

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinaria, Ciudad de México, México.

ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2025,

Volumen 9, Número 4.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i2](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2)

## **MODELO COMBINADO DE RED DE FLUJO Y TRASPORTE: SOLUCIÓN INTEGRADA PARA LA EFICIENCIA EN PRODUCCIÓN DE AZÚCAR**

**COMBINED FLOW NETWORK AND TRANSPORTATION  
MODEL: AN INTEGRATED SOLUTION FOR EFFICIENCY  
IN SUGAR PRODUCTION**

**Danna Paola Barrientos Fernández**

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, México

**Eduardo Javier Cortes Zetina**

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, México

**Rocío Ramos Hernández**

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, México

**Lorena Alcudia Chagala**

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, México

**Mercedes Morales Barragán**

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, México

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i4.20059](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i4.20059)

## Modelo Combinado de Red de Flujo y Trasporte: Solución Integrada para la Eficiencia en Producción de Azúcar

**Danna Paola Barrientos Fernández<sup>1</sup>**

[20223f101010@utcv.edu.mx](mailto:20223f101010@utcv.edu.mx)

<https://orcid.org/0009-0007-3182-3500>

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz  
Cuitláhuac, México

**Rocío Ramos Hernández**

[recio.ramos@utcv.edu.mx](mailto:recio.ramos@utcv.edu.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-7057-6406>

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz  
Cuitláhuac, México

**Mercedes Morales Barragán**

[mercedes.morales@utcv.edu.mx](mailto:mercedes.morales@utcv.edu.mx)

<https://orcid.org/0009-0007-4835-8115>

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz  
Cuitláhuac, México

**Eduardo Javier Cortes Zetina**

[eduardo.cortes@utcv.edu.mx](mailto:eduardo.cortes@utcv.edu.mx)

<https://orcid.org/0009-0009-4383-8747>

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz  
Cuitláhuac, México

**Lorena Alcudia Chagala**

[lorena.alcudia@utcv.edu.mx](mailto:lorena.alcudia@utcv.edu.mx)

<https://orcid.org/0000-0003-1912-1622>

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz  
Cuitláhuac, México

### RESUMEN

Este artículo presenta una solución integrada de investigación de operaciones para la agroindustria azucarera, que combina un modelo de red de flujo máximo con el método de transporte aplicado a la planeación agregada. A partir de observación directa se levantaron capacidades de equipos desde el batey hasta la tolva de almacenamiento y se modeló la línea como una secuencia de nodos con restricciones, lo que permitió diagnosticar cuellos de botella y su efecto sobre el throughput del sistema. En paralelo, se formuló un problema de asignación que incorpora costos y políticas operativas (mano de obra interna, tiempo extralimitado al 20% y subcontratación hasta 12%), resuelto en POM for Windows V5. La integración de ambos enfoques entrega: (i) identificación explícita de restricciones críticas, particularmente en evaporadores y centrifugadoras; (ii) un plan de producción de costo mínimo que prioriza capacidad interna difiere la subcontratación a periodos necesarios y controla inventarios; y (iii) análisis de sensibilidad y escenarios que apoyan decisiones tácticas ante variaciones de demanda y disponibilidad. Los hallazgos muestran que la asignación óptima vía transporte supera a políticas simplificadas (producción constante o mínima con subcontratación), reduciendo costos totales y mejorando la utilización de capacidad. La propuesta es de fácil implementación y transferible a otros procesos secuenciales agroindustriales, proporcionando una ruta práctica para elevar la eficiencia y la resiliencia operativa en ingenios azucareros. Se discuten además implicaciones gerenciales calendarios de producción, inversión focalizada y reprogramación de equipos y se sugieren líneas futuras para integrar indicadores ambientales y simulación dinámica del proceso.

**Palabras clave:** red de flujo máximo, método de transporte, planeación agregada, cuello de botella, producción azucarera

---

<sup>1</sup> Autor principal

Correspondencia: [20223f101010@utcv.edu.mx](mailto:20223f101010@utcv.edu.mx)

# **Combined Flow Network and Transportation Model: An Integrated Solution for Efficiency in Sugar Production**

## **ABSTRACT**

This article presents an integrated operations-research solution for the sugar agro-industry that combines a maximum-flow network model with the transportation method applied to aggregate planning. Based on direct observation, equipment capacities were recorded from the cane yard (batey) to the storage hopper, and the production line was modeled as a sequence of capacity-constrained nodes, enabling diagnosis of bottlenecks and their effect on throughput. In parallel, an assignment problem was formulated that incorporates costs and operating policies (internal labor, overtime limited to 20%, and subcontracting up to 12%) and was solved in POM for Windows V5. The integration of both approaches delivers: (i) explicit identification of critical constraints—particularly in evaporators and centrifuges; (ii) a minimum-cost production plan that prioritizes internal capacity, defers subcontracting to necessary periods, and controls inventories; and (iii) sensitivity and scenario analyses that support tactical decisions under demand and availability variations. Findings show that the optimal assignment via the transportation model outperforms simplified policies (constant production or minimum output with subcontracting), reducing total cost and improving capacity utilization. The proposal is easy to implement and transferable to other sequential agro-industrial processes, providing a practical path to increase efficiency and operational resilience in sugar mills. Managerial implications are also discussed—production calendars, targeted investment, and equipment rescheduling—and future work is suggested to integrate environmental indicators and dynamic process simulation.

**Keywords:** maximum flow network, transportation method, aggregate planning, bottleneck, sugar production

*Artículo recibido 04 Agosto 2025  
Aceptado para publicación: 29 Agosto 2025*



## INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de la agroindustria azucarera, la eficiencia operativa representa un factor determinante para alcanzar una producción competitiva y sostenible. La dinámica de transformación de la caña de azúcar en producto final involucra múltiples procesos interconectados, cuyas limitaciones técnicas y de capacidad pueden generar cuellos de botella que afectan la continuidad del flujo productivo. Ante este panorama, el uso de modelos cuantitativos de optimización constituye una herramienta estratégica para diagnosticar y mejorar el desempeño operativo en entornos industriales complejos (Mukherjee, Sangal, Sarkar, & Ahmed Almaamari, 2022).

El presente estudio propone una solución integrada basada en la combinación del modelo de red de flujo máximo y el método de transporte, con el objetivo de optimizar simultáneamente la capacidad instalada y la asignación de recursos en una planta azucarera. A través de la observación directa del proceso productivo, se identificaron capacidades de maquinaria en cada etapa desde el batey hasta la tolva de almacenamiento. El modelo de red permitió representar gráficamente el flujo de materiales, revelando restricciones críticas en puntos específicos del sistema. Por su parte, el método de transporte, ajustado a una planeación agregada, consideró variables como tiempo extra, subcontratación y disponibilidad de mano de obra, para minimizar los costos operativos sin comprometer la cobertura de la demanda. Esta investigación, también reconoce que ciertas limitaciones observadas responden a condiciones estructurales del entorno industrial, las cuales pueden ser corregidas mediante reprogramaciones técnicas. No obstante, dichos ajustes implican costos adicionales que pueden ser evaluados. En conjunto, la propuesta metodológica ofrece una herramienta replicable para mejorar la eficiencia en industrias con procesos de transformación secuenciales.

La motivación práctica es doble. Primero, los ingenios operan bajo variabilidad de abastecimiento, de calidad del jugo y de disponibilidad de equipos, lo que exige respuestas tácticas rápidas basadas en datos y no en reglas simplificadas. Segundo, decisiones locales (por ejemplo, acelerar una etapa intermedia) pueden ser contraproducentes si no se considera la red completa de procesos desde el batey hasta la tolva y el envasado; de ahí la pertinencia de modelar explícitamente nodos, arcos y capacidades, así como sus interdependencias y límites reales de operación.



Con ello, se habilita una lectura integral del sistema que facilita intervenir donde genera mayor valor: aliviar restricciones críticas, reprogramar equipos, y ajustar calendarios de producción con criterios cuantitativos y verificables.

Las contribuciones de este estudio son: (i) una metodología integrada y replicable para plantas con procesos secuenciales, que enlaza el diagnóstico de capacidad (red de flujo) con la decisión de asignación (método de transporte); (ii) evidencia comparativa de desempeño frente a políticas operativas tradicionales, mostrando mejoras en utilización de capacidad y reducción de costos; y (iii) un marco de análisis de sensibilidad y escenarios que informa decisiones tácticas ante cambios en demanda o disponibilidad. En conjunto, el enfoque propuesto aporta una base rigurosa para elevar eficiencia y resiliencia operativa, y ofrece lineamientos concretos para su adopción en contextos industriales similares.

El resto del artículo se organiza así: primero se detallan los fundamentos teóricos y el contexto operativo del proceso; después se describe la metodología y el levantamiento de datos; más adelante se presentan resultados, análisis comparativo y sensibilidad; finalmente, se discuten implicaciones gerenciales y líneas de trabajo futuro.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Las crisis sanitarias, como la del COVID-19, afectaron significativamente a las empresas del sector agroalimentario en diversos países. Mientras algunas lograron adaptarse, otras sufrieron grandes pérdidas debido a la falta de estrategias adecuadas. Durante la pandemia, los gobiernos se enfocaron en garantizar el suministro de alimentos, lo que incrementó la presión sobre las cadenas de suministro. En este contexto, diversos estudios han resaltado la importancia de fortalecer la resiliencia y optimizar la logística para asegurar la continuidad operativa del sector. Por ejemplo, Rahbari et al. (2023) propusieron un modelo para gestionar la cadena de suministro de alimentos enlatados bajo condiciones inciertas mediante optimización robusta, permitiendo tomar decisiones más acertadas ante escenarios cambiantes. De forma complementaria, otros análisis evidenciaron que la exportación a países vecinos fue una estrategia eficaz para reducir costos, incrementar el empleo y mejorar el uso de los recursos logísticos.



Estos hallazgos refuerzan la necesidad de cadenas agroalimentarias resilientes que puedan anticipar, prepararse, responder y recuperarse ante interrupciones, manteniendo la operación continua y la satisfacción del cliente (Singh & Kumar, 2021; Palacio, 2021; Viet, Behdani, & Bloemhof-Ruwaard, 2019; Lotfi, y otros, 2022)

En la búsqueda de soluciones eficientes, se ha implementado también el sistema de cross-docking, una técnica logística que transfiere directamente la carga desde vehículos de entrada a los de salida, minimizando tiempos de almacenamiento. Aunque se permite un almacenamiento temporal de hasta 24 horas, la capacidad limitada en los muelles puede generar demoras. En este ámbito, un estudio titulado “Estimación matemática del flujo máximo de mercancías dentro de un cross-docking para reducir el inventario” analizó la aplicación de algoritmos como Ford-Fulkerson, Edmonds-Karp y Dinic, identificando a este último como el más eficaz para reducir tiempos de espera y detectar cuellos de botella en la red logística (Mukherjee, Sangal , Sarkar, & Alkadarsh, 2022). Esto subraya la necesidad de implementar estrategias robustas que aborden la variabilidad en la demanda y los costos operativos en el sector agroindustrial (Zanoni, Ferretti, & Mazzoldi, 2017; Sadrabadi, Ghousi, & Makui, 2021). La resiliencia, en este sentido, no solo implica recuperación post-disrupción, sino también una gestión flexible y adaptable que permita incluso obtener ventajas competitivas a partir de eventos adversos (Jiang, Hassan, Faiz, & Noor-E-Alam, 2018; Nilakantan, 2019; Singh, Soni, & Badhotiya, 2019).

Además de optimizar la logística, es clave mejorar la distribución de materias primas. En Java Oriental, principal zona azucarera de Indonesia, se identificó un desequilibrio entre la oferta y demanda de caña. El estudio de Rofiq Mulyarto et al. (2025) abordó este reto asignando eficientemente la caña a los ingenios mediante el uso de QGIS y OpenSolver en Excel para el análisis espacial y la optimización del transporte. Los resultados propusieron dos escenarios viables ante la insuficiencia de producción, ofreciendo alternativas de planificación con diferentes costos de transporte. Este caso demuestra el valor de la investigación de operaciones y los sistemas de información geográfica en la toma de decisiones agrícolas.

Por otro lado, la programación matemática, particularmente la no lineal, también ha sido fundamental para enfrentar la demanda insatisfecha en el sector alimenticio, identificando causas y proponiendo soluciones eficientes (Mendoza, Sanín, Leo, & Rebollo, 2021).



Asimismo, la Inteligencia Artificial ha mostrado potencial para transformar digitalmente la cadena agroalimentaria, aumentando la eficiencia y reduciendo costos, como en el caso del sector bananero (Palacio, 2021; Almeida, Arias, & Vargas, 2023). En esta línea, Nurhasanah et al. (2020) propusieron un marco conceptual para diseñar cadenas inteligentes en la agroindustria de fibra natural, integrando modelos colaborativos de reabastecimiento y planificación de inventario y producción.

Otros modelos integrados, como el de Doliente y Samsatli (2020), han sido aplicados a la cadena de valor del arroz, conectando la producción de alimentos, energía y químicos mediante programación lineal multi-objetivo para minimizar tanto costos como emisiones de gases de efecto invernadero. Estos enfoques consideran la totalidad de la cadena de valor, desde el campo hasta el consumidor, y permiten una gestión más eficiente de recursos y la reducción de pérdidas post-cosecha (Gómez Dueñas, Manrique Guarin, Romero-Riaño, & Ardila Becerra, 2019; Essien, Dzisi, & Addo, 2018). De igual forma, se ha demostrado que una gestión optimizada del inventario es clave para la transparencia y precisión en los productos agrícolas, así como para la sostenibilidad del sector agroindustrial (Sinaga & Bahagia, 2019; Giallombardo, Mirabelli, & Solina, 2021). En definitiva, la flexibilidad y capacidad de adaptación son esenciales para enfrentar los cambios inesperados en la demanda y la oferta, garantizando así una cadena de suministro agroalimentaria más resiliente y sostenible.

## METODOLOGÍA

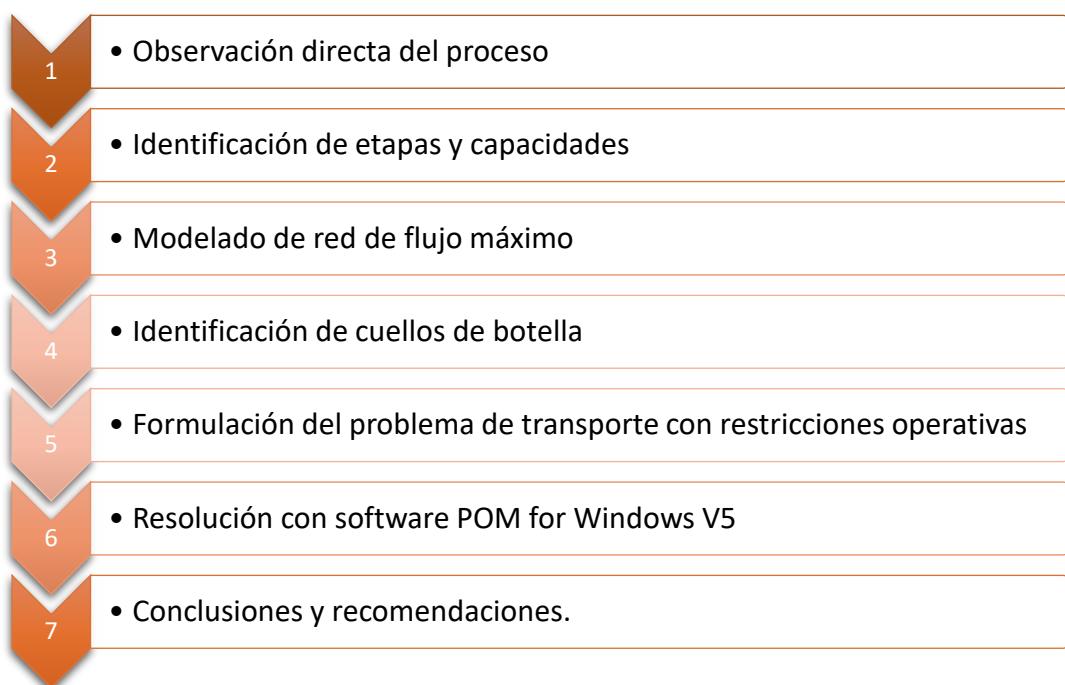
Para analizar la eficiencia operativa en la producción de azúcar, se aplicaron herramientas cuantitativas de optimización sobre datos obtenidos mediante observación directa del proceso productivo. La metodología combinó el modelado de una red de flujo máximo con la formulación de un problema de transporte, permitiendo identificar cuellos de botella y mejorar la asignación de recursos bajo restricciones operativas específicas. A continuación, se detalla el tipo de investigación, las fases y herramientas utilizadas.

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, no experimental y transversal. A partir de una observación directa del proceso productivo, se recopilaron datos relacionados con la capacidad de los equipos desde el batey hasta la tolva de almacenamiento (ver ilustración 1). Se aplicaron dos técnicas: Red de flujo máximo: utilizada para modelar la línea de producción como una red de nodos y arcos, donde cada nodo representa una etapa del proceso y cada arco una conexión con capacidad limitada



(Mukherjee, Sangal , Sarkar, & Alkadash, 2022). Esta herramienta permitió identificar puntos de acumulación de producto (cuellos de botella) y analizar el flujo máximo que el sistema puede soportar. Planeación agregada mediante el método de transporte: se modeló un problema de asignación de recursos, tomando en cuenta restricciones operativas como tiempo extra (máx. 20%), subcontratación (máx. 12%) y mano de obra interna (mín. 68%). Se usó el software POM for Windows V5 para calcular la solución óptima que minimiza los costos asociados a producción, inventario y subcontratación, a lo largo de seis períodos mensuales.

#### **Ilustración 1.** Metodología empleada



La combinación del modelo de red de flujo máximo y el método de transporte demostró ser una estrategia metodológica eficaz para diagnosticar restricciones operativas y optimizar la asignación de recursos en un entorno productivo complejo. Esta integración permitió un análisis integral del sistema, facilitando la toma de decisiones basadas en datos y orientadas a la mejora continua de la eficiencia industrial.

#### **Red de flujo máximo aplicada a la línea de producción.**

En el ámbito logístico, una red se entiende como un conjunto de nodos y conexiones que permiten el flujo de materiales, información o recursos a través de un sistema (Mukherjee, Sangal, Sarkar, & Ahmed Almaamari, 2022).

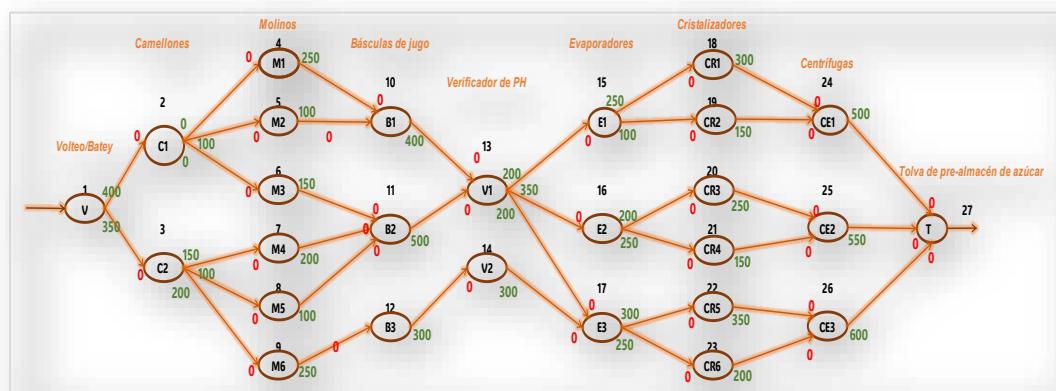


Estos nodos pueden presentar estaciones de trabajo, centros de distribución, procesos o equipos, mientras que las conexiones reflejan los caminos por los cuales circulan los productos o datos.

En este contexto, la producción de azúcar, puede representarse mediante una red productiva compuesta por múltiples modos interconectados. El proceso inicia en el volteo o mejor conocido como batey, donde se recibe la caña, la cual es enviada a dos camellones que la separan para ser transportada por bandas transportadoras hacia seis molinos. Una vez extraído, el jugo pasa por tres básculas para ser pesado, y posteriormente se dirige a dos verificadores de pH, una etapa crítica, ya que el jugo normalmente presenta un pH elevado que debe ser regulado con cal. Después, el jugo es dirigido a tres evaporadores, donde se precalienta, y luego a seis cristalizadores, donde comienza a tomar su forma sólida característica de la azúcar perlada. A continuación, el producto pasa a tres bombas centrifugas, las cuales eliminan la humedad del grano mediante vapor. Finalmente, la azúcar seca se almacena en una tolva, y desde ahí se dirige, a través de una línea directa al proceso de envasado. Este flujo estructurado de procesos y equipos permite presentar al sistema como una red de flujo, facilitando el análisis de su rendimiento y la identificación de posibles cuellos de botella para su optimización.

La ilustración 2 muestra la representación de este proceso como un modelo de red que incluye las capacidades máximas en cada parte del proceso. En este diagrama es posible identificar diversos cuellos de botella, los cuales impiden que la línea de producción opere a su capacidad máxima. Los números verdes son las cantidades máximas (toneladas) que el nodo puede enviar al nodo siguiente; los números negros es una identificación del nodo y finalmente, los números rojos representan la cantidad de recepción de producto del nodo.

**Ilustración 2.** Modelo de red de flujo máximo en contexto con la empresa de estudio.



Esta situación refleja limitaciones propias del entorno industrial, que, si bien afectan la eficiencia del sistema, pueden ser corregidas mediante una reprogramación adecuada de la maquinaria. No obstante, es importante considerar que tales ajustes implican costos adicionales, tanto en términos económicos como operativos, lo que debe ser evaluado cuidadosamente antes de su implementación.

### **Asignación óptima mediante el método de transporte**

En este contexto, se busca un acercamiento a una asignación óptima de recursos mediante una aplicación del método de transporte a la planeación agregada. Se desarrolla un modelo de optimización utilizado para distribuir eficientemente los volúmenes de producción de azúcar desde distintos puntos de la línea, con el objetivo de minimizar costos operativos y maximizando el aprovechamiento de los recursos.

Para su implementación se establecieron restricciones operativas propias del entorno industrial analizado: un máximo del 20% de la producción puede realizarse en tiempo extra, se permite hasta el 12% de subcontratación mensual en relación con la demanda solicitada, y se contempla un 68% de mano de obra interna.

Estas condiciones aseguran que la mayor parte de la demanda se cubran en tiempo regular, optimizando el uso de recursos internos.

En la tabla 1, se presentan los costos asociados al periodo diciembre – mayo de la zafra 2023 - 2024 calculados mediante el software POM for Windows V5, el cual permite modelar de forma intuitiva y eficiente problemas de optimización, facilitando la visualización y resolución de escenarios complejos, además agiliza la toma de decisiones al generar soluciones óptimas de manera rápida y precisa (Citra, y otros, 2024).

Es importante señalar que, conforme avanzan los meses, el costo de inventario tiende a incrementar, dado que la mercancía debe ser resguardada en almacén hasta el momento de su venta, lo que implica una acumulación de costos logísticos adicionales.



**Tabla 1.** Costos operativos mediante el método de transporte.

	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Oferta
Inventario inicial	\$1.8	\$3.6	\$5.4	\$7.2	\$9.0	\$10.8	150000
Mano de obra	\$487.6	\$489.4	\$491.2	\$493.0	\$494.8	\$496.6	272680
Tiempo extra	\$151.8	\$153.6	\$155.4	\$157.2	\$159.0	\$160.8	80200
Subcontratación	\$1,151.8	\$1,153.6	\$1,155.4	\$1,157.2	\$1,159.0	\$1,160.8	48120
Mano de obra	---	\$487.6	\$489.4	\$491.2	\$493.0	\$494.8	306034
Tiempo extra	---	\$151.8	\$153.6	\$155.4	\$157.2	\$159.0	90010
Subcontratación	---	\$1,151.8	\$1,153.6	\$1,155.4	\$1,157.2	\$1,159.0	54006
Mano de obra	---	---	\$487.6	\$489.4	\$491.2	\$493.0	257686
Tiempo extra	---	---	\$151.8	\$153.6	\$155.4	\$157.2	75790
Subcontratación	---	---	\$1,151.8	\$1,153.6	\$1,155.4	\$1,157.2	45474
Mano de obra	---	---	---	\$487.6	\$489.4	\$491.2	156400
Tiempo extra	---	---	---	\$151.8	\$153.6	\$155.4	46000
Subcontratación	---	---	---	\$1,151.8	\$1,153.6	\$1,155.4	27600
Mano de obra	---	---	---	---	\$487.6	\$489.4	217600
Tiempo extra	---	---	---	---	\$151.8	\$153.6	64000
Subcontratación	---	---	---	---	\$1,151.8	\$1,153.6	38400
Mano de obra	---	---	---	---	---	\$487.6	176800
Tiempo extra	---	---	---	---	---	\$151.8	52000
Subcontratación	---	---	---	---	---	\$1,151.8	31200
<b>Demandas</b>	401000	450050	378950	230000	320000	260000	

La aplicación conjunta del método de transporte y la red de flujo máximo permitió optimizar la asignación de recursos y detectar cuellos de botella en la línea de producción de azúcar, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo costos en los procesos clave.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación del método de transporte y del modelo de red de flujo máximo, ambos desarrollados con ayuda del software POM for Windows V5. El objetivo principal fue asignar de forma óptima la producción en la línea, priorizando los períodos con menor costo operativo y evitando el uso de subcontratación y tiempo extra, con el fin de mantener el costo total dentro de los límites del presupuesto. De forma paralela y mediante el modelo de red de flujo máximo, se identificó la capacidad máxima del sistema y se analizaron las restricciones internas que limitan el flujo continuo de producción.

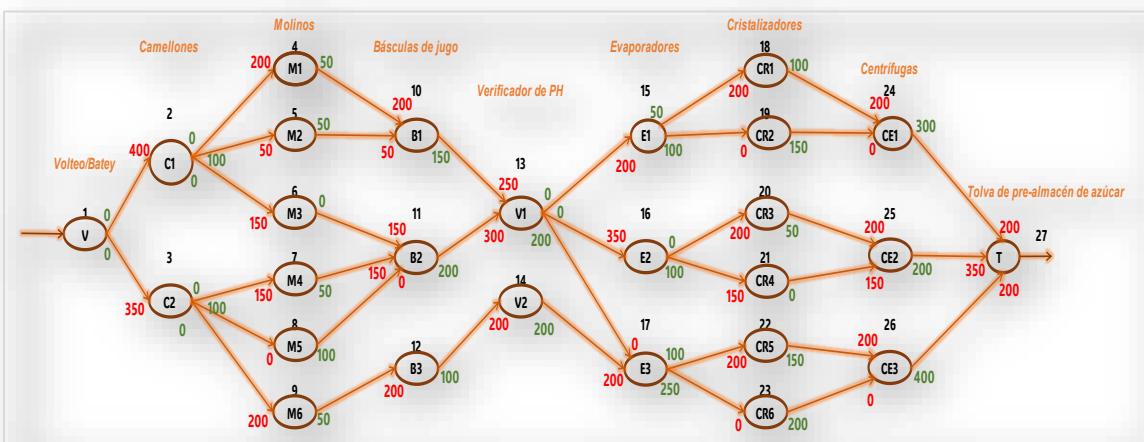


En este sentido, se realizaron cinco iteraciones que muestran cómo se distribuye la producción hasta la tolva de almacenamiento, indicando tanto las toneladas efectivamente trasladadas como aquellas que se acumulan debido a las limitaciones de capacidad en ciertas etapas del proceso. Estas acumulaciones reflejan la presencia de cuellos de botella, lo que permite detectar puntos críticos y orientar futuras mejoras en la eficiencia de la línea de producción.

### Red de flujo máximo

Según los resultados obtenidos mediante el software POM for Windows V5, a pesar de estos cuellos de botella identificados, la producción alcanza un flujo de 65 toneladas por periodo de producción. A continuación, la ilustración 3 presenta la red resuelta con las asignaciones correspondientes, donde se visualizan claramente las áreas donde se generan los cuellos de botella. En esta red los números en negro representan la cantidad de toneladas enviadas de un nodo de salida a un nodo de procedencia; los números en rojo indican la cantidad que llega al nodo, y los valores en verde muestran la acumulación de toneladas, es decir, los puntos donde se producen congestiones.

**Ilustración 3.** Resultado de red de flujo máximo mediante software.



Los cuellos de botella provocan acumulaciones de producto en puntos específicos del proceso de transformación, lo que no solo afecta el flujo productivo, sino que también puede retrasar la entrega y aumentar los costos operativos.

### Asignación óptima mediante el método de transporte

En los resultados obtenidos mediante el software POM for Windows V5, se utilizó una columna ficticia llamada *dummy* para balancear el método de transporte debido a que la oferta y la demanda no

coinciden. El análisis mostró que, durante los primeros meses de producción, no es necesaria la subcontratación de azúcar; sin embargo, en meses posteriores sí se requiere, lo que incrementa ligeramente los costos. El método de transporte asignó la producción priorizando los períodos de menor costo, minimizando la subcontratación y manteniendo los costos totales dentro de los límites previstos, dicha información se muestra en la ilustración 4.

**Ilustración 4.** Ventana de resultados del software POM for Windows V5 de la asignación óptima mediante el método de transporte

(untitled) Solution							
solution value = \$848067600	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Dummy
Mano de obra	170800	101880					
Tiempo extra	80200						
Subcontratación							48120
Mano de obra		258160	47874				
Tiempo extra		90010					
Subcontratación							54006
Mano de obra			255286	2400			
Tiempo extra			75790				
Subcontratación							45474
Mano de obra				156400			
Tiempo extra				46000			
Subcontratación				25200	0		2400
Mano de obra					217600		
Tiempo extra					64000		
Subcontratación					38400	0	
Mano de obra						176800	
Tiempo extra						52000	
Subcontratación						31200	

La aplicación del método de transporte en este estudio permitió una asignación óptima de los recursos productivos mediante la incorporación de costos operativos específicos asociados a cada alternativa: mano de obra propia, tiempo extra y subcontratación. Estos valores fueron establecidos como parámetros dentro del modelo, lo que permitió al sistema priorizar aquellas opciones que ofrecieran menor costo total. A través del software POM for Windows V5, se resolvió el problema de transporte considerando la demanda mensual proyectada (durante 6 meses de zafra) y las restricciones operativas del ingenio. El modelo arrojó las cantidades óptimas que deben asignarse a cada modalidad de producción (bultos de 50 kilogramos de azúcar), respetando los límites establecidos para cada recurso y asegurando la cobertura de la demanda. Como resultado, se obtuvo una solución que no solo equilibra la utilización de recursos internos y externos, sino que además minimiza el costo total de producción, proporcionando así una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en la planeación agregada.



Conforme a los resultados obtenidos, se evaluaron tres estrategias: mantener una producción constante diaria, mantener una producción constante mínima y subcontratar el resto, e implementar una asignación óptima mediante el método de transporte. De estas, la estrategia más viable resultó ser la asignación óptima mediante el método de transporte, ya que optimiza los costos de producción. En contraste, la opción de mantener una producción constante mínima y subcontratar el resto es la más costosa, como se observa en la tabla 2.

**Tabla 2.** Comparación de costos totales mediante estrategias de optimización de costos de producción.

Mantener una producción constante diaria.	Mantener una producción constante mínima y subcontratar el resto.	Asignación mediante el método de transporte.
\$1,304,881,170.04	\$1,447,809,152.33	\$848,067,600

No obstante, el modelo de transporte generó un excedente de producción de 280,800 bultos más de lo que se está demandando, esto puede deberse a un factor principal: los productores están ingresando más toneladas de caña que en zafra anteriores. Si bien esto puede ser beneficioso para la organización, al contar con una mayor cantidad de azúcar disponible para la venta, también implica un incremento en los costos de producción. Esto se debe a que existe una relación directa entre la cantidad de caña ingresada y la producción de azúcar; es decir, a mayor volumen de caña, mayor producción, pero también mayores costos. De la misma forma, si se ingresa menos caña, se produce menos azúcar y, en consecuencia, los costos disminuyen.

## CONCLUSIONES

La aplicación conjunta del método de transporte y el modelo de red de flujo máximo, desarrollados mediante el software POM for Windows V5, ha permitido optimizar la asignación de recursos y analizar la capacidad máxima en la línea de producción de azúcar. Aunque aún existen cuellos de botella que limitan el flujo y generan acumulaciones en puntos críticos, estas técnicas han facilitado la identificación de dichas restricciones y la optimización de costos operativos. La planeación agregada basada en el método de transporte se presenta como la alternativa más eficiente, al maximizar la producción y mantener los costos dentro de los límites controlados, favoreciendo una mejor gestión logística y productiva en el ingenio estudiado. De esta forma, se sientan las bases para futuras mejoras que permitan alcanzar niveles óptimos de producción y rentabilidad.



Finalmente, la red de flujo máximo está estrechamente relacionada con la asignación óptima mediante el método de transporte, ya que un aumento en la producción de azúcar genera un incremento en las ventas y, por ende, puede requerir ajustes en la asignación de recursos. Por ello, entender y gestionar estos puntos críticos es fundamental para mantener un equilibrio eficiente entre la capacidad de producción, la asignación logística y los costos asociados, asegurando así la continuidad y rentabilidad del proceso productivo.

## **DISCUSIÓN**

La aplicación conjunta del modelo de red de flujo máximo y del método de transporte permitió interpretar con precisión la dinámica operativa de la línea de producción azucarera, revelando tanto su capacidad máxima como las limitaciones estructurales que condicionan su rendimiento. La identificación de cuellos de botella en etapas clave del proceso, como los evaporadores y centrifugadoras, evidenció la necesidad de intervenciones estratégicas para evitar acumulaciones que afectan el ritmo productivo. Estos hallazgos resultan relevantes, ya que el rediseño de la asignación de capacidades podría implicar mejoras considerables en eficiencia sin requerir grandes inversiones en infraestructura. Por otro lado, el método de transporte aplicado a la planeación agregada demostró su utilidad al equilibrar los costos de producción mediante una asignación óptima de recursos internos y externos. El uso de una columna ficticia (dummy) para ajustar oferta y demanda confirmó su flexibilidad para representar escenarios reales, y los resultados validan la viabilidad del modelo para decisiones logísticas fundamentadas. En conjunto, esta investigación aporta una herramienta metodológica robusta para el análisis y mejora de procesos industriales, especialmente útil en sectores agroindustriales donde la eficiencia operativa incide directamente en la rentabilidad y sostenibilidad del negocio.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- Citra, Z., Ferial Ashadi, R., Dwiyanto Wibowo, P., Malinda, Y., Apdeni, R., Karno Kinasih, R., & Rizqi Fitriansyah, E. (Julio de 2024). Analysis of Heavy Equipment Quantity using Quantitative Methods Software (QM) for Windows V5 on Road Infrastructure Works. *Jurnal Teknologi*, 16(2), 203–212.



- Lotfi, R., Gholamrezaei, A., Kadlubek, M., Afshar, M., Ali, S., & Kheiri, K. (2022). A robust and resilience machine learning for forecasting agri-food production. *Scientific Reports*, 12(1). doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26449-8>
- Almeida, O., Arias, V., & Vargas, W. (2023). Gestión inteligente de los datos en la agroindustria. *Revista Alfa*, 7(19), 139-152. doi: <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i19.204>
- Doliente, S., & Samsatli, S. (2020). Integrated production of food, energy, fuels and chemicals from rice crops: Multi-objective optimisation for efficient and sustainable value chains. *Journal of Cleaner Production*, 285. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124900>
- Essien, E., Dzisi, K., & Addo, A. (2018). Decision support system for designing sustainable multi-stakeholder networks of grain storage facilities in developing countries. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 126-130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.019>
- Giallombardo, G., Mirabelli, G., & Solina, V. (2021). An Integrated Model for the Harvest, Storage, and Distribution of Perishable Crops. *Applied Sciences*, 11(15x). doi: <https://doi.org/10.3390/app11156855>
- Gómez Dueñas, M., Manrique Guarin, L., Romero-Riaño, E., & Ardila Becerra, L. (2019). Agri-food systems: A regional perspective in innovation capabilities. *ENTRAMADO*, 15(2), 242-254. doi: <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.5707>
- Jiang, D., Hassan, M., Faiz, T., & Noor-E-Alam, M. (2018). A Possibility Distribution Based Multi-Criteria Decision Algorithm for Resilient Supplier Selection Problems. *arXiv (Cornell University)*, 1(1). doi:<https://arxiv.org/abs/1806.01650>
- Mendoza, C., Sanín, F., Leo, R., & Rebollo, H. (2021). Estrategias para cubrir la demanda insatisfecha en una fábrica alimenticia. *arXiv (Cornell University)*. doi: <https://arxiv.org/abs/2103.10998>
- Mukherjee, T., Sangal , I., Sarkar, B., & Alkadash, T. (2022). Estimación matemática del flujo máximo de mercancías dentro de un cross-dock para reducir el inventario. *Biociencias Matemáticas e Ingeniería.*, 19(12), 13710-13731. doi:10.3934/mbe.2022639
- Mukherjee, T., Sangal, I., Sarkar, B., & Ahmed Almaamari, Q. (2022). Modelos logísticos para minimizar el coste de manipulación de materiales dentro de un cross-dock. *Biociencias Matemáticas e Ingeniería*, 2(20), 3099-3119. doi:10.3934/mbe.2023146



- Nilakantan, K. (2019). Supply chain resilience to sudden and simultaneous lead-time and demand disturbances. *International Journal of Supply Chain and Operations Resilience*, 3(4), 292. doi: <https://doi.org/10.1504/ijscor.2019.099455>
- Nurhasanah, N., Mangunwidjaja, D., & Romli, M. (2020). A conceptual framework on the design of intelligent supply chain for natural fibre agroindustry. *AIP conference proceedings*, 2217. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0000742>
- Palacio, I. (2021). Oportunidades para la transformación digital de la cadena de suministro del sector bananero basado en software con inteligencia artificial. *Revista Politécnica*, 17(33), 47-63. doi: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v17n33a4>
- Rahbari, M., Arshadi Khamseh, A., & Mohammadi, M. (2023). Optimización robusta y análisis estratégico para la cadena de suministro agroalimentaria en tiempos de crisis: estudio de caso de una economía emergente. *Sistemas expertos con aplicaciones*(225). doi:10.1016/j.eswa.2023.120081
- Rofiq Mulyarto, A., Aminah, S., & Astuti, R. (2025). Asignación de caña de azúcar a los ingenios azucareros de la provincia de Java Oriental: enfoque de distribución espacial y método de transporte. *BIO Web de Congresos*(165). doi:10.1051/bioconf/202516502003
- Sadrabadi, M., Ghousi, R., & Makui, A. (2021). Designing a disruption-aware supply chain network considering precautionary and contingency strategies: a real-life case study. *RAIRO - Operations Research*, 55(5), 2827-2860. doi: <https://doi.org/10.1051/ro/2021123>
- Sinaga, T., & Bahagia, S. (2019). Integrated Logistics and Transportation Routing in Rural Logistics System. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 528(1). doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/528/1/012081>
- Singh, C., Soni, G., & Badhotiya, G. (2019). Performance indicators for supply chain resilience: review and conceptual framework. *Journal of industrial engineering international*, 15, 105-117.
- Singh, R., & Kumar, P. (2021). Strategic framework for developing resilience in Agri-Food Supply Chains during COVID 19 pandemic. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 25(11), 1411-1424. doi: <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1908524>



Viet, N., Behdani, B., & Bloemhof-Ruwaard, J. (2019). Data-driven process redesign: anticipatory shipping in agro-food supply chains. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1302-1318. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1629673>

Zanoni, S., Ferretti, I., & Mazzoldi, L. (2017). Supply chain network design under uncertain demand: robust and stable optimisation approaches. *International Journal of Inventory Research*, 4, 172. doi: <https://doi.org/10.1504/ijir.2017.088761>

