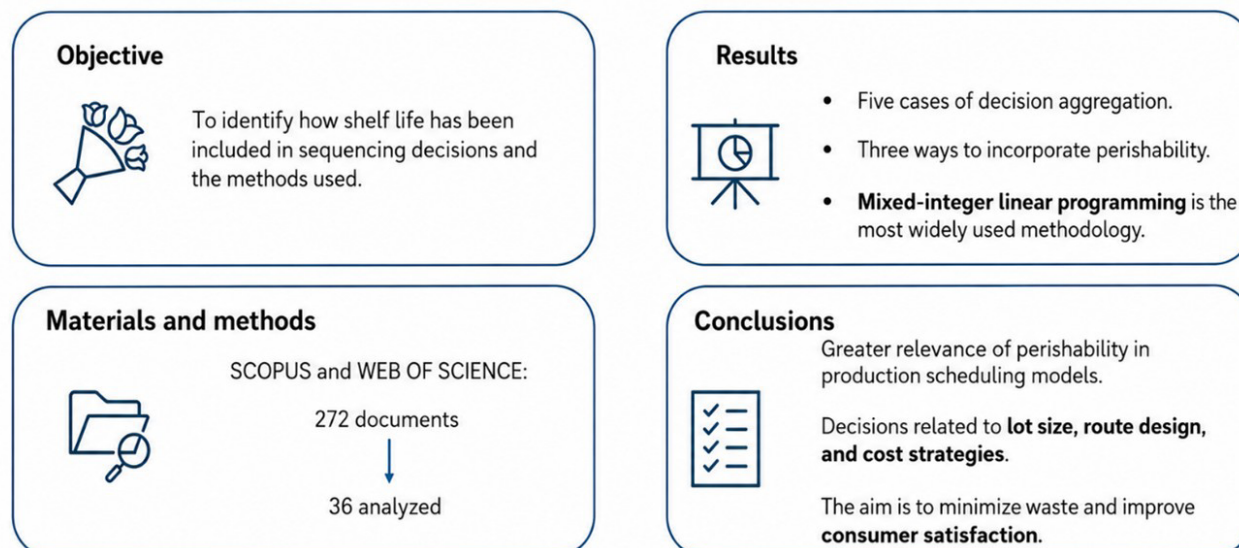
La literatura revisada muestra tres enfoques mediante los cuales la variable de perecibilidad se ha incorporado a la programación de la producción en entornos industriales basados en recursos derivados del sector agrícola. Además, los hallazgos revelan que la programación lineal entera mixta es el método más utilizado para respaldar las decisiones de programación en estos entornos, las cuales suelen integrarse con otros tipos de decisiones, como el dimensionamiento de lotes y el diseño de rutas.

### ¿Qué aportan estos resultados?

Desde una perspectiva académica, los hallazgos de la revisión permiten identificar métodos y técnicas para abordar los problemas de secuenciación de pedidos en entornos de producción perecederos. Desde una perspectiva práctica, los resultados proporcionan orientación a los responsables de la toma de decisiones sobre la complejidad asociada a estas decisiones y los factores que deben considerarse durante el proceso de toma de decisiones.

## Graphical Abstract

### OPTIMIZATION MODELS FOR PERISHABLE PRODUCT SCHEDULING: A LITERATURE REVIEW



Keywords: Perishables, sequencing, mixed-integer linear programming

## Introducción

Los problemas de programación se han abordado extensamente en la literatura sobre gestión de producción; sin embargo, la consideración de la vida útil del producto sigue siendo un aspecto relativamente reciente. Uno de los primeros estudios que incorpora esta variable fue realizado por Monahan (1), aunque el interés en este tipo de problema ha aumentado considerablemente en los últimos años debido a factores como el cambio climático, la densificación urbana y el contexto post-COVID-19, que han incrementado la presión para una utilización más eficiente de los recursos productivos. Un estudio representativo dentro de esta tendencia es el de Hariga (2), quien incorporó las fechas de caducidad de los productos asociadas a las tasas de deterioro en un modelo de optimización de inventario.

A pesar del creciente interés en incorporar la perecederidad en los modelos de programación de producción, su tratamiento sigue siendo heterogéneo y fragmentado a lo largo de la literatura. En muchos casos, los modelos tradicionales de programación no consideran explícitamente la vida útil del producto, lo que puede provocar pérdidas significativas, deterioro de la calidad y menor satisfacción del cliente. Esta situación es especialmente crítica en los sectores agroindustriales, donde los productos tienen una vida útil limitada y una alta sensibilidad a las condiciones de almacenamiento y procesamiento. En consecuencia, es necesario consolidar y analizar los casos reportados en la literatura en los que la perecederidad se integra en las decisiones de secuenciación para identificar tendencias, metodologías predominantes y oportunidades de investigación.

La importancia de incorporar la perecedibilidad en la secuenciación de producción, así como su estrecha relación con problemas estratégicos y tácticos como el enrutamiento de vehículos y la gestión de inventarios, se refleja en los estudios revisados, en los que estas decisiones se integran para lograr operaciones más coordinadas y completas que contribuyan a una mejor preservación del producto (3).

Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre modelos de optimización aplicados a la programación y secuenciación de producción de productos perecederos (PP), con el propósito de proporcionar un marco de referencia para este tipo de problema. El artículo está organizado en las siguientes secciones: metodología de revisión, revisión bibliométrica de resultados, análisis de resultados, discusión de los resultados y conclusiones.

## Metodología

Se realizó una búsqueda en las bases de datos ScienceDirect, Scopus y Web of Science dentro de los campos de título, resumen y palabras clave. No se establecieron restricciones de tiempo para identificar estudios fundamentales y examinar la evolución de la incorporación de la variable de perecederidad en los modelos de programación de producción. Las ecuaciones de búsqueda utilizadas fueron las siguientes:

“programación de producción” Parámetros Y “productos perecederos” (1)

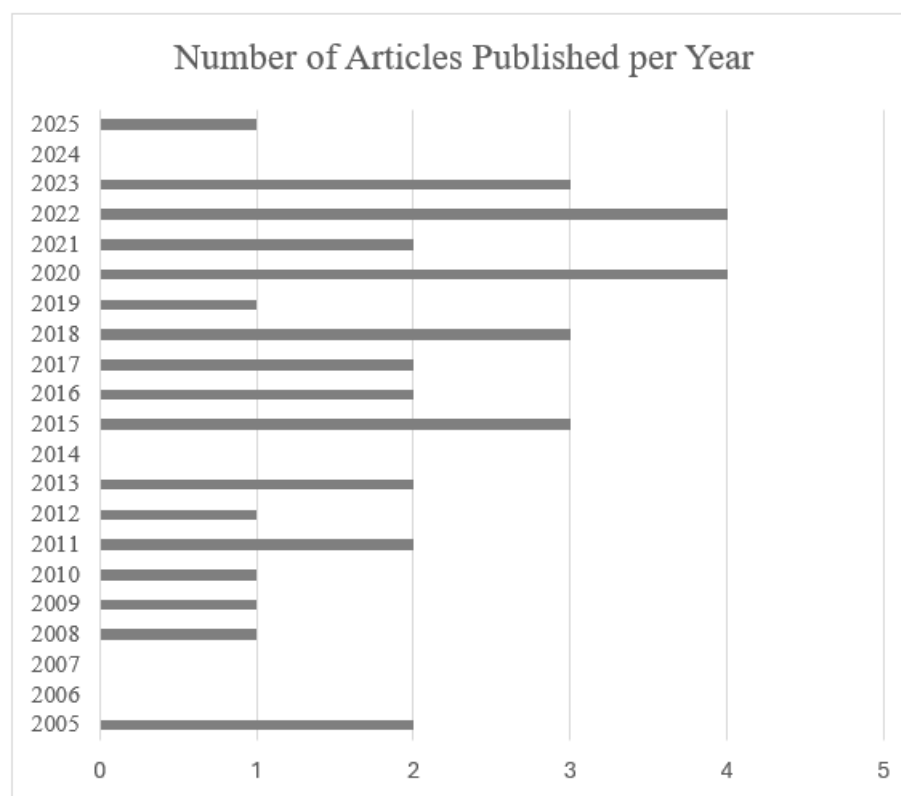
“secuenciación de producción” Y “productos perecederos” (2)

Un total de 272 artículos fueron recuperados de esta búsqueda y posteriormente filtrados según los siguientes criterios: 1. Artículos escritos en inglés. 2. Artículos relacionados con productos perecederos de origen agrícola (frutas, verduras, productos cárnicos, lácteos, entre otros), excluyendo productos como hormigón, productos farmacéuticos, productos químicos y productos similares. 3. Los problemas abordados debían corresponder a las etapas posteriores a la cosecha; por lo tanto, los estudios seleccionados se centraron en la etapa de transformación de los PPs. 4. Artículos sobre el desarrollo de modelos de optimización. 5. El enfoque de modelización debía incorporar la perecedibilidad del producto mediante la consideración de un periodo máximo de consumo o una fecha de caducidad, como propusieron Vahdani et al. (4).

También se incluyeron artículos de revisión que abordan la planificación de los PPs, así como modelos de optimización aplicados en agricultura, para realizar procedimientos de búsqueda cruzada destinados a identificar estudios no recuperados mediante las ecuaciones iniciales de búsqueda, como en el caso de Shadkam e Irannezhad (5). También se incluían ponencias de congresos, siempre que no se hubiera publicado ningún artículo de revista sobre el mismo tema por el mismo autor o autores.

### Revisión bibliométrica de los resultados

Según el procedimiento descrito anteriormente, se seleccionaron 35 artículos para su análisis. La Figura 1 muestra que el 51% de los estudios que incorporan la variable de perecederidad se publicaron entre 2018 y 2025 (el último año de publicación entre los artículos seleccionados). Esta tendencia puede explicarse por el desarrollo de cronologías de la información y la implementación de sistemas de apoyo a la decisión dentro de las cadenas de suministro de productos perecederos.



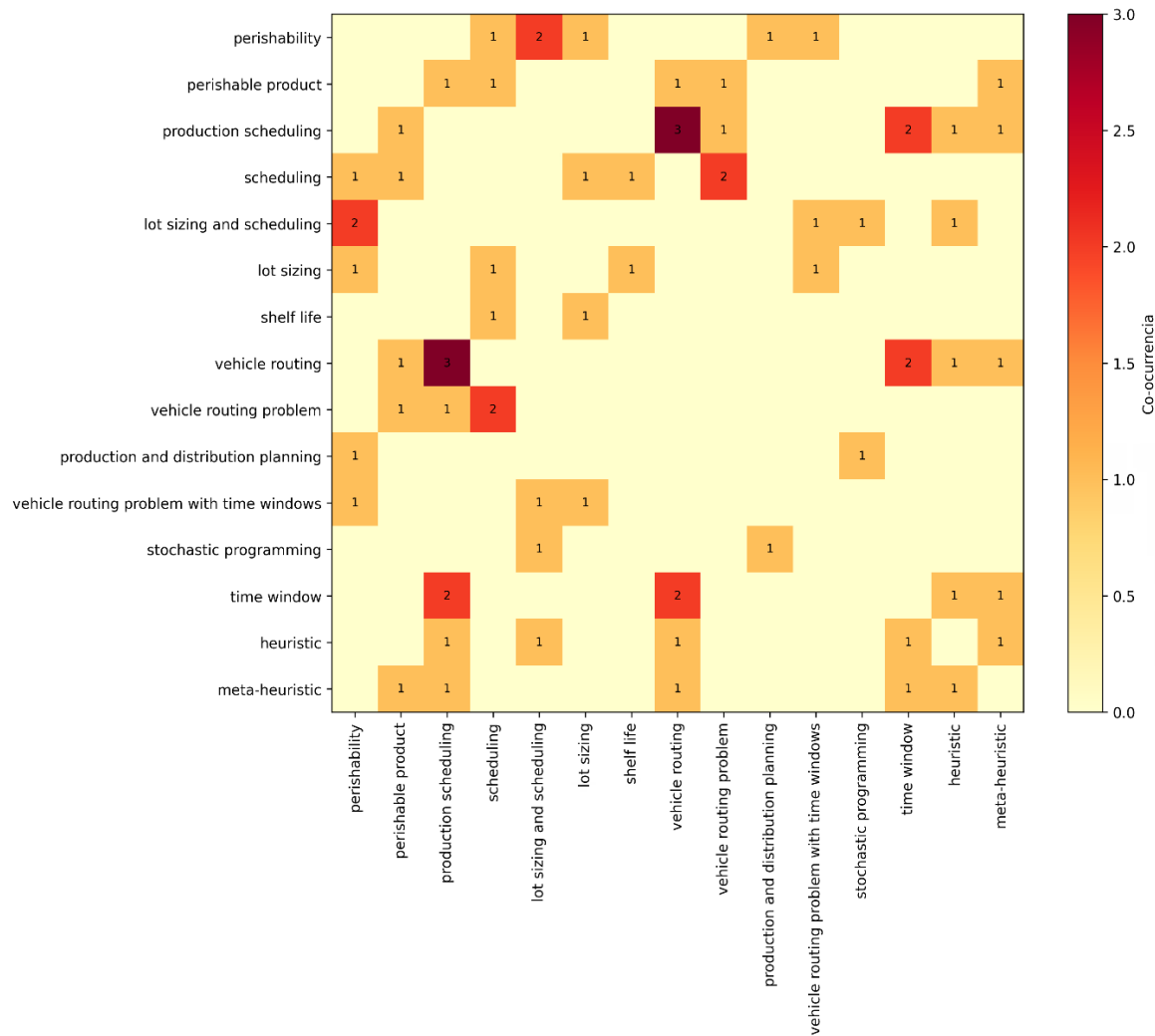
**Figura 1.** Número de artículos publicados por año

En función de las instituciones con las que los autores están afiliados, se construyó la Tabla 1. Muestra que el 44,9% de los estudios se originaron en países de Asia, el 38,2% de países europeos y el 16,9% de países de América. Entre todos los países, los niveles de participación más altos correspondieron a Irán (22,5%), Alemania (15,7%), China (13,5%) y Países Bajos (10,1%).

**Tabla 1.** Distribución de los autores por país de afiliación institucional

<b>País</b>	<b>Número de autores</b>	<b>Porcentaje</b>
Irán	20	22.5%
Alemania	14	15.7%
China	12	13.5%
Países Bajos	9	10.1%
Estados Unidos	7	7.9%
Brasil	5	5.6%
Francia	4	4.5%
Portugal	4	4.5%
Taiwán	3	3.4%
Turquía	3	3.4%
Argentina	2	2.2%
India	2	2.2%
Italia	2	2.2%
Reino Unido	1	1.1%
Chile	1	1.1%
TOTAL	92	100%

Para identificar las principales líneas temáticas y tendencias de investigación presentes en los artículos seleccionados, se realizó un análisis de densidad de palabras clave basado en los términos reportados por los autores en cada publicación. Según la Figura 2, los resultados se concentran en términos asociados a la programación de producción y la integración de decisiones logísticas en los PPs. Las palabras clave que aparecen con mayor frecuencia son programación de producción, enrutamiento de vehículos, perecederidad y tamaño de lotes, lo que indica un interés predominante en desarrollar modelos integrados destinados a coordinar actividades de producción, almacenamiento y distribución.



**Figura 2.** Mapa de calor de palabras clave

Basándose en estos resultados, los artículos se clasificaron según la integración de la programación de producción con otras decisiones dentro del proceso de gestión de operaciones. En consecuencia, se encontró que los problemas de distribución y enrutamiento (DR) constituyen la categoría más estudiada, como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Porcentaje de artículos por problema abordado

Problema abordado junto con la programación de producción	Número de artículos	%
Distribución y Ruta de Vehículos	16	45.7%
Tamaño de lote	11	31.4%
Planificación de producción	6	17.1%
Gestión de inventario	1	2.9%
Programación de producción	1	2.9%

Las categorías mencionadas anteriormente se revisan en la siguiente sección.

# Resultados

## Clasificación

Este artículo propone una clasificación de los estudios revisados basada en cómo abordan la integración de las decisiones de programación de producción con otras actividades operativas y estratégicas, con el objetivo de destacar la importancia de la coordinación funcional para mejorar la eficiencia global de los sistemas de producción. Esta clasificación se basaba en identificar la actividad o etapa del proceso que, junto con la programación de producción, presentaba el mayor nivel de detalle tanto en el desarrollo del modelo como en la presentación y discusión de los resultados.

Aunque revisiones bibliográficas anteriores (7)(8)(9) han propuesto clasificaciones basadas en la integración de decisiones de programación con áreas como la gestión de inventarios y la optimización de recursos, la clasificación propuesta en este artículo difiere porque la estrategia de búsqueda no fue diseñada para identificar estas combinaciones; más bien, surgieron como resultado de la propia reseña. Las categorías resultantes fueron: dimensionamiento de lotes (LS), distribución y enrutamiento de vehículos (DR), planificación de producción, gestión de inventarios y programación de producción.

## Problemas de programación de producción y dimensionamiento de lotes (LS)

Los problemas que integran la programación de producción y las decisiones de LS han sido abordados extensamente en la literatura. Estos problemas pueden analizarse desde la perspectiva de la gestión de inventarios porque uno de sus objetivos principales está asociado a reducir los costes de mantenimiento generados por tamaños de lote que superan las tasas de consumo de producción (10). Las dos preguntas principales que abordan estos modelos son cuánto y cuándo producir (11). Según Chen (8), estos problemas pueden implicar niveles de toma de decisiones tácticas y/o operativas.

Una característica importante es que la LS no se trata como una decisión estática, sino que se ajusta según factores como la demanda del producto (12) y la capacidad de producción (13).

En cuanto a las metodologías aplicadas, la Tabla 3 muestra que la programación de enteros mixtos (lineal o no lineal) es el enfoque más frecuentemente empleado para la modelización de problemas, aunque tanto los métodos de solución como las funciones objetivo difieren entre estudios. Solo el trabajo de Yao y Huang (14) empleó programación estocástica y un algoritmo genético para minimizar los costes de producción y almacenamiento de inventarios.

En cuanto a los métodos de solución empleados, tres (3) estudios emplearon software CPLEX; sin embargo, también se implementaron algoritmos genéticos y diferentes enfoques heurísticos para resolver los modelos propuestos.

Pahl y Voß (15) abordaron el problema del LS discreto conjuntamente con la programación de producción e incorporaron la perecederidad del producto como una tasa fija de deterioro. Para representar el tiempo, los autores dividieron los macro-periodos en micro-periodos.

Pahl et al. (16) revisitaron el problema de la LS discreta integrado con la programación de producción e incorporaron además configuraciones dependientes de la secuencia. Esta característica es relevante porque, como explican los autores, el LS afecta a los costes de instalación, los costes de inventario y la frescura del producto; Por lo tanto, el equilibrio generado entre estos factores se convierte en determinante para la efectividad de la decisión. En su modelo, la vida útil del producto se incorporaba mediante un factor de deterioro, donde un valor de cero indica que el producto no puede almacenarse, mientras que un valor de uno indica que el producto puede almacenarse durante el periodo inmediatamente posterior a la producción.

La incorporación de los costes de montaje dependientes de la secuencia también se abordó en (17), (18) y (13). En el primer estudio, los autores desarrollaron un modelo estocástico de programación entera en el que la vida útil del producto se trataba como una constante. El enfoque de solución consistía en combinar un algoritmo de reenlace de caminos con un solucionador de programación lineal de enteros mixtos. En la segunda publicación, se incorporaron máquinas paralelas a la configuración del sistema porque estos problemas no pueden abordarse descomponiendo el sistema en un conjunto de máquinas simples, especialmente cuando solo hay un recurso disponible para las actividades de configuración. El tercer estudio incorporó múltiples líneas de producción y escasez de recursos; La solución propuesta consistía en una heurística que combinaba una regla de ramificación con un procedimiento de relajación y fijación.

Amorim et al. (19) propusieron modelos de programación mixta de enteros multiobjetivo para secuenciación y dimensionamiento de lotes bajo dos escenarios de producción: fabricación pura por encargo y una configuración híbrida entre fabricación por encargo y fabricación a stock. Una de las principales contribuciones al problema de programación de los PP fue la inclusión de dos funciones objetivo: minimizar costes y maximizar la frescura del producto en el momento del despacho.

Study (20) comparó dos modelos matemáticos con diferentes niveles de decisión. En el primer modelo, el problema se centraba en definir la programación continua de trabajos similares. El segundo modelo se propuso como una extensión del primero porque pretendía determinar cómo debían producirse los lotes de productos en términos de tiempo y cantidad, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Publicaciones que abordan el problema integrado de la programación de producción y el tamaño de lotes

Artículo	Tipo de modelo	Método de solución	Función objetivo	Producto perecedero relacionado
(14)	Programación estocástica	Algoritmo genético híbrido	Minimizar los costes de producción y de almacenamiento	Profesional de verduras, frutas y alimentos frescos
(15)	Programación lineal mixta de enteros	CPLEX	Minimizar el coste de producción y almacenamiento de inventario	Frutas y verduras

(16)	Programación de enteros mixtos	Heurística desarrollada por el autor	Minimizar los costes de instalación, almacenamiento de inventario y costes de eliminación asociados a las limitaciones de capacidad	Productos alimentarios
(19)	Programación de enteros mixtos	Algoritmo genético	Minimizar los costes de producción; maximizar la frescura de los productos enviados	Yogur
(20)	Programación de enteros mixtos	CPLEX	Minimizar los costes de producción	Productos alimenticios preparados
(17)	Programación estocástica entera	Heurística desarrollada por el autor	Maximizar el beneficio	Productos alimentarios
(21)	Programación lineal mixta de enteros	Búsqueda adaptativa de vecindarios grandes (ALNS)	Minimizar los costes totales de producción y distribución	Productos alimentarios
(18)	Programación de enteros mixtos	Heurística híbrida de relajación y reparación y optimización	Minimizar los costes de producción y de almacenamiento	Preparaciones de frutas
(12)	Programación lineal mixta de enteros	CPLEX	Minimizar el makespan	Productos lácteos
(13)	Programación de enteros mixtos	Heurística de relajación y reparación con rama y vinculación	Minimizar los costes de producción y de almacenamiento	Industria de procesamiento de carne

(22)	Programación de enteros mixtos	Heurística híbrida de relajación y reparación y optimización	Minimizar los costes relacionados con la producción, el almacenamiento de inventarios, la configuración de la secuencia de producción y la vida útil	Productos alimentarios
------	--------------------------------	--	--	------------------------

La integración de LS, la programación de producción y los problemas de enrutamiento de vehículos fue abordada más a fondo por Belo-Filho et al. (21). Para resolver este problema, los autores propusieron un modelo de programación lineal de enteros mixtos en el que la vida útil del producto se representaba como un intervalo de tiempo fijo. En este estudio, se implementó un algoritmo adaptativo de búsqueda de grandes vecindarios con el objetivo de minimizar los costes de producción y distribución.

Los estudios descritos anteriormente utilizan tasas de deterioro que varían según diferentes factores para modelar las características de perecederidad del producto o limitar la vida útil del producto o materia prima a un número fijo de días. En contraste, Sel et al. (12) desarrollaron un modelo de programación lineal mixta de enteros destinado a minimizar el makespan y propusieron una aproximación determinista a la probabilidad de perecederidad del producto. Este enfoque se complementó con un modelo de simulación para evaluar diferentes duraciones de vida útil y así estimar las pérdidas de programación.

Alipour et al. (22) abordaron problemas de LS y programación dentro de un sistema compuesto por múltiples líneas de producción paralelas, múltiples periodos y configuraciones dependientes de la secuencia. Además de minimizar los costes de producción, almacenamiento y residuos, la función objetivo incorporaba los costes asociados a la vida útil del producto. Uno de los aspectos más interesantes de este estudio es el uso de dos heurísticas para la solución de modelos. La primera heurística, relajarse y arreglar, permite identificar una solución factible al problema, que posteriormente mejora usando la segunda heurística, arreglar y optimizar.

#### Problemas de programación de producción, distribución y enrutamiento de vehículos (DR)

Los problemas relacionados con la DR han recibido considerable atención debido a la importancia de esta etapa para la preservación de las PP, ya que sus objetivos están asociados a reducir los tiempos de tránsito y garantizar la calidad y las condiciones de seguridad del producto. Estudios como (23), (24) y (25) ejemplifican el tratamiento de este tema; sin embargo, estas obras no incorporan problemas de programación de producción.

La integración de problemas de enrutamiento con la secuenciación de producción para PPs se justifica por la relación entre ambas etapas del proceso logístico. La programación de producción pretende maximizar la frescura y vida útil del producto, mientras que las actividades de

enrutamiento y distribución deben garantizar una eficiencia operativa suficiente para transferir estos beneficios a los consumidores finales.

Como se muestra en la Tabla 4, el tratamiento de problemas que integran el enrutamiento y la programación de producción da lugar a una mayor diversidad de modelos y métodos de solución en comparación con los problemas de LS. En las primeras publicaciones, la función objetivo se centraba en la maximización del beneficio o la rentabilidad, como se ilustra en (26). Para lograr este objetivo, los autores desarrollaron un modelo de programación no lineal que considera la demanda estocástica y una única línea de producción.

La formulación consideraba clientes con diferentes ventanas temporales; sin embargo, se permitían retrasos en la entrega, aunque asociados a costes penalizantes. La vida útil del producto se incorporó al modelo mediante una tasa de deterioro.

**Tabla 4.** Publicaciones que abordan el problema integrado de la programación de producción, distribución y enrutamiento de vehículos

Artículo	Tipo de modelo	Método de solución	Función objetivo	Producto perecedero relacionado
(26)	Programación no lineal	Método de Nelder–Mead Restringido y Heurística desarrollada por el autor	Maximizar el beneficio	Productos alimentarios
(27)	Programación mixta de enteros multiobjetivo	CPLEX	Minimizar los costes de producción, almacenamiento y transporte; maximizar la fracción media de vida útil restante de los productos entregados	Productos alimentarios
(28)	Programación lineal mixta de enteros	CPLEX	Maximizar el beneficio	Productos lácteos
(4)	Programación estocástica	Heurística desarrollada por el autor; Algoritmo del ciclo del agua	Maximizar el beneficio	Productos alimentarios

(29)	Programación lineal mixta de enteros	Procedimiento de búsqueda adaptativa aleatorizada y codiciosa (GRASP) con algoritmo de búsqueda evolutiva	Minimizar el makespan	Productos alimentarios
(30)	Programación estocástica	Algoritmo de Reducción de Escenarios	Maximizar el beneficio	Productos lácteos
(31)	Programación lineal mixta de enteros multiobjetivo	Hiperheurística basada en criterios de Monte Carlo	Minimizar costes y maximizar la probabilidad de compra del cliente	Productos alimentarios
(32)	Programación no lineal de enteros mixtos	Algoritmo de búsqueda de vecindarios combinado con recocido simulado	Minimizar los costes de montaje, almacenamiento de inventario y ruta del vehículo	Industria de procesamiento de carne (pollo)
(33)	Programación Multiobjetivo Robusta	No especificado	Maximizar la rentabilidad y minimizar el impacto ambiental	Lechuga
(34)	Programación lineal mixta de enteros	CPLEX	Minimizar el coste total	Verduras
(35)	Programación lineal de enteros mixtos y programación difusa	Algoritmo competitivo imperialista híbrido y evolución diferencial autoadaptativa	Maximizar el beneficio	Productos alimentarios
(36)	Programación estocástica	Metaheurística de cinco fases	Minimizar los costes de producción, inventario y distribución	Productos alimentarios
(37)	Programación de enteros mixtos	CPLEX	Minimizar los costes de producción	Productos alimentarios

(38)	Programación lineal mixta de enteros multiobjetivo	Programación objetivo	Minimizar el coste total y maximizar la fiabilidad de los proveedores seleccionados Minimizar las emisiones de carbono derivadas de las actividades de producción, inventario y enrutamiento; minimizar los costes totales	Industria de procesamiento de carne (pollo)
(39)	Programación lineal mixta de enteros	Optimización en Enjambre de Partículas (PSO)	Minimizar los costes de producción y distribución	Productos alimentarios
(40)	Programación lineal mixta de enteros	Optimización de colonias de hormigas y algoritmo genético difuso		Productos alimentarios

El problema de la demanda estocástica fue revisitado por Mousavi et al. (36), quienes desarrollaron un modelo de programación estocástica destinado a minimizar los costes de producción, enrutamiento e inventario. Para resolver el problema, los autores propusieron un enfoque metaheurístico de cinco fases. La vida útil del producto se incorporó mediante un parámetro destinado a penalizar la falta de frescura según un umbral temporal predefinido.

A diferencia del estudio anterior, (28) no consideró la demanda estocástica, sino que incorporó los tiempos y costes asociados a la reconfiguración del sistema de producción en el modelo. Los autores combinaron un modelo de simulación con el modelo de optimización para obtener tiempos dinámicos de operación y aumentar el realismo del modelo. Dentro de la función objetivo, un componente asociado al precio del producto permitía cuantificar el impacto de la frescura en la rentabilidad operativa.

Los costos de instalación se revisaron en (34), donde los autores consideraron además los impactos energéticos asociados a las actividades de producción y distribución.

En (4), además de abordar problemas de enrutamiento de vehículos y programación de producción, se consideró un sistema de producción en varias etapas, en el que se incorporaban el inventario en proceso y los correspondientes costes de mantenimiento en cada etapa. Similar a (26), los autores modelaron la demanda estocástica usando una distribución de probabilidad conocida. Para resolver el problema, desarrollaron un enfoque de soluciones propietario y lo compararon con el algoritmo del Ciclo del Agua (41), concluyendo que este último producía mejores soluciones.

Los problemas de distribución integrados con la programación de producción y la gestión de inventarios también fueron abordados por Ghasemkhani et al. (35), quienes propusieron un modelo

de programación lineal mixta entera que posteriormente se transformó en un modelo difuso para incorporar la incertidumbre de la demanda y maximizar la rentabilidad del sistema. En este modelo, la vida útil se representaba mediante un parámetro que determinaba la calidad del producto según el tiempo necesario para llegar al minorista final.

El estudio (29) propuso un modelo de programación lineal de enteros mixtos para representar un sistema de producción compuesto por una máquina y múltiples vehículos de distribución. La función objetivo se asoció con la minimización de makespan en lugar de la minimización de costes, que es el enfoque más común. Para fines de solución, los autores propusieron un algoritmo híbrido que combinaba el procedimiento de búsqueda adaptativa aleatorizada codiciosa con un algoritmo de búsqueda evolutiva (42). La vida útil del producto se definía como una constante incorporada en una restricción que limitaba tanto el tiempo máximo de entrega al último cliente dentro de una subruta como el tiempo de finalización de la producción.

Publicaciones como Vahdani et al. (4) destacan la importancia del modelado de incertidumbre en la programación de producción perecedera para mejorar la eficiencia, la integración empresarial y la capacidad de respuesta (43). Sin embargo, la demanda no es la única fuente de variabilidad; En estos sistemas, el suministro de materias primas, que generalmente son perecederas, también presenta incertidumbre. Respecto a esta fuente de variabilidad, Guarnaschelli et al. (30) incorporaron una distribución de probabilidad para el suministro de materias primas y la representaron a través de un conjunto de escenarios y probabilidades asociadas.

Estudios como (19) y (38) aprovecharon el potencial de los modelos multiobjetivo para identificar las mejores soluciones posibles para dos objetivos opuestos o complementarios. Entre los estudios que integraron la distribución y la programación de producción, se identificaron obras (31), (27) y (33). El primero pretendía minimizar los costes de producción y distribución mientras maximizaba la probabilidad de compra. Estos objetivos pueden considerarse contradictorios porque aumentar la probabilidad de compra se asocia con la ampliación de las capacidades de producción y distribución, capaces de garantizar a los clientes productos completamente frescos en plazos de entrega extremadamente cortos, incrementando así los costes.

En el segundo estudio, los autores incorporaron el dimensionamiento de lotes en un problema que integraba la programación y distribución de la producción utilizando tanto enfoques de vida útil fija como flexibles. El objetivo era minimizar los costes totales de la cadena de suministro mientras se maximizaba la frescura de los productos entregados a los clientes.

El tercer artículo presentó un modelo de optimización robusto orientado a maximizar el beneficio mientras se reducen los impactos medioambientales. Para lograr este objetivo, se incorporaron parámetros asociados a la incertidumbre en los costes de producción y transporte.

Aunque integrar múltiples objetivos en un solo modelo es una práctica común, estudios como Sun et al. (39) abordaron modelos independientes para optimizar los dos objetivos considerados, que en su caso específico eran minimizar las emisiones de carbono y minimizar los costes totales.

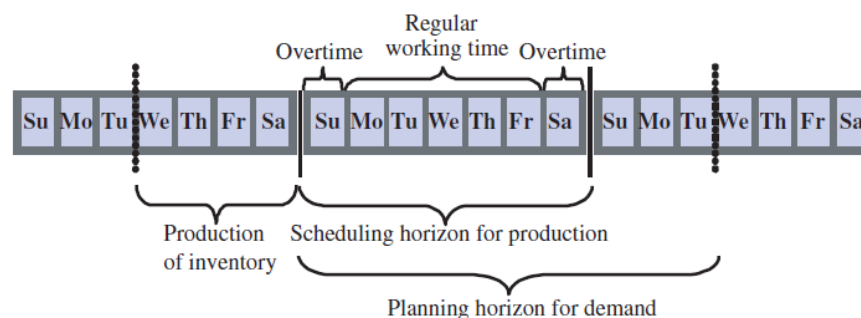
Según Schouten et al. (44) y Li (40), la calidad del producto es una prioridad del cliente y debe garantizarse en todas las etapas del ciclo logístico. Esto se refleja en estudios como Manouchehri

et al. (32), que incorporaron las temperaturas de los almacenes y vehículos de transporte en su modelo tanto como parámetros de coste como restricciones. Además, evaluaron la degradación del producto mediante recuentos de microorganismos medidos en diferentes etapas del proceso y restringieron estos recuentos según umbrales predefinidos.

Lejarza et al. (37) integraron dos modelos: el primero relacionado con la dinámica de calidad, considerando diferentes factores ambientales, y el segundo se centró en la cadena de suministro desde la etapa de producción.

### Planificación de producción y programación de órdenes de producción

Una de las diferencias más importantes entre la planificación de la producción y la programación de producción radica en el horizonte temporal al que se refieren. La planificación de la producción generalmente considera la capacidad de procesos a largo plazo, mientras que las decisiones de programación pertenecen al nivel operativo y se desarrollan dentro de subdivisiones del horizonte de planificación, como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Horizonte de planificación. Reproducido de (45)

La Tabla 5 presenta los artículos que consideran la relación entre planificación y programación de producción para los PP. El primero de estos estudios fue realizado por Entrup et al. (45), quienes desarrollaron un modelo de programación lineal mixta de enteros mediante el cual abordaron la planificación de las etapas de aromatización y envasado del producto utilizando una representación en tiempo continuo. Los investigadores emplearon una cuadrícula temporal en la que cada periodo correspondía a un día, y la vida útil del producto se expresaba en días. La función objetivo tenía como objetivo maximizar los márgenes de contribución teniendo en cuenta los costes y los ingresos variables a lo largo del horizonte de planificación, para los cuales el precio del producto se veía afectado por la vida útil.

De manera similar, Singh et al. (46) abordaron las operaciones de envasado determinando secuencias de procesamiento mientras definían simultáneamente los niveles de inventario y la capacidad de la instalación. Su enfoque consistía en dos etapas: la primera se centraba en la secuenciación y las decisiones de asignación, mientras que la segunda modelaba la demanda estocástica. Los autores consideraron tanto la vida útil máxima como la mínima restante como parámetros del modelo.

Del mismo modo, Steinbacher et al. (47) abordaron el problema de planificación de producción en una empresa fabricante de ensaladas junto con la secuenciación de órdenes de producción, utilizando un modelo de programación lineal mixta de enteros combinado con un modelo de simulación.

**Tabla 5.** Publicaciones que abordan problemas de secuenciación integrados con problemas de planificación

Artículo	Tipo de modelo	Método de solución	Función objetivo	Producto perecedero relacionado
(45)	Programación lineal mixta de enteros	CPLEX	Maximizar el margen de contribución teniendo en cuenta el componente de vida útil	Yogur
(48)	Programación lineal mixta de enteros	Heurística de descomposición	Minimizar costes	Productos lácteos
(49)	Programación lineal mixta de enteros	Heurística de relajarse y arreglar	Minimiza los costes de instalación y almacenamiento de inventario	Productos alimentarios
(50)	Programación lineal mixta de enteros	CPLEX	Minimizar los costes de montaje, producción y almacenamiento de inventario	Productos alimentarios
(46)	Programación estocástica	Heurística generalizada basada en la descomposición de Benders	Maximizar el beneficio	Yogur
(47)	Programación lineal mixta de enteros	No especificado (Gurobi)	Combinación de minimización de makespan y minimización de deterioro de ingredientes	Ensaladas de charcutería

Como se observa en la Figura 2, la duración del intervalo de tiempo es un factor clave para delimitar el alcance de las decisiones de planificación y programación de la producción. Sel et al. (48) propusieron una heurística que mejora la eficiencia computacional de los problemas híbridos de planificación y programación. Su objetivo era minimizar los costes asociados al deterioro del producto, producción, gestión de inventario, operaciones de horas extra, embalaje, transporte y demanda no cubierta.

La heurística consiste en dividir el problema en dos submodelos: el primero considera un periodo de planificación más largo, mientras que el segundo aborda intervalos de planificación más cortos. Según los autores, el primer submodelo actúa como un proceso maestro responsable de llamar al segundo modelo para apoyar las decisiones de planificación.

El modelo propuesto por Claassen et al. (49) abordó simultáneamente las decisiones de LS y programación de producción, considerando la configuración del sistema de producción y centrándose en los niveles de inventario y los cambios de producto. La perecedibilidad se incorporó mediante un parámetro de tasa de deterioro incluido en la función objetivo. De manera similar, Wei et al. (50) incorporaron decisiones de LS; Sin embargo, a diferencia de los modelos presentados en la subsección 3.2, estos autores enfatizaron la división entre macro-periodos y micro-periodos, que, como se ha discutido anteriormente, constituye una de las bases para diferenciar decisiones a largo y corto plazo.

### Gestión de inventario

Las decisiones de programación de producción e inventario, incluyendo materias primas, inventario en proceso y inventario de productos terminados, están estrechamente relacionadas, como se observa en (12), ya que determinan tanto los costes del sistema como los niveles de inventario necesarios para alcanzar los objetivos del servicio.

En Buisman et al. (51), los autores desarrollaron un modelo de programación lineal mixta de enteros que integra la gestión de donaciones de alimentos con la planificación de menús en una organización benéfica. El modelo tenía como objetivo determinar qué donaciones debían aceptarse según la disponibilidad de inventario y cómo debían utilizarse eficientemente en la planificación del menú. Bajo este enfoque, se especificaba la vida útil máxima del producto como parámetro, mientras que la variable de decisión correspondía a la vida útil restante de los productos en el momento del consumo.

### Programación de producción

En Cai et al. (52), la vida útil del producto se asociaba a una fecha límite tras la cual los productos ya no podían entregarse a los clientes, pero podían seguir utilizándose en otro proceso o venderse; por lo tanto, se asignó un valor de salvamento. Este enfoque garantiza que los productos entregados a los clientes mantengan altos niveles de frescura.

Los autores propusieron un modelo no lineal y un algoritmo de solución propietario compuesto por tres fases: selección de la secuencia óptima según el tipo de producto, selección de la secuencia óptima dentro de cada categoría de producto y, finalmente, asignación de tiempos de procesamiento a cada producto en las máquinas.

## Discusión de los resultados

A lo largo de la sección anterior, se pueden identificar tres enfoques principales para modelar y representar la perecederidad del producto en problemas de secuenciación de producción: periodos de tiempo fijos, factores de deterioro representados mediante tasas fijas y probabilidades asociadas a la perecederidad del producto. Según la información presentada en la Tabla 6, los periodos de tiempo fijos constituyen el enfoque más utilizado en la literatura disponible hasta la fecha.

**Tabla 6.** Clasificación de la vida útil

Representación en vida útil	Número de artículos	Referencias
Duración fija de la vida útil (perecederidad representada mediante una vida útil o fecha de caducidad predefinida)	23 (65.7%)	(13), (15), (16), (17), (18), (19), (20), (21), (22), (27), (28), (29), (30), (31), (33), (34), (36), (45), (46), (48), (50), (51), (52)
Factor de deterioro basado en una tasa fija de deterioro (deterioro continuo o decaimiento exponencial/lineal)	11 (31.4%)	(4), (14), (26), (32), (35), (37), (38), (39), (40), (47), (49)
Probabilidad de deterioro del producto (modelos estocásticos o distribuciones de probabilidad como Weibull)	1 (2.9%)	(12)

Es importante señalar que estos enfoques para modelar la vida útil responden más a las características de los datos disponibles y a las condiciones del modelo o sistema modelado propuesto que al producto en sí. No obstante, cada enfoque implica una conceptualización diferente de la perecederidad. Cuando se establece un factor de deterioro basado en las características del producto y en los procesos de maduración y descomposición, se consideran los efectos de los agentes de conservación y la frescura del producto en los clientes finales. En cambio, cuando la vida útil se modela como un periodo fijo, estas consideraciones se omiten.

Por otro lado, modelar la probabilidad de perecederidad del producto implica considerar los efectos de factores externos sobre productos o materias primas; por lo tanto, la duración del producto se convierte en un parámetro aleatorio. Estas conceptualizaciones tienen un impacto sustancial en los resultados de la secuenciación porque determinan la naturaleza y la exhaustividad de los criterios utilizados por el modelo para priorizar órdenes de producción.

Estas diferencias en la representación de la perecederidad también se reflejan en los modelos matemáticos empleados a lo largo de la literatura. En particular, se observó que el modelado de perecederidad en 28 de los artículos revisados se realizó utilizando modelos de programación mixta entera (lineales y no lineales), demostrando una preferencia por estructuras deterministas que

incorporan restricciones operativas y de capacidad inherentes a los sistemas de producción. Dentro de estos modelos, las tasas de deterioro y la vida útil fija constituyen los enfoques más frecuentes para representar la perecederidad, mientras que los enfoques probabilísticos generalmente requieren extensiones estocásticas o escenarios adicionales que aumentan la complejidad del modelo.

Independientemente del método utilizado para representar la duración del producto, es común entre los estudios revisados asociar los costes con la vida útil, ya sea relacionado con la percepción del cliente —donde se valora la frescura—, la conservación de inventario de productos o materias primas, o el valor de salvamento asociado a la venta de residuos a otras industrias.

Las condiciones de conservación del producto indican que la vida útil de los PP no depende únicamente de las características intrínsecas del producto, sino también de las condiciones operativas a las que se exponen los productos, que pueden o no ser controlables por los responsables de la toma de decisiones. Uno de estos factores, identificado en los artículos revisados como influyente tanto en la calidad del producto como en las decisiones de secuenciación, es el tiempo de configuración y reconfiguración del sistema cuando es necesario. Debido a los riesgos de contaminación asociados con los materiales residuales, los tiempos de preparación juegan un papel fundamental en la determinación de la secuenciación de productos dentro de los sistemas de producción.

## Conclusiones

La revisión bibliográfica realizada muestra que, en el 80% de los casos analizados, el problema se modeló utilizando enfoques de programación mixta entera, ya fueran lineales o no lineales. Este hallazgo sugiere que este enfoque de modelado es el más utilizado para abordar problemas de programación que involucran a los PPs, demostrando su capacidad para apoyar a los responsables de la toma de decisiones que enfrentan este tipo de problemas. Por el contrario, el dominio de los modelos deterministas revela la aplicación limitada de los enfoques estocásticos, lo que pone de manifiesto una importante brecha en la investigación.

En cuanto a las condiciones o casos que favorecen enfoques deterministas o estocásticos, la revisión bibliográfica sigue siendo inconclusa. Las tablas 3, 4 y 5 no revelan un patrón claro que relacione los enfoques de modelado con funciones objetivo o tipo de producto. Identificar tales relaciones puede constituir una oportunidad para futuras investigaciones.

En cuanto a los métodos y técnicas utilizados para resolver los modelos formulados, la revisión bibliográfica revela una diversidad sustancial, incluyendo métodos desarrollados por autores, técnicas clásicas aplicadas a casos novedosos y combinaciones de diferentes enfoques. Esta diversidad dificulta la selección de un método ideal; por lo tanto, se recomienda evaluar múltiples enfoques de solución para cada modelo.

Aunque siete de los artículos identificados abordaban sistemas de fabricación a medida, se observó un predominio de los sistemas de fabricación a stock. Esto puede explicarse por el hecho de que las materias primas agrícolas generalmente muestran un comportamiento dependiente de la cosecha, requiriendo reposición periódica para su procesamiento y utilización posteriores. Este hallazgo

sugiere que relativamente pocos estudios han considerado estrategias de producción basadas en la tirada, que, aunque poco comunes en este campo, pueden ser relevantes en sectores como la floricultura.

Como se muestra en las Tablas 3, 4 y 5, diecinueve de los treinta y cinco artículos analizados se referían de forma general a “productos alimentarios” sin especificar categorías concretas de productos. Esto puede ser contraproducente para comprender los fenómenos de perecederidad, ya que es necesario comprender las características específicas del producto, las cadenas de valor y las condiciones de procesamiento para un modelado más preciso de los factores asociados a la preservación y utilización.

Es importante destacar que solo dos de los artículos revisados consideraron la incertidumbre en la disponibilidad de materias primas, a pesar de que, en la mayoría de los casos, las materias primas se originaron en sistemas agrícolas y, por tanto, están sujetas a factores como el clima, la calidad del suelo, las condiciones de siembra, las condiciones de cosecha, entre otros. Este hallazgo crea oportunidades para futuras investigaciones orientadas a incorporar esta fuente de incertidumbre en la complejidad de la planificación, ya que frecuentemente representa una de las principales preocupaciones de los responsables de la toma de decisiones.

Al formular modelos de planificación, es necesario considerar no solo el tipo de sistema de producción, sino también el nivel deseado de integración, ya que este factor desempeña un papel decisivo en la delimitación de problemas. Este artículo proporciona un marco de referencia para futuros investigadores que buscan abordar niveles de integración similares a los presentados aquí, siendo los problemas de enrutamiento la categoría más frecuentemente identificada, seguidos por los problemas de dimensionamiento de lotes, representados por dieciséis y once estudios, respectivamente.

#### Declaración de contribución de autoría de CreditT

**Conceptualización - Ideas:** David Ricardo Maldonado Porras, Diana María Cárdenas Aguirre.

**Curación de datos:** David Ricardo Maldonado Porras. **Análisis formal:** David Ricardo Maldonado Porras.

**Investigación:** David Ricardo Maldonado Porras. **Metodología:** David Ricardo Maldonado Porras.

**Dirección de Proyecto:** David Ricardo Maldonado Porras, Diana María Cárdenas Aguirre.

**Recursos:** Anny Astrid Espitia Cubillos. **Software:** David Ricardo Maldonado Porras. **Supervisión:**

Diana María Cárdenas Aguirre. **Validación:** David Ricardo Maldonado Porras, Diana María Cárdenas Aguirre.

**Redacción - borrador original - Elaboración:** David Ricardo Maldonado Porraso. **Redacción - revisión y edición -Elaboración:** David Ricardo Maldonado Porras, Diana María Cárdenas Aguirre.

**Financiación:** no declara.

**Conflicto de intereses:** no declara. **Aspecto ético:** no declara.

## Referencias

1. Monahan JP. Programación de producción de productos perecederos. *Revista Internacional de Investigación en Producción*. 1976; 14(6):689-697

<https://doi.org/10.1080/00207547608956387>

2. Hariga M. Políticas óptimas de inventario para productos perecederos con demanda dependiente del tiempo. *Revista Internacional de Economía de la Producción*. 1997; 50(1):35-41.

[https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(97\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(97)00006-6)

3. Mason AN., Villalobos JR. Coordinación de la producción de cultivos perecederos mediante mecanismos de subasta. *Sistemas agrícolas*. 2015; 138:18-30.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.04.008>

4. Vahdani B, Niaki STA, Aslanzade S. Coordinación producción-inventario-enrutamiento con restricciones de capacidad y ventana temporal para productos perecederos: algoritmos heurísticos y metaheurísticos. *Revista de Producción Más Limpia*. 2017; 161:598-618.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.113>

5. Shadkam E., Irannezhad E. Una revisión exhaustiva de los métodos de optimización por simulación en cadenas de suministro agrícolas y la transición hacia un marco digital inteligente basado en agentes para la agricultura 4.0. *Aplicaciones de ingeniería de la inteligencia artificial*. 2025

<https://doi.org/10.2139/ssrn.4791793>

6. Lin X, Negenborn RR, Lodewijks G. Control predictivo consciente de la calidad para la programación de la producción de almidón de patata. *Informática y electrónica en la agricultura*. 2018; 150 (febrero): 266-278.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.020>

7. Amorim, P., Meyr, H., Almeder, C., & Almada-Lobo, B. (2013). Gestión de la perecederidad en la planificación de producción y distribución: una discusión y revisión. *Revista de Servicios Flexibles y Manufactura*, 25(3), 389-413

<https://doi.org/10.1007/s10696-011-9122-3>

8. Chen S, Berretta R, Clark A, Moscato P. Tamaño y programación de lotes para productos alimentarios perecederos: una reseña. En el Módulo de Referencia en Ciencia de los Alimentos. 2019.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21444-3>

9. Soto-Silva WE, Nadal-Roig E, González-Araya MC, Pla-Aragones LM. Modelos de investigación operativa aplicados a la cadena de suministro de fruta fresca. *Revista Europea de Investigación Operativa*. 2016; 251(2):345-355.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.046>

10. Neumann K, Schwindt C, Trautmann, N. Programación avanzada de producción para plantas por lotes en industrias de proceso. *O Spectrum*. 2002; 251-279.

<https://doi.org/10.1007/s00291-002-0100-8>

11. Lin GC, Kroll DE, Lin CJ. Determinar un tiempo común de ciclo de producción para un problema de planificación de lotes económicos con elementos en deterioro. *Revista Europea de Investigación Operativa*. 2006; 173(2):669-682.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.014>

12. Sel Ç, Bilgen B, Bloemhof-Ruwaard J. Planificación y planificación de la producción láctea de fabricación y envase bajo incertidumbre a lo largo de la vida. *Modelado Matemático Aplicado*. 2017; 51:129-144.

<https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.06.002>

13. Soler WAO, Santos MO, Akartunalı K. Enfoques MIP para muchos problemas de dimensionamiento y programación en múltiples líneas de producción con recursos escasos, estaciones de trabajo temporales y productos perecederos. *Revista de la Sociedad de Investigación Operativa*. 2019; 0(0):1-16.

<https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1640588>

14. Yao MJ, Huang JX. Resolver el problema de la programación de lotes económicos con elementos deteriorados usando algoritmos genéticos. *Revista de Ingeniería Alimentaria*. 2005; 70(3):309-322.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.077>

15. Pahl J, Voß S. Dimensionamiento discreto de lotes y planificación incluyendo restricciones de deterioro y perecederidad. *Apuntes de clase en Procesamiento de Información Empresarial*. 2010; 46 LNBI:345-357.

[https://doi.org/10.1007/978-3-642-12494-5\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12494-5_31)

16. Pahl J, Voß S, Woodruff D. Dimensionamiento discreto de lotes y planificación con tiempos y costes de configuración dependientes de la secuencia, incluyendo restricciones de deterioro y perecederidad. *Notas de Clase en Procesamiento de Información Empresarial*, 2011; 345-357.

[https://doi.org/10.1007/978-3-642-12494-5\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12494-5_31)

17. Amorim P, Costa AM, Almada-Lobo B. Un método híbrido de reenlace de caminos para resolver problemas enteros estocásticos de dos etapas. *Transacciones internacionales en investigación operativa*. 2015; 22(1):113-127.

<https://doi.org/10.1111/itor.12084>

18. Tempelmeier H, Copil K. Dimensionamiento de lotes capacitado con máquinas paralelas, montajes dependientes de la secuencia y un operador de montaje común. *O Spectrum*. 2016; 38(4): 819-847.

<https://doi.org/10.1007/s00291-015-0410-2>

19. Amorim P, Antunes CH, Almada-Lobo, B. Planificación y planificación de lotes multiobjetivo que abordan problemas de perecederidad. *Investigación en Química Industrial e Ingeniería*. 2011; 50(6): 3371-3381.

<https://doi.org/10.1021/ie101645h>

20. Amorim P, Belo-Filho MAF, Toledo, FMB, Almeder C, Almada-Lobo B. Dimensionamiento de lotes frente a lote en la planificación de producción y distribución de productos perecederos. *Revista Internacional de Economía de la Producción*. 2013; 146(1):208-218.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.001>

21. Belo-Filho MAF, Amorim P, Almada-Lobo, B. Una búsqueda adaptativa de gran vecindario para el problema operativo integrado de producción y distribución de productos perecederos. *Revista Internacional de Investigación en Producción*. 2015; 53(20): 6040-6058.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1010744>

22. Alipour Z, Jolai F, Monabbati E, Zaerpour N. Dimensionamiento general de lotes y programación para productos alimentarios perecederos. *RAIRO - Investigación Operativa*. 2020; 54(3): 913-931.

<https://doi.org/10.1051/ro/2019021>

23. Govindan K, Jafarian A, Khodaverdi R, Devika K. Problema de localización de vehículos de dos escalones con ventanas temporales para optimizar la red sostenible de la cadena de suministro de alimentos perecederos. *Revista Internacional de Economía de la Producción*. 2014

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.028>

24. Rahbari A, Nasiri MM, Werner F, Musavi MM, Jolai F. El problema de enrutamiento y programación de vehículos con el cross-docking para productos perecederos bajo incertidumbre: Dos modelos bi-objetivo robustos. *Modelado Matemático Aplicado*. 2019; 70: 605-625.

<https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.01.047>

25. Tavallali PA, Feylizadeh MR, Amindoust A. Presentación de un modelo de programación matemática para el enrutamiento y programación de travesías y transporte. *Revista Polaca de Estudios de Gestión*. 2020; 22(1): 545-564

<https://doi.org/10.17512/pjms.2020.22.1.35>

26. Chen HK, Hsueh CF, Chang MS. Programación de producción y enrutamiento de vehículos con ventanas temporales para productos alimentarios perecederos. *Informática e Investigación Operativa*. 2009; 36(7): 2311-2319.

<https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.09.010>

27. Amorim P, Günther HO, Almada-Lobo B. Planificación integrada de producción y distribución multiobjetivo de productos perecederos. *Revista Internacional de Economía de la Producción*. 2012; 138(1): 89-101.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.005>

28. Bilgen B, Çelebi Y. Planificación integrada de programación y distribución de producción en la cadena de suministro láctea mediante modelado híbrido. *Anales de Investigación Operativa*. 2013; 211(1): 55-82.

<https://doi.org/10.1007/s10479-013-1415-3>

29. Lacomme P, Moukrim A, Quilliot A, Vinot M. Optimización de la cadena de suministro con integración tanto de producción como de transporte: múltiples vehículos para un solo producto perecedero. *Revista Internacional de Investigación en Producción*. 2018; 56(12): 4313-4336.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1431416>

30. Guarnaschelli A, Salomone HE, Méndez CA. Un enfoque estocástico para la planificación integrada de producción y distribución en cadenas de suministro lácteos. *Informática e Ingeniería Química*. 2020; 140:106-966.

<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106966>

31. Jafari NF, Behnamian J. Hiperheurística para la programación integrada de plazos y problema de enrutamiento de vehículos para productos perecederos considerando la calidad de producción. *Optimización de ingeniería*. 2020; 0(0): 1-20.

<https://doi.org/10.1080/0305215X.2020.1837792>

32. Manouchehri F, Nookabadi AS, Kadivar M. Enrutamiento de producción en cadenas de suministro perecederas y degradables de calidad. *Heliyon*. 2020; 6(2): e03376.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03376>

33. Aazami A, Saidi-Mehrabad M, Seyedhosseini SM. Un modelo de optimización robusta biobjetivo para un problema integrado de producción y distribución de bienes perecederos con estrategias de mejora de la demanda: un estudio de caso. *International Journal of Engineering. Transacciones A: Fundamentos*. 2021; 34(7): 1766-1777.

<https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.07a.21>

34. Solina V, Mirabelli G. Planificación integrada de producción-distribución con consideraciones energéticas para cadenas de suministro alimentarias eficientes. *Procedia Informática*. 2021

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.355>

35. Ghasemkhani A, Tavakkoli-Moghaddam R, Rahimi Y, Shahnejat-Bushehri S, Tavakkoli-Moghaddam H. Problema integrado producción-inventario-enrutamiento para productos multiperecederos bajo incertidumbre mediante algoritmos metaheurísticos. *Revista Internacional de Investigación en Producción*. 2022; 60(9): 2766-2786.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1902013>

36. Mousavi R, Bashiri M, Nikzad E. Problema de enrutamiento estocástico de producción para productos perecederos: Modelado y algoritmo de solución. *Informática e Investigación Operativa*. 2022

<https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105725>

37. Lejarza F, Baldea M. Un marco eficiente de optimización para rastrear múltiples atributos de calidad en las cadenas de suministro de productos perecederos. *Revista Europea de Investigación Operativa*. 2022; 297(3): 890-903.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.04.057>

38. Hashemi-Amiri O, Ghorbani F, Ji R. Problema integrado de selección de proveedores, programación y enrutamiento para la cadena de suministro de productos perecederos: un enfoque robusto en la distribución. *Informática e Ingeniería Industrial*. 2023; 175: 108845.

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108845>

39. Sun H, Sun S, Zhou Y, Xue Y. Compensaciones entre objetivos económicos y medioambientales del problema de producción-inventario-enrutamiento para múltiples productos perecederos. *Informática e Ingeniería Industrial*. 2023; 178(3663): 109133.

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109133>

40. Li N. Un algoritmo de dos etapas para la optimización de la distribución de la producción de productos frescos. *International Journal of Industrial Engineering: Teoría, Aplicaciones y Práctica*. 2025; 32(1).

<https://doi.org/10.23055/ijietap.2025.32.1.10119>

41. Eskandar H, Sadollah A, Bahreininejad A, Hamdi M. Algoritmo del ciclo del agua - Un método novedoso de optimización metaheurística para resolver problemas de optimización de ingeniería con restricciones. *Ordenadores y estructuras*. 2012; 110-111: 151-166.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.07.010>

42. Prins C. Un GRASP × híbrido evolutivo de búsqueda local para el problema de enrutamiento de vehículos. *Estudios en inteligencia computacional*. 2009; 161: 35-53.

[https://doi.org/10.1007/978-3-540-85152-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-85152-3_2)

43. Borodin V, Bourtembourg J, Hnaien F, Labadie N. Manejo de la incertidumbre en la gestión de la cadena de suministro agrícola: un estado del arte. *Revista Europea de Investigación Operativa*. 2016; 254(2): 348-359.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.057>

44. Schouten R, Van Kooten O, Van Der Vorst J, Marcelis W, Luning P. Logística controlada de calidad en las redes de cadena de suministro de verduras: ¿Cómo puede un lote individual llegar a un consumidor individual en el estado óptimo? *Acta Horticulturae*. 2012; 936: 45-52.

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.936.4>

45. Entrup ML, Günther HO, Van Beek P, Grunow M, Seiler, T. Enfoques de programación lineal de enteros mixtos para la planificación y planificación integrada en la vida útil en la producción de yogures. *International Journal of Production Research* 2005; 43(23): 5071-5100.

<https://doi.org/10.1080/00207540500161068>

46. Singh NK, Kuthambalayan TS. Integrar las operaciones y las decisiones de marketing para gestionar los riesgos de perecederidad con una vida útil mínima restante objetivo disponible para los consumidores. *Informática e Ingeniería Industrial*. 2022; 163: 107812.

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107812>

47. Steinbacher LM, Rippel D, Schulze P, Rohde AK, Freitag M. Programación basada en calidad para un taller de trabajo flexible. *Revista de Sistemas de Fabricación*. 2023; 70 (junio): 202-216.

<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.07.005>

48. Sel C, Bilgen B, Bloemhof-Ruwaard JM, van der Vorst JGAJ. Optimización multi-cubo para una planificación y programación integradas en la cadena de suministro de lácteos perecederos. *Informática e Ingeniería Química*. 2015; 77: 59-73.

<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.03.020>

49. Claassen GDH, Gerdessen JC, Hendrix EMT, van der Vorst JGAJ. Sobre planificación y programación de producción en la industria de procesamiento de alimentos: Modelado de montajes no triangulares y descomposición de productos. *Informática e Investigación Operativa*. 2016; 76: 147-154.

<https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.06.017>

50. Wei W, Amorim P, Guimarães L, Almada-Lobo B. Abordando la perecederidad en industrias de procesos multinivel. *Revista Internacional de Investigación en Producción*. 2018; 57(17): 5604-5623.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1554916>

51. Buisman ME, Haijema R, Akkerman R, Bloemhof JM. Gestión de donaciones para la planificación de menús en comedores sociales. *Revista Europea de Investigación Operativa*. 2018; 272(1): 324-338.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.06.005>

52. Cai XQ, Chen J, Xiao YB, Xu XL. Selección de productos, asignación de tiempo de máquina y decisiones de programación para la fabricación de productos perecederos sujetos a una fecha límite. *Informática e Investigación Operativa*. 2008; 35(5): 1671-1683.

<https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.09.027>