

Retos en el modelado de la trazabilidad en las cadenas de suministro de alimentos

Challenges in the modeling of traceability in food supply chains

Tatiana Maya Trujillo

Javier Arturo Orjuela Castro

Milton M. Herrera

Como citar este artículo: Maya-Trujillo, T., Orjuela-Castro, J. A., Herrera, M. M, “Challenges in the modeling of traceability in food supply chains”, INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, 2021. doi: <https://doi.org/10.14483/23448393.15975>

Fecha de envío: 24-02-2020

Modificado: 05-12-2020

Fecha de aceptación: 21-12-2020

Editor: Nelson L. Díaz Aldana.

Este documento es la versión final de autor del manuscrito aprobado para publicación, incorporando todas las revisiones surgidas durante el proceso de evaluación por pares. Puede haber diferencias entre esta versión y la versión final diagramada para publicación impresa. Se recomienda consultar la versión publicada si usted desea citar este artículo.

La publicación final está disponible en: <https://doi.org/10.14483/23448393.15975>

This document is the author's final manuscript version of the journal article, incorporating any revisions agreed during the peer review. There may be differences between this and the publisher's version. You are advised to consult the publisher's version if you wish to cite from this article.

The final publication is available at: <https://doi.org/10.14483/23448393.15975>

Review

Challenges in the modeling of traceability in food supply chains

Retos en el modelado de la trazabilidad en las cadenas de suministro de alimentos

Tatiana Maya Trujillo¹, Javier Arturo Orjuela Castro², Milton M. Herrera³

¹Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas (Bogotá), ²Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas (Bogotá), ³Universidad Militar Nueva Granada (Bogotá). tmt_maya@hotmail.com, jorjuela@udistrital.edu.co, milton.herrera@unimilitar.edu.co

Received: 24/02/2020 - Modified: 05/12/2020 - Accepted: 21/12/2020

Resumen

Contexto: Los intereses en los hábitos alimentarios de los consumidores ha vuelto relevante el acceso a la información relacionada con un producto, donde toma relevancia la trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos (TCSA).

Método: Para identificar los principales focos problemáticos y los retos a enfrentar en los sistemas de trazabilidad y el modelado de la TCSA, se realizó una revisión sistemática de la literatura en la que se analizaron 84 artículos y se presentaron diferentes taxonomías sobre modelos de gestión, modelos de optimización y modelos de simulación, luego se realizó una discusión de los retos y futuros focos en el modelado de trazabilidad en las cadenas de suministro de alimentos (CSA).

Resultados: Se identificaron limitaciones en el tipo de decisiones analizadas (tácticas y operativas), asimetrías en el flujo de información entre eslabones, falta de modelos robustos, relevancia de la gestión de la información como instrumento de integración, vacíos en la medición de políticas de gestión tecnológica en la trazabilidad, la necesidad de modelos holísticos y brechas en la relación entre trazabilidad y sostenibilidad.

Conclusiones: Hace falta el desarrollo de modelos basados en la gestión de tecnologías, sistemas de trazabilidad que faciliten las relaciones y los flujos entre los diferentes actores, el desarrollo de modelos de gestión logística sostenible que involucren la trazabilidad, la utilización de enfoques multi-criterio relacionado múltiples eslabones y cuantificar diferentes medidas de desempeño de la CSA para maximizar los beneficios de la trazabilidad mediante modelos multi-objetivo.

Palabras clave: Cadena de suministro de alimentos, sistemas de trazabilidad, modelado de la trazabilidad, gestión, optimización, simulación.

Abstract

Context: Due to changes in the interest of consumers where access to information has become increasingly relevant, food supply chain traceability (CSFT) has acquired a significant importance.

Method: Main issues and challenges in traceability conceptualization in the development of traceability systems and the traceability modelling of food supply chain such as management models, optimization models and simulation models have been identified in this paper, for this purpose it analyzed more than sixty (60) papers and it was shown different taxonomies about them, then it is conducted a discussion regarding to the challenges and future focuses in the modeling of traceability in food supply chain (FSC).

Results: The literature review identifies limitations in the type of decisions analyzed, asymmetries of the information flow between echelons; lack of robust model, relevance of data management as an instrument of integration among the actors; gaps in the measurement of technology management policies in traceability; the need of holistic models and gaps in the relationship between traceability and sustainability.

Conclusions: It is necessary technologies management which improve track and trace characteristics and contribute to the relations and flows between actors, the development of sustainable logistics management models that involve traceability, the use of multi-criteria approaches related to multiple levels and / or echelons to and finally quantify different measures of FSC performance to maximize benefits of traceability through multi-objective models.

Keywords: Food supply chain, traceability systems, traceability modelling, management, optimization models.

Open access



© The authors; licensee: Revista INGENIERÍA. ISSN 0121-750X, E-ISSN 2344-8393

Cite this paper as: Maya-Trujillo, T., Orjuela-Castro, J. A., Herrera, M. M.: *Challenges in the modeling of traceability in food supply chains*. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, 2021 pp:pp. doi: <https://doi.org/10.14483/23448393.15975>

1. Introducción

Los requisitos para documentar los productos alimenticios son cada vez mayores, se ha aprobado una amplia legislación nacional e internacional para garantizar la seguridad alimentaria, y tanto la industria como los consumidores también están cada vez más interesados en conocimientos adicionales sobre el origen, los procesos y otras propiedades del producto [1]. Lo anterior ha hecho que en los últimos años, los sistemas de trazabilidad, entendidos como la "*totalidad de datos y operaciones que es capaz de mantener la información deseada sobre un producto y sus componentes a través de toda o parte de su cadena de producción y utilización*" (ISO 22005: 2007) [2], hayan tomado relevancia por las implicaciones que tienen en el desempeño de las cadenas de suministro (CS), independientemente del sistema de producción y el tipo de alimento [3]. De esta forma, la trazabilidad es esencial para las compañías, por diferentes razones, entre las que se encuentran el cumplimiento de la normatividad vigente, los estándares internacionales, los requisitos de certificación, la implementación de estrategias y programas de marketing, la certificación de origen del producto, la identidad, la calidad y garantizar la seguridad alimentaria con métodos eficaces para responder a los problemas de identificación y seguridad sanitaria de los alimentos [4].

La trazabilidad no es la información del producto y el proceso en sí, sino una herramienta que permite encontrar esta información nuevamente en un momento posterior [1], por lo tanto el sistema de trazabilidad se convierte en un elemento fundamental que mejora el desempeño de la CSA, que contribuye en varios aspectos, tales como: i) la integridad de los alimentos, ii) mitigación de los problemas que conlleva la adulteración y iii) favorecimiento de la posición en el mercado con características distintivas de calidad e inocuidad [5]. La trazabilidad no es un término trivial, la revisión de la literatura muestra que incluso en las revistas científicas existe confusión e incoherencia [6]. Estudios previos han tratado de estructurar una definición unificada de trazabilidad; sin embargo, no se ha logrado llegar a una definición clara para la CSA tal como lo afirma Dabbene et al. [4]. De igual forma, la CSA es tratada por separado de los sistemas de trazabilidad, sin tener en cuenta que ambas coexisten, a pesar que en cada eslabón puede funcionar de forma independiente, el impacto final no es mutuamente excluyente [7]. Dicha falta de relación es evidente al observar la atención que ha recibido la trazabilidad en la última década en relación con su capacidad para impulsar la conectividad de la información en la CS y reforzar el proceso logístico, así como la gestión de CSA en su conjunto [8].

En los últimos años, los aspectos de la trazabilidad se han reconocido como una herramienta fundamental para garantizar la seguridad y la calidad de los alimentos; por lo que, el diseño e implementación de un sistema de trazabilidad requiere un replanteamiento y una reorganización exhaustiva de toda la CSA [4], esta necesidad resalta nuevamente la conexión entre la trazabilidad y la gestión de la CS la cual ha sido tratada desde hace algunos años. Por ejemplo, Wang et al. presenta un modelo integrado de planificación de operaciones y trazabilidad para la gestión de alimentos perecederos [9], Thakur y Hurburgh modelan el intercambio de información entre actores en la cadena de suministro de granos [3], Saltini y Akkerman simulan diferentes escenarios para evaluar el impacto de la profundidad y la estrategia de un sistema de trazabilidad en la eficiencia de la producción y el retiro del producto [10], Gautam et al. modela los efectos de implementar un sistema de trazabilidad basado en RFID [11] estos y trabajos resaltan la importancia de profundizar en la conexión existente entre la trazabilidad y la gestión de las CSA, conexión dada por las propiedades únicas que las CSA tienen, como son: la perecibilidad, las estrictas regulaciones, las limitaciones operativas. Preservar la frescura y la calidad del producto requieren plazos de entrega limitados, condiciones de almacenamiento controladas, lo que deriva en mejor calidad y minimiza las pérdidas debidas al deterioro [12]. Esta situación implica entender la dinámica de los flujos de información y material que ocurren en las CS. En este sentido, diferentes autores han desarrollado modelos que contribuyen a representar la relación dinámica de los flujos de información y material a lo largo de la cadena [3]. Si bien, existen diferentes estudios que emplean el modelamiento para el diseño e implementación de los sistemas de trazabilidad, aún no se han identificado las potencialidades del modelado de los sistemas de trazabilidad en la CSA, lo cual es indispensable si se tiene en cuenta que los sistemas de trazabilidad de alimentos impactan en la eficiencia y efectividad de la CS [2], así como la calidad y capacidad de respuesta [13].

En este contexto, se requiere una revisión sistemática de la literatura que permita identificar dichas potencialidades y contribuya a entender las implicaciones del modelamiento de los sistemas de trazabilidad en el desempeño de las CSA desde diferentes enfoques, logrando tener un acercamiento a la conexión entre trazabilidad y

A través de una revisión sistemática de la literatura, este artículo discute tres aspectos que inciden en el modelado de la trazabilidad en la CSA: i) conceptualización de la trazabilidad, ii) sistemas de trazabilidad y iii) diferentes enfoques de modelado de la trazabilidad en la CSA. Además, el artículo contribuye con identificar los focos problemáticos en los sistemas de trazabilidad de la CSA y los retos que enfrenta el modelado de la trazabilidad en la CSA. La metodología utilizada en la revisión de literatura se presenta en la Sección 2. Luego los resultados obtenidos de la revisión sistemática se presentan en la Sección 3. Esta sección se encuentra organizada en dos subsecciones: a) conceptualización de la trazabilidad y b) una taxonomía propuesta para identificar los enfoques con los cuales se han abordado los sistemas de trazabilidad en la CSA. Adicionalmente, la sección muestra diferentes enfoques de modelado de la trazabilidad en la CSA: modelos de gestión, enfoques en técnicas de optimización y de simulación, lo cual permite una taxonomía general sobre el modelado de la trazabilidad en las CSA. La Sección cuatro se presentan los trabajos futuros identificados a partir de la revisión de la literatura identificando vacíos del conocimiento (GAPs), focos problemáticos y retos a enfrentar en futuras investigaciones.

2. Metodología

La revisión sistemática de la literatura se apoya en las metodologías propuestas por Kitchenham [14] y Rincón et al. [15], para resolver las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuáles han sido los principales enfoques a través de los cuales se ha investigado la trazabilidad en las CSA? ¿Cuáles han sido las principales técnicas utilizadas para el modelado de la trazabilidad en las CSA? ¿Qué métodos de solución se han utilizado para optimizar la trazabilidad en las CSA? ¿Qué implicaciones y retos conlleva el modelado de los sistemas de trazabilidad en el CSA?. La Tabla I presenta la secuencia de pasos adoptados para la revisión sistemática de la literatura, la cual permite identificar, evaluar e interpretar la literatura relevante que contribuye a identificar los posibles impactos del modelado de los sistemas de trazabilidad de las CSA en la gestión y el desempeño de estas

Tabla I
Pasos secuenciales de la revisión de la literatura.

| Etapas | Actividades |
|------------------------------------|--|
| Protocolo y estrategia de búsqueda | Búsqueda en las bases de datos Scopus, Web of Science y IEEE Xplore. |
| | El algoritmo de búsqueda fue: "Traceability" limitada a título, palabras claves y resumen y se enlazo a la frase "Food supply chain" limitada de igual forma. Como algoritmos de búsqueda adicionales se utilizaron: "Modelling traceability - food supply chain", "Optimization traceability – food supply chain", "Simulation traceability – food supply chain". |
| | Para la búsqueda se limitó a los documentos categorizados como: Artículos, Conference papers o revisiones. |
| | De acuerdo a los criterios de búsqueda adicionales se establecieron como temas de interés: Definición de la trazabilidad y los enfoques utilizados para el modelado de la trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos (TCSA), enfatizando en los modelos de gestión, optimización y simulación. |
| | Tabulación en hoja de cálculo, empleada para la categorización de los artículos y el análisis de información |
| Revisión, criterios de selección | Criterios de selección: Artículos multidisciplinarios ordenados por relevancia, que se refieran a alimentos y productos alimenticios; de acuerdo a la primera búsqueda se evidencio un crecimiento en el número de publicaciones sobre la TCSA desde el año 2009, razón por la cual se excluyen los publicados antes del 2009, a excepción de los seminales. |
| | Selección de cada uno de los artículos para verificar su calidad, su procedencia y su disponibilidad. |
| Extracción de datos | Diligenciamiento de la lista de referencia para los artículos seleccionados bajo los criterios de búsqueda adicionales, con datos generales como: objetivo, campo de aplicación, temática principal, resultados, metodología utilizada y trabajos futuros. |
| | Revisión de los artículos relacionados con el modelado de la TCSA, posteriormente se analizaron aquellos con enfoque de optimización, de simulación y otros enfoques. |
| Síntesis de datos e informe | Se analizó cada uno de los aportes de los autores en las técnicas de modelado de la TCSA. |
| | Se realizó un resumen general de los principales enfoques utilizados en el modelado de la TCSA |
| | Se elaboraron cuadros comparativos y de análisis de las variables y métodos de solución utilizados |

3. Resultados

Es esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la revisión de la literatura que comprende las principales definiciones de trazabilidad y se establece una posición teórica, luego se presentan los enfoques que han sido abordados para los sistemas de trazabilidad. Posteriormente, se propone una breve taxonomía de los enfoques de modelado en la TCSA, esta parte se divide en: modelos de gestión de la CSA relacionados con trazabilidad, modelos con técnicas de optimización y modelos de simulación.

A partir del año 2009 se evidencia un crecimiento en el número de publicaciones en el modelado de la trazabilidad en la CSA, destacándose un incremento para los años 2011 y 2015, como se ilustra en la Figura 1. Gracias a esto la literatura ha desarrollado diferentes corrientes de investigación en trazabilidad de alimentos entre las que se destaca: El desarrollo de sistemas de trazabilidad eficaces respaldados por diversas tecnologías de identifica-

ción de productos, el uso de información de trazabilidad para mejorar la gestión de la CS y el uso de enfoques de gestión de operaciones para mejorar la gestión de la trazabilidad[16]. En esta última corriente de investigación autores como Dupuy et al. (2005) , Bertolini et al. (2006)), Thakur et al. (2010), Wang, X. et.al. (2012), Dai, H. et al. (2015), Li & Wang (2017), Gautam, R. et al. (2017), Yu, et al. (2018) y B. Dai et al. (2020) entre otros, buscan mejorar la gestión de la trazabilidad mediante el enfoque de gestión de operaciones y reafirman la necesidad de desarrollar nuevos enfoques metodológicos que permitan realizar análisis estructurados de trazabilidad [16]. Esto demuestra la importancia del modelamiento en los sistemas de trazabilidad y denota la necesidad de diseñar modelos que permitan abordar los problemas y retos que implica la adopción de tecnologías de trazabilidad en la última década.



Figura 1. Tendencia historia de las publicaciones en la temática

El mayor número de publicaciones de trazabilidad en la CSA, en las bases de datos consultadas, se presenta entre el 2015 y 2019, como se ilustra en la Figura 2. El número de publicaciones muestra la relevancia en términos de contribuciones a la investigación alcanzado en la última década. Esto implica un interés creciente en el modelado para el desarrollo y adopción de sistemas de trazabilidad en la CSA.

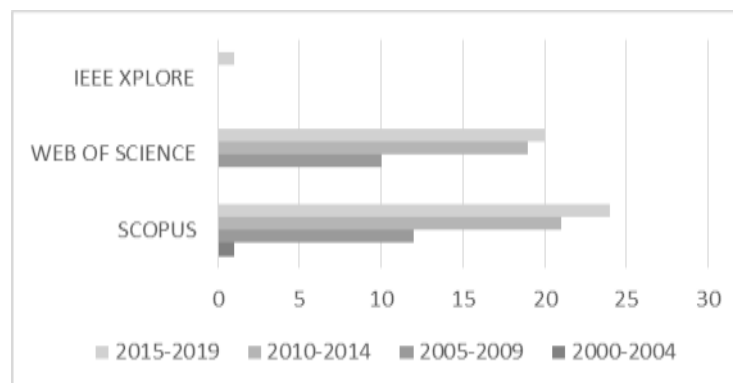


Figura 2. Publicaciones por bases de datos consultadas

De los documentos seleccionados a partir de la revisión sistemática, el 63% son artículos de investigación, el 8% son revisiones de la literatura y el restante son artículos de conferencias. Los autores identificados en la ventana de observación (2009-2019) más relevantes de acuerdo con el número de publicaciones sobre TCSA son: Xiaoshuan Zhang, y Zetian Fu, Linhai Wu, Jianping Quian y Lingling Xu de China, Petter Olsen, Kine Karlsen y Kathryn Donnelly de Noruega, Wim Verbeke de Bélgica, Giovanni Mirabelli, Teresa Pizzuti y Luigi Patrono de Italia, Liliana Moga de Polonia, Jack Van Der Vorst de Países Bajos y Maitri Thakur y Tejas Bhatt de Estados Unidos. En este contexto, el mayor número de publicaciones identificadas han sido elaboradas para países desarrollados, lo cual muestra la necesidad de investigación en particular para los países de Latinoamérica.

3.1. Conceptualización de la Trazabilidad

El primer artículo de TCSA fue publicado en 1996 por Hobbs [17], donde se resalta la importancia de la trazabilidad para la seguridad alimentaria y enfatiza en los costos derivados del monitoreo de la trazabilidad. A partir de 2002, se presentó un aumento considerable en el número de publicaciones con respecto a los alimentos, en particular después de una serie de incidentes relacionados con la inocuidad de los alimentos durante los cuales se demostró que los sistemas de trazabilidad eran débiles o estaban ausentes [18]. El desarrollo de estos incidentes y principalmente la aparición de brotes sanitarios produjo que diferentes países desarrollaran e implementaran requisitos legales sobre trazabilidad, definiendo métodos y autoridades de control para monitorear productos alimenticios no seguros [4]. Esta nueva legislación llevo a que las empresas se interesaran en el tema y desarrollaran sistemas de trazabilidad eficientes. Sin embargo, es importante resaltar que existen casos donde se implementó la trazabilidad en forma temprana, antes de ser un requisito legal, motivada por el aumento de los ingresos generados por sistemas de distribución de menor costo, reducción de gastos de retiro de productos y ventas ampliadas de productos con alta seguridad y calidad [19].

La trazabilidad ha tomado relevancia en diferentes campos, tales como: tecnológico, social y administrativo [15], [8]. Diferentes autores han definido la trazabilidad, sin embargo, no hay una definición clara para la CSA, impidiendo un marco conceptual común de trazabilidad [15], [20].

La ISO 8402-1994 define la trazabilidad como: “La capacidad de rastrear el historial, la aplicación o la ubicación de una entidad mediante identificaciones registradas” [21], esta misma definición fue adoptada por [22], [23], [20] y [24] en esta definición se resalta la importancia de disponer de la información histórica del producto. En este mismo enfoque, Tamayo [25] define la trazabilidad como la capacidad para rastrear bienes a lo largo de la cadena de distribución con base a un número de lote o número de serie [25], adicionalmente, Regattieri [26] afirma que la trazabilidad permite el rastreo de los productos convirtiéndose en el registro de la historia de un producto. Manos y Manikas [27] entienden la trazabilidad como la capacidad de rastrear el historial del producto a través de la CS hacia o desde el lugar y el momento de la producción, incluida la identificación de los insumos utilizados y las operaciones realizadas. Mientras, Olsen y Borit [6] plantean una definición más general, definiéndola como la capacidad de acceder a cualquiera o toda la información relacionada con el producto que se está controlando, a lo largo de todo su ciclo de vida, por medio de la identificación y el registro. La definición con mayor difusión es: La trazabilidad es la capacidad para seguir históricamente una aplicación o localización de algo que este bajo consideración u observación [21], concepto general y ambiguo del término de trazabilidad.

La Tabla II presenta un resumen de las principales definiciones de trazabilidad identificadas a partir de la revisión de literatura. Estas definiciones evidencian la existencia de tres conceptos claves: rastreo, seguimiento e información. El seguimiento es la capacidad de seguir el camino de un producto a lo largo de la CS, mientras que el rastreo se refiere a la capacidad de determinar el origen y las características de un producto en particular, obtenido al referirse a los registros mantenidos en la CS [28]. Para este artículo se adopta la siguiente definición: “La trazabilidad es la capacidad de rastrear y seguir un alimento y su unidad trazable previamente identificada, por medio de registros físicos o digitales a lo largo de toda la CS para el control y localización en cualquier momento a lo largo del ciclo de vida de dicha unidad, que permita la toma de decisiones” [15], ya que contempla de forma explícita la capacidad de rastrear y seguir un alimento y mantener los registros físicos o digitales de estos, información que estará disponible a lo largo de toda la CSA.

Tabla II
Definiciones de trazabilidad

| Autores | Definición de trazabilidad |
|---|---|
| Ley General de Alimentos de la CE (Comisión Europea, 2004c) | La capacidad de rastrear y seguir un alimento, un pienso, un animal o una sustancia productora de alimentos que se pretende, o que se espera que se incorpore a un alimento o un pienso, en todas las etapas de producción, procesamiento y distribución [29]. |
| (Van der Vorst, J. et al., 2005) | Información que puede ser utilizada para informar a las partes interesadas sobre el paradero de elementos o productos particulares (físicos), su historial, propiedades dinámicas, contenido y relaciones con otros productos [30] |
| (Rábade, L. & Alfaro, J. 2006) | El registro y seguimiento de piezas, procesos y materiales utilizados en la producción [31]. |
| (Folinas, D. et al., 2006), (Canavari, M. et al. 2010) | La capacidad de rastrear y seguir un alimento, animal o sustancia productora de alimentos en todas las etapas de producción y distribución [32] [33] |
| (Regattieri, A. et al., 2007) | El método para proporcionar suministros de alimentos más seguros y para conectar a productores y consumidores. Es aplicable a todos los productos y todos los tipos de CS [26]. La historia de un producto en términos de las propiedades directas de ese producto y / o propiedades que están asociadas con ese producto, una vez que estos productos han sido sujetos a procesos particulares de valor agregado utilizando medios de producción asociados y en condiciones ambientales asociadas [26]. |
| (Van Rijswijk, W. et al., 2008) | La capacidad de rastrear y seguir los alimentos y los ingredientes de los alimentos a través de la CS; por lo tanto, la trazabilidad se puede aplicar en todas las etapas de producción, procesamiento y distribución [34]. |

| | |
|-----------------------------|--|
| ISO 22005-2009 | La capacidad de seguir un alimento para consumo humano o un alimento para animales, en las etapa(s) especificada(s) de producción, procesamiento y distribución [21]. |
| (Bosona, T. et al., 2013) | La habilidad para rastrear y ubicar un producto en la CS [8]. |
| (Dabbene, F. et al., 2014) | La capacidad de garantizar que a los productos que se “mueven” a lo largo de la CSA se les realiza seguimiento y rastreo [4] |
| (Rincón D.L, et al., 2017), | Capacidad de rastrear y seguir un alimento y su unidad trazable previamente identificada, por medio de registros físicos o digitales a lo largo de toda la CS para el control y localización en cualquier momento a lo largo del ciclo de vida de dicha unidad, para la toma de decisiones [15]. |

3.2. Sistemas de trazabilidad

La naturaleza compleja del procesamiento de alimentos y la captura del volumen masivo de información ha dificultado la implementación de la trazabilidad [35]. Estas complejidades requerían tecnologías y métodos avanzados para capturar de datos de alta calidad sobre el producto y el proceso de producción. Si bien el registro de la información en sí no es difícil, en la práctica, obtener acceso a la información más adelante puede ser un desafío [6]. Por ejemplo, rastrear un producto terminado desde todos sus ingredientes y materias primas junto con todos los registros asociados resultará en una cantidad abrumadora de información difícil de comunicar o analizar [23]. Como los sistemas de trazabilidad pueden archivar y comunicar información sobre la calidad del producto, el origen y la seguridad del consumidor, se convierten en herramienta indispensable de trazabilidad ya que almacenan y proporcionan información en tiempo real sobre la ubicación y la historia en la CSA [32], [36] y [37].

La Tabla III presenta los artículos más destacados que abordan y discuten temas relacionados con los sistemas de trazabilidad (ST), se presenta una clasificación basada en el diseño e implementación de sistemas de trazabilidad, es decir los modelos, arquitecturas, metodologías o enfoques implementados. También, se consideraron trabajos enfocados en la validación o mejora de ST ya existentes. La mayor cantidad de documentos se concentran en el diseño e implementación de los ST. En este sentido, implica la necesidad de modelar la integración de las tecnologías de trazabilidad a lo largo de la CSA y evidenciar los efectos en su desempeño.

Tabla III
Los sistemas de trazabilidad en la literatura

| Autores | Síntesis | Tecnología de soporte empleada | Tipo |
|--|--|--|------|
| (Salampasis, M. et al., 2012) | Desarrollaron la herramienta TraceALL, como un marco orientado a servicios, para proporcionar una metodología formal, cuyo propósito general es apoyar la representación del conocimiento y el modelado de la información en los ST e implementar aplicaciones de rastreabilidad [38]. | Ontologías y Web semántica (SW) | VM |
| (Hu, J. et al., 2013) | Modelo basado en un enfoque de sistemas para el diseño e implementación de un sistema de trazabilidad (ST). Se resalta la importancia de estándares tecnológicos para establecer, registrar y permitir colaboraciones empresariales [39] | Unified Modeling Language | DI |
| (Mgonja et al., 2013) | Determinaron una herramienta de diagnóstico para validar el rendimiento del ST, se identifican los indicadores más relevantes de trazabilidad [40] | Diagramas de flujo de procesos conceptuales. | VM |
| (Pizzuti, T. & Mirabelli, G. 2015) | Diseño de un ST cuyo principal objetivo es facilitar la integración de la información en toda la CS y garantizar la confianza del consumidor y el cumplimiento de las normas legales y de calidad. Crean el Global Track (sistema informativo para almacenar, gestionar y transmitir datos) [41] | Modelado por BPMN, Diagramas de Procesos de Negocios (BPD) | DI |
| (Liang, W. et al., 2015) | Crearon un modelo de trazabilidad de la CS de ganado y un ST basado en la tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) y la red EPCglobal [42] | EPCIS, Paquetes de software Fosstrak y FreePastry y AggregationEvent | DI |
| (Chen, R.Y. 2015) | Modelo para el desarrollo de un ST basado en Algoritmo de rastreo autónomo [43]. | IoT, mapas cognitivos difusos y método de reglas difusas. | VM |
| (Verdouw, C.N. et al, 2016) | Se analiza el concepto de las CSA virtuales desde una perspectiva de Internet de las cosas (IoT) y propone una arquitectura para implementar sistemas de información habilitadores [44]. | IoT | DI |
| (Kim, H.M. & Laskowski, M. 2018) | Desarrollaron de una metodología para el diseño de un ST basada en contratos inteligentes a través de Blockchain (Se ejecuta un rastreo de procedencia y se hacen cumplir las restricciones de trazabilidad) [45] | Blockchain | DI |
| (Fernández-Caramés, T.M. et al., 2018) | Presentan un ST para rastrear los suministros agroalimentarios chinos, cuyo objetivo es mejorar la seguridad y la calidad de los alimentos y reducir las pérdidas en la logística [46] | RFID y Blockchain | DI |

(DI: Diseño y la implementación de un ST, VM: Validación o mejora de un ST)

3.3. Modelado de la trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos

La literatura con enfoques o técnicas de modelado y optimización de la trazabilidad ha sido ampliamente estudiada [4]. El objetivo del proceso de modelado del ST es describir el comportamiento del producto como una colección de procesos interactivos, de manera que su acción combinada pueda describir el fenómeno observado y que cada subproceso pueda entenderse completamente para su descripción [47]. Por medio de la revisión de literatura se ha identificado que la TCSA se ha modelado a partir de diferentes enfoques.

3.3.1. Modelos para la gestión de la cadena de suministro con trazabilidad

La trazabilidad aumenta la eficiencia de la CSA al reducir los costos de las actividades relacionadas con la distribución de productos alimenticios [19]. Un ST adecuado puede contribuir a la competitividad de los eslabones de la CSA [5], [48]. Varios autores han planteado metodologías que facilitan la gestión de la cadena de suministro (GCS), identifican factores que influyen en la gestión de la trazabilidad en la CS. Por ejemplo, Karlsen et al. [1] discute el efecto de diferentes niveles de granularidad en los desempeños del ST a través de la identificación de puntos críticos de trazabilidad en la CSA. Estudios posteriores de Karlsen y Olsen [20] analizan la validez de los métodos cualitativos en ST. En esta vía, Faisal y Talib [2] proponen una metodología basada en un enfoque de modelado estructural interpretativo (ISM, por sus siglas en inglés) para determinar y comprender las interacciones entre las diversas variables de la TCSA y el orden de prioridad. Paralelamente, Chaudhuri et al. [49] desarrollan una metodología de ISM difuso (Fuzzy ISM) y la multiplicación de referencia cruzada en una matriz de impacto aplicada en una clasificación (MICMAC) para identificar riesgos que afectan la CS. Este trabajo propone un mapa de propagación del riesgo en la CS respecto a la trazabilidad.

Balaji y Arshinder [50] identifican las causas del desperdicio de alimentos, así como el poder impulsor y la dependencia de las causas en el analizar de las interacciones entre ellas con un enfoque basado en MICMAC difuso y modelado estructural interpretativo total (TISM). Identifican 16 variables causales del desperdicio de alimentos. En esta vía, Khan et al. [35] desarrollaron un modelo basado en la relación contextual entre los factores críticos de éxito (CSF) a través del enfoque del TISM. Identifican 12 CSF con base en una revisión de la literatura y la opinión de los expertos, el modelo estructural se analizó mediante el método Fuzzy MICMAC. Shakar et al. [51] desarrollaron un marco integral para la implementación de un sistema logístico de alimentos basado en la trazabilidad, sobre la base de la teoría del CSF y el enfoque de múltiples partes interesadas en la garantía de calidad, postularon un modelo jerárquico para representar la interrelación entre los CSF estadísticamente significativos.

3.3.2. Modelado de trazabilidad con técnicas de optimización

La planificación de operaciones y los problemas de diseño en la industria alimentaria a menudo están relacionados con la elección de materias primas, la cantidad y el tamaño de los lotes, entre otros. Los modelos de programación lineal entera mixta (MILP) o de programación no lineal (MINLP) se utilizan con frecuencia para tales problemas con una clara función objetivo cuantitativa u objetivos cuantitativos multicriterio [9], en los últimos años en dichos problemas de diseño se ha empezado a considerar los sistemas de trazabilidad, ya que en CSA las características son diferentes a las demás, garantizar el seguimiento, control y localización del alimento a lo largo de la cadena y la disponibilidad de toda la información relacionada en cualquier momento permite mejorar el desempeño de la cadena y la satisfacción del cliente. En este contexto, se evidencia que en los modelos de optimización, la inclusión de características específicas de los alimentos no es suficientemente abordada [52], lo limita la gestión de ST, la adopción de tecnologías y el uso de información proporcionada para la toma de decisiones.

En técnicas de optimización en la CS orientadas a mejorar la trazabilidad y minimizar los costos, la teoría está bastante desarrollada [4]. Sin embargo, se requieren modelos que aborden los problemas de seguridad y calidad de alimentos con sistemas de trazabilidad y los relacione con los factores de operación en la cadena, para la mejora de las operaciones y el desempeño de la trazabilidad de forma conjunta [16]. Se evidencia la necesidad de que la gestión de la trazabilidad en los alimentos permita comunicar la información a los consumidores y otras partes interesadas [8], aspectos a considerar a la hora de modelar. Por otro lado, si se considera el grado de incertidumbre, al número de enlaces intermedios y eslabones en la CS, la demanda y los costos logísticos difusos, el modelo debe contemplar la imprecisión y retardos en la información a lo largo de la CS [53]. En este contexto, se han utilizado técnicas que abordan las relaciones complejas generadas a lo largo de la CS y se ha enfatizado en la importancia del uso de sistemas de trazabilidad que garanticen la disponibilidad y calidad de la información. La Tabla IV presenta los principales modelos de optimización aplicados para el análisis de trazabilidad. Se muestran

las técnicas de optimización de mayor uso en la literatura, tales como MILP, MINLP, programación dinámica (DP) o programación estocástica (SP), se evidencia la necesidad de contemplar la incertidumbre y complejidad, en términos de modelado del ST.

Tabla IV
Principales modelos de optimización, que involucran trazabilidad.

| MILP: Programación lineal entera mixta, MINLP: Programación no lineal entera mixta, MP: Programación multiobjetivo, MOINLP: programación no lineal con varios objetivos, PNL: Programación no lineal, DP: Programación dinámica, SP: Programación estocástica | | |
|--|---|---------------------------|
| Autores | Artículo | Técnica |
| (Dupuy, C. et al., 2005) | Propone por primera vez el problema de la evaluación del rendimiento y la optimización de los ST [54] | MILP |
| (Li, D., Kehoe, D. & Drake, P. 2006) | Modelo de planificación innovador para la planificación de la cadena de suministro de alimentos perecederos [55]. | DP |
| (Dabbene, F. et al., 2008). | Modelo híbrido para la optimización del rendimiento de la CSA frescos, gestiona una compensación entre los costos logísticos y algunos índices que miden la calidad del alimento, se considera un comportamiento dinámico [47]. | DP |
| (Wang, X. et al., 2009) | Modelo de optimización que integra iniciativas de trazabilidad con factores de operación para alcanzar la calidad deseada y lograr el impacto mínimo en la recuperación del producto de una manera económica [9] | MINLP |
| (Wang, X. et al., 2010) | Modelo de optimización conjunta de la trazabilidad y los rendimientos de fabricación, actuando tanto en el tamaño de los lotes como en la dispersión de los lotes, mediante la introducción de funciones de riesgo relacionadas con la seguridad alimentaria [16] | MINLP |
| (Thakur et al., 2010) | Modelo de optimización de objetivos múltiples que proporciona un método eficaz para minimizar el esfuerzo de trazabilidad al minimizar la seguridad alimentaria y el riesgo causado por la agregación de lotes en un elevador de granos [56] | MP enteros mixtos |
| (Rong, A. et al., 2011). | Metodología para modelar la degradación de la calidad de los alimentos, para integrarla en un modelo de programación para la planificación de la producción y distribución [52] | MILP |
| (Ahumada, O. & Villalobos, J.R. 2011). | Modelo operativo para ayudar a tomar decisiones de producción y distribución durante la cosecha [57] | MILP |
| (Wang, X. et al., 2012) | Modelo de precios basado en la evaluación dinámica de la calidad. Se evalúan los beneficios de la utilización de trazabilidad a través de diferentes políticas de precios, incluyen la variación de la calidad derivada de los 175 cambios de temperatura a través del tiempo [58] | DP |
| (Piramuthu et al., 2013) | Modelo para minimizar el costo de responsabilidad conjunta, introduciendo una función de degradación de la calidad exponencial en el tiempo [59] | MILP |
| (Yu, M. & Nagurney, A. 2013) | Modelo de CSA basado en redes bajo competencia oligopolística y perecedera. Incorporan el deterioro a través de la introducción de multiplicadores de arco, con la inclusión de los costos de desecho asociados a la eliminación de alimentos en mal estado [60] | Modelado de redes |
| (Hertog, et al., 2014) | Modelo de optimización de la cadena de frío basado en la vida útil del producto, buscan hacer seguimiento a las pérdidas e inocuidad de los alimentos en los almacenes para lo que plantean un algoritmo de seguimiento exhaustivo y determinan la vida útil faltante de los alimentos [61] | Optimización combinatoria |
| (Aiello, G. et al., 2015) | Modelo de optimización que busca aumentar la eficiencia de la CS y sus retornos, se centra en un análisis económico para determinar el valor de la información generada por el ST en comparación con el costo operacional [62] | SP |
| (Dai, H. et al., 2015) | Modelo de análisis matemático, muestran las asimetrías existentes en los incentivos para mejorar la trazabilidad del sistema a lo largo de la CS. Proponen un mecanismo de participación en los intereses en el diseño de los sistemas de rastreabilidad de la CS [63] | Análisis matemático |
| (Li & Wang, 2017). | Modelado de análisis matemático, representan la relación demanda precio en la cadena de alimentos refrigerados al implementar una herramienta de seguimiento basada en una red de sensores [64] | Análisis matemático |
| (Gautam, R. et al., 2017) | Modelo de programación no lineal con varios objetivos para una CS de kiwi, cuando se utiliza un ST basado en etiquetas RFID [11] | MOINLP |
| (Mohammed, A. 2017) | Modelo para evaluar la viabilidad económica del sistema de monitoreo habilitado con RFID para el diseño de la CS de carne Halal [65] | MP |
| (Dai, J.B., et al., 2017). | Modelo para optimizar conjuntamente la capacidad de seguimiento y el precio teniendo en cuenta el costo de seguimiento y recuperación en una CS [66] | PNL |
| (Soto-Silva, W.E. et al., 2017) | Modelo integrado para dar una solución conjunta a la compra, transporte y almacenamiento de los productos frescos [12] | MP |
| (Yu, et al., 2018) | Modelo difuso multi-objetivo para el diseño de una CS para productos agrícolas frescos, de dos canales con incertidumbre en información. Se considera el costo de producto desperdiciado, trazabilidad, transporte y localización de instalaciones [53] | MP difuso |

Mohammed [65] es el autor con mayor número de citas, mientras Dupuy [54] es el primero en abordar el problema del tamaño de lote apropiado y las reglas de mezcla para mejorar el desempeño del ST. En el 2009, Wang [9] propone un modelo de optimización integrado, se desarrolla en un contexto de producción por lotes, donde un lote de producto terminado podría producirse a partir de varios lotes de materia prima heterogéneos con diferentes características de precio o riesgo, se concluye que la clasificación del riesgo por cada lote de materia prima influye de manera considerable en el desempeño de la cadena. En el 2010, Wang [16] modifica el modelo introduciendo funciones de riesgo relacionadas con la seguridad alimentaria. Los dos trabajos publica-

dos por Wang, junto con el trabajo en 2008 de Dabbene [47] y el de Thakur [56] en 2010 se consideran las publicaciones seminales en el modelado de la trazabilidad desde un enfoque de optimización.

En el 2006, Van der Vorst [30] señaló la necesidad de enfocarse en la complejidad total de las CSA por lo que sugiere que deben ser analizadas como una estructura en red. Este concepto es argumentado por Nagurney en 1999, quien propone la teoría económica de redes, la cual proporcionó un marco matemático para la CS su representación y análisis gráfico [67]. En el mismo concepto, Dabbene [47] en el 2008 plantean que el proceso de trazabilidad en producción, puede modelarse como un gráfico interconectado, donde los lotes de materias primas se representan como nodos, y los arcos representan operaciones de mezcla que conducen a productos finales. Posteriormente en el 2018, Yu et al. [53] también plantean la CSA perecederos como una red, mediante un grafo que considera el grado de incertidumbre causado por el número de enlaces intermedios y eslabones que componen la CSA. Varios modelos aplican la optimización entera mixta, por la característica de las variables, tales como el seguimiento de los cambios, los orígenes de los alimentos y la vida útil [9]. Sin embargo, teniendo en cuenta que la demanda y los costos logísticos son imprecisos, es necesario formular el diseño de la CSA perecederos teniendo en cuenta la incertidumbre e información difusa [53]. En la Tabla V se muestra el método de solución y las consideraciones especiales de cada formulación.

Tabla V
Métodos de solución y consideraciones especiales.

| Autores | Método de solución | Considera |
|--|--|--|
| [9] (Wang, X. et al. 2009) | Optimización, Modelo EPQ | -Enfoque de evaluación de riesgos. -Ciclo de vida útil. |
| [56] (Thakur et al. 2010) | Frente óptimo de Pareto | El problema de mezcla de granos a granel y la agregación de lotes. |
| [16] (Wang, X. et al. 2010) | Simulación del número finito de valores binarios | Factores operacionales, de vida útil y de trazabilidad. |
| [52] (Rong, A. et al., 2011). | -Modelado de múltiples periodos. | -Combinan modelos de deterioro de la calidad de los alimentos con modelos de logística. |
| | -Estructura de red de distribución genérica. | -Degradación de la calidad dinámica. -Almacenamiento y transporte entre eslabones. |
| [57] (Ahumada, O & Villalobos, J.R. 2011). | Branch and bound | Incluyen productos a cosechar, frecuencia (tiempo por semana) y días de cosecha |
| [58] (Wang, X. et al., 2012) | Simulaciones numéricas | El modelo se evalúa con diferentes políticas de precios para aprovechar la información capturada a través de un ST. Análisis dinámico de la calidad vs el precio |
| [59] (Pirramuthu et al. 2013) | Análisis numérico | -Importancia relativa de los niveles de granularidad. -Diferencia marginal en los costos de recuperación |
| [60] (Yu, M. & Nagurney, A. 2013) | Método de EULER | -Equilibrio en los flujos de la red (Cournot-Nash). -Formulaciones con desigualdad variacional. |
| [61] (Hertog, et al., 2014) | Algoritmo de búsqueda exhaustiva combinatoria | Perspectiva desde la gestión de almacenes. Inventario finito Lista de indicadores clave de rendimiento (KPI) para medir la calidad. |
| [62] (Aiello, G. et al., 2015) | Análisis numérico | Nivel de granularidad óptimo (Lote de Trazabilidad Económica). |
| [63] (Dai, H. et al., 2015) | Análisis numérico | -Dinámica de recuperación en una CS. -Mecanismo de intercambio de interés |
| [64] (Li & Wang, 2017) | Análisis numérico | Utilización de datos de una red de sensores para la toma de decisiones del precio |
| | | Vida útil del producto |
| | | Búsqueda del precio optimo |
| [11] (Gautam, R. et al., 2017) | Modelo analógico entre el sistema de polinización de plantas y un algoritmo de optimización evolutivo. | -Incertidumbre de la información al utilizar un sistema de RFID. -Capacidad de transporte. -Capacidad de almacenamiento. |
| [65] (Mohammed, A. 2017) | -Solución óptima de Pareto | -Utiliza tres objetivos en conflicto. |
| | -Algoritmo de toma de decisiones | -El sistema de trazabilidad utiliza RFID. |
| [66] (Dai, J.B., et al., 2017) | Análisis numérico | -Capacidad de seguimiento. -Busca el equilibrio entre el costo de seguimiento y el de recuperación. |
| [12] (Soto-Silva, W.E. et al., 2017) | Método de restricción (convertir un modelo multi-objetivo en uno mono-objetivo). | La planificación de la compra, el transporte y el almacenamiento de productos frescos. |
| [53] (Yu, J. et al., 2018) | Método de dos fases : 1 fase, Método min-max y 2 fase enfoque de compromiso difuso | Umbral de incertidumbre en la toma de decisiones |

En la Tabla VI se presenta la clasificación de las funciones objetivo. En la mayoría maximizan la ganancia, el ingreso neto o el valor presente neto [12], algunos autores plantean maximizar la rentabilidad de cada empresa participante en la CSA [60]. Dai et al. [63] en 2015, es el primero en incluir las asimetrías en los incentivos recibidos por los diferentes eslabones de la CS al integrar la trazabilidad, aspecto de relevancia al mejorar la trazabilidad en toda la CS e incluir a todas las partes interesadas lo que permitiría obtener el mayor beneficio para la cadena en general [4]. Sin embargo, desarrollar sistemas de trazabilidad detallados, no es fácil para los eslabones más pequeños, ya que carecen de capacidad financiera, información de trazabilidad adecuada y conocimientos suficientes para implementarla [8], por lo que los beneficios netos recibidos de manera específica por cada eslabón suele ser bastante desequilibrado en comparación a otros.

Tabla VI

Funciones objetivo planteadas en los modelos de optimización.

| Autores | | Minimizar | Maximizar | Costo total | Contenedores de almacenamiento | Prob. Retiro del producto | Ingresos | Costos de responsabilidad | Beneficio esperado | Valor de la información | Costo de transporte | Integridad del producto | Retorno de la inversión | Satisfacción de la demanda logística |
|---------|---------------------------------------|-----------|-----------|-------------|--------------------------------|---------------------------|-----------|---------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| [9] | (Wang, X. et al., 2009) | x | | x | | | | | | | | | | |
| [56] | (Thakur et al., 2010) | x | | | x | | | | | | | | | |
| | | x | | x | | | | | | | | | | |
| [16] | (Wang, X. et al., 2010) | x | | x | | x | | | | | | | | |
| [52] | (Rong, A. et al., 2011). | x | | x | | | | | | | | | | |
| [57] | (Ahumada, O & Villalobos, J.R. 2011). | | x | | | | Productor | | | | | | | |
| [58] | (Wang and Dong 2012) | x | | | | x | | | | | | | | |
| | | | x | | | | Minorista | | | | | | | |
| [59] | (Piramuthu et al., 2013) | x | | | | | | x | | | | | | |
| [60] | (Yu, M. & Nagurney, A. 2013) | | x | | | | | | x | | | | | |
| [61] | (Hertog, et al., 2014) | | x | | | | | | | | | Calidad | | |
| | | x | | | | x | | | | | | | | |
| [62] | (Aiello, G. et al., 2015) | | x | | | | | | | RFID | | | | |
| [63] | (Dai, H. et al., 2015) | x | | | | | | | | | Inventarios | | | |
| [64] | (Li & Wang, . 2015) | | x | | | | | | Minorista | | | | | |
| [11] | (Gautam, R. et al., 2017) | x | | | | | | x | | | x | | | |
| [65] | (Mohammed, A. 2017) | x | | x | | | | | | | | | | |
| | | | x | | | | | | | | | x | x | |
| [66] | (Dai, J.B., et al., 2017). | | x | | | | x | | | | | | | |
| [12] | (Soto-Silva, W.E. et al., 2017) | x | | x | | | | | | | | | | |
| [53] | (Yu, J. et al., 2018) | x | x | x | | | | | | | | | | x |
| TOTAL | | 13 | 9 | 7 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |

Se observa que la mayoría de las publicaciones consideran factores de degradación o deterioro, se tiene tradición en la integración de los efectos de pérdida de valor en los modelos matemáticos desarrollados [49], [58], [61], [62], [65], [69]. Otros tienen en cuenta el retiro o recuperación de productos deteriorados o contaminados, en este enfoque lo esencial es identificar el origen de riesgo y retirar todos los productos que no

puedan identificarse claramente como seguros [67]. En 2017, Dai et al. [67] identifica el origen de riesgo, involucran la mayor cantidad de eslabones de la CS, la integración de todos los actores permitirá la identificación y rastreo efectivo de productos. El 35% de los trabajos estudian 2 eslabones, otro 35% 3 y cerca de un 30% 4. La Tabla VII muestra los eslabones tenidos en cuenta en los modelos. La mayoría de los estudios la cadena no es estudiada en su totalidad, lo que puede llevar a soluciones lejanas a la realidad.

Tabla VII
Eslabones de la cadena de suministro de alimentos considerados en cada modelo

| Autores | | Productor | Fabricante | Distribuidor | Minorista o cliente final | Centros logísticos |
|---------|---------------------------------------|-----------|--------------------|--------------|---------------------------|--------------------|
| [56] | (Thakur et al. 2010) | | X | | X | |
| [16] | (Wang, X. et al., 2010) | | X | | X | |
| [52] | (Rong, A. et al., 2011). | X | X | X | X | |
| [57] | (Ahumada, O & Villalobos, J.R. 2011). | X | Centro de envasado | X | X | |
| [58] | (Wang and Dong 2012) | | | X | X | |
| [59] | (Piramuthu et al., 2013) | Múltiples | Múltiples | | Múltiples | |
| [60] | (Yu, M. & Nagurney, A. 2013) | X | X | X | X | |
| [61] | (Hertog, et al., 2014) | X | | X | X | |
| [62] | (Aiello, G. et al., 2015) | Dos | | | X | |
| [63] | (Dai, H. et al., 2015) | Dos | X | | | |
| [42] | (Li & Wang, 2015) | | Múltiples | X | Múltiples | |
| [11] | (Gautam, R. et al., 2017) | X | | X | X | |
| [65] | (Mohammed, A. 2017) | X | Matadero | X | X | |
| [66] | (Dai, J.B., et al., 2017). | X | X | | X | |
| [12] | (Soto-Silva, W.E. et al., 2017) | X | X | | | |
| [53] | (Yu, J. et al., 2018) | X | | X | X | X |
| Total | | 12 | 9 | 9 | 13 | 1 |

3.3.3. Taxonomía modelos de optimización

De la revisión de literatura realizada, se propone una taxonomía para los modelos de optimización, dividiéndolos en los que utilizan programación lineal (PL), programación no lineal (PNL) y los que utilizan otras técnicas de optimización, así mismo se presentan variables y parámetros utilizados en los modelos.

3.3.3.1. Modelos con programación lineal

Las variables y parámetros de los modelos de PL se presentan en la Tabla VIII y IX, respectivamente. En los modelos de PN la variable de decisión, unidades enviadas a otro eslabón se presenta con mayor frecuencia, siete (7) de los ocho (8) artículos la consideran. En cuatro (4) se utiliza el tamaño de lote como variable, mientras cinco (5) de los modelos usan variables binarias para la toma de decisiones.

Tabla VIII
Variables de los modelos de programación lineal aplicados a CSA

| Autores | | Inventario | Und. Enviadas a otro eslabón | No. Lotes a producir | Variable binaria | Cantidad de Residuos | Tamaño de lote | Und. Recuperadas | Und. a comprar | No. Contenedores enviados | Horas hombre contrata- | No, etiquetas | No. Elementos no conformes |
|---------|---------------------------------------|------------|------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|-------------------|------------------|----------------|---------------------------|------------------------|---------------|----------------------------|
| [56] | (Thakur et al., 2010) | | | | X | | | | | | | | |
| [52] | (Rong, A. et al., 2011). | X | X | X | X | X | X | | | | | | |
| [57] | (Ahumada, O & Villalobos, J.R. 2011). | X | Con calidad específica | Hectárea | | | Caja por hectárea | X | X | X | X | | |
| [59] | (Piramuthu et al., 2013) | | x | | | | x | | | | | | |
| [60] | (Yu, M. & Nagurney, A. | | Flujos óptimos | | Rutas | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------------------|---|---|---|---|---|--------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| | 2013) | | | | | | | | | | | | |
| [62] | (Aiello, G. et al., 2015) | | x | X | | | Lote de trazabilidad económica | | | | | x | x |
| [65] | (Mohammed, A. 2017) | | x | | X | | | | | | | | |
| [12] | (Soto-Silva, W.E. et al., 2017) | | x | | X | | | | x | | | | |
| Total | | 2 | 7 | 3 | 5 | 1 | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Respecto a los parámetros utilizados, los costos son tomados en cuenta en siete (7) modelos, entre los que se destacan los costos de producción, de transporte y de recuperación, solo dos modelos consideran de forma explícita los costos de implementar ST; finalmente se destaca el tiempo de transporte, la demanda y el porcentaje de degradación de la calidad como parámetros a considerar en los modelos analizados.

Tabla IX
Parámetros de los modelos de programación lineal aplicados a CSA

| Parámetros de los métodos de programación matemática aplicados a CVT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|---------|----------------------|------------------------|-----------------|--------------|---------------------|-----------------------|-----------------|----------------|-------------|--------------------|-------------------|--------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Autores | | % de gradación calidad | min y max de calidad | Tiempo. de transporte | Demanda | Capacidad de produc- | Costos | Cap. transporte | Cap. Almacén | Tiempo de Almacena- | Mano de obra disponi- | No. De periodos | Tamaño de lote | Temperatura | Distancia de viaje | Retorno inversión | % integridad | Factor de Vida útil | Multa por incumplimiento de calidad o | Parámetros de volumen, humedad y peso | Precio | Prob. contaminación o defecto | Disponibilidad informacional | Responsabilidad civil |
| [56] | (Thakur et al., 2010) | | | | | | | | | | | | | | | | | | x | x | | | | |
| [52] | (Rong, A. et al. 2011). | Tasa de riesgo | x | maximo | x | x | Cp, Ct, Ca, Cr, Cen f | | | | | x | x | x | | | | | | | | | | |
| [57] | (Ahumada,O & Villalobos, J.R. 2011). | % na | | x | x | x | Cp, Ct, Ca, Ce, Cr, Cm | | x | | x | | | | | | | X | x | | x | | | |
| [59] | (Piramuthu et al., 2013) | x | | x | | | Cr | | | | | | | | | | | | | | x | RF ID | x | |
| [60] | (Yu, M. & Nagurney, A. 2013) | x | | x | | | Totales, Cr | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| [62] | (Aiello, G. et al., 2015) | % na | | | | | Ct, Ca, Ctr a | | | | | | | | | | | | | | x | | | |
| [65] | (Mohammed, A. 2017) | | | | x | x | Ct, Ctr a | x | | | | | | | x | x | x | | | | | | | |
| [12] | (Soto-Silva, W.E. et al., 2017) | | | | x | | Admon, Ct | x | | x | | | | | | | | | | | | | | |
| Total | | 5 | 1 | 4 | 4 | 3 | 7 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |

Se resalta que en varios modelos una de las principales decisiones abordadas es el tamaño de lote que se va a manejar, esto permite establecer el nivel de granularidad óptimo cuando se adopta una sistema de trazabilidad [62], ayuda a limitar la retirada del producto y determina el costo específico de trazabilidad para una unidad trazable y por ende determinar los beneficios alcanzados por la implementación de sistemas de trazabilidad de forma más específica.

3.3.3.2. Modelos con programación no lineal

Las variables y parámetros utilizados en los modelos de programación no lineal (PNL) se presentan en la Tabla X y en la Tabla XI, respectivamente. En los modelos que utilizan PNL se destaca el uso de variables binarias y las variables de decisión: unidades enviadas y unidades producidas.

Tabla X
Variables de los modelos de programación no lineal aplicados a CSA

| Autores | | Und. Enviadas a otro eslabón | No. Lotes a producir | Variable binaria | Tamaño de lote | Und. producidas | Tamaño de la unidad ad trazable |
|--------------|----------------------------|------------------------------|----------------------|------------------|----------------|-----------------|---------------------------------|
| [16] | (Wang, X. et al., 2010) | x | X | x | x | | |
| [11] | (Gautam, R. et al., 2017) | | | x | | | |
| [66] | (Dai, J.B., et al., 2017). | | | | x | x | x |
| [53] | (Yu, J. et al., 2018) | x | | x | | x | |
| Total | | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 |

Respecto a los parámetros, el más utilizado son los costos, la demanda y el porcentaje de degradación de la calidad. Se evidencia que tanto las variables como los parámetros más utilizados en los modelos de programación lineal y no lineal son similares. Esto refleja el interés en los modelos de programación no lineal en el flujo de materiales y la necesidad de considerar la incertidumbre de las CS a la hora de modelar, con el ánimo de garantizar un mayor acercamiento a la realidad. Por otro lado, se evidencia una muy baja atención en los flujos de información.

Tabla XI
Parámetros de los modelos de programación no lineal aplicados a CSA

| Autores | | % de gradación calidad | No. De camiones | Tiem. de trans- | Demanda | Cap producción | Costos | Cap. transporte | Cap. Almacén | Tiem. Almacén | Tamaño de lote | Distancia de | Factor de Vida | Multa por incumplimiento de | Precio | Prob. contaminación o defecto | Disponibilidad información de | Responsabilidad | Prob. de recuperación | Cantidades producidas y | Promedio und. que deben ser |
|--------------|----------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|----------|----------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------------|----------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| [16] | (Wang, X. et al., 2010) | x | | | x | x | Ccl, Cr | | | x | | | x | x | | | | | | | |
| [11] | (Gautam, R. et al., 2017) | x | x | x | | | Ct | x | x | | | x | | | | x | x | x | | x | |
| [66] | (Dai, J.B., et al., 2017). | | | | x | | Cp, Cr, Cis | | | | x | | | | x | | | | x | | x |
| [53] | (Yu, J. et al., 2018) | x | | x | x | x | Cp, Ct, Cr, Ctr a | x | | | | | | | | | | | | | |
| Total | | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

3.3.3.3. Modelos con otra técnica de optimización

Las variables y parámetros utilizados en los modelos que manejan técnicas de optimización diferentes a las clásicas (programación lineal y no lineal) se presentan en la Tabla XII y en la Tabla XIII, respectivamente. En los modelos planteados con otras técnicas se destaca que, a diferencia de los analizados anteriormente, se tiene en consideración el ST a utilizar como variable de decisión.

Tabla XII
Variables de los modelos que utilizan otra técnica de optimización

| Autores | | Inventario | Und. Recuperadas | ST a utilizar | Precio de venta | Vida útil faltante | Descuento optimo |
|---------|----------------------|------------|------------------|---------------|-----------------|--------------------|------------------|
| [58] | (Wang and Dong 2012) | x | | X | X | x | x |
| [61] | (Hertog, et al., | x | | X | | x | |

| | | | | | | | |
|--------------|------------------------|---|---|---|---|---|---|
| | 2014) | | | | | | |
| [63] | (Dai, H. et al., 2015) | | X | X | | x | |
| [42] | (Li & Wang, . 2015) | x | | x | x | | |
| | | | | | | | |
| Total | | 3 | 1 | 4 | 2 | 3 | 1 |

Al igual que en las técnicas anteriores, se hace evidente la relación entre los parámetros de calidad de la CS y la implementación del ST, ya que varios autores la relacionan en sus modelos [47], [53], [16], [59] y [11], dicha relación contribuye a mejorar el desempeño de la cadena ya que una de las claves de la gestión de la CSA es una visión integradora de logística y calidad, lo anterior resalta la necesidad de modelos combinados que estimen los cambios de calidad y la vida útil restante para optimizar las estrategias de gestión de la cadena [61].

Tabla XIII
Parámetros de los modelos que utilizan otra técnica de optimización

| Cp: Costo de producción, Ct: Costo de transporte, Ca: Costo de almacenamiento, Ce: Costo de empaque, Cr: Costo recuperación o eliminación, Cenf: Costo de enfriamiento, Cm: Costo mano de obra, Ctra: Costo tecnología de trazabilidad, Cis: Costo inspección y seguimiento, Ccl: Costo configuración de línea, %na: Porcentaje de no aceptación. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|------------------------|----------------------|---------|----------------|-----------|--------------|------------------------|---------------------|----------------|-------------|---------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Autores | | % de gradación calidad | min y max de calidad | Demanda | Cap producción | Costos | Cap. Almacén | Tiempo. Almacenamiento | No. De periodos | Tamaño de lote | Temperatura | Factor de Vida útil | Multa por incumplimiento de calidad o demanda | Precio | Prob. contaminación o defecto | Disponibilidad información de traza | Responsabilidad civil | Prob. de recuperación |
| [58] | (Wang and Dong 2012) | X | X | X | X | Totales | | | Intervalo de Tiempo | | X | X | | | | | | |
| [61] | (Hertog, et al., 2014) | | X | | | Ct | X | X | | | X | X | | | | | | X |
| [63] | (Dai, H. et al., 2015) | X | | X | | Ctr Ca | | | | X | | | | | X | X | X | |
| [42] | (Li & Wang, . 2015) | X | | X | | Cp | | | | | | | X | Max , Min, Actual Negociación | | | | |
| Totales | | 3 | 2 | 3 | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

3.3.4. Modelado de trazabilidad con técnicas de simulación

El principal inconveniente de la mayoría de los modelos analíticos es el hecho de la necesidad de cumplir numerosas restricciones antes de poder aplicarse en la práctica, mientras los enfoques matemáticos requieren demasiadas simplificaciones para modelar problemas en CS realistas [68]. Las herramientas de simulación a menudo se utilizan para respaldar la toma de decisiones de rediseño o gestión de la CS cuando existe incertidumbre logística [69]. En la Tabla XIV se distinguen cuatro tipos de simulación para la gestión de la CSA: (i) simulación en hoja de cálculo, (ii) dinámica de sistema (DS), (iii) simulación con eventos discretos (DEDS) y (iv) juegos de negocios [69]. La DS proporciona información cualitativa, mientras que la simulación con eventos discretos cuantifica los resultados e incorpora incertidumbres y los juegos pueden educar y entrenar a los usuarios [68].

La simulación con eventos discretos permite modelar sistemas logísticos de forma más operativa y detallada [68] y con la dinámica de sistemas se puede evaluar la relación entre las variables y el comportamiento dependiente del tiempo con una visión a nivel estratégico [70]. Por su parte, la simulación basada en agentes proporciona una forma de examinar la estructura de la CS y los problemas de gestión, desde una visión que combina

elementos de decisión tácticos [71]. En la siguiente tabla se muestran los modelos de trazabilidad bajo el enfoque de simulación, con una descripción y el objetivo principal de cada modelo.

Tabla XIV
Modelos de simulación sobre la trazabilidad en las cadenas de suministro de alimentos.

| SC: Simulación de hoja de cálculo, SD: Dinámica de sistema, DEDS: Simulación de sistema de evento discreto, SA: Simulación por agentes | | | | |
|--|------------------------------------|--|---|------------------------------|
| Autores | | Descripción | Propósito | Paradigma de simulación |
| [69] | (Van der Vorst, J.G. et al., 2000) | Modelo de simulación basado en Petri-nets para respaldar la toma de decisiones al rediseñar una CSA para refrigerados. | Se modela el comportamiento dinámico de la CSA, basado en conceptos de proceso de negocio, variables de diseño, indicadores de desempeño y entidad comercial | DEDS |
| [68] | (Van der Vorst, J.G. et al., 2009) | Modelo de simulación integrado hacia el análisis de logística, sostenibilidad y calidad de los alimentos. Incorpora modelos de cambio de calidad e indicadores de sostenibilidad. | Se simula la CS como una red de: Agente: Toman las decisiones (planificadores, puntos de venta, productores y sistemas de distribución), Trabajos: Actividades de la cadena y Flujos: Objetos móviles dentro del sistema. | DEDS con ALADIN |
| [72] | (Saltini, R., & Akkerman, R. 2012) | Simulan diferentes escenarios para evaluar el impacto de la profundidad y la estrategia de un sistema de trazabilidad (se consideran tres ST) en la eficiencia de la producción y el retiro del producto (dispersión reducida de costo). | Simula dos crisis alimentarias: Contaminación del grano (proveedor) y contaminación de un lote | SC en Visual Basic |
| [73] | (Herrera M.M., et al., 2014) | Modelo de simulación sobre el efecto de la implementación de tecnología de trazabilidad en la CS de frutas y sus relaciones con la capacidad de inversión y la calidad de un producto. | Se simulan tres empresas procesadoras de frutas bajo un enfoque transversal relacionado con la implementación de tecnología, identifica cuatro efectos principales que determinan el comportamiento dinámico del sistema | SD |
| [74] | (Ge, H., et al., 2015) | Modelo analítico y modelo de simulación de la CS de trigo con el objetivo final de identificar estrategias de prueba de calidad efectivas. | Se modelan a los agricultores y manipuladores de carga como individuos racionales y de aprendizaje que toman decisiones basados en sus propias experiencias, así como en las experiencias de otros a su alrededor. | SA |
| [75] | (Herrera M.M., et al., 2018) | Modelo de simulación sobre el comportamiento de la capacidad de producción, la trazabilidad y la recuperación en la CS de ciclo cerrado | Se representan las relaciones entre las capacidades de trazabilidad y recuperación y sus efectos en el control de calidad. | SD |
| [76] | (La Scalia, G. 2019) | Simulan la incidencia económica y ambiental de los sistemas de gestión de almacén, bajo la simulación de tres escenarios de precio, basados en la vida útil del producto y su gestión a través de la trazabilidad | Simulan dos estrategias de almacén en la CS de la fresa: primero en vender primero en salir, primero en entrar primero en salir, en tres escenarios de precio diferentes | SC Simulación de Monte Carlo |
| [77] | (Gunawan, I. et al., 2019) | Simulan un modelo de costo-beneficio basado en un enfoque dinámico para determinar la influencia de la mejora de un sistema de trazabilidad en la industria de alimentos hacia la eficacia y la eficiencia del proceso de retiro | Simulan tres escenarios: Sistemas de trazabilidad en empresas de pequeña, mediana y gran escala. Utilizando indicadores de precisión, amplitud y profundidad. | SD |

De acuerdo con el análisis de los cuatro paradigmas de simulación de Van der Vorst et al. [69] en el 2000 y Kleijnen [78] en el 2003 se evidencia que la dinámica de sistemas es el paradigma más adecuado para abordar problemas estratégicos que contemplen la calidad de los productos para la CSA. También, se destaca que las simulaciones de mayor frecuencia son las desarrolladas a través de las hojas de cálculo dada su facilidad de uso.

Tabla XV
Medidas de desempeño de los modelos de dinámica de sistemas.

| Autores | | Capacidad de recuperación | Relación costo y beneficio | Calidad del producto | Inversión. en trazabilidad |
|--------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| [73] | (Herrera M.M., et al., 2014) | | | x | x |
| [75] | (Herrera M.M., et al., 2018) | x | | x | x |
| [77] | (Gunawan, I. et al., 2019) | | x | | |
| Total | | 1 | 1 | 2 | 2 |

Las medidas de desempeño de la CSA son un aspecto esencial en el modelado tanto de simulación como de optimización para el análisis de los sistemas de trazabilidad. Las tablas XV, XVI y XVII presentan las medidas de desempeño utilizadas en los modelos de simulación planteados bajo dinámica de sistemas, simulación de eventos discretos y simulación por hojas de cálculo, respectivamente.

Tabla XVI
Medidas de desempeño de los modelos de simulación de eventos discretos.

| Autores | Impacto ambiental | Costos logísticos | Calidad del producto | Disponibilidad del producto | Precio | Rendimiento de la cadena |
|---------|-------------------|-------------------|----------------------|-----------------------------|--------|--------------------------|
|---------|-------------------|-------------------|----------------------|-----------------------------|--------|--------------------------|

| | | | | | | | |
|------|------------------------------------|--------------------------------|---|---|---|---|---|
| [69] | (Van der Vorst, J.G. et al., 2000) | | | X | X | X | X |
| [68] | (Van der Vorst, J.G. et al., 2009) | Emisiones CO2 y uso de energía | X | X | | | |
| | Total | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |

Se destaca el análisis de las medidas relacionadas con el análisis de la capacidad de recuperación del sistema de trazabilidad, lo cual refleja una preocupación en las investigaciones por la sostenibilidad del sistema de producción y recuperación a lo largo de las CSA. En esta medida, es posible que estas medidas conduzcan a entender mejor el concepto y la dinámica de la seguridad alimentaria en las CS.

Tabla XVII
Medidas de desempeño de los modelos de simulación por hojas de cálculo.

| Autor | | Tamaño del lote | Capacidad de recuperación | Número de lotes | Impacto ambiental | Recuperación de la inversión |
|-------|------------------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|
| [10] | (Saltini, R., & Akkerman, R. 2012) | X | X | X | | |
| [76] | (La Scalia, G. 2019) | | | | Emisiones CO2 | X |
| | Total | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

4. Trabajo futuro y Gaps Identificados

Se evidencia que el tema de trazabilidad en la CSA ha tenido una dinámica de publicación creciente y un interés por la comunidad académica y empresarial. Varios autores relacionan la trazabilidad y la calidad, mantener una alta calidad en alimentos perecederos es de vital importancia para el desempeño de la CSA [52].

En cuanto a la implementación de TS desde la parte económica se destaca la necesidad de desarrollar modelos que permitan la evaluación y comparación de metodologías en un marco unificado, tanto desde el punto de vista operativo como económico, considerando los costos y beneficios derivados de la introducción de un TS optimizado [4], en dicha optimización se debe considerar la oportunidad de aumentar la profundidad del TS [10], para esto se sugiere la implementación de un sistema de comunicación e intercambio de información en toda la CSA que conduzca a un intercambio de datos rápido y eficiente [79], además, algunos autores mencionan la necesidad de investigaciones adicionales sobre trazabilidad centradas en cuestiones tales como: mejorar los aspectos tecnológicos de los sistemas de trazabilidad; el vínculo entre el sistema de trazabilidad y las unidades de producción de alimentos; la estandarización del intercambio de información; la integración de la trazabilidad en la gestión logística y el desarrollo de estrategias de creación de conciencia y la eficacia de la comunicación de la información de trazabilidad a los consumidores y otras partes interesadas [8], se considera que dichos aspectos pueden ser considerados en los modelos de optimización y en los de simulación dependiendo del enfoque dado.

Por otro lado en relación a los alimentos procesados, a pesar de contar con diferentes métodos para implementar la trazabilidad en el procesamiento considerando el reto que implica la mezcla de lotes, se resalta la necesidad de evaluar los escenarios de aplicación específicos en el procesamiento de alimentos para mejorar la granularidad [80], en este mismo sentido se requiere la formulación de políticas de mezcla desde la producción hasta la distribución y el desarrollo de modelos que permitan determinar el tamaño óptimo del lote, lo cual en conjunto ayudara a reducir la dispersión general del lote [4]. Adicionalmente, toma relevancia considerar modelos de trazabilidad para múltiples productos y las interacciones entre estos [52]. Proponer modelos con degradación de calidad para múltiples productos relacionados, por ejemplo frutas y verduras, incluyendo parámetros variables como fluctuación de la temperatura [68] [81] y humedad relativa en cambios de pisos térmicos [82].

Existe una clara tendencia por el consumo de productos frescos con alta calidad, por lo que los eslabones de la cadena deberán prestar atención a la vida útil del producto, para esto se deberá considerar, en el modelado, los beneficios potenciales que los productores o fabricantes podrían obtener al ofrecer una vida útil más larga [16],

con la implementación de ST en términos de crisis de seguridad y eficiencia de producción [72]. Considerar los beneficios potenciales que los fabricantes de alimentos podrían obtener al proporcionar una vida útil más larga del producto es un tema importante y desafiante para la investigación futura, ya que bajo esta circunstancia el modelo realmente considera el problema desde la perspectiva de la cadena de suministro completa [16]. De acuerdo a esto, varios modelos buscan maximizar los beneficios de la trazabilidad, pero se deben cuantificar diferentes medidas de desempeño en la CSA, lo que da origen a modelos multiobjetivo, un trabajo de investigación futuro.

De igual forma se requieren modelos con enfoques holísticos para el diseño y la gestión del CSA frescos [81], que tengan en consideración los efectos de una decisión de un proveedor en la responsabilidad y funcionamiento con otro eslabón, a través de mecanismos de participación al implantar ST [63]. En el diseño de la capacidad de seguimiento en la CSA influyen factores como la recuperación de los desperdicios [75] y la evaluación de los valores de granularidad para mejorar el sistema de trazabilidad [83], también se sugiere trabajar en modelos que permitan optimizar los esfuerzos conjuntos de retirada de productos de la cadena de suministro y la reducción de precio, utilizando costos de retiro compartidos [84].

Las relaciones complejas entre eslabones y variables conllevan a la creación de modelos integrados, planeación estratégica, operativa y táctica para dar solución a los principales problemas de la CSA, modelos que aunque pueden ser robustos y complejos, facilitan la gestión [16]. Los documentos se enfocan especialmente en decisiones tácticas y operativas, las decisiones estratégicas son menos consideradas, por lo tanto, es un campo de investigación que requiere mayor atención [81]. Se menciona la necesidad de desarrollar un marco de optimización y planificación capaz de tener en cuenta explícitamente la variable “tiempo”, con el objetivo de seguir de cerca la evolución y los cambios en la línea de producción e ir actualizando y adaptando dinámicamente las estrategias de planificación a los cambios [4]. En este sentido, se destaca el uso de la dinámica de sistemas como técnica de simulación para dar soporte a los tomadores de decisiones ya que desarrolla composiciones entre variables de forma sistémica para la toma de decisiones integrales y estratégicas de la CSA, que permite el análisis del comportamiento a través del tiempo [73].

Los principales problemas modelados han sido de planificación, asignación y transporte. Sin embargo, la adición constante de nuevos parámetros, condiciones y variables proponen la integración de métodos complementarios como la optimización y simulación, o el cambio de perspectiva de un enfoque de mono-criterio a un enfoque multi-criterio relacionado múltiples niveles y/o eslabones [12]. A pesar de que este cambio se ha evidenciado en las últimas publicaciones, se considera que aún quedan investigaciones por desarrollar a través de modelos multiobjetivo.

Recientemente, la evolución de la logística en el contexto de la industria 4.0 requiere del procesamiento de grandes volúmenes de información con múltiples atributos cuantitativos y cualitativos. En este contexto, los sistemas de trazabilidad juegan un papel esencial en la sincronización de los autores y mejoramiento del desempeño de la CSA. Desde la revisión de literatura, se ha evidenciado la carencia de estudios que vinculen el modelado de los sistemas de trazabilidad y la logística 4.0, convirtiéndose en una oportunidad para futuras investigaciones. En este mismo contexto se sugiere considerar en futuras investigaciones el uso de tecnologías novedosas, como inteligencia artificial, big data y blockchain para obtener mejoras efectivas en el desempeño de la trazabilidad en el procesamiento de alimentos [80], además, la creciente difusión de nuevas tecnologías para la identificación y detección automáticas, junto con la disponibilidad de nuevos modelos computacionales y de simulación y de nuevos sistemas mecánicos para la segregación de lotes, abren el camino para nuevas soluciones capaces de garantizar un mayor nivel de control de la cadena de suministro [4].

Tal vez uno de los focos de estudio relevantes es la necesidad de incluir la sostenibilidad en la gestión de la CSA, considerando impactos ambientales / ecológicos, como el consumo y el agotamiento de los recursos hídricos, o la pérdida de energía, junto con las relaciones con trazabilidad [76]. Considerar la sostenibilidad en la gestión de la CS requiere incluir no solo aspectos ecológicos y económicos sino también sociales, uno de ellos la seguridad alimentaria, donde la trazabilidad resulta fundamental. En conclusión, para futuras investigaciones también se sugieren modelos de gestión logística sostenible.

La mayoría de los modelos revisados utilizan parámetros determinísticos, sin embargo, se hace necesario el desarrollo de modelos de optimización que aborden la incertidumbre y variabilidad del flujo de material en la CSA, con un enfoque estocástico para evitar sesgos con la realidad [53]. Se deben diseñar e implementar sistemas de trazabilidad que permitan el acceso eficiente a la información y que contemplen las fuertes asimetrías

entre los eslabones, ya que estos generan escenarios con alto grado de incertidumbre, lo cual produce la necesidad de modelos que contemplen la información difusa en los ST [53]. Investigaciones futuras que aborden la incertidumbre en los parámetros establecidos, como la demanda o el porcentaje de integridad, una opción es utilizar modelos de programación estocástica [65]. Bajo este mismo enfoque y en relación a la representación de la CSA como una red, se puede considerar la opción de incluir en el modelo la incertidumbre de la oferta [12] y la variabilidad de la demanda, junto con la volatilidad del precio y la confiabilidad de la entrega [60]. Se requiere el uso de tecnologías de trazabilidad de alimentos más efectivas y económicas que faciliten la integración de datos de trazabilidad estáticos y dinámicos y garanticen la continuidad del flujo de información dentro de la cadena de suministro [8].

En síntesis, se observa la necesidad de desarrollar modelos que aborden la variabilidad e incertidumbre de los sistemas a través de los parámetros estocásticos; modelos que apoyen la toma de decisiones estratégicas, donde se resalta la importancia de la dinámica de sistemas; desarrollo e implementación de tecnología con un enfoque sistémico que permitan mejorar las características de rastreo y seguimiento; desarrollo de modelos que integren métodos complementarios o la utilización de enfoques multiobjetivo, multiproducto; modelos y mecanismos para la gestión de datos orientados al análisis integral de las relaciones y los flujos entre los actores de la cadena; desarrollo de modelos que permitan el análisis del comportamiento de la implementación tecnológica en los procesos de trazabilidad; desarrollo de modelos de participación que consideren los efectos de las decisiones de un eslabón en la responsabilidad y funcionamiento del otro y el desarrollo modelos de gestión logística sostenible. En este sentido, una intervención sistémica basada en modelos de simulación estratégicos puede mejorar el proceso de toma de decisiones en el largo plazo de los sistemas de trazabilidad adoptados.

Referencias

- [1] K. M. Karlsen and P. Olsen, "Validity of method for analysing critical traceability points," *Food Control*, vol. 22, no. 8, pp. 1209–1215, 2011, doi: 10.1016/j.foodcont.2011.01.020.
- [2] M. N. Faisal and F. Talib, "Implementing traceability in Indian food-supply chains: An interpretive structural modeling approach," *J. Foodserv. Bus. Res.*, vol. 19, no. 2, pp. 171–196, 2016, doi: 10.1080/15378020.2016.1159894.
- [3] M. Thakur and C. R. Hurburgh, "Framework for implementing traceability system in the bulk grain supply chain," *J. Food Eng.*, vol. 95, no. 4, pp. 617–626, 2009, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.06.028.
- [4] F. Dabbene, P. Gay, and C. Tortia, "Traceability issues in food supply chain management: A review," *Biosyst. Eng.*, vol. 120, pp. 65–80, 2014, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2013.09.006.
- [5] J. A. Alfaro and L. A. Rábade, "Traceability as a strategic tool to improve inventory management: A case study in the food industry," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 118, no. 1, pp. 104–110, 2009, doi: 10.1016/j.ijpe.2008.08.030.
- [6] P. Olsen and M. Borit, "How to define traceability," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 29, no. 2, pp. 142–150, 2013, doi: 10.1016/j.tifs.2012.10.003.
- [7] T. A. McMeekin *et al.*, "Information systems in food safety management," *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 112, no. 3, pp. 181–194, 2006, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2006.04.048.
- [8] T. Bosona and G. Gebresenbet, "Food traceability as an integral part of logistics management in food and agricultural supply chain," *Food Control*, vol. 33, no. 1, pp. 32–48, 2013, doi: 10.1016/j.foodcont.2013.02.004.
- [9] X. Wang, D. Li, and C. O'Brien, "Optimisation of traceability and operations planning: An integrated model for perishable food production," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 47, no. 11, pp. 2865–2886, 2009, doi:

- [10] R. Saltini and R. Akkerman, "Testing improvements in the chocolate traceability system: Impact on product recalls and production efficiency," *Food Control*, vol. 23, no. 1, pp. 221–226, 2012, doi: 10.1016/j.foodcont.2011.07.015.
- [11] R. Gautam, A. Singh, K. Karthik, S. Pandey, F. Scrimgeour, and M. K. Tiwari, "Traceability using RFID and its formulation for a kiwifruit supply chain," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 103, pp. 46–58, 2017, doi: 10.1016/j.cie.2016.09.007.
- [12] W. E. Soto-Silva, M. C. González-Araya, M. A. Oliva-Fernández, and L. M. Plà-Aragónés, "Optimizing fresh food logistics for processing: Application for a large Chilean apple supply chain," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 136, pp. 42–57, 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.02.020.
- [13] J. A. Orjuela Castro, "Incidencia del diseño de la cadena de suministro alimentaria en el equilibrio de flujos logísticos," Universidad Nacional de Colombia, 2018.
- [14] B. Kitchenham, "Procedures for Performing Systematic Reviews," *Jt. Tech. Rep. Softw.*, vol. 1, no. 1, pp. 79–83, 2004, doi: 10.5144/0256-4947.2017.79.
- [15] D. L. Rincón, J. E. Fonseca Ramirez, and J. A. Orjuela Castro, "Towards a common reference framework for traceability in the food supply chain Hacia un marco conceptual común para la trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos," vol. XX, no. Xx, pp. 1–25, 2017, doi: 10.14483/udistrital.jour.reving.20XX.X.aXX.
- [16] X. Wang, D. Li, C. O'brien, and Y. Li, "A production planning model to reduce risk and improve operations management," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 124, no. 2, pp. 463–474, 2010, doi: 10.1016/j.ijpe.2009.12.009.
- [17] J. E. Hobbs, "Transaction costs and slaughter cattle procurement: Processors' selection of supply channels," *Agribusiness*, vol. 12, no. 6, pp. 509–523, 1996, doi: 10.1002/(SICI)1520-6297(199611/12)12:6<509::AID-AGR2>3.0.CO;2-7.
- [18] Food Chain Strategy and Food Standards Agency, "Traceability in the Food Chain A preliminary study," *Heal. San Fr.*, no. March, p. 51, 2002.
- [19] E. Golan *et al.*, "Traceability in the US food supply: Economic theory and industry studies," *Econ. Res. Serv. US Dep. Agric. Agric. Econ. Rep.*, vol. 830, no. 830, p. 56, 2004, [Online]. Available: <http://151.121.68.30/publications/aer830/aer830.pdf>.
- [20] K. M. Karlsen, B. Dreyer, P. Olsen, and E. O. Elvevoll, "Granularity and its role in implementation of seafood traceability," *J. Food Eng.*, vol. 112, no. 1–2, pp. 78–85, 2012, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.03.025.
- [21] ICONTEC, "NTC-ISO 9000 Sistemas de Gestión de la Calidad - fundamentos y vocabulario," *Icontext*, no. 571, pp. 1–23, 2015, doi: 10.18086/swc.2015.02.02.
- [22] M. Bertolini, M. Bevilacqua, and R. Massini, "FMECA approach to product traceability in the food industry," *Food Control*, vol. 17, no. 2, pp. 137–145, 2006, doi: 10.1016/j.foodcont.2004.09.013.
- [23] P. Olsen and M. Aschan, "Reference method for analyzing material flow, information flow and information loss in food supply chains," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 21, no. 6, pp. 313–320, 2010, doi: 10.1016/j.tifs.2010.03.002.
- [24] T. Kelepouris, K. Pramataris, and G. Doukidis, "RFID-enabled traceability in the food supply chain," *Ind. Manag. Data Syst.*, vol. 107, no. 2, pp. 183–200, 2007, doi: 10.1108/02635570710723804.

- [25] S. Tamayo, T. Monteiro, and N. Sauer, "Deliveries optimization by exploiting production traceability information," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 22, no. 4–5, pp. 557–568, 2009, doi: 10.1016/j.engappai.2009.02.007.
- [26] A. Regattieri, M. Gamberi, and R. Manzini, "Traceability of food products: General framework and experimental evidence," *J. Food Eng.*, vol. 81, no. 2, pp. 347–356, 2007, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.10.032.
- [27] B. Manos and I. Manikas, "Article information : Traceability in the greek fresh produce sector: drivers and constraints," *Br. Food J.*, 2010, doi: <http://dx.doi.org/10.1108/MRR-09-2015-0216>.
- [28] A. Bechini, M. G. C. A. Cimino, F. Marcelloni, and A. Tomasi, "Patterns and technologies for enabling supply chain traceability through collaborative e-business," *Inf. Softw. Technol.*, vol. 50, no. 4, pp. 342–359, 2008, doi: 10.1016/j.infsof.2007.02.017.
- [29] EC, "Commission Regulation (EC) No 853/2004 of 29 April 2004 on the hygiene of foodstuffs," *Off. J. Eur. Union*, vol. L 269, no. September 2000, pp. 1–15, 2004, doi: 2004R0726 - v.7 of 05.06.2013.
- [30] J. Van Der Vorst, A. Beulens, and P. Van Beek, "Innovations in logistics and ICT in food supply chain networks," in *Innovations in AgriFood Systems: Product Quality and Consumer Acceptance*, Wageningen Academic Publishers, 2005.
- [31] L. A. Rábade and J. A. Alfaro, "Buyer-supplier relationship's influence on traceability implementation in the vegetable industry," *J. Purch. Supply Manag.*, vol. 12, no. 1, pp. 39–50, 2006, doi: 10.1016/j.pursup.2006.02.003.
- [32] D. Folinas, I. Manikas, and B. Manos, "Traceability data management for food chains," *Br. Food J.*, vol. 108, no. 8, pp. 622–633, 2006, doi: 10.1108/00070700610682319.
- [33] M. Canavari, R. Centonze, M. Hingley, and R. Spadoni, "Traceability as part of competitive strategy in the fruit supply chain," *Br. Food J.*, vol. 112, no. 2, pp. 171–186, 2010, doi: 10.1108/00070701011018851.
- [34] W. van Rijswijk, L. J. Frewer, D. Menozzi, and G. Faioli, "Consumer perceptions of traceability: A cross-national comparison of the associated benefits," *Food Qual. Prefer.*, vol. 19, no. 5, pp. 452–464, 2008, doi: 10.1016/j.foodqual.2008.02.001.
- [35] S. Khan, A. Haleem, M. I. Khan, M. H. Abidi, and A. Al-Ahmari, "Implementing traceability systems in specific supply chain management (SCM) through critical success factors (CSFs)," *Sustain.*, vol. 10, no. 1, 2018, doi: 10.3390/su10010204.
- [36] F. Dabbene and P. Gay, "Food traceability systems: Performance evaluation and optimization," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 75, no. 1, pp. 139–146, 2011, doi: 10.1016/j.compag.2010.10.009.
- [37] J. G. Van der Vorst, "Performance levels in food traceability and the impact on chain design: results of an international benchmark study," *Dep. Manag. Res.*, 2003.
- [38] M. Salampasis, D. Tektonidis, and E. P. Kalogianni, "TraceALL: A semantic web framework for food traceability systems," *J. Syst. Inf. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 302–317, 2012, doi: 10.1108/13287261211279053.
- [39] J. Hu, X. Zhang, L. M. Moga, and M. Neculita, "Modeling and implementation of the vegetable supply chain traceability system," *Food Control*, vol. 30, no. 1, pp. 341–353, 2013, doi: 10.1016/j.foodcont.2012.06.037.

- [40] J. T. Mgonja, P. Luning, and J. G. A. J. Van Der Vorst, "Diagnostic model for assessing traceability system performance in fish processing plants," *J. Food Eng.*, vol. 118, no. 2, pp. 188–197, 2013, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.04.009.
- [41] T. Pizzuti and G. Mirabelli, "The Global Track&Trace System for food: General framework and functioning principles," *J. Food Eng.*, vol. 159, pp. 16–35, 2015, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.03.001.
- [42] W. Liang, J. Cao, Y. Fan, K. Zhu, and Q. Dai, "Modeling and implementation of cattle/beef supply chain traceability using a distributed RFID-based framework in China," *PLoS One*, vol. 10, no. 10, pp. 1–17, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0139558.
- [43] R. Y. Chen, "Autonomous tracing system for backward design in food supply chain," *Food Control*, vol. 51, pp. 70–84, 2015, doi: 10.1016/j.foodcont.2014.11.004.
- [44] C. N. Verdouw, J. Wolfert, A. J. M. Beulens, and A. Rialland, "Virtualization of food supply chains with the internet of things," *J. Food Eng.*, vol. 176, pp. 128–136, 2016, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.11.009.
- [45] H. M. Kim and M. Laskowski, "Toward an ontology-driven blockchain design for supply-chain provenance," *Intell. Syst. Accounting, Financ. Manag.*, vol. 25, no. 1, pp. 18–27, 2018, doi: 10.1002/isaf.1424.
- [46] T. M. Fernández-Caramés and P. Fraga-Lamas, "A Review on the Use of Blockchain for the Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32979–33001, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2842685.
- [47] F. Dabbene, P. Gay, and N. Sacco, "Optimisation of fresh-food supply chains in uncertain environments, Part I: Background and methodology," *Biosyst. Eng.*, vol. 99, no. 3, pp. 348–359, 2008, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.11.011.
- [48] X. Zhang, J. Zhang, F. Liu, Z. Fu, and W. Mu, "Strengths and limitations on the operating mechanisms of traceability system in agro food, China," *Food Control*, vol. 21, no. 6, pp. 825–829, 2010, doi: 10.1016/j.foodcont.2009.10.015.
- [49] A. Chaudhuri, S. Srivastava, R. K. Srivastava, and P. Zeenat, "Risk propagation and its impact on performance in food processing supply chain: a fuzzy interpretive structural modeling based approach," *J. Model. Manag.*, vol. 1, pp. 1–58, 2016, doi: 10.1108/JM2-08-2014-0065.
- [50] M. Balaji and K. Arshinder, "Modeling the causes of food wastage in Indian perishable food supply chain," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 114, pp. 153–167, 2016, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.07.016.
- [51] R. Shankar, R. Gupta, and D. K. Pathak, "Modeling critical success factors of traceability for food logistics system," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 119, no. August 2017, pp. 205–222, 2018, doi: 10.1016/j.tre.2018.03.006.
- [52] A. Rong, R. Akkerman, and M. Grunow, "An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 131, no. 1, pp. 421–429, 2011, doi: 10.1016/j.ijpe.2009.11.026.
- [53] J. Yu, M. Gan, S. Ni, and D. Chen, "Multi-objective models and real case study for dual-channel FAP supply chain network design with fuzzy information," *J. Intell. Manuf.*, vol. 29, no. 2, pp. 389–403, 2018, doi: 10.1007/s10845-015-1115-8.
- [54] C. Dupuy, V. Botta-Genoulaz, and A. Guinet, "Batch dispersion model to optimise traceability in food industry," *J. Food Eng.*, vol. 70, no. 3, pp. 333–339, 2005, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.05.074.
- [55] D. Li, D. Kehoe, and P. Drake, "Dynamic planning with a wireless product identification technology in food

- supply chains," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 30, no. 9–10, pp. 938–944, 2006, doi: 10.1007/s00170-005-0066-1.
- [56] M. Thakur, L. Wang, and C. R. Hurburgh, "A multi-objective optimization approach to balancing cost and traceability in bulk grain handling," *J. Food Eng.*, vol. 101, no. 2, pp. 193–200, 2010, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.07.001.
- [57] O. Ahumada and J. R. Villalobos, "Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 133, no. 2, pp. 677–687, 2011, doi: 10.1016/j.ijpe.2011.05.015.
- [58] X. Wang and D. Li, "A dynamic product quality evaluation based pricing model for perishable food supply chains," *Omega*, vol. 40, no. 6, pp. 906–917, 2012, doi: 10.1016/j.omega.2012.02.001.
- [59] S. Piramuthu, P. Farahani, and M. Grunow, "RFID-generated traceability for contaminated product recall in perishable food supply networks," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 225, no. 2, pp. 253–262, 2013, doi: 10.1016/j.ejor.2012.09.024.
- [60] M. Yu and A. Nagurney, "Competitive food supply chain networks with application to fresh produce," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 224, no. 2, pp. 273–282, 2013, doi: 10.1016/j.ejor.2012.07.033.
- [61] M. L. A. T. M. Hertog, I. Uysal, U. McCarthy, B. M. Verlinden, and B. M. Nicolai, "Shelf life modelling for first-expired-first-out warehouse management," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 372, no. 2017, 2014, doi: 10.1098/rsta.2013.0306.
- [62] G. Aiello, M. Enea, and C. Muriana, "The expected value of the traceability information," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 244, no. 1, pp. 176–186, 2015, doi: 10.1016/j.ejor.2015.01.028.
- [63] H. Dai, M. M. Tseng, and P. H. Zipkin, "Design of traceability systems for product recall," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 53, no. 2, pp. 511–531, 2015, doi: 10.1080/00207543.2014.955922.
- [64] D. Li and X. Wang, "Dynamic supply chain decisions based on networked sensor data: an application in the chilled food retail chain," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 17, pp. 5127–5141, 2017, doi: 10.1080/00207543.2015.1047976.
- [65] A. Mohammed, Q. Wang, and X. Li, "A study in integrity of an RFID-monitoring HMSC," *Int. J. Food Prop.*, vol. 20, no. 5, pp. 1145–1158, 2017, doi: 10.1080/10942912.2016.1203933.
- [66] J. B. Dai, L. Fan, N. K. S. Lee, and J. Li, "Joint optimisation of tracking capability and price in a supply chain with endogenous pricing," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 18, pp. 5465–5484, 2017, doi: 10.1080/00207543.2017.1321800.
- [67] D. M. Sourza Monteiro, "Theoretical and Empirical Analysis of the Economics of Traceability Adoption in Food Supply Chains," 2007.
- [68] J. G. A. J. Van Der Vorst, S. O. Tromp, and D. J. Van Der Zee, "Simulation modelling for food supply chain redesign; Integrated decision making on product quality, sustainability and logistics," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 47, no. 23, pp. 6611–6631, 2009, doi: 10.1080/00207540802356747.
- [69] J. G. A. J. Van der Vorst, A. J. M. Beulens, and P. Van Beek, "Modelling and simulating multi-echelon food systems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 122, pp. 354–366, 2000, doi: 10.1145/1735813.1735818.
- [70] J. Sterman, *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*, Mc Graw Hi. 2000.

- [71] L. A. Santa-Eulalia, G. Halladjian, S. D'Amours, and J. M. Frayret, "Integrated methodological frameworks for modeling agent-based advanced supply chain planning systems: A systematic literature review," *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 4, no. 4, pp. 624–668, 2011, doi: 10.3926/jiem.326.
- [72] R. Saltini, R. Akkerman, and S. Frosch, "Optimizing chocolate production through traceability: A review of the influence of farming practices on cocoa bean quality," *Food Control*, vol. 29, no. 1, pp. 167–187, 2013, doi: 10.1016/j.foodcont.2012.05.054.
- [73] M. M. Herrera-Ramírez and J. A. Orjuela Castro, "Perspectiva de trazabilidad en la cadena de suministros de frutas: un enfoque desde la dinámica de sistemas," *Ingeniería*, vol. 28, no. 3, pp. 236–247, 2014, doi: 10.1108/IJLM-07-2012-0062.
- [74] H. Ge, R. Gray, and J. Nolan, "Agricultural supply chain optimization and complexity: A comparison of analytic vs simulated solutions and policies," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 159, pp. 208–220, 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2014.09.023.
- [75] M. M. Herrera-Ramírez, L. Vragas, and D. Contento, *Modeling the Traceability and Recovery Processes in the Closed-Loop Supply Chain and Their Effects*, vol. 915. Springer International Publishing, 2018.
- [76] G. La Scalia, R. Micale, P. P. Miglietta, and P. Toma, "Reducing waste and ecological impacts through a sustainable and efficient management of perishable food based on the Monte Carlo simulation," *Ecol. Indic.*, vol. 97, no. June 2018, pp. 363–371, 2019, doi: 10.1016/j.ecolind.2018.10.041.
- [77] I. Gunawan, I. Vanany, and E. Widodo, "Cost-benefit model in improving traceability system: case study in Indonesian bulk-liquid industry," *Supply Chain Forum*, vol. 20, no. 2, pp. 145–157, 2019, doi: 10.1080/16258312.2019.1570671.
- [78] J. P. C. Kleijnen and M. T. Smits, "Performance metrics in supply chain management," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 54, no. 5, pp. 507–514, 2003, doi: 10.1057/palgrave.jors.2601539.
- [79] ANICA-POPA, "FOOD TRACEABILITY SYSTEMS AND INFORMATION SHARING IN FOOD SUPPLY CHAIN Ionuț ANICA-POPA," *Manag. Mark. Challenges Knowl. Soc.*, vol. 7, no. 4, pp. 749–758, 2012.
- [80] J. Qian, B. Dai, B. Wang, Y. Zha, and Q. Song, "Traceability in food processing: problems, methods, and performance evaluations—a review," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1080/10408398.2020.1825925.
- [81] W. E. Soto-Silva, E. Nadal-Roig, M. C. González-Araya, and L. M. Pla-Aragones, "Operational research models applied to the fresh fruit supply chain," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 251, no. 2, pp. 345–355, 2016, doi: 10.1016/j.ejor.2015.08.046.
- [82] L. A. Sanabria Coronado, A. M. Peralta Lozano, and J. A. Orjuela, "Modelos de Localización para Cadenas Agroalimentarias Perecederas: una Revisión al Estado del Arte," *Ingeniería*, vol. 22, no. 1, p. 65, 2017, doi: 10.14483/udistrital.jour.reving.2017.1.a04.
- [83] J. Qian, B. Fan, X. Wu, S. Han, S. Liu, and X. Yang, "Comprehensive and quantifiable granularity: A novel model to measure agro-food traceability," *Food Control*, vol. 74, pp. 98–106, 2017, doi: 10.1016/j.foodcont.2016.11.034.
- [84] B. Dai, Y. Nu, X. Xie, and J. Li, "Interactions of traceability and reliability optimization in a competitive supply chain with product recall," *Eur. J. Oper. Res.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.ejor.2020.08.003.

Tatiana Maya-Trujillo

Estudiante de la Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia), está desarrollando su proyecto de investigación sobre logística en la cadena de suministro de alimentos. Trabaja como asistente en la Maestría en Ciencias de la información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, y es miembro del

grupo de investigación "GYCALYT" (Grupo de investigación en cadenas de abastecimiento, logística y trazabilidad).

Javier Arturo Orjuela-Castro

Doctor en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia; Magíster en Investigación de Operaciones y Estadística, Universidad Tecnológica de Pereira; Ingeniero Industrial, Ingeniero de Alimentos, docente e Investigador en Logística y Cadenas de Suministro de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Director del Grupo de Investigación GICALYT (Grupo de investigación en cadenas de abastecimiento, logística y trazabilidad).

Correo electrónico: jorjuela@udistrital.edu.co

Milton M. Herrera

PhD in Model-based Public Planning, Design Policy and Management, de la Universidad de Palermo (Italia); Doctor en Modelado en Política y Gestión Pública de la Universidad Jorge Tadeo Lozano (Colombia), Magíster en Ingeniería Industrial e Ingeniero de Producción, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Profesor Asistente de Producción y Logística del Centro de Investigaciones de Ciencias Económicas de la Universidad Militar Nueva Granada; investigador del grupo GICALYT (Grupo de investigación en cadenas de abastecimiento, logística y trazabilidad).

Correo electrónico: milton.herrera@unimilitar.edu.co