

Diseño viable y resiliente de la cadena de suministro de panela: un estudio con dinámica de sistemas

Carlos Javier Guerrero-Useda¹

Jeysser Johan Otero Díaz²

Andrés Polo Roa¹



Artículo de investigación

Fecha de recepción: 21 de febrero de 2025 ■ **Fecha de aceptación:** 11 de abril de 2025 ■ **Fecha de publicación:** 12 de junio de 2026

✉ Programa de Ingeniería Industrial, Universidad de Cundinamarca, Soacha, Colombia. jjotero@ucundinamarca.edu.co

Guerrero-Useda, C. J., Otero Díaz, J. J., & Polo Roa, A. (2026). Diseño viable y resiliente de la cadena de suministro de panela: un estudio con dinámica de sistemas. *Revista de Investigaciones Uniagraria*, 13(1), 19-40.

Resumen

Las cadenas de suministro agroalimentarias enfrentan entornos de alta incertidumbre (clima, logística, demanda) que amplifican el efecto dominó ante disrupciones locales. Más allá de la resiliencia puntual, la viabilidad enfatiza la capacidad de adaptación sostenida del sistema, integrando agilidad y sostenibilidad a lo largo del tiempo. En este trabajo se propone y evalúa un marco de viabilidad para la cadena de suministro de panela, que integre resiliencia, agilidad y sostenibilidad, utilizando dinámica de sistemas (DS) y la analogía con el sistema inmune del cuerpo humano. Para esto, se construyó un modelo DS que representa los eslabones agrícolas de transformación, homogenización y empaque. Se analizaron cinco escenarios: 1) cadena base; 2) interrupción agrícola; 3) interrupción de transporte; 4) incremento súbito de demanda, y 5) reducción de capacidad de almacenamiento. Se calcularon indicadores de desempeño (nivel de servicio, costos de transporte e inventarios por eslabón) y un Índice de Resiliencia (SCRI) que combina servicio y costo normalizado. La cadena exhibe mayor fragilidad ante choques en el eslabón agrícola (servicio 0.543) y en transporte (servicio 0.746), con efectos dominó sobre homogenización y empaque. El incremento de demanda mostró mayor resiliencia (servicio 0.996; SCRI $\approx$ 0.999) por la respuesta coordinada de producción e inventarios. La reducción de almacenamiento elevó costos de transporte ($\approx$ \$ 105,1 millones), pese a un servicio alto (0.93), revelando un trade-off costo-servicio. El marco traduce principios inmunológicos (barreras, redundancia pasiva, activación adaptativa) en políticas de inventario de mitigación, flexibilidad logística y planes de contingencia, y ofrece un indicador sintético (SCRI) para decisiones tácticas. La viabilidad de la cadena depende de blindar el eslabón agrícola, optimizar *buffers* e inventarios de mitigación y coordinar transporte bajo restricciones de almacenamiento. El enfoque DS-inmunológico facilita el diseño de respuestas anticipatorias y rutas de recuperación costo-efectivas.

Palabras clave: agroindustria de la panela, dinámica de sistemas, índice de resiliencia, sistema inmune, sostenibilidad, viabilidad de cadenas de suministro.

¹ Maestría en ingeniería, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia.

² Programa de Ingeniería Industrial, Universidad de Cundinamarca, Soacha, Colombia

Viable and Resilient Design of the Panela Supply Chain: A System Dynamics Study

Abstract

Agri-food supply chains face highly uncertain environments (climate, logistics, demand) that amplify domino effects under local disruptions. Beyond punctual resilience, **viability** emphasizes the system's sustained adaptive capacity, integrating agility and sustainability over time. This study proposes and evaluates a viability framework for the panela supply chain that integrates resilience, agility, and sustainability, using System Dynamics (SD) and the immune system analogy. An SD model was developed to represent the agricultural, transformation, homogenization, and packaging stages. Five scenarios were analyzed: (i) baseline chain, (ii) agricultural disruption, (iii) transportation disruption, (iv) sudden demand surge, and (v) reduced storage capacity. Performance indicators (service level, transportation costs, and inventories by stage) and a Supply Chain Resilience Index (SCRI) combining service and normalized cost were calculated. The chain exhibits greater fragility under shocks at the agricultural stage (service 0.543) and transportation stage (service 0.746), with domino effects on homogenization and packaging. The demand surge showed the highest resilience (service 0.996; SCRI $\approx$ 0.999) due to coordinated production and inventory response. Reduced storage capacity significantly increased transportation costs ($\approx$ USD 105.1 million) despite a high service level (0.93), revealing a service–cost trade-off. The framework translates **immunological principles** (barriers, passive redundancy, adaptive activation) into mitigation inventory policies, logistical flexibility, and contingency plans, while providing a synthetic indicator (SCRI) for tactical decision-making. The chain's viability depends on securing the agricultural stage, optimizing buffers and mitigation inventories, and coordinating transportation under storage restrictions. The SD–immune-based approach facilitates the design of anticipatory responses and cost-effective recovery paths.

Keywords: supply chain viability, system dynamics, panela agroindustry, immune system, sustainability, resilience index.

Introducción

Las cadenas de suministro (CS) configuradas en la era de la globalización se caracterizan por ser estructuras predominantemente estáticas, lo que limita su capacidad de resiliencia y adaptabilidad (Ivanov & Dolgui, 2020). El siglo XXI ha estado marcado por hitos disruptivos como la revolución tecnológica de la Industria 4.0, la pandemia del Covid-19 y la creciente preocupación frente al cambio climático, cuyos efectos han impactado de manera significativa el desempeño de las cadenas de suministro a nivel global (Balezantis *et al.*, 2023). Estos fenómenos se vieron amplificados por transformaciones en el comportamiento de los consumidores, quienes recurrieron a compras de pánico de productos alimenticios de larga duración (Loxton *et al.*, 2020), reconfigurando percepciones y prioridades en torno a la gestión de las cadenas de suministro (MacCarthy *et al.*, 2022).

Diversos estudios han mostrado que la pandemia interrumpió el desarrollo de capacidades resilientes en las cadenas de suministro (Barman *et al.*, 2021; Sarkis *et al.*, 2020). Aunque se implementaron estrategias tanto proactivas como reactivas, estas resultaron insuficientes para neutralizar los efectos negativos (Ozdemir *et al.*, 2022). En paralelo, la gestión tradicional de las cadenas se ha ampliado hacia enfoques que integran capacidad de respuesta y agilidad, lo cual incrementó la complejidad de los sistemas y reorientó la atención hacia la gestión del riesgo (Dai, 2016; Esmaeili-Najafabadi *et al.*, 2021; A. R. Singh *et al.*, 2012).

Eventos recientes, como fenómenos climáticos extremos o crisis sanitarias, han evidenciado la falta de viabilidad en muchas cadenas de suministro, al colapsar por interrupciones en nodos locales, la propagación del efecto dominó y la pérdida de conectividad (Chervenkova & Ivanov, 2023). Tales interrupciones han impactado gravemente múltiples dimensiones del desempeño, y las empresas han mostrado dificultades para recuperarse de las pérdidas económicas derivadas (Glas *et al.*, 2021). Aunque existen herramientas de

planificación para distintos horizontes temporales y niveles de agregación —desde estrategias de largo plazo hasta métodos operativos como MPS o MRP—, el reto central sigue siendo cómo diseñar cadenas capaces de afrontar eventos disruptivos (Srinivasan & Tew, 2017).

Este desafío es especialmente relevante en el sector agroalimentario, caracterizado por alta complejidad, incertidumbre y múltiples interdependencias (Romero-Riaño *et al.*, 2020). Las disrupciones recientes han puesto de relieve la vulnerabilidad de la producción agrícola ante perturbaciones externas, revelando conexiones olvidadas entre agricultura, sociedad y economía (Anderson *et al.*, 2021; Phillips *et al.*, 2024). Al mismo tiempo, los consumidores demandan mayores garantías de calidad y seguridad en los productos agrícolas, lo cual eleva los requisitos de desempeño de las cadenas agroalimentarias (Z. Li *et al.*, 2022). Esta combinación de incertidumbre y presión sobre la seguridad alimentaria proyecta riesgos crecientes para la disponibilidad de alimentos (Bassett *et al.*, 2021). Por ello, la construcción de cadenas agroalimentarias adaptables, reconfigurables, resilientes y viables se ha convertido en una prioridad de investigación y de gestión (Ivanov, 2024).

En este contexto, resulta imperativo adoptar enfoques de gestión resiliente que integren sostenibilidad como eje central, superando la visión tradicional en la que esta se limitaba a aspectos logísticos. Hoy, la sostenibilidad se reconoce como una condición estructural de las cadenas de suministro modernas, particularmente en ámbitos como la distribución y el transporte. Sin embargo, aún persiste la necesidad de técnicas de modelado que permitan analizar escenarios de crisis y guiar la construcción de cadenas agroalimentarias viables en el largo plazo.

La problemática de interrupciones en las cadenas de suministro puede comprenderse mediante la analogía con el cuerpo humano, constantemente expuesto a agentes patógenos. El sistema inmune responde con células B y T,

que eliminan o neutralizan las amenazas (Khan *et al.*, 2019). Siguiendo esta lógica, un “sistema de suministro saludable” requiere no solo soluciones puntuales, sino la capacidad de sostener resiliencia en el tiempo, es decir, viabilidad (Ivanov, 2022). Esta analogía se alinea con investigaciones que conciben la resiliencia y la viabilidad como atributos que aseguran la “salud” de la cadena frente a disrupciones (Ivanov, 2024). No obstante, la mayoría de las cadenas carecen de lineamientos para modelar impactos de interrupciones bajo condiciones extremas (Najafi *et al.*, 2024), lo que provoca reacciones tardías, coordinación deficiente y periodos prolongados de escasez (Queiroz *et al.*, 2022). En contraste, un diseño “inmune” de la cadena podría fomentar respuestas más rápidas y efectivas.

Si bien los enfoques actuales ofrecen marcos útiles, pocos resultan lo suficientemente flexibles y universales para enfrentar una amplia gama de eventos inesperados. En esta medida, el diseño de redes logísticas puede adaptar funciones del sistema inmunológico, que aporta principios como inmunidad innata, adaptativa y degeneración funcional (Liu *et al.*, 2023; Glas *et al.*, 2021). Según Ivanov (2024), en vista de que aún existe escasez de modelos formales que integren explícitamente mecanismos inmunológicos en el diseño de la resiliencia de cadenas de suministro.

En el presente artículo se propone un marco para la viabilidad de cadenas agroalimentarias inspirado en el sistema inmune, capaz de actualizar planes de corto plazo y preparar a la red para riesgos futuros. Aunque es aplicable a riesgos operativos y disruptivos, aquí se centra en estos últimos. Con ello se avanza hacia un sistema integral de gestión de interrupciones, al tiempo que se identifican líneas de investigación prospectivas para enriquecer la literatura existente sobre resiliencia de cadenas de suministro.

El enfoque propuesto adquiere especial relevancia en el sector agroindustrial colombiano, que busca insertarse competitivamente en mercados internacionales con productos como

aguacate, cacao, frutas, hortalizas y panela. Estos sectores enfrentan demandas crecientes en materia de inocuidad y calidad, al tiempo que lidian con la dispersión geográfica, la volatilidad climática y la heterogeneidad tecnológica de los productores. Estos factores plantean la necesidad de innovaciones que fortalezcan la capacidad de respuesta y viabilidad de las cadenas, asegurando un desempeño robusto frente a los retos actuales y futuros.

Revisión de literatura

A continuación, se identifican y analizan aportes recientes sobre la viabilidad en el diseño de redes de cadenas de suministro (SCND, sigla del nombre en inglés), con el fin de cartografiar el estado del arte y evidenciar las brechas de investigación vigentes. Para ello, se revisan las principales tipologías de diseño de redes de cadenas de suministro (SCND) y se contrasta su alcance. De este examen se desprende que abordar la viabilidad en SCND mediante una analogía con el sistema inmune integrada con técnicas de inteligencia artificial (IA) constituye una línea de estudio original y aún poco explorada.

Viabilidad en diseño de redes de cadenas de suministro (SCND)

La viabilidad en cadenas de suministro se entiende como la capacidad del sistema para sostenerse y perdurar en contextos cambiantes mediante el rediseño estructural y la replanificación del desempeño con impactos de largo plazo (Ivanov, 2021). A diferencia de los enfoques centrados en conservar estados estacionarios, la viabilidad subraya la adaptación continua de la red para garantizar su desempeño bajo interrupciones (Ivanov & Das, 2020). En esta línea, la naturaleza de la incertidumbre condiciona el lente de análisis: cuando las perturbaciones son conocidas o mensurables, la visión basada en estabilidad resulta adecuada; cuando predominan los “unknown-unknowns”, la perspectiva de viabilidad ofrece una cobertura conceptual y operativa más amplia frente al abanico completo de eventos (Chervenkova &

Ivanov, 2023). Pese a estos avances, los estudios que tratan explícitamente la viabilidad bajo incertidumbre verdaderamente no anticipable siguen siendo escasos (Ramani *et al.*, 2022), lo que evidencia la necesidad de marcos y modelos que integren mecanismos de adaptación estructural, aprendizaje y respuesta bajo condiciones extremas.

Metodologías usadas en estudios de viabilidad de cadenas de suministro

El campo de la viabilidad en SCND continúa madurando, por lo que aún predominan los desarrollos teóricos sobre las aplicaciones a gran escala. Dentro de los abordajes de modelación matemática, la programación lineal entera mixta (PLEM, sigla del nombre en inglés) se ha consolidado como metodología de referencia para problemas de diseño de red con múltiples restricciones y decisiones discretas (Abbasi *et al.*, 2024; Gholian-Jouybari *et al.*, 2024; Gilani & Sahebi, 2022; Kahr, 2022; Kumar & Kumar, 2024; Shiri *et al.*, 2024; Tang *et al.*, 2022). Para capturar no linealidades asociadas a economías de escala, costos dependientes del flujo o comportamientos de proceso, se recurre a la programación no lineal entera mixta (MINLP, sigla del nombre en inglés), ampliando el espacio de representación del fenómeno (Gilani & Sahebi, 2022; Lotfi *et al.*, 2024; Ren *et al.*, 2024). En paralelo, la simulación continua mediante la dinámica de sistemas (DS) ha ganado tracción para estudiar acumulaciones, demoras y bucles de retroalimentación característicos de redes logísticas sometidas a interrupciones (Ghadge *et al.*, 2022a; Rozhkov *et al.*, 2022). A partir de esta literatura reciente, surgen categorías que articulan dimensiones de viabilidad —resiliencia, sostenibilidad y agilidad— con el uso de técnicas de IA, enfoques de solución para SCND, manejo de incertidumbre, incorporación de conceptos del sistema inmune (SI) y validaciones en estudios de caso. Sin embargo, una lectura exhaustiva de dichos trabajos no identifica propuestas que diseñen redes viables integrando simultáneamente IA y analogía inmunológica, lo que sustenta el carácter novedoso del enfoque que aquí se plantea.

Analogía con el sistema inmune

La noción de viabilidad como propiedad dinámica, impulsada por la coevolución entre interrupciones y respuestas en sistemas abiertos, se fundamenta en paralelos con la biología (Ivanov & Dolgui, 2020). La investigación contemporánea ha revalorizado la funcionalidad integrada de los sistemas biológicos como fuente de principios de diseño (Wegener *et al.*, 2023). En específico, el sistema inmune combina componentes preexistentes y adaptativos altamente interconectados (Srinivasan & Tew, 2017), susceptibles de ser reforzados mediante intervenciones externas como medicamentos o vacunas (Darmoul *et al.*, 2013). Su evolución frente a patógenos ha producido un equilibrio entre eficacia y costo (de desarrollo, ejecución y mantenimiento) que inspira criterios de diseño eficientes en otros dominios (Khan *et al.*, 2019; Y. Li *et al.*, 2023). En términos metodológicos, el razonamiento analógico permite mapear conceptos de un dominio bien comprendido hacia otro que requiere ser explicado o replanteado (Zhang & Cheng, 2012).

Trasladado a cadenas de suministro, el primer nivel —barreras físicas— emula piel y membranas: políticas de inventario de seguridad y capacidad ociosa estratégica que reducen la probabilidad de falla sistémica (Wegener *et al.*, 2023; Man *et al.*, 2013; Khan *et al.*, 2019). El segundo nivel —inmunidad innata— se vincula con detener la propagación de “patógenos logísticos” vía reconocimiento temprano de patrones y contención (Reed *et al.*, 2024; Chervenкова & Ivanov, 2023), análogo a estrategias de variedad estructural, flexibilidad de procesos, redundancia y agilidad (Ivanov, 2024). La etapa en que un riesgo “rompe” las barreras (p. ej., un pico repentino de demanda) corresponde a la materialización del evento y su potencial efecto dominó (Srinivasan, 2010). El tercer nivel —inmunidad adaptativa— incorpora respuesta específica y memoria: la activación diferida de mecanismos (horas/días) que, una vez aprendidos, aceleran futuras reacciones (Khan *et al.*, 2019; Y. Li *et al.*, 2023;

Glas *et al.*, 2021). En clave logística, esto se traduce en adaptación pasiva (absorción con capacidades innatas o planes predefinidos) y adaptación activa (medidas proactivas y reactivas durante o tras el impacto) (Ivanov, 2022). Aunque la resiliencia se reconoce como un concepto transversal —de lo subcelular al ecosistema— y aplicable a economía, ingeniería, redes de suministro y salud (Wegener *et al.*, 2023; Reed *et al.*, 2024), persiste una escasez de modelos conceptuales y formalizados de resiliencia de CS que se basen explícitamente en mecanismos inmunológicos (Ivanov, 2024). La extensión reciente del foco hacia la viabilidad incorpora niveles de supervivencia, redes entrelazadas y adaptación de red-de-redes, integrando capacidades como adaptabilidad, agilidad, flexibilidad y colaboración (Ivanov, 2022; Chervenkova & Ivanov, 2023).

Dinámica de sistemas (DS)

La dinámica de sistemas es una técnica de simulación determinista basada en ecuaciones diferenciales y un lenguaje visual que facilita representar estructuras de realimentación y demoras (Miao *et al.*, 2017). Su fortaleza radica en explicar problemas que emergen de interacciones acumulativas, retardos y bucles en sistemas complejos (Goosby & Cheadle, 2024; Götz *et al.*, 2024). En gestión de cadenas de suministro, la DS resulta especialmente útil en contextos de crisis por su capacidad para evaluar estados del sistema y apoyar decisiones con base en trayectorias simuladas (Mohammadi *et al.*, 2022a). Tras identificar variables clave y relaciones causales, el modelo se formaliza matemáticamente para obtener resultados cuantitativos y reproducibles (Izadi *et al.*, 2023).

La literatura reciente revisada muestra una amplia diversidad sectorial —desde transiciones energéticas hasta agroindustrias— y una cobertura alta de disrupciones ($\approx 89,5$ % de los modelos), incluyendo choques de demanda y oferta, fallas de transporte, paros de nodos, crisis políticas o pandemias como el Covid-19. En cuanto a capacidades de viabilidad, los trabajos han enfatizado sostenibilidad (36,8 %) y, en menor

medida, resiliencia y colaboración (26,3 % cada una), mientras que agilidad y flexibilidad aparecen poco exploradas. Respecto a la inmunidad, prácticamente todos los estudios incorporan alguna estrategia de mitigación, pero con baja variedad: el 94,7 % recurre a inventarios de seguridad como medida principal. Existen, no obstante, señales de diversificación: capacidad adaptable de recursos productivos frente a variaciones de insumos (Taheri *et al.*, 2024) y aprendizaje por refuerzo para descubrir políticas de pedido robustas sin depender de grandes históricos (Bussieweke *et al.*, 2024). Esta evidencia refuerza la oportunidad de integrar, de forma más explícita y sistemática, principios inmunológicos y técnicas de IA en marcos de diseño viable con validación por simulación.

Materiales y métodos

El presente estudio desarrolla un caso aplicado para evaluar un enfoque viable y resiliente de la cadena de suministro en un contexto real del sector agroindustrial de la panela. La planificación empresarial opera bajo condiciones cambiantes: metas de ventas, competitividad y sostenibilidad, al tiempo que enfrenta variaciones de demanda y restricciones operativas en el suministro de caña, almacenamiento y transporte, con efectos directos sobre costos, emisiones de CO₂ y nivel de servicio. Dadas estas características, se adopta la dinámica de sistemas (DS) como metodología de análisis y la plataforma Stella para la construcción y simulación de escenarios.

Modelo de dinámica de sistemas

El diagrama causal propuesto (figura 1) integra cuatro bucles de realimentación y tres bucles de balance. Cuando ocurre una interrupción del transporte —por fallas logísticas, clima adverso o bloqueos viales— los tiempos de entrega de caña y derivados se alargan. Este retraso reduce los inventarios en destino, limitando la capacidad de atender pedidos a tiempo y degradando el nivel de servicio, con posibles pérdidas de ventas e impacto reputacional. Este bucle de balance muestra cómo

un problema de transporte desencadena efectos adversos a lo largo de la red.

La disminución del nivel de servicio, producto de demoras e incumplimientos, genera insatisfacción y puede inducir a los clientes a reducir compras futuras o migrar a otros proveedores, lo cual contrae la demanda esperada. A la inversa, un aumento de la demanda reduce inventarios y activa órdenes adicionales de producción; con

ello, se incrementa el procesamiento de caña y la fabricación de panela hasta restablecer el equilibrio entre oferta y demanda. Si la reposición tarda o la caída de inventario es pronunciada, el nivel de servicio vuelve a deteriorarse, con riesgo de pérdida de clientes. Este bucle de balance busca estabilizar el sistema ajustando la producción ante fluctuaciones, por lo que la resiliencia depende de reaccionar con rapidez, sostener inventarios óptimos y preservar un servicio alto.

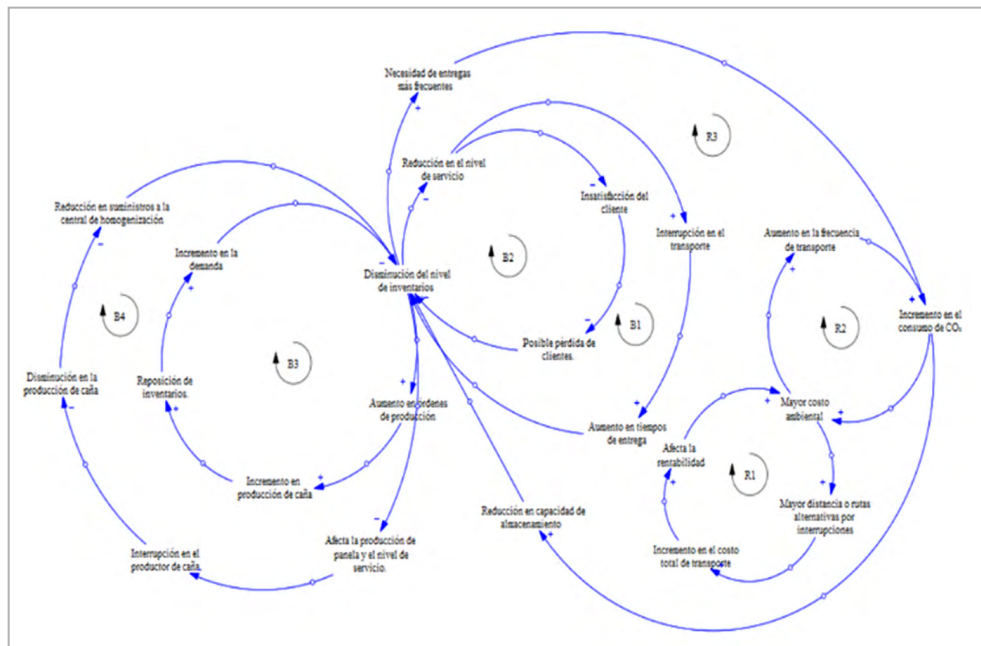


Figura 1. Diagrama causal para la cadena de suministro de la panela.

Cuando la interrupción ocurre aguas arriba, en el productor de caña —por clima, contingencias laborales u otros imprevistos— la disponibilidad de materia prima disminuye. Esto reduce el abastecimiento hacia la central de homogenización y contrae los inventarios procesables, afectando el ritmo de producción de panela y deteriorando el nivel de servicio (retrasos, faltantes, insatisfacción). El bucle de retroalimentación negativa evidencia el efecto dominó de un choque agrícola y subraya la

necesidad de diversificar proveedores, mantener inventarios de seguridad y contar con planes de contingencia para sostener el servicio.

El incremento de la frecuencia de transporte —por entregas más pequeñas o limitaciones de almacenamiento— eleva el consumo de CO_2 y los costos asociados al mayor uso de combustible y activos, afectando la sostenibilidad y la rentabilidad. Además, las rutas alternativas impuestas por interrupciones pueden ser más largas o menos

eficientes, incrementando distancias y tiempos, y elevando el costo total de transporte con potencial traslado al precio final. Este bucle de refuerzo ilustra cómo decisiones logísticas y disrupciones impactan simultáneamente el desempeño ambiental y financiero. Para preservar la resiliencia, es clave optimizar rutas, evitar viajes innecesarios y adoptar prácticas más sostenibles que reduzcan emisiones y costos.

La reducción de la capacidad de almacenamiento limita el inventario máximo y obliga a aumentar la frecuencia de abastecimiento de materias primas o despachos de producto terminado. Ello eleva costos operativos (combustible, mantenimiento) y el consumo de CO₂ por mayor utilización de vehículos.

Eslabones de la cadena de suministro

Productor de caña convencional. Por cada planta de procesamiento (trapiche) operan aguas arriba entre tres y cinco predios. El ciclo de cultivo se extiende de doce a dieciocho meses y se maneja por lotes para asegurar cosechas mensuales y flujo de caja continuo. Este eslabón es sensible a variaciones climáticas que afectan rendimientos y procesos, así como a la calidad de las prácticas agronómicas. En épocas de lluvia pueden verse comprometidas cosecha y productividad. Las entradas típicas son: semilla, insumos, conocimiento y mano de obra; la salida es: caña madura o tallos molinables que alimentan la etapa de transformación. La demanda de caña está impulsada por órdenes de compra y por la ventana óptima de cosecha definida por el estado vegetativo del cultivo (figura 2).

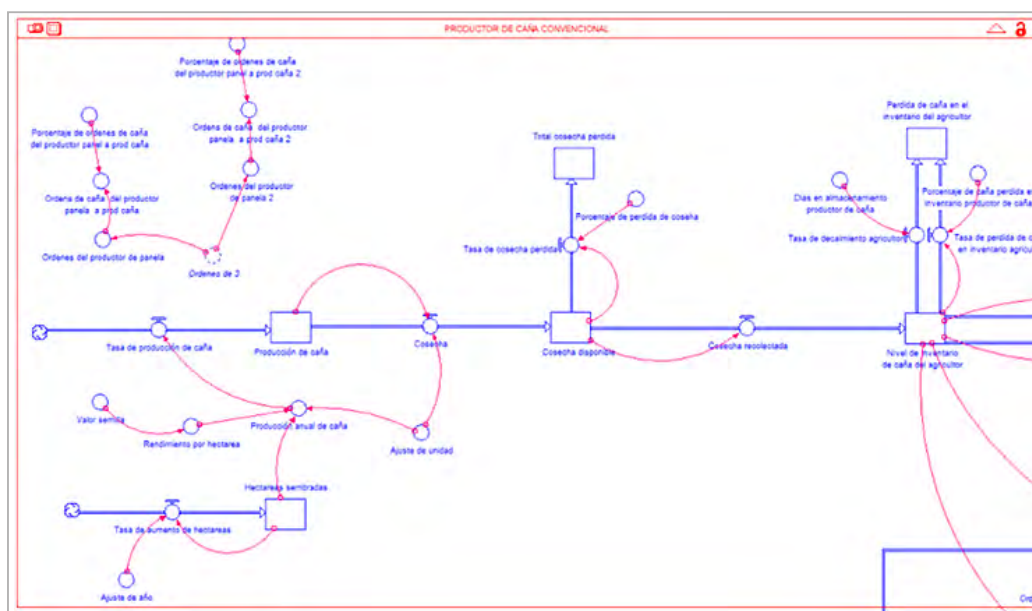


Figura 2. Diagrama causal en el eslabón de producción de caña en cultivo convencional.

Productor de caña orgánica. Comparte la estructura aguas arriba (tres a cinco predios por trapiche) y el ciclo de doce a dieciocho meses,

con prácticas certificadas que habilitan el acceso a mercados diferenciados. Se gestiona por lotes para sostener cosechas mensuales y flujo de caja.

Enfrenta las mismas vulnerabilidades climáticas y de manejo. Recibe semilla, insumos y trabajo, y entrega caña madura o tallos molinables.

La demanda para procesamiento depende, nuevamente, de las órdenes de compra y del momento agronómico oportuno (figura 3).

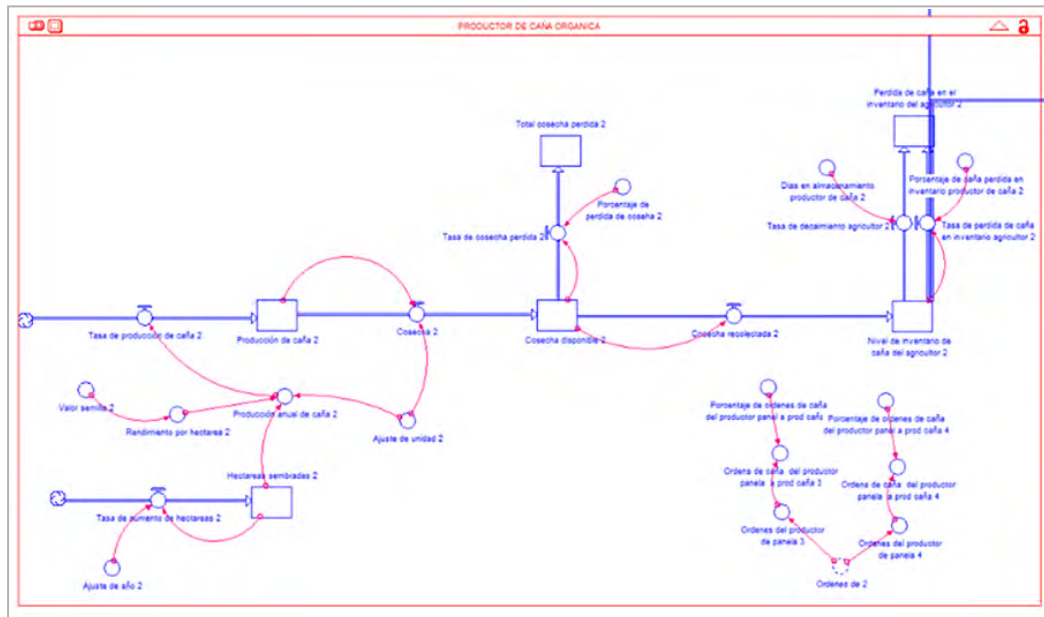


Figura 3. Diagrama causal en el eslabón de producción de caña en cultivo orgánico.

Productor de panela (trapiche). Efectúa la transformación en tres subprocesos: extracción del jugo, evaporación y concentración para obtener panela en bloque o granulada. El bagazo de caña se emplea como fuente energética. La panela en bloque se remite a un centro de adecuación y empaque; la granulada, al centro de empaque de la empresa ancla. El insumo principal es caña madura,

y los productos son panela en bloque o granulada. El procesamiento suele tomar entre cuatro y seis días, con corridas cada dos o tres semanas. En una variante, puede producirse miel virgen (65-70 °Brix) como producto final intermedio, que se envía a homogenización y concentración para elaborar panela en bloque o pulverizada; la obtención de miel tarda de dos a cuatro días (figura 4).

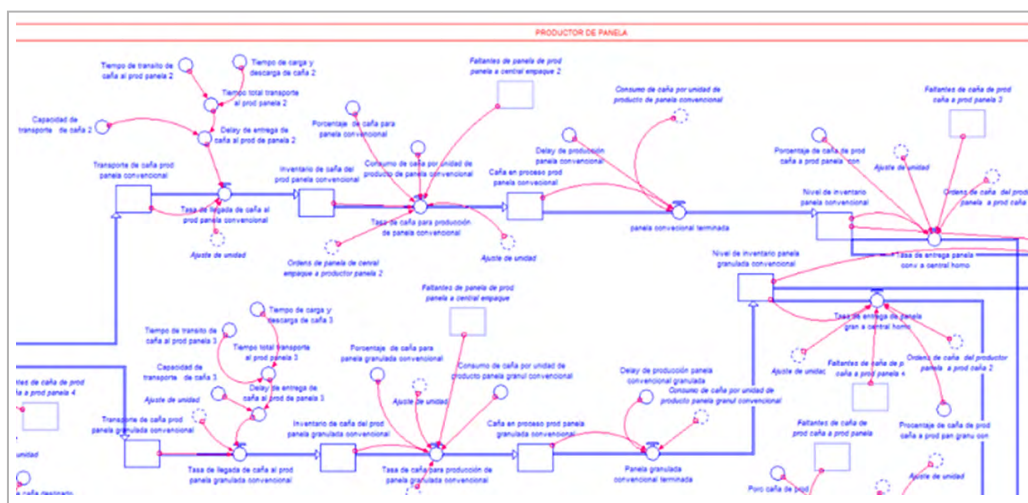


Figura 4. Diagrama causal en el eslabón de producción de panela (trapiches).

Centro de empaque (figura 5). Recibe panela en bloque desde trapiches para consolidar, asegurar inocuidad y preparar pedidos mediante clasificación, selección, limpieza y empaque. La entrada es panela a granel sin seleccionar; la salida es panela empacada, clasificada y rotulada conforme a las órdenes de los clientes. Para exportación, la entrega se realiza en la planta

de la empresa ancla; para mercado nacional, típicamente se despacha a distribuidores sin pasar por bodegas del cliente. El ciclo de esta etapa dura entre cuatro y seis días, según capacidad. Un Centro de Distribución Logística (CEDI) puede integrar de quince a veinte trapiches, de los cuales entre cuatro y siete despachan cada semana, en rotación según el plan de producción.

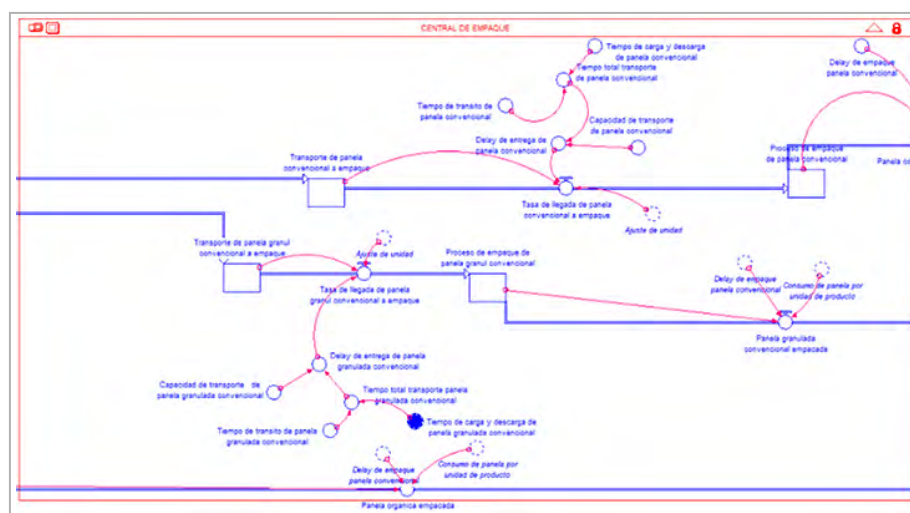
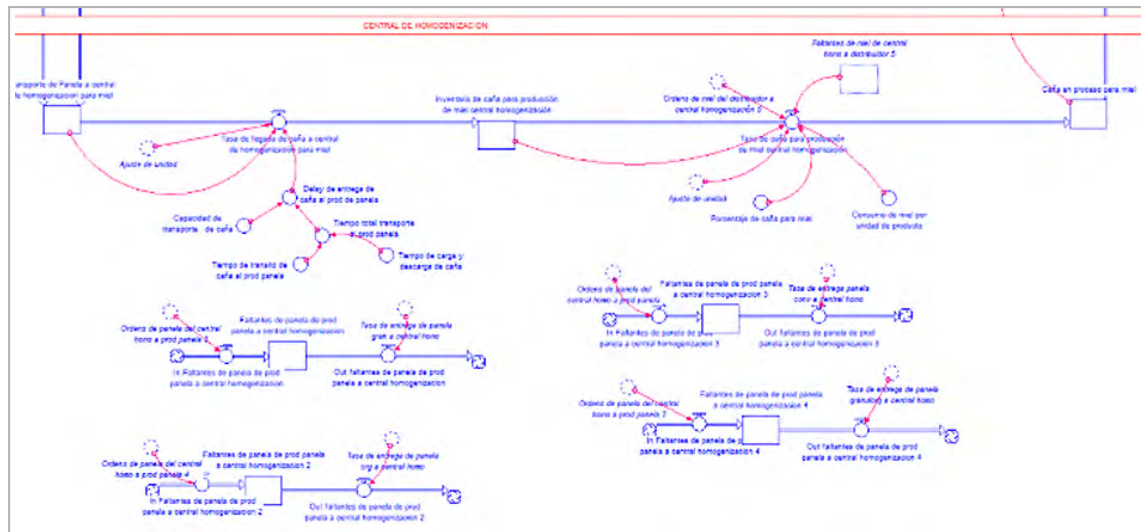


Figura 5. Diagrama causal en el eslabón del centro de empaque.

predominantemente, panela granulada (más del 90 %); bajo solicitud de la empresa ancla puede elaborarse panela en bloque (menos del 10 %). El procesamiento toma de cuatro a seis días. Estas centrales pueden articular desde treinta hasta más de cien trapiches; semanalmente reciben miel de ocho a quince plantas, según el plan y los pedidos. En la actualidad operan por debajo del 30 % de su capacidad instalada, con posibilidad de escalar, en la medida en que se consoliden mercados de mayor valor (figura 6).



Resultados

centro de empaque y distribución— operan de manera coordinada, de modo que producción, procesamiento, almacenamiento y transporte fluyen sin fricciones. La política de inventarios es consistente con los requerimientos de cada etapa: se sostienen niveles óptimos que evitan tanto escasez como acumulaciones innecesarias, preservando la estabilidad operativa y el cumplimiento oportuno de los pedidos. Los resultados de niveles de inventario de caña en los diferentes productores pueden observarse en la figura 7.

En el escenario base se observa el funcionamiento de referencia de la red panelera bajo condiciones normales, sin interrupciones relevantes ni alteraciones de la demanda. Esta línea de base permite comparar el desempeño frente a los demás escenarios de variabilidad y choque. Los eslabones —productores de caña convencional y orgánica, trapiches, central de homogenización,

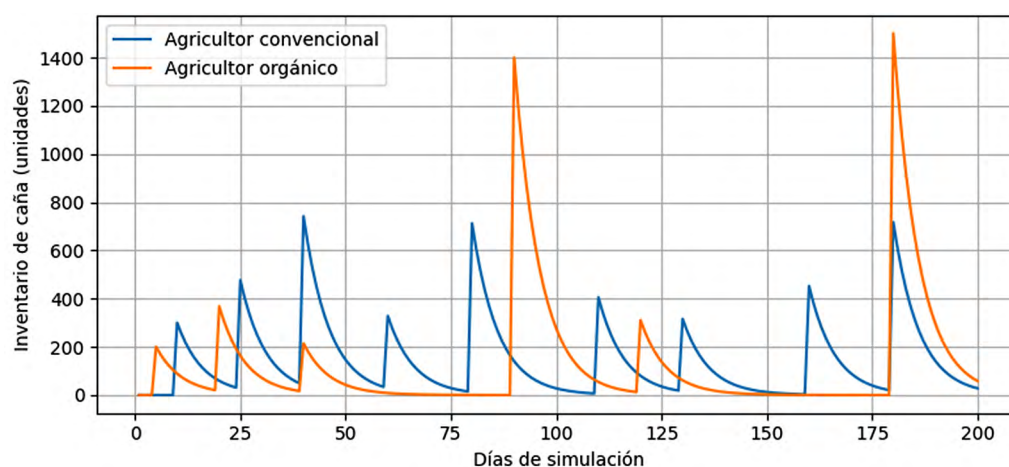


Figura 7. Nivel de inventario de caña en productor convencional y orgánico en escenario actual.

Escenario 2: interrupciones en la producción del eslabón agrícola

Cuando la producción de caña se ve comprometida —por inundaciones, sequías prolongadas u otras contingencias— se reduce la disponibilidad de materia prima y se agotan los inventarios aguas arriba. Esta contracción impacta el abastecimiento a centrales de homogenización y plantas de proceso, disminuye la fabricación de panela y

genera desabastecimientos de producto terminado. En consecuencia, el nivel de servicio se deteriora por retrasos y faltantes, con efectos sobre la satisfacción del cliente y riesgos contractuales. La resiliencia del sistema depende de la capacidad para amortiguar el choque mediante diversificación de proveedores, inventarios de seguridad y flexibilidad en producción y transporte; sin estas salvaguardas, la red entra en zona crítica, con una caída marcada del servicio y el aumento de costos (figura 8).

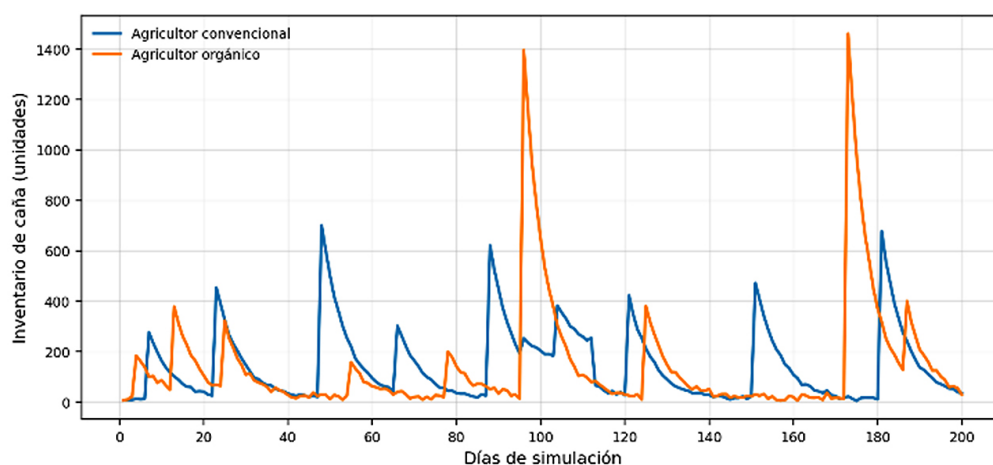


Figura 8. Nivel de inventario de caña tras interrupción en el eslabón del cultivo.

Escenario 3: interrupciones en el transporte en el eslabón del agricultor

Este escenario se centra en las dificultades para movilizar la caña desde los predios hacia la central de homogenización y los eslabones subsecuentes, debido a una infraestructura vial deficiente, fallas de flota o condiciones climáticas adversas. La disrupción impide entregas a tiempo y provoca efectos cascada: en la central disminuye con rapidez la disponibilidad de insumos

(p. ej., miel virgen) para mantener un ritmo de producción estable; en los trapiches y predios se acumula caña sin evacuar, con riesgo de pérdidas si no se transporta oportunamente. El nivel de servicio (figura 9) se ve severamente afectado al no poder sostener la producción de panela y las entregas finales. Además, el costo logístico y el consumo de CO₂ se incrementan cuando deben activarse rutas alternativas, servicios más costosos o medidas de urgencia para restablecer el flujo desde origen.

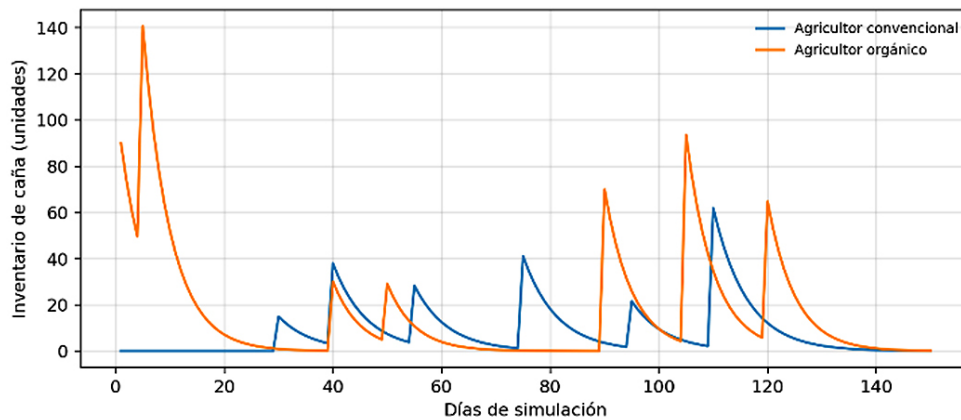


Figura 9. Nivel de inventario de caña tras afectación del transporte.

Escenario 4: incremento de la demanda

Se evalúa un aumento abrupto y significativo del consumo de productos de panela. La presión de mercado acelera la salida de inventarios de producto terminado y empaques; en esta medida, si la capacidad de respuesta productiva no acompasa

el salto en pedidos, los stocks en distribuidores y puntos de venta se agotan, lo que genera demoras y faltantes. La tensión se propaga a lo largo de la red, desde la planificación de cosecha en finca hasta el despacho final, y así se pone a prueba la sincronización entre producción, almacenamiento y distribución (figura 10).

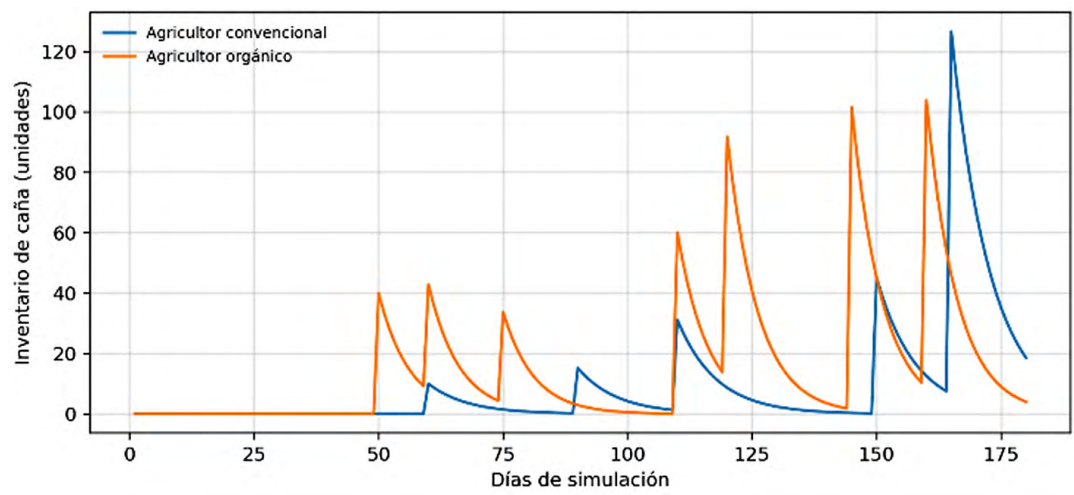


Figura 10. Nivel de inventario de caña tras afectación por el incremento de la demanda.

Escenario 5: reducción de la capacidad de almacenamiento

Aquí se simula una restricción de espacio para guardar tanto insumos procesados, como panela terminada en los trapiches o centros afines, restricción motivada por limitaciones de infraestructura. Con menor capacidad de acopio, la operación requiere entregas más frecuentes para sostener el flujo, lo que eleva costos de transporte, uso de combustible y, por ende, el consumo de CO₂. La falta de espacio

puede obligar a ralentizar o detener la producción para evitar acumulaciones no gestionables, lo cual crea cuellos de botella que repercuten en inventarios aguas abajo. Como resultado, el nivel de servicio se resiente por retrasos en la preparación y entrega de pedidos, y el costo logístico total puede aumentar si se recurre a despachos adicionales o soluciones de emergencia para compensar la restricción de almacenamiento. La tabla 1 muestra las medidas de desempeño establecidas para evaluar la cadena de suministro de la panela.

Tabla 1. Medidas de desempeño

Medidas de desempeño	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Costo total de transporte	\$ 39.215.614	\$ 28.988.685	\$ 49.001.042	\$ 22.071.683	\$ 105.124.333
Nivel de servicio	0.867	0.543	0.746	0.996	0.930
Nivel de inventario de caña del agricultor convencional	14.07	4.82	9.35	11.48	2.58

Nivel de inventario de caña del agricultor orgánico	19.28	20.68	22.58	20.10	17.01
Nivel de inventario de miel	223.11	38.91	171.23	36.05	377.52
Nivel de inventario de panela convencional	5.13	0.39	2.85	0.26	6.25
Nivel de inventario de panela granulada convencional	5.45	1.84	2.24	0.52	6.49
Nivel de inventario de panela granulada orgánica	1.57	0.72	1.36	1.33	0.15
Nivel de inventario de panela orgánica	1.60	0.75	1.39	1.60	1.38
Nivel de inventario promedio cadena	30.69	20.71	33.33	33.30	42.20

Fuente: elaboración propia.

Discusión

En el eslabón del productor de panela, la analogía con las células B se traduce en la capacidad de reaccionar con rapidez ante amenazas y paradas del proceso. Así como estas células responden velozmente a patógenos, el productor necesita mecanismos listos para enfrentar cambios inesperados, desde la variabilidad climática y escasez de insumos hasta las contingencias laborales.

La redundancia pasiva aparece como la disponibilidad de recursos de respaldo: equipos alternos propios o de la vecindad para colaboración horizontal, y monitoreo del estado de las cañas listas para moler que no forman parte del plan ordinario, pero pueden activarse en emergencia. Con ello, un fallo de maquinaria o un bache en el

suministro no detiene la operación, preservando la continuidad productiva.

El inventario de mitigación actúa como un “anticuerpo” frente a fluctuaciones de demanda o problemas de abastecimiento. Considerando la vida útil de la panela (aproximadamente, 120-180 días, según el tipo), gestionar ese stock de forma eficiente permite sostener el flujo incluso cuando ocurren interrupciones, aprovechando la durabilidad del producto para amortiguar choques.

Las capacidades innatas del productor corresponden a los recursos y saberes disponibles para operar en condiciones normales sin medidas extraordinarias: conocimientos tradicionales, uso eficiente de recursos naturales y cumplimiento de la demanda diaria. Estas capacidades sostienen una operación estable en contextos estándar.

Si el entorno cambia de forma abrupta, se activan los planes de contingencia: estrategias previamente diseñadas para enfrentar eventos críticos como fenómenos climáticos, faltantes de insumos o cuellos de botella logísticos. Tales planes permiten ajustar la producción y reducir el impacto de la disrupción, de modo que la operación continúe aun en escenarios adversos.

En el productor de caña, tanto convencional como orgánico, la inmunidad adaptativa se refleja en la capacidad de ajustar prácticas productivas y logísticas ante disrupciones recurrentes o nuevas. Aprender de experiencias previas habilita las estrategias que evitan impactos persistentes en producción y suministro.

La función análoga a las células T asesinas se materializa en acciones concretas y decisivas para eliminar problemas que amenazan la producción. En caña convencional, esto incluye adoptar insumos que eleven productividad, prácticas de agricultura regenerativa para mejorar nutrientes y retención de humedad, mecanización para facilitar labores y esquemas de colaboración horizontal para reconfigurar la cadena. En caña orgánica, las respuestas se orientan a soluciones naturales: control biológico de plagas, manejo agroecológico y procesos compatibles con certificaciones.

La adaptación sostenida para suprimir interrupciones implica cambios persistentes en el tiempo que aumentan la resiliencia ante problemas repetitivos. Para el productor convencional, puede

significar mayor mecanización o diversificación de cultivos; en el ámbito orgánico, significa optimizar prácticas regenerativas, diversificar fuentes de nutrientes y fortalecer alianzas con certificadores. Con estas medidas, tanto productores convencionales como orgánicos mantienen la operación sin pausas significativas y robustecen la “inmunidad” de sus eslabones.

En la cadena convencional, la adaptabilidad es más elevada gracias a la mayor disponibilidad de equipos, insumos y personal. Los productores pueden escalar o desacelerar la producción con rapidez, y los distribuidores, al operar con sistemas más industrializados, reconfiguran sus procesos logísticos con mayor flexibilidad. Además, la presencia de inventarios de seguridad en cada eslabón amortigua las variaciones de la demanda y sostiene la continuidad del flujo de productos.

El Índice de Resiliencia de la Cadena de Suministro (SCRI, sigla del nombre en inglés) evalúa hasta qué punto una red logra conservar su eficiencia (costos) y su efectividad (nivel de servicio) frente a disrupciones o picos de demanda (tabla 2). Para estimarlo en este estudio, se consideraron dos componentes principales: el nivel de servicio y los costos de transporte en diferentes escenarios. El Nivel de Servicio Expectativo (SLE, sigla del nombre en inglés) expresa el grado de cumplimiento en entregas completas y a tiempo. El valor ideal es 1 (100 %). Ahora, el error de servicio ($1 - \text{SLE}$) representa la distancia respecto al desempeño perfecto: cuanto menor sea el SLE, mayor será este error.

Tabla 2. Índice de resiliencia en diferentes escenarios

Escenario	Nivel de servicio (SLE)	Error en nivel de servicio (SLE_error)	Costo de transporte (TC)	Costo normalizado	SCRI
Cadena actual	0.867373	0.132627	\$ 39.215.610	0.392156	0.948
Interrupción en la producción	0.54274	0.45726	28.988.690	0.289887	0.867

Interrupción en el transporte	0.745954	0.254046	49.001.040	0.49001	0.876
Incremento de la demanda	0.996225	0.003775	22.071.680	0.220717	0.999
Disminución de la capacidad de almacenamiento	0.93002	0.06998	\$ 105.124.300	\$ 1.051.243	0.926

Fuente: elaboración propia.

Conclusión

Se plantea un modelo de dinámica de sistemas para estudiar la resiliencia de la cadena panelera bajo la implementación de inventarios de mitigación y redundancia pasiva. Los escenarios permiten derivar políticas para mejorar la gestión de existencias, optimizar el transporte y reducir los costos asociados a disrupciones en producción y distribución. No obstante, la efectividad de estas medidas no es homogénea entre eslabones: el productor de caña puede resultar especialmente expuesto por la vida útil limitada del producto, los retrasos logísticos y la volatilidad de la demanda, factores que elevan la complejidad operativa, generan cuellos de botella y deterioran la capacidad de respuesta y la precisión de entrega.

La vulnerabilidad más marcada aparece en el eslabón agrícola. En el escenario de interrupción del agricultor, el nivel de servicio cae a 0,543, lo cual evidencia la dependencia crítica de los insumos iniciales y el consiguiente efecto dominó sobre procesamiento, homogenización, empaque y distribución. Para contrarrestar esta fragilidad se requiere diversificar proveedores, establecer inventarios de seguridad en puntos críticos y verificar la agilidad de los planes de contingencia y la capacidad de reacción del productor. Las reservas estratégicas de caña (convencional y orgánica) y la incorporación de tecnologías de monitoreo de cultivo pueden anticipar y mitigar estos eventos, para así estabilizar el desempeño de la red.

El costo total de transporte varía de forma notable entre escenarios y condiciona la

eficiencia global. Cuando se reduce la capacidad de almacenamiento, el gasto logístico alcanza su máximo (USD 105.124.333), una señal de ineficiencia severa: la limitación de espacio obliga a aumentar la frecuencia de movimientos y a usar recursos adicionales. Este comportamiento confirma la dependencia de una infraestructura de acopio adecuada para mantener costos estables. La falta de capacidad crea cuellos de botella que interrumpen el flujo continuo y restan capacidad de respuesta ante cambios de demanda. Por ende, resulta prioritario optimizar el uso del almacenamiento mediante automatización y mejor coordinación logística, para disminuir costos de transporte y mejorar la oportunidad de las entregas, fortaleciendo así la resiliencia.

El escenario de aumento de demanda revela el mayor desempeño resiliente: nivel de servicio de 0,996 y el costo de transporte más bajo (USD 22.071.683). La red muestra flexibilidad para absorber picos sin comprometer el servicio, lo que sugiere una preparación adecuada en producción y distribución. Mantener altos niveles de servicio en estos contextos sustenta la competitividad y la satisfacción del cliente. La planificación con inventarios de seguridad, sumada a tecnologías predictivas para anticipar la demanda y a la coordinación en tiempo real con proveedores y distribuidores, potencia esta capacidad de adaptación.

Las disrupciones de transporte provocan una reducción marcada del inventario de caña convencional (9,35), afectando directamente la fabricación de panela y desbalanceando el flujo a

lo largo de la red, con retrasos en entregas finales. Este resultado subraya la necesidad de planificar inventarios de seguridad adecuados y de contar con medidas preventivas que aseguren continuidad operativa. Sistemas de gestión de inventarios en tiempo real, contratos con múltiples transportistas y planes de contingencia más robustos mejoran la agilidad y estabilizan la operación ante variaciones del stock.

La restricción de almacenamiento impacta de forma profunda el desempeño. En el escenario de disminución de capacidad, el inventario promedio de la cadena asciende a 42,20, señal de acumulaciones que no se distribuyen con eficiencia y que enlentecen la producción y el servicio al cliente. Mantener niveles elevados del stock por falta de espacio incrementa costos operativos y reduce la eficiencia global. La combinación de almacenamiento automatizado, una planificación de demanda más precisa y la expansión de capacidad (propia o mediante acuerdos con terceros) permite sostener un flujo continuo y responder mejor frente a picos o interrupciones.

El inventario de mitigación resulta decisivo, especialmente para la panela orgánica. En el escenario de incremento de demanda, el stock de panela granulada orgánica escala a 118,22, demostrando el valor de reservas suficientes para absorber fluctuaciones sin sacrificar servicio ni disparar costos de transporte y almacenamiento. La definición de existencias estratégicas en todos los eslabones asegura continuidad productiva y distributiva aun con fallas de suministro de caña o incidencias logísticas. Tecnologías de monitoreo de inventarios que anticipen reabastecimientos ayudan a dimensionar esas reservas y a cubrir oportunamente los picos de demanda.

Referencias

- Abbasi, S., Abbaspour, S., Eskandari Nasab Siahkoohi, M., Yousefi Sorkhi, M., & Ghasemi, P. (2024). Supply chain network design concerning economy and environmental sustainability: Crisis perspective. *Results in Engineering*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102291>
- Anderson, J. D., Mitchell, J. L., & Maples, J. G. (2021). Lessons from the Covid-19 pandemic for food supply chains. *Applied Animal Science*, 37(6), 738-747. <https://doi.org/10.15232/aas.2021-02223>
- Balezantis, T., Zickiene, A., Volkov, A., Streimikiene, D., Morkunas, M., Dabkiene, V., & Ribauskiene, E. (2023). Measures for the viable agri-food supply chains: A multi-criteria approach. *Journal of Business Research*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113417>
- Barman, A., Das, R., & De, P. K. (2021). Impact of Covid-19 in food supply chain: Disruptions and recovery strategy. *Current Research in Behavioral Sciences*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.crbeha.2021.100017>
- Bassett, H. R., Lau, J., Giordano, C., Suri, S. K., Advani, S., & Sharan, S. (2021). Preliminary lessons from Covid-19 disruptions of small-scale fishery supply chains. *World Development*, 143, 105473. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105473>
- Bussieweke, F., Mula, J., & Campuzano-Bolarin, F. (2024). Optimisation of recovery policies in the era of supply chain disruptions: a system dynamics and reinforcement learning approach. *International Journal of Production Research*, 63(5), 1649-1673. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2383293>
- Chervenkova, T., & Ivanov, D. (2023). Adaptation strategies for building supply chain viability: A case study analysis of the global automotive industry re-purposing during the Covid-19 pandemic. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103249>

- Dai, Z. (2016). Multi-objective fuzzy design of closed-loop supply chain network considering risks and environmental impact. *Human and Ecological Risk Assessment*, 22(4), 845-873. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1113852>
- Darmoul, S., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2013). Handling disruptions in manufacturing systems: An immune perspective. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(1), 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.09.021>
- Esmaeili-Najafabadi, E., Azad, N., & Saber Fallah Nezhad, M. (2021). Risk-averse supplier selection and order allocation in the centralized supply chains under disruption risks. *Expert Systems with Applications*, 175, 114691. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114691>
- Ghadge, A., Er, M., Ivanov, D., & Chaudhuri, A. (2022). Visualisation of ripple effect in supply chains under long-term, simultaneous disruptions: a system dynamics approach. *International Journal of Production Research*, 60(20), 6173-6186. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987547>
- Gholian-Jouybari, F., Hajiaghaei-Keshteli, M., Smith, N. R., Calvo, E. Z. R., Mejía-Argueta, C., & Mosallanezhad, B. (2024). An in-depth metaheuristic approach to design a sustainable closed-loop agri-food supply chain network. *Applied Soft Computing*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111017>
- Gilani, H., & Sahebi, H. (2022). A data-driven robust optimization model by cutting hyperplanes on vaccine access uncertainty in Covid-19 vaccine supply chain. *Omega*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102637>
- Glas, A. H., Meyer, M. M., & Eßig, M. (2021). Covid-19 attacks the body of purchasing and supply management: A medical check of the immune system. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 27(4). <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2021.100716>
- Goosby, B. J., & Cheadle, J. E. (2024). The Immune System Is a Complex System: Inflammatory Morbidity and Systemic Racism. *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, 76, 713-744. <https://doi.org/10.1007/s11577-024-00952-4>
- Götz, P., Auping, W. L., & Hinrichs-Krapels, S. (2024). Contributing to health system resilience during pandemics via purchasing and supply strategies: an exploratory system dynamics approach. *BMC Health Services Research*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12913-023-10487-7>
- Ivanov, D. (2021). Supply Chain Viability and the Covid-19 pandemic: a conceptual and formal generalisation of four major adaptation strategies. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3535-3552. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1890852>
- Ivanov, D. (2022). Viable supply chain model: integrating agility, resilience and sustainability perspectives—lessons from and thinking beyond the Covid-19 pandemic. *Annals of Operations Research*, 319(1), 1411-1431. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03640-6>
- Ivanov, D. (2024). Supply chain resilience: Conceptual and formal models drawing from immune system analogy. *Omega*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103081>
- Ivanov, D., & Das, A. (2020). Coronavirus (Covid-19/SARS-CoV-2) and supply chain resilience: A research note. *International Journal of Integrated Supply Management*, 13(1), 90-102. <https://doi.org/10.1504/IJISM.2020.107780>

- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by Covid-19 outbreak. *International Journal of Production Research*, 58(10), 2904-2915. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1750727>
- Izadi, E., Nikbakht, M., Feylizadeh, M. R., & Shahin, A. (2023). A system dynamics model in the humanitarian supply chain based on blockchain technology. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 96. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103977>
- Kahr, M. (2022). Determining locations and layouts for parcel lockers to support supply chain viability at the last mile. *Omega*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102721>
- Khan, Z. A., Khan, M. T., Ul Haq, I., Iqbal, J., & Tufail, M. (2019). Human immune system inspired framework for disruption handling in manufacturing Process. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(11), 1081-1097. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1686174>
- Kumar, A., & Kumar, K. (2024). An uncertain sustainable supply chain network design for regulating greenhouse gas emission and supply chain cost. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100142>
- Li, Y., Xue, Y., Peng, Z., & Zhang, L. (2023). Immune diversity in lophotrochozoans, with a focus on recognition and effector systems. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 21, 2262-2275. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2023.03.031>
- Li, Z., Zhao, P., & Han, X. (2022). Agri-food supply chain network disruption propagation and recovery based on cascading failure. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 589, 126611. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126611>
- Liu, H., Li, Y., Bai, Z., & Wang, Y. (2023). SMFM-based analogy retrieval tool for the conceptual design of innovative products. *Computers in Industry*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103973>
- Lotfi, R., Hazrati, R., Aghakhani, S., Afshar, M., Amra, M., & Ali, S. S. (2024). A data-driven robust optimization in viable supply chain network design by considering Open Innovation and Blockchain Technology. *Journal of Cleaner Production*, 436. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140369>
- Loxton, M., Truskett, R., Scarf, B., Sindone, L., Baldry, G., & Zhao, Y. (2020). Consumer Behaviour during Crises: Preliminary Research on How Coronavirus Has Manifested Consumer Panic Buying, Herd Mentality, Changing Discretionary Spending and the Role of the Media in Influencing Behaviour. *Journal of Risk and Financial Management*, 13(8), 13080166. <https://doi.org/10.3390/jrfm13080166>
- MacCarthy, B. L., Ahmed, W. A. H., & Demirel, G. (2022). Mapping the supply chain: Why, what and how? *International Journal of Production Economics*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108688>
- Man, M., Liu, S., Chang, X., & Lu, M. (2013). The biological property of synthetic evolved digital circuits with ESD immunity — redundancy or degeneracy? *Journal of Bionic Engineering*, 10(3), 396-403. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(13\)60235-8](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(13)60235-8)
- Miao, S., Wang, T., & Chen, D. (2017). System dynamics research of remanufacturing closed-loop supply chain dominated by the third party. *Waste Management and Research*, 35(4), 379-386. <https://doi.org/10.1177/0734242X16684384>

- Mohammadi, M. A., Sayadi, A. R., Khoshfarman, M., & Husseinazadeh Kashan, A. (2022). A systems dynamics simulation model of a steel supply chain-case study. *Resources Policy*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102690>
- Najafi, M., Zolfagharinia, H., Rostami, S., & Rafiee, M. (2024). Enhancing supply chain resilience facing partial and complete disruptions: The application in the cooking oil industry. *Applied Mathematical Modelling*, 131, 253-287. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2024.04.013>
- Ozdemir, D., Sharma, M., Dhir, A., & Daim, T. (2022). Supply chain resilience during Covid-19 pandemic. *Technology in Society*, 68, 101847. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101847>
- Phillips, J., Durand-Morat, A., Nalley, L. L., Graterol, E., Bonatti, M., Loaiza de la Pava, K., Urioste, S., & Yang, W. (2024). Understanding demand for broken rice and its potential food security implications in Colombia. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100884>
- Queiroz, M. M., Ivanov, D., Dolgui, A., & Fosso Wamba, S. (2020). Impacts of epidemic outbreaks on supply chains: mapping a research agenda amid the Covid-19 pandemic through a structured literature review. *Annals of Operations Research*, 319, 1159-1196. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03685-7>
- Ramani, V., Ghosh, D., & Sodhi, M. M. S. (2022). Understanding systemic disruption from the Covid-19-induced semiconductor shortage for the auto industry. *Omega*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102720>
- Reed, J. M., Wolfe, B. E., & Romero, L. M. (2024). Is resilience a unifying concept for the biological sciences? *In iScience*, 27(5). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109478>
- Ren, A., Yu, L., Zhao, X., Jia, F., Han, F., Hou, H., & Liu, Y. (2024). A multi-objective optimization approach for green supply chain network design for the sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) industry. *Science of the Total Environment*, 927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172050>
- Romero-Riaño, E., Guerrero-Santander, C. D., & Martínez-Ardila, H. E. (2021). Agronomy research co-authorship networks in agricultural innovation systems. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 161-176. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021015>
- Rozhkov, M., Ivanov, D., Blackhurst, J., & Nair, A. (2022). Adapting supply chain operations in anticipation of and during the Covid-19 pandemic. *Omega*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102635>
- Sarkis, J., Dewick, P., Hofstetter, J. S., & Schröder, P. (2020). Overcoming the Arrogance of Ignorance: Supply-Chain Lessons from Covid-19 for Climate Shocks. *One Earth*, 3(1), 9-12. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.06.017>
- Shiri, M., Fattahi, P., & Sogandi, F. (2024). Two-stage approach for Covid-19 vaccine supply chain network under uncertainty using the machine learning algorithms: A case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108837>
- Singh, A. R., Mishra, P. K., Jain, R., & Khurana, M. K. (2012). Design of global supply chain network with operational risks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(1-4), 273-290. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3615-9>

- Srinivasan, R. S. (2010). Supply chain immunity: A methodology for risk management. *International Journal of Services Sciences* 3(1). <https://doi.org/10.1504/IJSSci.2010.029861>
- Srinivasan, R. S., & Tew, J. D. (2017). Supply chain immune system: concept, framework, and applications. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 20(6), 515-531. <https://doi.org/10.1080/13675567.2017.1324834>
- Taheri, N., Jahani, H., & Pishvaei, M. S. (2024). Modeling sustainable bioethanol supply chain in Australia: A system dynamics approach. *Renewable Energy*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120481>
- Tang, L., Li, Y., Bai, D., Liu, T., & Coelho, L. C. (2022). Bi-objective optimization for a multi-period Covid-19 vaccination planning problem. *Omega*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102617>
- Wegener, K., Damm, O., Harst, S., Ihlenfeldt, S., Monostori, L., Teti, R., Wertheim, R., & Byrne, G. (2023). Biologicalisation in manufacturing – Current state and future trends. *CIRP Annals*, 72(2), 781-807. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2023.05.005>
- Zhang, R., & Cheng, G. (2012). Immune system research based on the core enterprise of supply chain finance. *Applied Mechanics and Materials*, 174-177, 2798-2801. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.174-177.2798>