

## **Optimización de la cadena de suministro intensificada y diversificada en la industria Sorbitol municipio Florida, Camagüey**

Optimization of the intensified and diversified supply chain in the Sorbitol industry, Florida municipality, Camagüey

Fabiàn Enrique Wilson-González<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7984-944X>

Ángel Galindo-Llanes<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1738-8761>

Hilda de las Mercedes Oquendo-Ferrer<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1705-5828>

Néstor Loredo-Carballo<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5975-9888>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ciencias Aplicadas.  
Universidad Ignacio Agramonte Loynaz, Camagüey, Cuba

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Industrial. Facultad de Ciencias Aplicadas.  
Universidad Ignacio Agramonte Loynaz, Camagüey, Cuba

<sup>3</sup>Centro de Estudios de Dirección Empresarial y Territorial (CEDET)  
Universidad Ignacio Agramonte Loynaz, Camagüey, Cuba

\*Autor para correspondencia. Correo electrónico: [enrique.wilson@reduc.edu.cu](mailto:enrique.wilson@reduc.edu.cu)

### **RESUMEN**

Se optimizó la cadena de suministro integrada para nuevos escenarios productivos en la industria Sorbitol del municipio de Florida, provincia de Camagüey. Se tuvo en cuenta los índices de consumos y precios de materias primas y productos, conjuntamente con la disponibilidad de caña. En este sentido, se elaboró la cadena de suministro, a partir de la integración de las producciones entre los sectores económicos implicados. Esta unión intersectorial, basada en el modelo de economía circular, sustentada en el aprovechamiento óptimo de materias primas y tecnologías, permitió alcanzar nuevos encadenamientos productivos. La optimización se realizó primero, para conocer los máximos aportes que pueden generarse en la cadena de suministro al desarrollo local, según la disponibilidad de caña para las zafas 16/17, 21/22 y el promedio. Bajo estas condiciones ideales no se obtienen

ventas del fructooligosacárido (FOS) porque todo el azúcar se utiliza para producir glucosa de un precio de venta mayor. Finalmente, se combinan estos escenarios, fijándose las capacidades de glucosa, las cuales comprenden la producción anual de la planta actual, la suma de esta con otra de igual capacidad y la cromatográfica por vía enzimática. Se determinó que los máximos aportes al desarrollo local corresponden a la zafra 16/17 de mayor producción por lo que evidenció la necesidad de sembrar caña en el territorio, con el propósito de intensificar y diversificar producciones, para cumplir con las demandas y maximizar los aportes al desarrollo local.

**Palabras clave:** cadena de suministro; economía circular; encadenamientos productivos; optimización.

### **ABSTRACT**

The integrated supply chain was optimized for new production scenarios in the Sorbitol industry in the municipality of Florida, province of Camagüey. The consumption rates and prices of raw materials and products were taken into account, together with the availability of cane. In this sense, the supply chain was developed, based on the integration of productions between the economic sectors involved. This intersectoral union, based on the circular economy model, supported by the optimal use of raw materials and technologies, allowed us to achieve new production chains. The optimization was carried out first, to know the maximum contributions that can be generated in the supply chain to local development, according to the availability of cane for the 16/17, 21/22 and average harvests. Under these ideal conditions, no sales of fructooligosaccharide (FOS) are obtained because all the sugar is used to produce glucose at a higher sales price. Finally, these scenarios are combined, establishing the glucose capacities, which include the annual production of the current plant, the sum of this with another of equal capacity and the chromatographic enzymatic route. It was determined that the maximum contributions to local development correspond to the 16/17 harvest of greater production, which demonstrated the need to plant sugarcane in the territory, with the purpose of intensifying and diversifying productions, to meet demands and maximize contributions to local development.

**Keywords:** supply chain; circular economy; productive chains; optimization.

Recibido: 06/09/2024

Aceptado: 12/12/2024

## Introducción

La transformación estructural de la economía cubana impone la necesidad de identificar y desarrollar acciones en aquellas actividades con potencial económico estratégico. De acuerdo con las valoraciones de la máxima dirección del país, <sup>(1)</sup> se necesita avanzar en la transformación integral de la empresa estatal socialista, donde, las estrategias de desarrollo territorial, desde las potencialidades endógenas de innovación, la intersectorialidad, el conocimiento, la ciencia y la tecnología, fortalecen su proyección hacia los territorios. Para ello, es importante la manera en que se distribuyen los recursos para los procesos de planificación de las producciones.

La agroindustria azucarera y sus derivados, como uno de los sectores estratégicos definidos en el Plan de Desarrollo Económico y Social hasta 2030, <sup>(2)</sup> constituye un factor clave de desarrollo para estos territorios y que deberán enfocarse en la introducción de nuevas tecnologías que permitan elevar la eficiencia y el valor agregado de sus productos, soportados en la intensificación y diversificación de sus producciones.

En Cuba se ha trabajado mucho en la diversificación de la industria azucarera, pero en la actualidad aún no se aprovechan de forma eficiente todas las facilidades que brinda esta industria. <sup>(3)</sup> Sin embargo, un elemento que puede considerarse poco abordado es la integración de los diferentes componentes que conforman la cadena agroindustrial, con un enfoque al desarrollo territorial. De manera general en las condiciones actuales de un desarrollo territorial sostenible, soportado en la actividad industrial, resulta importante profundizar en la relación existente entre las actividades socioeconómicas fundamentales en las que un territorio soporta su economía, la eficiencia de las cadenas de suministro que tributan a la actividad industrial y la contribución de las mismas al desarrollo territorial.

## Fundamentación teórica

Varios investigadores <sup>(4,5,6,7,8)</sup> apuntan a la transformación de la industria, con el desarrollo de tecnologías integradas, automatizadas y optimizadas, como

resultado de procesos de innovación sistémicos, encaminados al mejoramiento de la eficiencia, la flexibilidad, el desempeño organizacional y la competencia; para ello, se pronostican cambios en la forma en que operan los procesos, las cadenas de suministro y los modelos de negocios.

Actualmente se imponen, modelos con enfoque de economía circular que reducen los impactos económicos, ambientales, <sup>(9)</sup> sociales <sup>(10)</sup> y cierran el ciclo de vida de los productos, <sup>(11)</sup> cuyos procesos se basan en la cooperación y la integración, <sup>(12)</sup> para alcanzar el desarrollo sostenible, como solución integradora de elementos económicos, ambientales y sociales, <sup>(13, 14)</sup> generando impactos positivos en el ámbito de su desarrollo y competitividad.<sup>(15)</sup>

Para ello, las estrategias de trabajo deben orientarse a la economía circular, se requiere revelar y optimizar las cadenas de suministro lo que permite la toma de decisiones oportunas, responsabilizar a cada uno de los sectores económicos por su implicación y aprovechar al máximo las oportunidades del territorio enfocado al desarrollo territorial.

Por consiguiente, resulta pertinente diseñar una estrategia de optimización como herramienta para procesos de evaluación y toma de decisiones en la definición de escenarios productivos con mayor aporte al desarrollo territorial.

## **Materiales y métodos**

### **Optimización de la cadena de suministro**

En la realización de este estudio se utilizaron las ventajas de los métodos de optimización y de computación para los cuales se siguieron los pasos siguientes:

- Planteamiento del problema

En este paso se planteó el problema y se definió su naturaleza, que en este caso es un problema de programación lineal mezclada con enteros, considerándose que se desea maximizar los aportes al desarrollo local de un municipio, tomando como base la contribución de la industria objeto de análisis, teniéndose en cuenta la disponibilidad de materias primas necesarias en los procesos productivos que garantizan la producción y la demanda de los principales clientes en la industria de interés.

- **Formulación del problema**

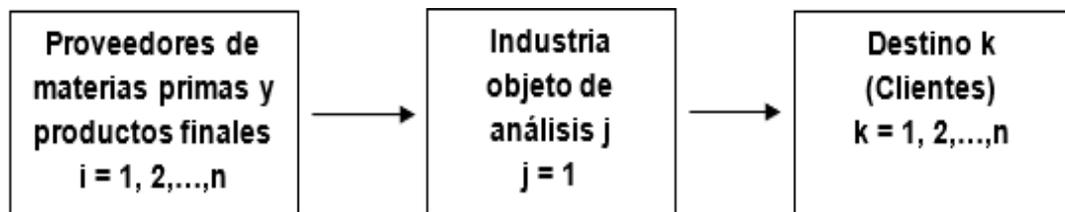
El problema se formuló en la hoja de cálculo del EXCEL, programándose las variables continuas y enteras, las restricciones de capacidad de cada una de las materias primas principales y de las plantas involucradas, las de demanda de los productos finales y la función objetivo.

La función objetivo son los máximos aportes al desarrollo local, considerando los impuestos que deben pagar los sectores económicos por sus operaciones de compra venta.

- **Solución del problema**

Para la solución del problema se utilizó la Macro Solver del EXCEL, obteniéndose la mejor alternativa que maximiza los aportes al desarrollo local por ventas de materias primas y productos, con la programación con enteros y las cantidades a producir por cada uno de los eslabones del sistema. También utilizando las variables definidas como enteras, se simulan los escenarios diseñados.

A continuación, se desarrollan cada uno de los pasos (figura 1):



**Fig. 1-** Planteamiento del problema de optimización

donde:

$X_{ij}$  (Cantidades producidas de las materias primas  $i$  necesarias para la producción de la industria objeto de análisis  $j$ ).

$Y_{jk}$  (Cantidades de productos finales que se producen en la industria objeto de análisis  $j$  para enviar hacia los destinos  $k$ )

**Variables enteras:**  $Z_j$  (Alternativas de producción)

Se consideraron todas las materias primas intermedias que se venden y compran para garantizar las producciones en la industria objeto de análisis ( $X_{ij}$ ).

Asimismo, los productos finales vendidos a los principales clientes.

**Como función objetivo:**

$$\text{Máx}_{ap,DL} = \sum 0,052 * ((p_{ij} * X_{ij} + p_{ij} * Y_{ij}) * (Z_1 + Z_2 + Z_3)) + 0,02 * ((p_{ij} * Y_{ij}) * (Z_1 + Z_2 + Z_3)) \quad (1)$$

donde:

$p_{ij}$  (precios de venta de cada materia prima y producto final),

$X_{ij}$  (Materias primas)

$Y_{ij}$  (Productos finales)

$Z_j$ : (Alternativas de producción)

Se considera para los aportes al desarrollo local un 5,2 % que se aplica a todos los productos y materias primas que se compran y venden por los sectores económicos del territorio y un impuesto de un 2 % para las producciones finales que no constituyan materias primas.

**Como restricciones se consideraron:**

De capacidad de cada materia prima y producto final

$$X_{11}(Z_1+Z_2+Z_3) \leq K_1$$

$$X_{21}(Z_1+Z_2+Z_3) \leq K_2$$

.

.

.

$$X_{11-1}(Z_1+Z_2+Z_3) \leq K_{11}$$

donde:

$K_i$  (capacidad de producción de cada uno de las materias primas y productos finales)

Se consideraron las relaciones e índices tecnológicos para las producciones.

De demanda de productos finales

$$Y_{11}(Z_1+Z_2+Z_3) = D_1$$

$$Y_{12}(Z_1+Z_2+Z_3) = D_2$$

$$Y_{13}(Z_1+Z_2+Z_3) = D_3$$

$$Y_{14}(Z_1+Z_2+Z_3) = D_4$$

donde:

$D_j$ : (demanda de sorbitol, siropes, líquido de freno y FOS)

**Como restricciones de números enteros se consideraron:**

Las alternativas de producción consideradas

$$Z_1+Z_2+Z_3=1 \tag{2}$$

$$Y_1+Y_2=2 \tag{3}$$

## Resultados y discusión

### Optimización de la cadena de suministro intensificada y diversificada

Se optimizó primero, para conocer los máximos aportes que pueden realizarse por la cadena de suministro al desarrollo local, según la disponibilidad de caña. En este sentido, se toman como referencia las zafras 16/17, 21/22 y el promedio del período, con una ejecución de 274 826,00 t/a, 63 921,40 t/a, y 158 827,90 t/a de caña respectivamente. La tabla 1 muestra los precios de materias primas y productos, además, se determinan las capacidades de los recursos. Para ello se tuvo en cuenta los índices de consumo, <sup>(16)</sup> conjuntamente con la disponibilidad de caña, a partir de sus encadenamientos productivos locales.

**Tabla 1-** Precios de materias primas y productos

Producto	u/m	Precio
Caña de azúcar	\$/t	800,00
Azúcar crudo	\$/t	11133,83
Azúcar refino	\$/t	15377,55
Fructooligosacárido (FOS)	\$/t	2568,65
Fructosa	\$/L	1,82
Sirope saborizado fructosa	\$/L	32,45
Sirope off	\$/L	4,29
Sirope saborizado off	\$/L	30,00
Glucosa	\$/t	10536,40
Sorbitol	\$/t	33814,83
Líquido de freno	\$/L	37,95

También, en la figura 2 se observa la integración de las producciones y su interrelación entre los sectores económicos implicados, en el territorio a través de las demandas y entregas que se generan, a partir de la planificación real de sorbitol (1 005,38 t/a). Resaltar el aprovechamiento del residuo generado en la refinación del azúcar (sirope off) y el coproducto (fructosa) que se forma en la inversión de la sacarosa para la obtención de la glucosa, considerada el producto deseado para ser empleado en la producción de sorbitol. Esta unión intersectorial constituye la cadena de suministro para la agroindustria azucarera territorial, sustentada en políticas de economía circular.

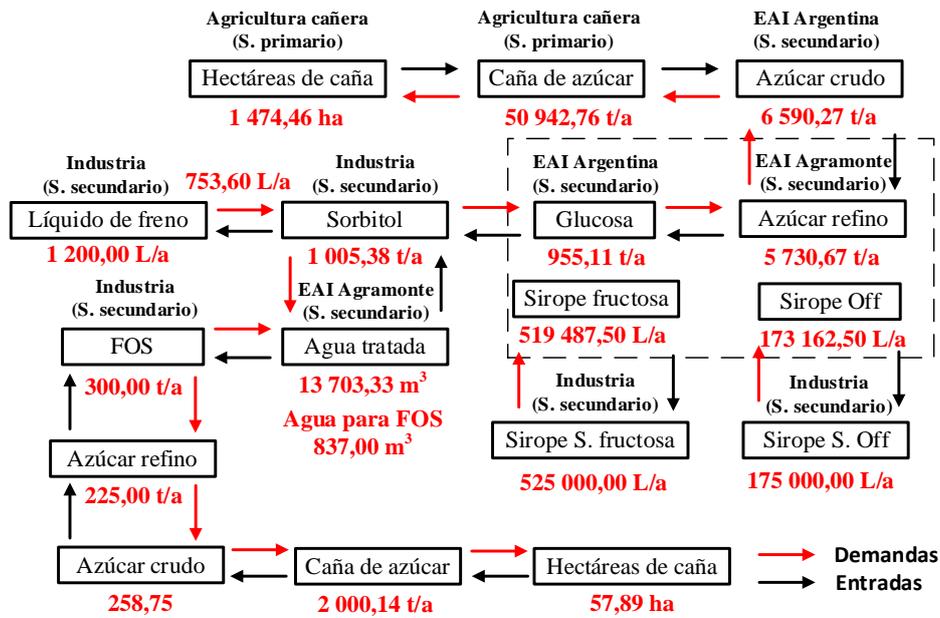


Fig. 2- Demandas y entregas por sectores económicos para nuevos escenarios

Por su parte, en la tabla 2 se especifican los máximos aportes al municipio en miles de pesos y se presentan las capacidades de ventas también en miles de toneladas o litros según corresponden para cada uno de los escenarios.

Tabla 2- Resultados de la optimización, máximos aportes al municipio en miles de pesos (1000 CUP)

FO (máx aportes al Municipio)	Zafra 2016-17	Zafra 2021-22	Promedio
	118 852,94	27 643,84	68 687,69
caña (t)	274, 83	63,92	158,83
azúcar crudo (t)	35, 55	8,27	20,55
azúcar refinado (t)	30,92	7,19	17,87
glucosa (t)	5,15	1,198	2,98
sirope off (L)	2 688,33	6 25,28	1 553,64
sirope saborizado off (L)	2 660,10	618,70	1 537,33
Sorbitol (t)	5,41	1,26	3,13
líquido de freno (L)	5 785,81	1 345,71	3 343,75
FOS (t)	0,00	0,00	0,00
Fructosa (L)	16 233,88	3 775,82	9 381,91
sirope sab. Fructosa (L)	16 406,14	3 815,88	9 481,47

Los resultados arrojaron 118 852 942,93 CUP, 27 643 841,94 CUP y 68 687 690,88 CUP de máximos aportes al desarrollo local respectivamente (zafra 16/17, zafra 21/22 y zafra promedio), lo que evidencian un

comportamiento proporcional entre la disponibilidad de caña y la contribución al desarrollo territorial. Además, no se reflejan ventas de FOS, debido a que, bajo estas condiciones ideales, todo el azúcar se utiliza para producir glucosa ya que el precio es mayor y, por tanto, generan más ventas.

Teniendo en cuenta estos razonamientos, posteriormente se combinan estos escenarios, fijándose las capacidades de glucosa, las cuales comprenden la producción anual de la planta actual, la suma de esta con otra de igual capacidad y la cromatográfica por vía enzimática con capacidades de 450,00 t/a, 900,00 t/a y 4 279,57 t/a respectivamente. La tabla 3 muestra los resultados para la zafra 16/17 correspondiente a las mayores producciones, se presentan los máximos aportes al municipio en miles de pesos y las capacidades de ventas también en miles de toneladas o litros según corresponden para cada uno de los escenarios.

**Tabla 3-** Resultados de la optimización, máximos aportes al municipio en miles de pesos (1000 CUP) para la zafra 16/17

FO (máx aportes al Municipio)	Planta glucosa actual	Actual + Inversión	Glucosa por cromatografía
	<b>73 455,06</b>	<b>77 799,23</b>	<b>110 424,64</b>
caña (t)	274,83	274,83	274,83
azúcar crudo (t)	35,55	35,55	35,55
azúcar refino (t)	30,92	30,92	30,92
glucosa (t)	0,45	0,90	4,30
sirope off (L)	2 688,33	2 688,33	2 688,33
sirope saborizado off (L)	2 660,10	2 660,10	2 660,10
Sorbitol (t)	0,47	0,95	4,49
líquido de freno (L)	505,30	1 010,60	4 805,46
FOS (t)	37,62	35,82	6,98
Fructosa (L)	1 417,77	2 835,54	13 483,21
sirope sab. Fructosa (L)	1 432,81	2 865,63	13 626,28

Se obtienen como máximos aportes al desarrollo local 73 455 060,45 CUP, 77 799 232,32 CUP y 110 424 638,84 CUP respectivamente, para cada una de las producciones (actual, actual + inversión y por cromatografía), en correspondencia a la zafra 16/17, donde se alcanzaron las mayores producciones. Asimismo, es válido destacar, que en el análisis de los otros dos escenarios de zafra para la planta cromatográfica no se obtienen resultados válidos, motivado por la carencia de caña.

## Conclusiones

El desarrollo industrial sostenible debe sustentarse en políticas de economía circular, soportada en encadenamientos productivos locales que posibiliten la adquisición de materias primas y el aporte de nuevos productos, que funcionen sobre cadenas de suministro optimizadas. La optimización evidencia la necesidad de sembrar caña en el territorio, con el propósito de intensificar y diversificar producciones, para cumplir con las demandas y maximizar los aportes al desarrollo local.

## Referencias bibliográficas

1. CANEL, M. *Discurso en la clausura de la X Legislatura de la Asamblea Nacional del Poder Popular*: Habana, Cuba.2023.
2. *PLAN NACIONAL DE DESARROLLO ECONÓMICO Y SOCIAL HASTA EL 2030*: Publicación realizada con apoyo del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en Cuba, Diciembre 2019.
3. DÍAZ, M. *El procesamiento de la caña de azúcar con esquemas flexibles y énfasis en la alimentación, la energía y la preservación del medio ambiente*. Documento presentado en Taller "El azúcar y su contribución al desarrollo económico y social del país": La Habana, Cuba.2019. Informe inédito.
4. ROZO GARCÍA, F. *Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0*. Revista UIS Ingenierías: Universidad Industrial de Santander. Colombia.2020, **19**(2), pp. 177-191. ISSN 1657-4583.
5. CULOT, G., NASSIMBENI, G., ORZES, G., SARTOR, M. *Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions*. International Journal of Production Economics. 2020, **226**(107617), pp. 1-15. ISSN 0925-5273.
6. BÜCHI, G., CUGNO, M. CASTAGNOLI, R. *Smart factory performance and Industry 4.0*. Technological Forecasting and Social Change. 2020, **150**(119790), pp. 1- 10. ISSN 0040-1625.
7. CHING, N., GHOBAKHLOO, M., IRANMANESH, M., MAROUFKHANI, P., ASADI, S. *Industry 4.0 applications for sustainable manufacturing: A systematic literature review and a roadmap to sustainable development*. Journal of Cleaner Production. 2022, **334**(130133), pp. 1-10 ISSN 0959-6526.

8. SCHMITT, R., ADAM, T., BARBALHO, S., HEINE, I., SILVA, I. *Industry 4.0 Readiness: a new framework for maturity evaluation based on a bibliometric study of scientific articles from 2001 to 2020*. *Dyna: Universidad Nacional de Colombia*. 2021, **88**(218), pp 101-109. ISSN 0012-7353.
9. RODRÍGUEZ, M., VÁZQUEZ, A., TORRES, M., VILARAGUT, M., CASTRO, M. Planeamiento territorial con energía fotovoltaica en la provincia de Cienfuegos. *Ingeniería Energética: Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.Cujae*. 2022, **XLIII**(1), pp 58-70. ISSN 1815-5901.
10. MARTÍN, M., DIAS, A., IRIBARREN, D. Definition, assessment and prioritisation of strategies to mitigate social life-cycle impacts across the supply chain of bioelectricity: A case study in Portugal. *Renewable Energy*. 2022 **194**(28935), pp 1110-1118. ISSN 0960-1481.
11. DE LA CABA, K., GUERRERO, P., TRUNG, T., CRUZ-ROMERO, M., KERRY, J., FLUHR, J., NEWTON, R. From seafood waste to active seafood packaging: An emerging opportunity of the circular economy. *Journal of Cleaner Production*. 2019, **208**(14299), pp 86-98. ISSN 0959-6526.
12. DE JESUS, A., ANTUNES, P., SANTOS, R., MENDONÇA, S. Eco-innovation in the transition to a circular economy: An analytical literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2018, **172**, pp 2999-3018. ISSN 0959-6526.
13. PRIETO, V., JACA, C., ORMAZABAL, M. Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*. 2018, **179**(11619), pp 605-615.
14. KORHONEN, J., HONKASALO, A., SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*. 2018, **143**, pp 37-46. ISSN 0921-8009.
15. SALDAÑA, J., BOJÓRQUEZ, L., CARLOS, C., GARCÍA, E. Impacto del uso de las TIC en la Competitividad de las PyMEs en Aguascalientes, México. *Conciencia Tecnológica*. 2021, (61), pp 1-11.
16. WILSON, F., GALINDO, P., OQUENDO, H., RODRÍGUEZ, J. Planificación de la producción industrial basada en balances intersectoriales. Estudio de caso sorbitol. *Revista Centro Azúcar*. 2023, **50**(4), pp 1-12 ISSN 2223-4861.

## **Conflicto de interés**

Los autores declaran que no hay conflictos de interés

## **Contribución de los autores**

Fabian Enrique Wilson González: conservación de datos, investigación, primera redacción.

Pablo Galindo Llanes: conceptualización, redacción, revisión y supervisión.

Hilda de las Mercedes Oquendo Ferrer: software, conceptualización, redacción, revisión y supervisión.

Néstor Loredo Carballo: conceptualización, redacción, revisión y supervisión.