

# MARCO ESTRATÉGICO-TÁCTICO INTEGRADO PARA EL DISEÑO DE CADENAS DE SUMINISTRO AGROALIMENTARIAS DE EXPORTACIÓN MEDIANTE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN MILP MULTIPERIODO

ERBERTH CRUZ PAREDES\*

<https://orcid.org/0009-0000-2313-937X>

Facultad de Ingeniería de Producción y Servicios,  
Universidad Nacional de San Agustín, Perú

Recibido: 7 de febrero del 2026 / Aceptado: 8 de abril del 2026

Publicado: 15 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8581>

**RESUMEN.** El diseño de cadenas de suministro agroalimentarias de exportación requiere integrar decisiones estratégicas y tácticas bajo condiciones productivas y comerciales variables. Este estudio propone un marco de optimización estratégico-táctico basado en un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) multiperiodo para el diseño de cadenas de suministro agroalimentarias que optimicen la inversión, instalaciones, abastecimiento y transporte en múltiples periodos. Además, se evalúa la robustez del modelo mediante el análisis de sensibilidad de parámetros clave. El enfoque se aplica a la industria de la pitahaya con un horizonte de diez años. El modelo determina una inversión inicial de S/ 680 186,9 y flujos de caja de S/ 769 007,3 anuales desde el sexto año. La configuración óptima incluye 8 almacenes modulares y 19 934 tutores de concreto. A su vez, se optimiza el transporte mediante una estrategia multimodal con costos de hasta S/ 206 180 anuales. Se demuestran mejoras en el desempeño económico y la configuración óptima de la cadena de suministro.

**PALABRAS CLAVE:** cadena de suministro / programación lineal entera mixta / modelo de optimización / planificación estratégica y táctica / agroalimentaria

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal

Correo electrónico: [ecruzp@unsa.edu.pe](mailto:ecruzp@unsa.edu.pe)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## INTEGRATED STRATEGIC-TACTICAL FRAMEWORK FOR THE DESIGN OF EXPORT AGRI-FOOD SUPPLY CHAINS USING A MULTI-PERIOD MILP OPTIMIZATION APPROACH

**ABSTRACT.** Designing export-oriented agri-food supply chains requires integrating strategic and tactical decisions under varying production and commercial conditions. This study proposes a strategic-tactical optimization framework based on a multi-period mixed-integer linear programming (MILP) model for designing agri-food supply chains to optimize investment, facilities, sourcing, and transportation over multiple periods. Furthermore, the model's robustness is evaluated through sensitivity analysis of key parameters. The approach is applied to the pitahaya industry over a ten-year horizon. The model determines an initial investment of S/ 680 186,9 and annual cash flows of S/ 769 007,3 starting in the sixth year. The optimal configuration includes eight modular warehouses and 19 934 concrete supports. Transportation is optimized through a multimodal strategy with annual costs of up to S/ 206 180, demonstrating improvements in economic performance and the optimal supply chain configuration.

**KEYWORDS:** supply chain / mixed-integer linear programming / optimization model / strategic and tactical planning / agri-food

## INTRODUCCIÓN

La dinámica del comercio internacional de productos orgánicos ha experimentado una aceleración significativa como resultado de cambios en los patrones de consumo global, pues gran parte de la población mundial se hizo más consciente de la importancia de una alimentación segura y saludable (Kumar et al., 2022). En este contexto, las preferencias alimentarias en todo el mundo se han diversificado debido a las transformaciones en los estilos de vida y el aumento demográfico, lo que ha reforzado el papel del sector agrícola como un componente clave en la economía global (Sufiyan et al., 2019).

A partir de ello, los procesos de la cadena de suministro adquieren una relevancia considerable en el comercio global y en los sectores económicos. En efecto, la cadena de suministro se configura como el elemento más importante de cualquier industria y representa el eje central de toda operación empresarial (Xu et al., 2024). Asimismo, la competencia entre las empresas se ha intensificado y se refleja actualmente en la necesidad de optimización de las cadenas de suministro, las cuales requieren mayores niveles de eficiencia (Liu & Lee, 2018). En consecuencia, la gestión óptima de la cadena de suministro es fundamental y determinante para lograr una producción más eficiente y minimizar costos operativos y logísticos (Gholian-Jouybari et al., 2023).

La cadena de suministro agroalimentaria constituye un sistema complejo caracterizado por la participación de múltiples eslabones en procesos diferenciados que funcionan de manera articulada para responder a una demanda global creciente (Mangla et al., 2018). En ese marco, dicho sistema integra, de manera compleja, las etapas de producción en granjas, procesamiento, almacenamiento, distribución y venta minorista al consumidor (Naik & Suresh, 2018). Asimismo, las cadenas de suministro agroalimentarias modernas cambian con el tiempo y evolucionan constantemente para responder a los desafíos dinámicos y complejos del entorno actual (Tsolakis et al., 2014).

Aunque tiene similitudes con las cadenas de suministro convencionales, la cadena de suministro agroalimentaria posee características únicas: un nivel elevado de complejidad que requiere habilidades de gestión especializadas (Onggo et al., 2019). Se distingue de las cadenas de suministro de manufactura o servicios por la naturaleza perecedera de los productos gestionados (Vazquez-Noguerol et al., 2022), la estacionalidad de la producción, y la variabilidad en la calidad y cantidad de la producción condicionada por factores climáticos, del suelo o humanos (Zhao et al., 2024).

Así, diversos factores como el cambio climático, los precios volátiles, la merma en los productos, la seguridad alimentaria y las políticas gubernamentales plantean desafíos constantes a las cadenas de suministro agroalimentaria (Ali et al., 2019). En ese sentido, un enfoque factible para reducir diversos desafíos propios de los sistemas agroalimentarios es la optimización del diseño y la planificación de la cadena de suministro. Los modelos

de optimización del diseño determinan la localización de instalaciones, su capacidad, estimación de costos y tiempos de operación, tecnologías a emplear, zonas de producción y procesamiento y selección de proveedores esenciales (Vieira et al., 2023). Según Martel y Klibi (2016), la complejidad de los modelos de optimización se debe a una variedad de factores: el alcance de las decisiones a tomar, la calidad de las proyecciones de costos e ingresos, los recursos potenciales múltiples, la cantidad y variedad de productos, las expectativas de los mercados, la complejidad de procesos productivos y logísticos, los objetivos a optimizar, las múltiples restricciones y la incertidumbre empresarial. Con todo ello, las decisiones estratégicas y tácticas en la gestión de la cadena de suministro agroalimentaria tienen influencia directa en la calidad final de los productos y en la rentabilidad económica de todo el sistema (Zhao et al., 2021).

En la toma de decisiones cuantitativas, la programación matemática cumple un rol importante, pues permite optimizar la asignación de recursos limitados según criterios de evaluación como costo, tiempo y beneficio. De este modo, facilita la obtención de soluciones óptimas para lograr actividades competitivas (Chandra & Grabis, 2016). Un problema de programación matemática consiste en minimizar o maximizar una función objetivo de variables reales o enteras sujeta a restricciones; los problemas de optimización se componen de tres elementos básicos: la función objetivo, conjunto de variables y conjunto de restricciones (Laínez-Aguirre & Puigjaner, 2015). Dentro de este campo, la programación lineal destaca por su practicidad. Esta es una técnica de optimización ampliamente utilizada en la agricultura, al brindar un soporte invaluable para tomar decisiones a través de modelos matemáticos efectivos y accesibles (Galán-Martín et al., 2015).

Según la literatura, el diseño de la cadena de suministro es una estrategia eficiente para brindar a las empresas visibilidad clara sobre el flujo de inventario, financiero y de información. Esta comprensión integral es la base para la toma de decisiones estratégicas y tácticas que optimizan el desempeño de la cadena de suministro. Las investigaciones demuestran que el problema del diseño de cadena de suministro ha sido estudiado en diversos marcos industriales y contextos. Hosseini-Motlagh et al. (2021) desarrollan un sólido modelo matemático para minimizar los costos totales de la cadena de suministro de trigo bajo incertidumbre integrando recolección, producción, inventario y distribución. El modelo desarrollado brinda perspectivas para tomar decisiones estratégicas y tácticas, las cuales están respaldadas por un análisis de sensibilidad.

En esa misma línea, Salehi-Amiri et al. (2021) estudiaron el diseño de la cadena de suministro para la industria de la nuez y desarrollaron un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) donde se minimizaron los costos integrando flujos directos e inversos para cumplir la demanda; asimismo, realizaron un análisis de sensibilidad de resultados. Clavijo-Burítica et al. (2023) proponen un diseño de cadena de suministro agroalimentaria resiliente a partir de desarrollar un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para

la minimización de costos. El modelo consideró el flujo de red hacia adelante y se validó con un caso de la industria cafetera colombiana. Finalmente, Rajabi-Kafshgar et al. (2023) diseñaron una cadena de suministro para el pistacho mediante programación lineal entera mixta (MILP) con el objetivo de minimizar los costos totales. Para ello, incorporaron la reutilización de residuos tanto en compost como en productos cosméticos.

A pesar de que los estudios mencionados destacan la relevancia del diseño de la cadena de suministro agroalimentaria, no abordan su aplicación en el cultivo de la pitahaya y operaciones poscosecha para exportación. De ese modo, los atributos distintivos de las frutas frescas para exportación, como su perecibilidad y los procesos de almacenamiento y transporte, representan desafíos que aún no han sido abordados en la literatura. Estos vacíos en investigaciones previas justifican el presente estudio, el cual busca desarrollar un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para el diseño de la cadena de suministro agroalimentaria de la pitahaya fresca para exportación.

Entre los años 2020 y 2024, Perú ha logrado diversificar y aumentar sustancialmente los envíos a mercados internacionales de agroproductos no tradicionales. Entre estos, sobresalen los arándanos, uvas, paltas y espárragos frescos, además de diversas frutas exóticas como la pitahaya. La pitahaya es una fruta exótica de color y forma muy atractivos; se presenta en diversos tipos, cuya diferencia más significativa es el color de su pulpa interna (Khatun et al., 2024). Tras un periodo de exportaciones mínimas, comprendido entre el año 2019 y 2022, las exportaciones de pitahaya peruana experimentaron un crecimiento exponencial a partir del 2023, cuando se registraron 101,4 toneladas valorizadas en US\$ 225 700. Esta cantidad se vio superada ampliamente en el año 2024, cuando se logró un hito al exportar 422 toneladas con un valor de US\$ 1,38 millones (Agroperú, 2025; Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2024).

En el contexto competitivo actual, el diseño de la cadena de suministro se presenta como una herramienta estratégica fundamental para que las empresas desarrollen una ventaja competitiva al permitirles tener operaciones con mayor grado de eficiencia y efectividad (Fathollahi-Fard et al., 2018). En consecuencia, el diseño de la cadena de suministro proporciona un marco de decisión basado en modelos matemáticos que otorgan una visión holística de la cadena de suministro y contribuye a las organizaciones para optimizar operaciones y afrontar retos de manera eficaz.

Como se mencionó, a pesar de los estudios realizados en el diseño de la cadena de suministro agroalimentaria en múltiples sectores y productos, se identifica una brecha de investigación sobre el diseño de cadenas de suministro de frutas exóticas de exportación, específicamente en la pitahaya, la cual requiere de la integración de eslabones y la planificación multiperiodo. De esta manera, este estudio plantea los siguientes objetivos de investigación:

- i) Desarrollar un marco de optimización estratégico-táctica integrada mediante un modelo MILP multiperiodo para el diseño de una cadena de suministro agroalimentaria de exportación orientado a la optimización del desempeño económico.
- ii) Analizar la sensibilidad de los parámetros productivos y comerciales para evaluar el impacto en el desempeño económico de la cadena de suministro de exportación.

Así, la presente investigación realiza aportes originales y contribuye significativamente tanto a la literatura académica como a las aplicaciones prácticas. En el ámbito académico, aborda la brecha entre los conocimientos teóricos ampliando la teoría de optimización en el contexto de la gestión de la cadena de suministro agroalimentaria para productos de exportación no tradicionales de alto valor como la pitahaya. Por otro lado, en las implementaciones prácticas, ofrece una guía para los profesionales gestores del sector y responsables de la toma de decisiones proporcionando una herramienta sólida para gestionar la cadena de suministro de pitahaya. Dicha herramienta orienta con la finalidad de maximizar los beneficios económicos en el mediano y largo plazo. Un aspecto distintivo de este modelo propuesto es la optimización de los flujos de caja anual en un horizonte de tiempo determinado.

Asimismo, el estudio proporciona un modelo MILP multiperiodo para el diseño integrado de la cadena de suministro de pitahaya, un cultivo cuya dinámica productiva y logística no ha sido formalmente modelada en la literatura. El modelo es novedoso porque incluye decisiones estratégicas y tácticas a la vez, así como parámetros logísticos y productivos propios del cultivo de la pitahaya, lo cual posibilita una representación práctica y realista para frutas exóticas emergentes en el Perú. Finalmente, la investigación se enfoca en el análisis detallado de la estructura de la red de cadena de suministro de pitahaya para exportación en un escenario real y el modelo se valida en la cadena de suministro de pitahaya de la zona agrícola del valle de Tambo, Arequipa.

## METODOLOGÍA

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo y aplicado. El caso de aplicación corresponde a una asociación de productores con 12 hectáreas destinadas a la producción de pitahaya. Los parámetros del modelo de programación lineal entera mixta (MILP) (costos, capacidad y niveles de producción) constituyen los datos de entrada del modelo. Las variables de decisión (flujos, cantidad de instalaciones y suministros) definen la configuración de la cadena de suministro y permiten optimizar los flujos de caja económico anuales. Este estudio está orientado al modelamiento matemático y diseño de la cadena de suministro de pitahaya para exportación mediante un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) multiperiodo. El modelo busca integrar decisiones estratégicas y tácticas

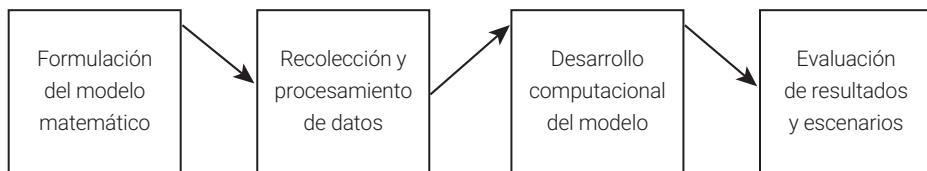
para maximizar el desempeño económico del sistema bajo restricciones de capacidad, demanda y disponibilidad.

Una cadena de suministro directa se conforma por proveedores, productores, centros de almacenamiento y acopiadores exportadores; a su vez, cuenta con flujos de producto, inventario y transporte establecidos en una perspectiva de planificación a diez años. La formulación del modelo busca maximizar el flujo de caja económico anual, expresado como la diferencia entre los ingresos por ventas y los costos totales de operación. Las restricciones del modelo abarcaron la capacidad de suministro, producción, almacenamiento, transporte y balances de flujo.

El modelo se implementó en Python y se ejecutó en la plataforma Google Colaboratory empleando librerías como PuLP y Pandas para la programación lineal entera mixta. La resolución se realizó mediante el *solver* CBC (COIN-OR Branch and Cut), el *solver* por defecto de PuLP. Con este se logró soluciones óptimas para cada periodo y proceso de la cadena de suministro. Para validar la robustez del modelo, se realizó un análisis de sensibilidad donde se examinó la variación de los resultados económicos frente a cambios de parámetros críticos productivos y comerciales. Este enfoque metodológico asegura que el estudio sea replicable y establece las bases para futuras ampliaciones del modelo hacia la sostenibilidad y circularidad de la cadena de suministro agroexportadora. La Figura 1 muestra las etapas de la investigación.

**Figura 1**

*Etapas de desarrollo de la investigación*

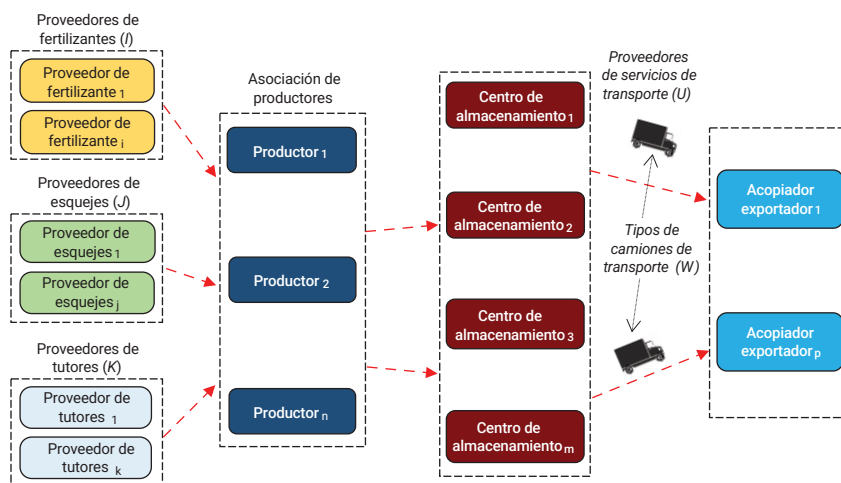


### **Formulación del modelo matemático de programación lineal**

En la Figura 2, se ilustra el diseño de una red de cadena de suministro multinivel para la pitahaya con fines de exportación, orientada a satisfacer las necesidades de los clientes acopiadores. El modelo propuesto considera el flujo de productos en sentido directo entre los diferentes niveles de la red.

**Figura 2**

Configuración de la cadena de suministro multinivel de pitahaya



Nota. Elaboración a partir de la propuesta de configuración óptima de la cadena de suministro. Los subíndices utilizados en cada componente de la cadena de suministro representan a  $i$  = proveedores de fertilizantes ( $i = 1, \dots, i$ ),  $j$  = proveedores de esquejes ( $J = 1, \dots, j$ ),  $k$  = proveedores de tutores ( $K = 1, \dots, k$ ),  $n$  = productores de la asociación ( $N = 1, \dots, n$ ),  $m$  = centros de almacenamiento ( $M = 1, \dots, m$ ),  $p$  = acopiadores exportadores ( $P = 1, \dots, p$ ).

### Notación de modelado

La definición de los componentes de la cadena de suministro en estudio se presenta en las tablas 1, 2 y 3.

**Tabla 1**

Conjuntos

Índice	Definición
T	Años del horizonte de planeamiento
I	Proveedores de fertilizantes
J	Proveedores de esquejes de pitahaya
K	Proveedores de tutores
U	Proveedores de transporte
W	Tipos de camiones de transporte

Nota. Los conjuntos se establecieron a través del mapeo de la red de suministro de pitahaya e identificación de actores y flujos de material relevantes. Entre ellos, los tutores son estructuras de postes de cemento o madera que brindan soporte físico para guiar el crecimiento de la pitahaya y sostener la planta en la etapa productiva de frutos.

**Tabla 2***Variables de decisión*

Variable	Definición
$YA_t$	1 si se instala un almacén en el periodo T, en caso contrario 0
$YSC_k$	1 si se selecciona los tutores del proveedor K, en caso contrario 0
$YR_k$	1 si los tutores comprados requieren renovación, en caso contrario 0
$QF_{it}$	Cantidad de fertilizante comprado del proveedor I en el periodo T (t)
$QE_j$	Cantidad de esquejes de pitahaya comprados del proveedor j (ud.)
$QT_k$	Cantidad de tutores adquiridos del proveedor K (ud.)
$QA_t$	Cantidad de centros de almacenamiento durante el periodo T (ud.)
$QPT_{uwt}$	Cantidad de pitahaya transportada por el proveedor U con el camión W en el periodo T (t)
$QV_{uwt}$	Cantidad de viajes por el proveedor U con el camión W en el periodo T (serv.)

**Tabla 3***Parámetros*

Parámetro	Definición
$CF_{it}$	Costo del fertilizante del proveedor I en el periodo T (S/ / t)
$CMF_{it}$	Capacidad máxima de suministro del proveedor I en el periodo T (t)
$CE_j$	Costo de esqueje de pitahaya del proveedor J en el periodo T (S/ / ud.)
$CME_j$	Capacidad máxima de suministro del proveedor j en el periodo T (ud.)
$CIT_k$	Costo por tutor inicial del proveedor K (S/ / ud.)
$CRT_k$	Costo de renovación de tutor del proveedor K (S/ / ud.)
$ICA_t$	Inversión en un centro de almacenamiento en el periodo T (S/)
$COA_t$	Costo de operación de un centro de almacenamiento en el periodo T (S/)
$CA_t$	Capacidad de almacenamiento de un almacén en el periodo T (t)
$CT_{ut}$	Costo de transporte por tonelada de la asociación de productores al acopiador exportador con el proveedor de transporte u en el periodo T (S/ / t)
$CC_{wut}$	Capacidad del camión tipo W del proveedor de transporte U en el periodo T (t)
$PP_t$	Producción proyectada de pitahaya en el periodo T (t)
PC	Cantidad de plantas de pitahaya cultivadas desde el inicio del horizonte de planificación (constante en el tiempo)
$CEP_t$	Calibre de exportación de pitahaya en el periodo T (%)
$CPU_t$	Costos productivos unitarios en el periodo T (S/ / ud.)
$PPE_t$	Precio de pitahaya de exportación en el periodo T (S/ / kg)
$RF_t$	Requerimiento de fertilizante por planta en el periodo T (kg / ud.)

### Función objetivo y restricciones del modelo matemático

La gestión eficiente de la cadena de suministro es decisiva para optimizar recursos limitados y reducir costos de producción y logísticos. Con ello, se garantiza la rentabilidad en un mercado competitivo. La función objetivo (FO) del modelo propuesto busca maximizar los flujos de caja económicos anuales y está representada por la ecuación 1.

$$\begin{aligned} \text{Maximizar } FCE_t = & \sum_{t \in T} PP_t CEP_t PPE_t - \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} QF_{it} CF_{it} - \sum_{t \in T} PC \cdot CPU_t - \\ & \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{w \in W} CT_{ut} QPT_{uwt} - \sum_{t \in T} ICA_t YA_t - \sum_{t \in T} COA_t QA_t - \sum_{j \in J} QE_j CE_j - \\ & \sum_{k \in K} CIT_k QT_k YSC_k - \sum_{k \in K} CRT_k QT_k YSC_k YR_k \end{aligned} \quad (1)$$

A fin de asegurar la claridad necesaria y articular de manera coherente el modelo matemático con la representación gráfica de la cadena de suministro de la Figura 2 y los conjuntos, variables de decisión y parámetros definidos en las tablas 1, 2 y 3, la ecuación 1 se desglosa en sus componentes fundamentales en la Tabla 4, donde se detalla la función de cada término.

**Tabla 4**

*Descripción detallada de los términos de la función objetivo*

Término matemático en la FO	Tipo de componente	Descripción detallada	Variables de decisión asociadas	Parámetros asociados
$\sum_{t \in T} PP_t CEP_t PPE_t$	Ingreso	Representa los ingresos por ventas generados en el periodo t. Se calcula como el producto de la producción proyectada (PP <sub>t</sub> ), porcentaje de calibre de exportación (CEP) y precio de venta (PPE <sub>t</sub> ).	-	PP <sub>t</sub> , CEP <sub>t</sub> , PPE <sub>t</sub>
$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} QF_{it} CF_{it}$	Costo operativo (OPEX)	Es el costo de adquisición de los fertilizantes. Corresponde al costo total de compra de fertilizante al proveedor i en el periodo t.	QF <sub>it</sub>	CF <sub>it</sub>
$\sum_{t \in T} PC \cdot CPU_t$	Costo operativo (OPEX)	Es el costo total asociado a las actividades agronómicas y de mantenimiento por planta cultivada (PC) en el periodo t.	-	PC <sub>t</sub> , CPU <sub>t</sub>
$\sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{w \in W} CT_{ut} QPT_{uwt}$	Costo logístico	Acumula el costo logístico de transportar la fruta (QPT <sub>uwt</sub> ) desde los productores hasta el acopiador exportador, utilizando el proveedor de transporte u y el tipo de camión w en el periodo t.	QPT <sub>uwt</sub>	CT <sub>ut</sub>

(continúa)

(continuación)

$\sum_{t \in T} ICA_t YA_t$	Costo de inversión (CAPEX)	Es el costo de inversión en habilitar nuevos centros de almacenamiento ( $YA_t$ ) en el periodo $t$ .	$YA_t$	$ICA_t$
$\sum_{t \in T} COA_t QA_t$	Costo operativo (OPEX)	Es el costo variable total de operar el centro de almacenamiento ( $QA_t$ ) en el periodo $t$ .	$QA_t$	$COA_t$
$\sum_{j \in J} QE_j CE_j$	Costo de inversión (CAPEX)	Es el costo total de adquisición de esquejes de pitahaya ( $QE_j$ ) al proveedor $j$ para la plantación del cultivo.	$QE_j$	$CE_j$
$\sum_{k \in K} CIT_k QT_k YSC_k$	Costo de inversión (CAPEX)	Es la inversión inicial en tutores, es decir, el costo de adquirir un nuevo sistema de tutores ( $QT_k$ ) del proveedor $k$ activado por la decisión de selección ( $YSC_k$ ).	$QT_k$ $YSC_k$	$CIT_k$
$\sum_{k \in K} CRT_k QT_k YSC_k YR_k$	Costo de inversión (CAPEX - recurrente)	Es el costo de renovación de tutores adicional incurrido cuando los tutores adquiridos requieren ser renovados, capturado por la interacción de las variables binarias de selección ( $YSC_k$ ) y renovación ( $YR_k$ ).	$QT_k YSC_k$ $YR_k$	$CRT_k$

Las restricciones que conforman el modelo de optimización se describen a continuación:

La ecuación 2 garantiza atender el requerimiento total por periodo de fertilizante orgánico para las plantas de pitahaya.

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} QF_{it} \cdot 1000 \geq PC \cdot RF_t \quad (2)$$

La restricción 3 establece la capacidad máxima de atención de los proveedores de fertilizantes para abastecer el requerimiento de fertilizante por periodo:

$$QF_{it} \leq CMF_{it} \forall i \in I; t \in T \quad (3)$$

El modelo considera una única compra de esquejes de pitahaya al inicio del horizonte de planificación (periodo  $t = 0$ ), la cual determina la cantidad de plantas (PC) que se establecerán y se mantendrán durante toda la vida útil del cultivo. Dado que durante la etapa de establecimiento inicial los esquejes de pitahaya presentan una tasa de mortalidad típica del 5 %, se incorpora un factor de seguridad. Por lo tanto, la ecuación 4 asegura que la cantidad total de esquejes comprados a los proveedores  $j$  sea suficiente para alcanzar la cantidad establecida de plantas, compensando las pérdidas esperadas.

$$\sum_{j \in J} QE_j \geq 1,05(PC) \quad (4)$$

La restricción 5 establece que la cantidad de esquejes a comprar será menor o igual a la capacidad de atención de los proveedores de esquejes.

$$QE_j \leq CME_j \quad \forall j \in J; t = 0 \quad (5)$$

La restricción representada por la ecuación 6 determina la elección de un solo proveedor de tutores. La ecuación 7 establece la relación entre los tutores y plantas de pitahaya. En el cultivo de pitahaya, cada planta requiere un tutor para su crecimiento y formación; un mismo tutor puede servir simultáneamente a dos plantas. Si se decide sembrar PC plantas de pitahaya, el número total de tutores requeridos es PC/2. Multiplicar por YSC<sub>k</sub> asegura que solo el proveedor elegido pueda tener compra positiva. Por otro lado, la ecuación 8 garantiza que la suma de tutores comprados a los proveedores sea exactamente igual al requerimiento total de tutores, lo que evita tanto el déficit como el excedente de tutores.

$$\sum_{k \in K} YSC_k = 1 \quad (6)$$

$$QT_k \leq \frac{PC}{2} \cdot YSC_k \quad \forall k \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} QT_k = \frac{PC}{2} \quad (8)$$

La restricción representada por la ecuación 9 garantiza la factibilidad logística del sistema al condicionar que el flujo de salida de pitahaya con calibre de exportación esté limitado por la capacidad de transporte, y definida por el número de viajes y la capacidad de los camiones.

$$QPT_{uwt} \leq CC_{wut} \cdot QV_{uwt} \quad (9)$$

En la restricción 10, al inicio del horizonte de planificación, no se tienen almacenes construidos previamente. La cantidad de almacenes en  $t = 1$  es igual a la decisión de instalación en ese periodo. Para los periodos siguientes, la cantidad de almacenes en el periodo  $t$  es igual a la cantidad del periodo anterior más las nuevas instalaciones. Con ello, se asegura que la capacidad disponible de almacenamiento sea suficiente para el periodo de producción determinado.

$$QA_1 = YA_1 \quad QA_t = QA_{t-1} + YA_t \quad \forall t \geq 2 \quad (10)$$

La ecuación 11 establece que la capacidad de almacenamiento debe ser igual o mayor a la producción anual de pitahaya con calibre de exportación.

$$CA_t \cdot QA_t \geq PP_t \cdot CEP_t \quad (11)$$

La ecuación 12 establece la condición para la instalación de un nuevo centro de almacenamiento. Esta inversión solo se materializa si la capacidad acumulada de almacenaje hasta el periodo anterior resulta insuficiente para almacenar la producción de pitahaya con calibre exportable del periodo actual. Se emplea una constante de valor suficientemente grande (M) para activar la restricción.

$$PP_t \cdot CEP_t - CA_t \cdot QA_t \cdot 1 \leq M \cdot YA_t \quad \forall t \geq 2 \quad (12)$$

Finalmente, las ecuaciones 13 y 14 establecen el dominio para las variables de decisión entera y binaria.

$$QF_{it}, QE_j, QT_k, QA_t, QPT_{uwt}, QV_{uwt} \in Z \text{ positivos} \quad (13)$$

$$YA_t, YSC_k, YR_k \in \{0, 1\} \quad (14)$$

El modelo de cadena de suministro propuesto se basa en los supuestos que se enuncian a continuación: la suficiencia de la capacidad instalada, el uso de parámetros deterministas conocidos con antelación, la absorción total por parte de las acopiadoras exportadoras de la producción de pitahaya que satisface el calibre de exportación y la canalización de todos los envíos a través de centros de almacenamiento utilizando exclusivamente servicios de transporte especializado para productos perecibles.

### Recolección de datos para el estudio de caso

La modelación evalúa el desempeño de la cadena de suministro de pitahaya facilitando la toma de decisiones estratégicas y tácticas. El modelo multiperiodo se aplicó para un horizonte de diez años por el ciclo productivo de la pitahaya, la que alcanza su rendimiento máximo entre el quinto y séptimo año. Esa información permitió evaluar inversiones estratégicas y maduración del cultivo a largo plazo. Para el caso de estudio, se consideró la frecuencia de cosecha de cuatro ciclos productivos durante los meses de diciembre a mayo de cada periodo. La recopilación de datos permitió parametrizar y validar el modelo de optimización de la cadena de suministro de pitahaya. Las tablas 5, 6 y 7 muestran la información de abastecimiento de esquejes, fertilizantes y sistema de conducción respectivamente.

**Tabla 5**

*Precios y oferta de esquejes de pitahaya*

Proveedor	Esqueje	Costo (S/ por ud.)	Capacidad de suministro (ud.)
Proveedor de esquejes 1	Sin raíz de 45 cm	2,00	20 000
Proveedor de esquejes 1	Con raíz de 45 cm	2,50	10 000

(continúa)

(continuación)

Proveedor	Esqueje	Costo (S/ por ud.)	Capacidad de suministro (ud.)
Proveedor de esquejes 2	Sin raíz de 45 cm	2,20	15 000
Proveedor de esquejes 2	Con raíz de 45 cm	3,00	8000
Proveedor de esquejes 3	Sin raíz de 50 cm	4,50	10 000

Nota. Con base en cotizaciones de proveedores nacionales.

**Tabla 6***Precios y oferta de fertilizante orgánico*

Proveedor	Fertilizante	Costo (S/ por t)	Capacidad de suministro (t)
RP	Compost de pollo	76,70	1725
RP	Compost de gallina	75,00	2640
SF	Compost de pollo	67,00	1150

Nota. Con base en datos de proveedores nacionales.

**Tabla 7***Costos y duración de tutores para el sistema de conducción*

Opción	Tutor	Costo (S/ por ud.)	Duración (años)
1	Concreto prefabricado	35,00	25-30
2	Concreto fabricado <i>in situ</i>	23,00	20-25
3	Eucalipto tratado	15,00	4-5

Nota. Con base en datos de proveedores locales y nacionales.

Sobre el almacenamiento, la conservación poscosecha es clave para cumplir con los estándares de calidad, el almacén modular refrigerado con energía fotovoltaica asegura la cadena de frío con una implementación rápida, menor inversión y fácil escalabilidad. En la Tabla 8, se detallan los parámetros de inversión, capacidad y costo operativo de un módulo de almacenamiento.

**Tabla 8***Costos y capacidad de un módulo de almacenamiento*

Parámetro	Unidad medida	Valor
Inversión	Soles	21 220,00
Capacidad de almacenamiento	Toneladas	12,00
Costo de operación anual	Soles	1400,00

Nota. Con base en el análisis técnico, los precios locales promedio y las condiciones operativas.

Los parámetros de transporte se detallan en la Tabla 9, obtenidos de empresas locales. Incluyen capacidad de unidades refrigeradas, costos por tonelada desde el valle de Tambo a Chíncha y frecuencia de viajes. Todo ello permite una representación coherente de los flujos del producto.

**Tabla 9**

*Costos, capacidades y disponibilidad de transporte*

Proveedor	Costo (S/ por t)	Capacidad de camión (t)	Disponibilidad
Empresa de transporte 1	540,00	17	3 veces por semana
Empresa de transporte 2	625,00	17	2 veces por semana
Empresa de transporte 3	480,00	8, 13 y 17	1 vez por semana
Empresa de transporte 4	565,00	17	1 vez por semana

*Nota.* Con base en información y cotización de proveedores locales y nacionales.

La producción anual total de pitahaya se proyecta considerando 12 hectáreas cultivadas con una densidad de 3164 plantas/ha. Para estimar la producción anual, se tiene en cuenta la capacidad de producción promedio de fruta por planta al año. La Tabla 10 detalla la proyección de producción promedio de pitahaya por año.

**Tabla 10**

*Producción promedio anual de fruta por planta de pitahaya en kilogramos*

Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
2,00	4,00	6,00	10,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00

*Nota.* Proyección basada en datos productivos de proyectos de cultivo anuales.

La pitahaya incrementa su rendimiento productivo anualmente y tiene una vida productiva de 15 años. De la producción total, el 80 % cumple con el calibre de exportación de 250 gr a 600 gr por fruto. Este porcentaje se fundamenta en información técnica proveniente de una empresa agroexportadora peruana que opera bajo condiciones similares a las del presente estudio. Por planta, entre el 78 % y 82 % de los frutos cosechados alcanzan el rango de peso con calibre de exportación; por lo tanto, se adopta un valor conservador del 80 % para la proyección de la producción total estimada para exportación por año detallada en la Tabla 11. Esta se calcula a partir de la producción promedio de fruta de pitahaya por planta al año (Tabla 10), el calibre de exportación y el área total cultivada.

**Tabla 11***Estimación anual de producción para exportación en toneladas*

Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
60,7	121,5	182,2	303,7	364,5	364,5	364,5	364,5	364,5	364,5

*Nota.* Proyección con base en rendimientos productivos, calibre de exportación y densidad de cultivo por ha.

La Tabla 12 muestra el requerimiento de fertilizante orgánico por planta durante el horizonte de planeamiento. A su vez, los costos unitarios de producción anual se presentan en la Tabla 13.

**Tabla 12***Requerimiento de fertilizante orgánico por planta (kg/planta/año)*

Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
4,00	4,00	6,00	8,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00

*Nota.* Cantidades basadas en experiencias nacionales.

**Tabla 13***Costos de producción unitarios (S//planta/año)*

Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
3,3	3,3	4,95	5,7	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05

*Nota.* Con base en datos primarios de costos de agua e insumos.

Los parámetros comerciales de precios de la pitahaya para exportación son esenciales para evaluar los flujos de caja económica del modelo de optimización de la cadena de suministro de pitahaya. La Tabla 14 muestra los precios de cada calibre de exportación de pitahaya.

**Tabla 14***Precios y porcentajes según calibre de exportación de pitahaya*

Calibre de exportación	% de la producción total	Precio promedio (S/ por kg)
250 gr-349 gr	30	2,16
350 gr-600 gr	50	4,32

*Nota.* Con base en fuentes primarias y precios promedio nacional.

## RESULTADOS

### Resultados del caso de estudio

La formulación de un modelo MILP permitió abordar simultáneamente la complejidad del diseño de la cadena de suministro integrando decisiones de nivel estratégico y táctico. A continuación, se presentan los resultados obtenidos al implementar el modelo de optimización propuesto en el estudio de caso. Las tablas 15, 16 y 17 presentan los resultados vinculados a la elección óptima de proveedores para los tres recursos estratégicos (esquejes, fertilizante y tutores) dentro de la cadena de suministro de pitahaya.

**Tabla 15**

*Resultados óptimos de compra de esquejes*

Proveedor	Esqueje	Cantidad (ud.)	Costo total (S/)
Proveedor esquejes 1	Sin raíz de 45 cm	20 000	40 000,00
Proveedor esquejes 1	Con raíz de 45 cm	4865	12 162,50
Proveedor esquejes 2	Sin raíz de 45 cm	15 000	33 000,00

*Nota.* Con base en los resultados del modelo de optimización, el costo total de adquisición de esquejes asciende a S/ 85 162,50 para las 12 ha de cultivo, se considera un 5 % de adicional.

**Tabla 16**

*Resultados óptimos de compra de fertilizante*

Año	Proveedor	Fertilizante	Cantidad (t)	Costo total (S/)
0	SF	Compost de pollo	152,00	11 248,00
1	SF	Compost de pollo	152,00	11 248,00
2	SF	Compost de pollo	228,00	16 872,00
3	SF	Compost de pollo	304,00	22 496,00
4-10	SF	Compost de pollo	342,00	25 308,00

*Nota.* Con base en los resultados del modelo de optimización.

**Tabla 17**

*Resultados óptimos de adquisición de tutores*

Opción	Tipo de tutor	Cantidad (ud.)	Costo total (S/)
1	Concreto prefabricado	0,00	0,00
2	Concreto fabricado <i>in situ</i>	19 934,00	458 482 00
3	Eucalipto tratado	0,00	0,00

*Nota.* Con base en resultados del modelo de optimización, se considera 5 % de adicional.

La Tabla 18 detalla los resultados óptimos del proceso de almacenamiento. El modelo determina una expansión progresiva de almacenes modulares: 4 de ellos en los primeros tres años, y 4 adicionales en el cuarto y quinto año. En total, fueron 8 almacenes modulares totales para cubrir la demanda en los diez años de horizonte de planeamiento.

**Tabla 18***Resultados óptimos de almacenamiento en soles*

Año	Cantidad de almacenes instalados	Inversión de instalación	Costo de operación anual	Costo total de almacenamiento
0	0	0,00	0,00	0,00
1	2	42 440,00	2800,00	45 240,00
2	1	21 220,00	4200,00	25 420,00
3	1	21 220,00	5600,00	26 820,00
4	3	63 660,00	9800,00	73 460,00
5	1	21 220,00	11 200,00	32 420,00
6-10	0	0,00	11 200,00	11 200,00

*Nota.* Con base en los resultados del modelo de optimización.

Los costos óptimos de transporte se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19***Optimización de costos de transporte en soles*

Año	Costo total de transporte
1	32 640,00
2	69 360,00
3	106 080,00
4	167 760,00
5-10	206 180,00

*Nota.* Con base en los resultados del modelo de optimización.

Por otro lado, el plan de contratación de transporte óptimo se presenta en la Tabla 20.

**Tabla 20***Planificación óptima de contratación de transporte*

Año	Proveedor	Capacidad de camión (t)	Cantidad de viajes	Costo de transporte (S/)
1	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
2	Emp. Transp. 1	17,00	4	36 720,0

(continúa)

(continuación)

2	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
3	Emp. Transp. 1	17,00	8	73 440,0
3	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
4	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
4	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
4	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
5	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
5	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
5	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
5	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0
6	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
6	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
6	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
6	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0
7	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
7	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
7	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
7	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0
8	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
8	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
8	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
8	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0
9	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
9	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
9	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
9	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0
10	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
10	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
10	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
10	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0

Nota. Con base en los resultados del modelo de optimización.

Los flujos de caja económicos óptimos se presentan en la Tabla 21 e integran los ingresos por ventas, costos operativos de producción, logísticos y ganancias. Esta proyección multianual ofrece una visión dinámica del desempeño económico de la cadena de suministro propuesta. Los flujos de caja anuales evidencian la eficiencia operativa de la cadena de suministro propuesta y su viabilidad a mediano y largo plazo, lo cual respalda decisiones sobre inversiones, adquisiciones, contratación logística y diseño de red con una base económica sólida.

**Tabla 21***Flujos de caja económicos óptimos en soles*

Año	Ingresos por ventas	Costos operativos	Inversión	Flujo de caja
0	0	136 542,4	543 644,5	-680 186,9
1	213 228,0	214 422,4	0,0	-1 194,4
2	426 456,6	299 593,6	0,0	126 863,0
3	639 684,9	371 813,6	0,0	267 871,3
4	1 066 141,4	534 202,4	0,0	531 939,0
5	1 279 369,7	531 582,4	0,0	747 787,3
6	1 279 369,7	510 362,4	0,0	769 007,3
7	1 279 369,7	510 362,4	0,0	769 007,3
8	1 279 369,7	510 362,4	0,0	769 007,3
9	1 279 369,7	510 362,4	0,0	769 007,3
10	1 279 369,7	510 362,4	0,0	769 007,3

*Nota.* Con base en los resultados del modelo de optimización.

### **Análisis de sensibilidad**

En esta sección, se realiza un análisis de sensibilidad sobre los parámetros del precio y rendimiento productivo para evaluar diversos escenarios y el comportamiento de los flujos de caja económicos en el horizonte de diez años. En la Tabla 22, se muestra que ambos parámetros presentan elasticidades mayores a 1,60 y se evidencian diferencias significativas en la variabilidad generada en el flujo de caja por cada variación de parámetro.

**Tabla 22***Sensibilidad del flujo de caja total ante variaciones del precio y rendimiento productivo*

Parámetro	Variación	Variación en el flujo de caja total	Elasticidad
Precio	-10 %	-20,71 %	2,07
Precio	-20 %	-41,43 %	2,07
Precio	-30 %	-62,14 %	2,07
Rendimiento	-10 %	-16,54 %	1,65
Rendimiento	-20 %	-34,47 %	1,72
Rendimiento	-30 %	-50,79 %	1,69

*Nota.* Elasticidad calculada como (% cambio en flujo de caja) / (% cambio en el parámetro). Valores > 1 indican sensibilidad alta.

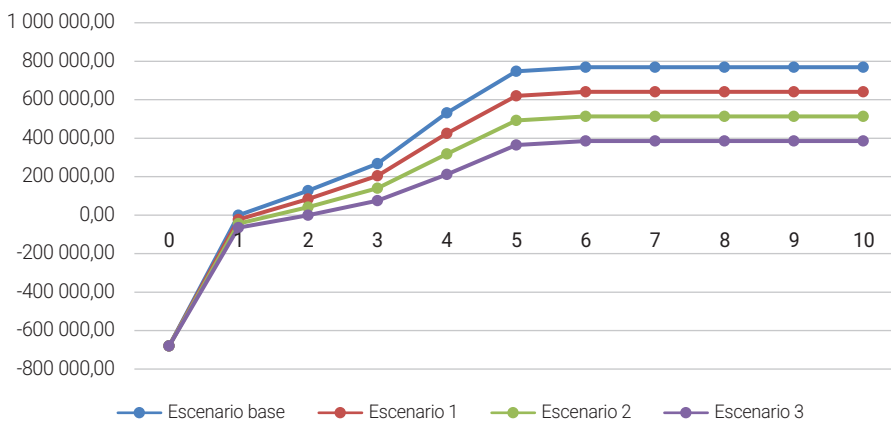
El análisis de sensibilidad revela diferencias significativas en la variabilidad generada por cada parámetro. El precio de venta presenta una elasticidad constante de 2,07. Ello indica que una disminución del 10 % en el precio reduce el flujo de caja total en 20,71 %, el cual es aproximadamente el doble de sensible que la variación del precio, relación lineal que se mantiene en todo el rango analizado de variación del 10 % al 30 %.

Por otro lado, el rendimiento productivo presenta una elasticidad promedio de 1,69, ligeramente menor que la del precio. Una reducción del 10 % en rendimiento genera una reducción del 16,54 % en el flujo de caja. Si bien esta sensibilidad sigue siendo alta, la variabilidad generada por el rendimiento es aproximadamente un 18 % menor que la inducida por el precio (elasticidades de 2,07 frente a 1,69). Esta comparación evidencia el principal aporte del análisis de sensibilidad: el precio constituye el parámetro crítico dominante en términos de variabilidad financiera, aunque el rendimiento productivo no puede ser desestimado.

La Figura 3 presenta la sensibilidad y el comportamiento del flujo de caja económico anual a lo largo del horizonte de planeamiento (diez años) bajo cuatro escenarios de precio de venta: base (sin reducción), y reducciones del 10 %, 20 % y 30 %. Se observa que, durante los primeros dos años (periodo de inversión inicial), todos los escenarios presentan flujos negativos similares, dado que la inversión de establecimiento del cultivo no depende del precio de venta. Sin embargo, a partir del tercer año, las curvas se separan progresivamente. La brecha entre escenarios se amplía año tras año debido al efecto acumulativo de los ingresos reducidos: a medida que se reduce el precio de venta de pitahaya, también disminuye el valor de la función objetivo. La Figura 3 muestra el impacto directo de la reducción del precio de venta en los flujos de caja anual.

**Figura 3**

*Cambios de flujo de caja por variación del precio de venta*

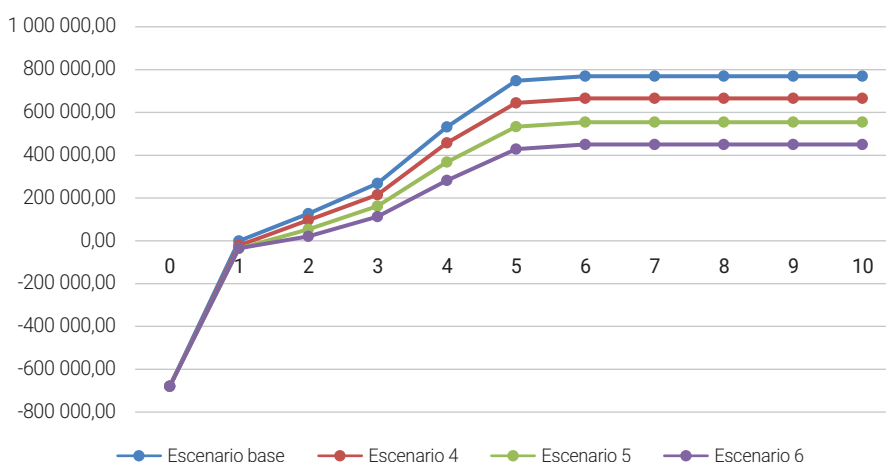


*Nota.* Resultados del modelo de optimización. El escenario 1 implica una reducción del precio de venta del 10 %; el escenario 2, una reducción del 20 %; y el escenario 3, una reducción del 30 %.

Por otro lado, la Figura 4 muestra la sensibilidad de la función objetivo a la reducción en el rendimiento productivo de las plantas de pitahaya. Se muestra la evolución anual del flujo de caja bajo tres escenarios de reducción del rendimiento productivo: 10 % (escenario 4), 20 % (escenario 5) y 30 % (escenario 6) en comparación con el escenario base. Al igual que en el caso del precio, los primeros años presentan flujos negativos similares entre escenarios, dado que la inversión inicial no depende del rendimiento. A partir del tercer año, las curvas de los flujos de caja económico se alejan, aunque con una separación menos pronunciada que en la Figura 3. Con ello, se identifica que la variación de los niveles de rendimiento productivo de la pitahaya tiene un efecto en los costos almacenamiento y transporte, y se asocia principalmente a factores como plagas, enfermedades y eventos climáticos extremos.

**Figura 4**

*Cambios de flujo de caja por variación del rendimiento productivo*



*Nota.* Resultados del modelo. El escenario 4 involucra una reducción del rendimiento productivo del 10 %; el escenario 5, una reducción del 20 %; y el escenario 6, una reducción del 30 %.

Las figuras 3 y 4 complementan el análisis cuantitativo de la Tabla 22 al mostrar la evolución temporal de los flujos de caja año a año. Mientras que la Tabla 22 resume el impacto total en el horizonte de diez años, las figuras 3 y 4 permiten identificar el momento en que divergen los escenarios (año 3), la magnitud de la brecha en cada periodo y el comportamiento acumulativo de las reducciones. Esta información temporal es relevante para la toma de decisiones sobre cuándo implementar estrategias de mitigación.

## DISCUSIÓN

En la investigación, se desarrolló y aplicó un modelo de programación lineal entera mixta multiperiodo para optimizar el diseño de una cadena de suministro de pitahaya para la

exportación. En esta sección, se presenta un análisis crítico de los resultados obtenidos, situando los hallazgos dentro de los antecedentes considerados para justificar las contribuciones únicas que aporta este trabajo. Los hallazgos muestran que el modelo propuesto tiene la capacidad de integrar dentro de un marco único decisiones estratégicas y tácticas que generan una cadena de suministro económicamente viable y eficiente operativamente. Esta investigación amplía el suministro al considerar tipos específicos de tutores y esquejes, lo cual es esencial para la rentabilidad en cultivos de gran valor.

En ese sentido, el modelo prioriza la diversificación y eficiencia en términos de costo al adquirir insumos y activos críticos para la producción. La solución para los esquejes combina estratégicamente las ofertas de dos proveedores y tres variedades de esquejes con el fin de minimizar el costo total de adquisición; ello reduce el riesgo operativo al garantizar el abastecimiento sin estar supeditado a una única fuente. Se observó que la producción exportadora de pitahaya necesita equilibrar costos, calidad y normativas; para ello, la fabricación local de tutores de concreto emerge como decisión estratégica clave. Con esta, el modelo prioriza el costo del ciclo de vida y minimiza gastos de reemplazo a diez años, de modo que se configura como un activo de larga duración.

Entre los resultados más destacados, se tiene el incremento de la capacidad de almacenamiento de manera gradual a través de la instalación de almacenes modulares con equipos de frío y energía fotovoltaica. Esta decisión estratégica mitiga la dependencia a operadores logísticos y reduce la inversión inicial. Para ello, el modelo sigue un plan de inversión progresivo alineado al crecimiento productivo que evita sobredimensionamiento inicial. A diferencia de modelos previos en productos no perecederos como trigo (Hosseini-Motlagh et al., 2021) o nuez (Salehi-Amiri et al., 2021), que utilizan infraestructura fija, el presente estudio incorpora modularidad dinámica enfatizando una ventaja clave del enfoque multiperiodo: la capacidad de adaptar la configuración de la cadena de suministro a los distintos niveles de producción que ocurren a lo largo del horizonte de planificación. Ello permite un diseño adaptable y actúa como mecanismo estratégico para estabilizar la calidad, reducir pérdidas poscosecha, disminuir la dependencia de operadores logísticos externos, y responde a un entorno agroexportador con variabilidad productiva creciente y mayores requerimientos logísticos.

En cuanto a la planificación del transporte, el modelo genera un plan de contratación óptimo combinando múltiples proveedores y capacidades vehiculares por periodo. Lo cual aventaja a enfoques que solo optimizan flujos agregados entre nodos. Este resultado evidencia que el modelo permite tomar decisiones tácticas de alto nivel considerando la realidad operativa en la que la capacidad de un solo proveedor puede ser insuficiente y la que sería difícil identificar mediante una planificación manual. Con ello, el modelo propuesto asegura la viabilidad de las operaciones logísticas.

Al respecto del flujo de caja proyectado, este es la verificación integral del diseño propuesto validando de manera económica las decisiones tomadas con flujos de caja estables y positivos a partir del segundo año. El flujo inicial es propio de inversiones significativas en infraestructura, activos e insumos. Su sensibilidad anual fue evaluada considerando fluctuaciones del 10 % al 30 % en rendimiento y precio de la pitahaya, lo cual disminuiría el flujo de caja anual. Sin embargo, la cadena de suministro demuestra viabilidad y resiliencia en el tiempo con flujos de caja positivos.

Finalmente, se identificó que la literatura actual es sólida, pero que se enfoca en productos con características logísticas y de valor diferentes a las frutas exóticas. En comparación con Hosseini-Motlagh et al. (2021) y Salehi-Amiri et al. (2021), cuyos modelos para el trigo y nuez, respectivamente, consideran flujos directos e inversos para productos con menor sensibilidad poscosecha, esta investigación se enfoca en optimizar la logística directa de la pitahaya, donde la viabilidad comercial del producto está supeditada a una logística óptima por la alta perecibilidad del producto. Por otro lado, el modelo de Clavijo-Buritica et al. (2023) para el café se centra en un flujo hacia adelante; en contraste, este estudio amplía el alcance al incluir decisiones multiperiodo y enfocar la dinámica real de cultivos como la pitahaya en contextos emergentes. Asimismo, mientras Rajabi-Kafshgar et al. (2023) se expande a la valorización de residuos del pistacho, el modelo aquí propuesto prioriza la eficiencia operativa al considerar en el diseño los detalles técnicos y logísticos de la pitahaya como fruta de exportación.

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo de programación lineal entera mixta multiperiodo para el diseño óptimo de la cadena de suministro de pitahaya para exportación de una zona agrícola del sur del Perú con condiciones específicas de clima y suelo. El modelo integra y sincroniza decisiones estratégicas y tácticas vinculando los procesos de abastecimiento, producción, almacenamiento y transporte, y seleccionando óptimamente proveedores de esquejes y fertilizante. Se determinó que fabricar tutores de concreto es lo más rentable en el largo plazo.

Las decisiones estratégicas incluyeron la instalación progresiva de almacenes, mientras que las decisiones tácticas optimizaron la planificación del transporte de pitahaya hacia los acopiadores exportadores, minimizando los costos totales. La solidez del flujo de caja respalda el diseño integrado y optimizado, de modo que es viable económicamente la producción para exportación de un producto de alto valor como la pitahaya.

Se ha identificado que la configuración óptima genera mayores beneficios económicos, lo cual fortalece la competitividad de los agricultores del valle de Tambo, Arequipa. Los resultados del modelo de optimización proporcionan una base técnica para decisiones

estratégicas y tácticas de los productores de pitahaya orgánica, lo cual establece una base sólida para el desarrollo competitivo del sector agrícola en el valle de Tambo, Arequipa.

Esta investigación sienta las bases para futuros estudios que fortalezcan la competitividad de la cadena de suministro agroalimentaria considerando la incorporación de incertidumbre mediante programación estocástica, la integración de criterios de sostenibilidad y la extensión del modelo para incluir logística inversa bajo principios de economía circular.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

El autor declara no tener conflictos de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

**Erberth Cruz Paredes:** conceptualización, investigación, análisis formal, recursos, metodología, *software*, escritura: borrador original, escritura: revisión y edición, validación.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IA GENERATIVA

No se ha utilizado IA generativa.

## REFERENCIAS

- Agroperú. (2025, 22 de enero). *Pitahaya peruana alcanzó récord de exportaciones en 2024*. <https://www.agroperu.pe/pitahaya-peruana-alcanzo-record-de-exportaciones-en-2024/>
- Ali, S. M., Moktadir, A., Kabir, G., Chakma, J., Rumi, J. U., & Islam, T. (2019). Framework for evaluating risks in food supply chain: implications in food wastage reduction. *Journal of Cleaner Production*, 228, 786-800. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.322>
- Chandra, C., & Grabis, J. (2016). *Supply Chain Configuration. Concepts, solutions, and applications* (2.ª ed.). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3557-4>
- Clavijo-Buritica, N., Triana-Sanchez, L., & Escobar, J. W. (2023). A hybrid modeling approach for resilient agri-supply network design in emerging countries: Colombian coffee supply chain. *Socio-Economic Planning Sciences*, 85, 101431. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101431>
- Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghahi-Keshteli, M., & Mirjalili, S. (2018). Multi-objective stochastic closed-loop supply chain network design with social considerations. *Applied Soft Computing*, 71, 505-525. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.07.025>

- Galán-Martín, A., Pozo, C., Guillén-Gosálbez, G., Vallejo, A. A., & Jiménez Esteller, L. (2015). Multi-stage linear programming model for optimizing cropping plan decisions under the new Common Agricultural Policy. *Land Use Policy*, 48, 515-524. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.06.022>
- Gholian-Jouybari, F., Hajiaghaei-Keshteli, M., Bavar, A., Bavar, A., & Mosallanezhad, B. (2023). A design of a circular closed-loop agri-food supply chain network - A case study of the soybean industry. *Journal of Industrial Information Integration*, 36, 100530. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100530>
- Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Abbasi Saadi, F. (2021) Strategic optimization of wheat supply chain network under uncertainty: a real case study. *Operational Research International Journal*, 21, 1487-1527. <https://doi.org/10.1007/s12351-019-00515-y>
- Khatun, T., Sharker Nirob, M. A., Bishshash, P., Akter, M., & Uddin, M. S. (2024). A comprehensive dragon fruit image dataset for detecting the maturity and quality grading of dragon fruit. *Data in Brief*, 52, 109936. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109936>
- Kumar, M., Raut, R. D., Sharma, M., Choubey, V. K., & Paul, S. K. (2022). Enablers for resilience and pandemic preparedness in food supply chain. *Operations Management Research*, 15, 1198-1223. <https://doi.org/10.1007/s12063-022-00272-w>
- Laínez-Aguirre, J. M., & Puigjaner, L. (2015). *Advances in integrated and sustainable supply chain planning*. Springer International Publishing.
- Liu, C. L., & Lee, M. Y. (2018). Integration, supply chain resilience, and service performance in third-party logistics providers. *The International Journal of Logistics Management*, 29(1), 5-21. <https://doi.org/10.1108/IJLM-11-2016-0283>
- Mangla, S. K., Luthra, S., Rich, N., Kumar, D., Rana, N. P., & Dwivedi, Y. K. (2018). Enablers to implement sustainable initiatives in agri-food supply chains. *International Journal of Production Economics*, 203, 379-393. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.012>
- Martel, A., & Klibi, W. (2016). *Designing value-creating supply chain networks*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28146-9>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2024). *Dinámica de la producción y precios de la pitahaya en el Perú, 2019 – 2024 (a julio)*. Dirección de Estudios Económicos – Dirección General de Políticas Agrarias. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/7087896/5543457-dinamica-de-la-produccion-y-precios-de-la-pitahaya-en-el-peru.pdf?v=1729086584>
- Naik, G., & Suresh, D. N. (2018). Challenges of creating sustainable agri-retail supply chains. *IIMB Management Review*, 30, 270-282. <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2018.04.001>

- Onggo, B. S., Panadero, J., Corlu, C. G., & Juan, A. A. (2019). Agri-food supply chains with stochastic demands: a multi-period inventory routing problem with perishable products. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 97, 101970. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.101970>
- Rajabi-Kafshgar, A., Gholian-Jouybari, F., Seyedi, I., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2023). Utilizing hybrid metaheuristic approach to design an agricultural closed-loop supply chain network. *Expert Systems with Applications*, 217, 119504. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119504>
- Salehi-Amiri, A., Zahedi, A., Akbapour, N., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110821>
- Sufiyan, M., Haleem, A., Khan, S., & Khan, M. I. (2019). Evaluating food supply chain performance using hybrid fuzzy MCDM technique. *Sustainable Production and Consumption*, 20, 40-57. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.03.004>
- Tsolakis, N. K., Keramydas, C. A., Toka, A. K., Aidonis, D. A., & Iakovou, E. T. (2014). Agrifood supply chain management: a comprehensive hierarchical decision-making framework and a critical taxonomy. *Biosystems Engineering*, 120, 47-64. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.10.014>
- Vazquez-Noguerol, M., Comesana-Benavides, J., Poler, R., & Prado-Prado, J. C. (2022). An optimisation approach for the e-grocery order picking and delivery problem. *Central European Journal of Operations Research*, 30, 961-990. <https://doi.org/10.1007/s10100-020-00710-9>
- Vieira, A. A. C., Figueira, J. R., & Fragoso, R. (2023). A multi-objective simulation-based decision support tool for wine supply chain design and risk management under sustainability goals. *Expert Systems with Applications*, 232, 120757. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120757>
- Xu, L., Mak, E., Proselkov, Y., & Brintrup, A. (2024). Towards autonomous supply chains: definition, characteristics, conceptual framework, and autonomy levels. *Journal of Industrial Information Integration*, 42, 100698. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100698>
- Zhao, G., Vázquez-Noguerol, M., Liu, S., & Parado-Prado, J. C. (2024). Agri-food supply chain resilience strategies for preparing, responding, recovering, and adapting in relation to unexpected crisis: a cross-country comparative analysis from the COVID-19 pandemic. *Journal of Business Logistics*, 45(1), e12361. <https://doi.org/10.1111/jbl.12361>
- Zhao, X., Wang, P., & Pal, R. (2021). The effects of agro-food supply chain integration on product quality and financial performance: evidence from Chinese agro-food processing business. *International Journal of Production Economics*, 231, 107832. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107832>