

Parámetros de optimización para un modelo de sostenibilidad ambiental en la industria manufacturera ecuatoriana

Darwin Aldás Salazar¹; Daniela Silva Gómez²;
Tito Mayorga Morales³; Helder Barrera Erreyes⁴

Resumen

Las actividades industriales generan impactos ambientales negativos como consecuencia de sus procesos productivos. Además, las exigencias de orden mundial por el cuidado del planeta impulsan a generar sistemas productivos más sostenibles. Por tal motivo el objetivo de la presente investigación es definir y analizar los parámetros que intervienen en la optimización de estrategias de sostenibilidad en la industria de manufactura del Ecuador hacia una producción sostenible en el ámbito ambiental, económico y social. Para el desarrollo de la investigación se partió de los objetivos ambientales que se muestran en la base de datos de la encuesta a empresas levantada por el INEC en Ecuador; posterior se realizó un estudio de la literatura existente referente a modelos de optimización para definir parámetros de modelización que se adapten al sector industrial estudiado. Finalmente se caracterizó los parámetros obtenidos de la literatura y de la base de datos a través del modelo Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC). De esta manera se obtuvieron parámetros que permitirán a futuro evaluar modelos de optimización, los más relevantes fueron: Costo unitario de tratamiento de aguas, costo de transporte, emisiones de carbono, costo de producción por unidad de productos, volumen total de residuos en la zona afectada.

Palabras clave: impacto ambiental, parámetros de modelización, multicriterio, objetivos ambientales.

Optimization parameters for an environmental sustainability model of the Ecuadorian manufacturing industry

Abstract

Industrial activities generate negative environmental impacts as a consequence of their production processes. Besides, global demands for the care of the planet drive to generate more sustainable production systems. For this reason, the objective of this research is to define and analyze the parameters involved in the optimization of sustainability strategies in the manufacturing industry of Ecuador towards sustainable production in the environmental, economic and social spheres. For the development of the research, we started from the environmental objectives shown in the database of the survey of companies conducted by INEC in Ecuador; subsequently, a study of the existing literature on optimization models was carried out to define modeling parameters that are adapted to the industrial sector studied. Finally, the parameters obtained from the literature and the database were characterized through the Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) model. The most relevant were: unit cost of water treatment, transportation cost, carbon.

Keywords: environmental impact, modeling parameters, multi-criteria, environmental targets.

Recibido: 25 de junio de 2024

Aceptado: 10 de noviembre de 2024

¹ <https://orcid.org/0000-0001-8882-030X> ; darwinsaldas@uta.edu.ec ; Universidad Técnica de Ambato: Facultad de Contabilidad y Auditoría

² <https://orcid.org/0000-0002-7132-5780>; dsilva7296@uta.edu.ec; Universidad Técnica de Ambato: Facultad de Contabilidad y Auditoría

³ <https://orcid.org/0000-0002-4385-3906>; titopmayorga@uta.edu.ec; Universidad Técnica de Ambato: Facultad de Contabilidad y Auditoría

⁴ <https://orcid.org/0000-0001-8196-3797>; hm.barrera@uta.edu.ec; Universidad Técnica de Ambato: Facultad de Contabilidad y Auditoría

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos los entes empresariales han receptado críticas por ser los principales protagonistas en los problemas ambientales (Wright & Nyberg, 2017), aunque, aún existe una interminable lista de inquietudes de insostenibilidad ambiental a las que estas empresas contribuyen. Muchas de ellas se enfocan solamente en los beneficios, sin tomar en cuenta la responsabilidad que se debe tener con el medio ambiente (Schaefer et al., 2020). La falta de compromiso entre el rendimiento ambiental y económico (Hang et al., 2018), ha provocado que las organizaciones omitan las intranquilidades que han sido originadas por la escasa sostenibilidad ambiental (Wahab, 2021).

La sostenibilidad ambiental se determina como la relación responsable con el medio ambiente para impedir el desgaste de los recursos naturales y de esta manera permitir la calidad ambiental por un largo tiempo (Sun et al., 2019). Esta definición de sostenibilidad ambiental se estableció como un mecanismo costoso y fue considerado como un obstáculo para el crecimiento económico. Por consiguiente, fue demostrada la dificultad ambiental que se daba al no introducir la sostenibilidad al contexto económico, social y cultural, desde entonces, se dio la necesidad de alternativas de desarrollo sostenible a futuro, que impulsaban a realizar un uso razonable de los recursos naturales (Gómez Contreras, 2014). En este aspecto, las personas se han centrado en la sostenibilidad ambiental, para incrementar varias alternativas y de esta forma desencadenar nuevas tácticas que impulsen el desarrollo sostenible y contribuyan a reducir la extenuación de recursos naturales, así como el deterioro por motivo de los procedimientos productivos (Aldás et al., 2024).

La sostenibilidad ambiental y la industria manufacturera son dos aspectos fundamentales que se debe considerar para obtener un punto de equilibrio entre el desarrollo económico y el cuidado ambiental (Okorie et al., 2021) y de esta manera conservar un desarrollo sostenible y cuidar el medio ambiente para las futuras generaciones sin desvincular el crecimiento económico del país. La industria manufacturera es uno de los sectores más destacables del Ecuador brindando gran

solvenencia y sostenibilidad económica en el país. La industria manufacturera es muy trascendente, ya que su importancia se basa en el desarrollo económico que se encuentra estrechamente ligado de forma positiva. La gestión ambiental tiene un propósito en las industrias del Ecuador y es, valorar el cuidado del medio ambiente, para que de esta manera se pueda conocer en qué medida se utilizan las Buenas Prácticas Ambientales y su impacto que tiene en el desarrollo sostenible (Malavé & Fernández, 2019).

Para entender lo importante que es la gestión ambiental, es sustancial conocer que surge desde que el ser humano empieza a utilizar ciertas maquinarias, que consumen energía, a partir de la Revolución Industrial y lo significativo que fue para la humanidad (A. Vidal & Asuaga, 2021). Debido a las acciones tanto del pasado, presente y futuro, la gestión ambiental se define como el conjunto de acciones que están enfocadas a conservar y proteger el medio ambiente (Arteta Peña et al., 2015). Para el cumplimiento de este aspecto es necesario la relación entre la información interdisciplinaria y los ciudadanos.

La industria manufacturera está evolucionando permanentemente, permitiendo pasar de una producción primaria a un estado de crecimiento, y valor agregado (Ríos-Almodóvar & Carrillo-Regalado, 2014). La industria manufacturera es una actividad, que se dedica a la transformación de materiales tanto físicos como químicos en un producto final, es decir, se encuentran listas para el consumo y comercialización, este sector es fundamental para el desarrollo del crecimiento económico de un país (Sánchez Juárez & Moreno Brid, 2016). La manufactura se encuentra en el sector secundario de la economía, esta actividad es desarrollada por diversas empresas, las cuales pueden ser pequeñas o multinacionales, además, la industria manufacturera, es un subgrupo del sector industrial, es decir, por medio de un proceso se produce cierto producto tangible, pero esta pasa por una transformación para llegar al final del insumo (Ibn Batouta et al., 2023). El sector manufacturero en el Ecuador tiene un protagonismo importante, pero de igual manera, genera una gran cantidad de residuos contaminantes que provoca daños en el medio ambiente (Aldas et al., 2023).

Un punto a recalcar son los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el objetivo 12 con un propósito de garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. Alzate et al. (2018) señalan que, en la actualidad, existe una creciente presión en temas medioambientales por parte de diversas partes interesadas en los países Latinoamericanos. La Organización de las Naciones Unidas tiene como meta principal exhortar a las empresas, de manera especial las magnas empresas y las empresas a nivel mundial decidan acoger prácticas sostenibles y unan información sobre la sostenibilidad en su lapso de introducción de informes (ONU, 2018).

II. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación, se utilizó una metodología conceptual con revisión de literatura y un descriptivo a través de un análisis de jerarquización con la herramienta denominada Criteria Importance Through Intercriteria Correlation CRITIC, donde se identificaron variables, criterios y múltiples parámetros de modelización que se enlazan a un modelo de optimización matemático. Los parámetros se analizaron a través de la base de datos tomada de la encuesta estructural de empresas ENESEM 2020, realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos INEC. Los datos proporcionados permitieron realizar un análisis detallado de las variables de estudio y principalmente categorizar los criterios de modelización basados en sostenibilidad ambiental que se ajusten al modelo matemático de optimización. Con el método CRITIC se determinó pesos para cada parámetro de tal forma que el peso es tanto mayor cuanto mayor sea su varianza. El método CRITIC es un mecanismo comparativo que destaca la importancia de diferentes criterios considerando sus valores normalizados por el rango como se indica en la ecuación 1 (Muñoz & Romana, 2016).

$$W_j = \sum_{j=1}^n \sum (1 - r_{jk}) \quad (1)$$

Donde:

w_j = peso o ponderación del criterio j

s_j = desviación típica del criterio j

$r_{j,k}$ = Coeficiente de correlación entre los criterios j y k

Los pesos obtenidos (w_j) se normalizan por la suma.

Obtenido el peso w_j de cada uno de los criterios se procede al cálculo de la ponderación de las distintas empresas mediante la ecuación 2:

$$x_i = \sum_{j=1}^n w_j \times C_{ij} \quad (2)$$

Donde:

x_i es la ponderación de la empresa i

w_j es el peso del criterio j

C_{ij} es el valor del criterio j para la empresa i

Utilizando el método CRITIC se determinó el peso de cada criterio; básicamente, el rango se utiliza para estandarizar las variables y luego se calcula la desviación estándar y la matriz de correlación para cada parámetro. Los pesos (w_j) se normalizan por la suma, obteniendo la ponderación (w_j estandarizada) de las variables (Aznar Bellver & García García, 2011).

El procesamiento de la información del modelo CRITIC se describe de la siguiente manera:

1. Crear la matriz de decisión
2. Normalizar por el rango los valores de cada uno de los criterios
3. Calcular la desviación estándar de cada criterio
4. Calcular la correlación entre cada par de criterios
5. Calcular el peso de cada criterio

El modelo CRITIC proporciona un enfoque sistemático y estructurado para procesar información sobre incidentes críticos, que permite una descripción detallada y completa. Esta información se utiliza para análisis, toma de decisiones y mejora de procesos en diversas situaciones.

Una vez definidos los principales parámetros de modelización se podrá elegir un modelo matemático que permita conseguir los objetivos ambientales y optimizarlos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la fase de revisión de literatura, se utilizó dos bases de datos (Scopus y Scielo) donde se identificaron 104 artículos científicos, los mismos que fueron importados al gestor bibliográfico Mendeley, posteriormente se eliminaron los duplicados quedando 99 artículos para examinar, luego de discriminar por tipo de artículo, área de la ciencia, temporalidad, quedaron 77 artículos. A continuación se seleccionaron solamente aquellos que presentan modelos matemáticos de optimización a través de la programación lineal, quedando de esta manera 22 artículos, se realizó un informe para excluir los que no cumplían los criterios para su elegibilidad, estos fueron: programación lineal, modelo matemático, sostenibilidad, energía, emisiones de dióxido de carbono, residuos sólidos y aguas residuales, con

este análisis se logró un informe evaluado para determinar su elegibilidad, mostrando finalmente 7 artículos seleccionados.

Se realizó además un análisis bibliométrico utilizando la herramienta VOSviewer, que proporciona información sobre las relaciones y conexiones entre términos clave. Se realizó un análisis de las palabras mencionadas: "modelos matemáticos", "sostenibilidad", "programación lineal", "optimización", "industria manufacturera", "desarrollo sostenible".

Este análisis sugiere un enfoque que combina la modelización matemática y la optimización para abordar cuestiones específicas en la industria manufacturera, con un énfasis en la sostenibilidad. En la Figura 1 se evidencia el resultado de las interrelaciones de las palabras en el análisis bibliométrico.

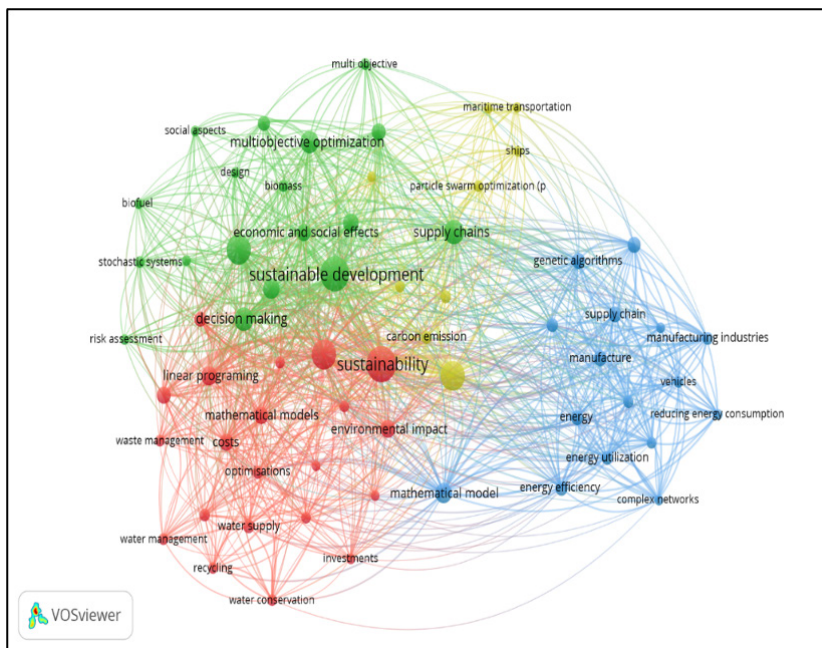


Figura 1: Diagrama de VOSviewer

En el proceso de revisión de literatura se sigue las pautas del método Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis (PRISMA) para la identificación, selección y exclusión de estudios de manera sistemática. La exclusión de estudios establecidos en temas específicos indica un enfoque selectivo según los criterios de la revisión dando por la cadena

de búsqueda. El análisis proporciona una visión general del proceso de revisión sistemática realizado mediante PRISMA, destacando los pasos clave y los resultados obtenidos en cada etapa para lograr la obtención de los artículos científicos más acordes para la elección del modelo matemático. Los resultados del análisis de los 7 modelos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios de modelización

Modelo	Autor	Tema	Objetivos ambientales				Enfoque modelado	Enfoque de solución	Tipo de industria	Software
			Emisiones de CO ₂	Aguas residuales	Residuos solidos	Energía				
M-01	(Alcocer Quinteros et al., 2020)	Modelo multicriterio para la gestión integral de residuos sólidos urbanos en Quevedo – Ecuador			X		Modelo matemático multicriterio	Modelo de Programación lineal	Domiciliarios, comerciales e industriales Mezclados en una zona urbana	Software General Algebraic Modeling System (GAMS)
M-02	(Beheshtinia & Fathi, 2023)	Energy-efficient and sustainable supply chain in the manufacturing industry				X	Modelo de optimización	Modelo de programación lineal entera mixta	Producción y transporte	LINGO
M-03	(Dehaghi & Khoshfetrat, 2020)	AHP-GP approach by considering the leopold matrix for sustainable water reuse allocation: Najafabad case study, Iran		X		X	Modelo de optimización	Modelo de programación lineal entera mixta	Agricultura e industria	LINGO
M-04	(Jabarzadeh et al., 2020)	A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable fruit closed-loop supply chain network	X				Optimización	Modelo de programación lineal entera mixta	Agrícola	Sistema General de Modelado Algebraico (GAMS)
M-05	(Mahjoub & Sahebi, 2020)	The water-energy nexus at the hybrid bioenergy supply chain: A sustainable network design model		X		X	Optimización	Modelo de Programación lineal	Energética	MINMAX
M-06	(Oliveira et al., 2023)	Self-Sustainability Assessment for a High Building Based on Linear Programming and Computational Fluid Dynamics				X	Optimización	Modelo de programación lineal		Ansys Fluent

M-07	(Rajak et al., 2022)	Multi-objective mixed-integer linear optimization model for sustainable closed-loop supply chain network: a case study on remanufacturing steering column	X	Optimización	Programación lineal entera mixta	Manufactura	Sistema General de Modelado Algebraico (GAMS)
------	----------------------	---	---	--------------	----------------------------------	-------------	---

Cada modelo tiene sus propias fortalezas y limitaciones, y la elección del enfoque y del software puede depender de la naturaleza específica del problema y de los recursos disponibles para su resolución. En conjunto, estos modelos representan una contribución significativa al campo de la optimización ambiental y la sostenibilidad en la industria. Dentro de cada modelo se identificaron los parámetros de modelización más relevantes, los criterios elegidos fueron revisados dentro de la encuesta ENESEM 2020, realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos INEC del apartado información económica ambiental

en empresas, estos criterios fueron analizados de las 703 empresas para así darles un valor. Por otro lado, los criterios que no se han identificado en dicha encuesta se procedió a su eliminación.

Los modelos matemáticos identificados en la revisión de literatura se evalúan en función de los Objetivos ambientales descritos en la Tabla 2. Los parámetros mostrados en la tabla son los más destacados dentro de los objetivos ambientales, estos objetivos son recopilados dentro de las emisiones de CO₂, aguas residuales, residuos sólidos y energía

Tabla 2. Objetivos ambientales

Tratar aguas residuales		Minimizar generación de residuos sólidos	Consumir eficientemente la energía
<ul style="list-style-type: none"> Costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro Emisión de Carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor Costo de producción por unidad de productos. Emisiones por unidad de producto 	<ul style="list-style-type: none"> Costo unitario de tratamiento de aguas residuales Agua limpia y saneamiento 	<ul style="list-style-type: none"> Generación de residuos sólidos Separación de residuos sólidos Tratamiento de residuos sólidos Compostaje de residuos sólidos Disposición final de residuos sólidos Volumen total de escombros en la zona afectada La cantidad de residuos sólidos Diferentes de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje 	<ul style="list-style-type: none"> Energía equivalente de productos finales Electricidad producida a partir de residuos Consumo de combustible del vehículo en m por cada recorrido Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por unidad de electricidad producida Consumo máximo de energía por periodo Costo unitario de generar electricidad en el sitio

La información proporcionada en la Tabla 3 muestra a los modelos asignados en cada objetivo ambiental y el enfoque de solución utilizado. Los modelos analizados utilizan enfoques de

programación lineal entera mixta para abordar diversos objetivos ambientales, lo que demuestra la eficacia y flexibilidad de estos enfoques para resolver problemas ambientales.

Tabla 3. Evaluación de los modelos en función de los objetivos ambientales

Emisiones de CO ₂	Objetivos ambientales		Energía	Enfoque de solución
	Aguas residuales	Residuos sólidos		
M-04	M-03			Modelo de programación lineal entera mixta
	M-05			Modelo de programación lineal entera mixta
		M-01		Modelo de programación lineal entera mixta
		M-07		
			M-02	
			M-03	Modelo de programación lineal entera mixta
			M-05	
			M-06	

En la Tabla 4 se extrae los parámetros de modelización de cada modelo matemático, estos permitirán la optimización de la función objetivo con la consideración de las limitaciones a través de las diferentes restricciones. Los porcentajes indican la proporción de participación de dicho parámetro en cada modelo. De esta manera se destaca como las principales funciones objetivo: 1) la minimización de costo de producción por unidad de producto; 2) La minimización del costo de

transporte del modo de transporte m por kilómetro y 3) La minimización de emisiones por unidad de producto.

Los parámetros más relevantes para la modelización a tomar en cuenta son: La generación de residuos sólidos, el consumo eficiente de energía eléctrica y el consumo de combustibles fósiles. Estos parámetros se los debe considerar como base para la formulación de un modelo de optimización para la sostenibilidad ambiental.

Tabla 4. Parámetros de cada modelo

Modelos	Costo unitario de tratamiento de aguas residuales	Agua limpia y saneamiento	Costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro	Emisión de Carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor	Costo de producción por unidad de productos.	Emisiones por unidad de producto	Generación de residuos sólidos	Separación de residuos sólidos	Tratamiento de residuos sólidos	Compostaje de residuos sólidos	Disposición final de residuos sólidos	Volumen total de escombros en la zona afectada	La cantidad de residuos sólidos	Diferentes de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje	Energía equivalente de productos finales	Electricidad producida a partir de residuos	Consumo de combustible del vehículo en m por cada recorrido	Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por unidad de electricidad producida	Consumo máximo de energía por periodo	Costo unitario de generar electricidad en el sitio
M-01	0	0	0	0	0	0	99,99	43,55	3,68	35,6	50,78	7,4	40,98	3,68	0	0	0	0	0	0
M-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,7	1,1	42,67	1,4	100	96,3
M-03	28	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,7	1,1	42,67	1,4	100	96,3
M-04	0	0	43	98	100	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M-05	28	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,7	1,1	42,67	1,4	100	96,3
M-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,7	1,1	42,67	1,4	100	96,3
M-07	0	0	0	0	0	0	99,99	43,55	3,68	35,6	50,78	7,4	40,98	3,68	0	0	0	0	0	0

Utilizando el método CRITIC es posible ponderar todos los parámetros y obtener la siguiente información dentro de dichos criterios con mayor relevancia (Ver Tabla 5): el peso del costo unitario del tratamiento de aguas residuales, agua potable y alcantarillado es de 11.07%, que es el valor más grande, seguido del transporte. Los parámetros de costo del modo de transporte,

emisiones de CO2 por contenedor KM (por tamaño de contenedor), costo de producción por unidad de producto y peso de emisión por unidad de producto es 8,55%, y, por último, el peso total de residuos en el área afectada es 7,24%. Estos criterios se enumeran como parámetros con mayor valor y así proceder con la selección del modelo de optimización cuantitativo.

Tabla 5. Ponderación por el Método CRITIC

Costo unitario de tratamiento de aguas residuales	8,55	11,07%
Agua limpia y saneamiento	8,55	11,07%
Costo de transporte del modo de transporte m por kilómetro	6,61	8,55%
Emisión de Carbono por contenedor KM por cada tamaño de contenedor	6,61	8,55%
Costo de producción por unidad de productos.	6,61	8,55%
Emisiones por unidad de producto	6,61	8,55%
Generación de residuos sólidos	4,69	6,07%
Separación de residuos sólidos	4,69	6,07%
Tratamiento de residuos sólidos	4,69	6,07%
Compostaje de residuos sólidos	4,69	6,07%
Disposición final de residuos sólidos	4,69	6,07%
Volumen total de escombros en la zona afectada	5,59	7,24%
La cantidad de residuos sólidos	4,69	6,07%
Diferentes de piezas que se reciclan en sitios de reciclaje	0	0,00%
Energía equivalente de productos finales	0	0,00%
Electricidad producida a partir de residuos	0	0,00%
Consumo de combustible del vehículo en m por cada recorrido	0	0,00%
Energía requerida para la mezcla continua de agua y biomasa en el digestor por unidad de electricidad producida	0	0,00%
Consumo máximo de energía por periodo	0	0,00%
Costo unitario de generar electricidad en el sitio	0	0,00%

IV. DISCUSIÓN

Se considera que la creación e implementación de un modelo cuantitativo para la optimización ambiental en el sector manufacturero de Ecuador, es de vital importancia para el cumplimiento de los objetivos ambientales, los mismos que se encuentra encaminados para una gestión más eficaz de los recursos y la sostenibilidad a largo plazo. La aplicación de un modelo de optimización en la industria de manufactura ecuatoriana tiene múltiples beneficios, en primer lugar, ayuda a las empresas a reducir su huella ambiental al optimizar el uso de recursos naturales, minimizar la generación de residuos y mejorar la eficiencia energética. Esto no solo contribuye a la conservación del medio ambiente, sino que también resulta en

ahorros significativos en costos operativos a largo plazo. Así, por ejemplo, Feitó Cespón et al. (2016) indican que un modelo de optimización integra objetivos económicos y medioambientales con el fin de respaldar la toma de decisiones estratégicas y tácticas, como la ubicación de instalaciones, el diseño de flujos de materiales y la selección de medios de transporte. En otro estudio se indican que las empresas manufactureras muestran que los objetivos ambientales están estrechamente comprometidos con el medioambiente para generar capacidades estratégicas con estándares ambientales (Cornejo-Cañamares et al., 2021).

El modelo cuantitativo de optimización ambiental representa una herramienta eficaz para mejorar la sostenibilidad y la competitividad

de la industria de manufactura ecuatoriana. Su aplicación ayuda a las empresas a reducir costos, cumplir con regulaciones ambientales y contribuir al desarrollo sostenible del país. Sin embargo, se necesitará un compromiso continuo por parte de todas las partes interesadas para superar los desafíos y maximizar los beneficios de esta innovadora aproximación.

V. CONCLUSIONES

Con base en las palabras clave proporcionadas, se identificó un conjunto de parámetros para un modelo de optimización matemática que están relacionados con objetivos ambientales en la industria manufacturera. Para crear y elegir categorías con ponderaciones para los parámetros, se realizó una revisión de literatura y se consideró los objetivos ambientales descritos en la base de todos ENESEM. Posteriormente se utilizó un análisis multicriterio para modelar criterios relacionados "con la sostenibilidad ambiental". La clasificación de las emisiones de CO₂, las aguas residuales, los residuos sólidos y la energía proporciona una base sólida para comprender el papel de estos criterios en el desarrollo de modelos matemáticos para optimizar el entorno de producción. Utilizando el análisis multicriterio y sus herramientas, es posible determinar el modelo matemático y los parámetros más apropiados para optimizar los objetivos ambientales del sector manufacturero del Ecuador. Esto proporciona un medio transparente para mejorar la eficiencia de la industria manufacturera. Además, las decisiones de sostenibilidad tienen en cuenta factores como la complejidad computacional y la adaptabilidad a las condiciones ambientales. El análisis crítico ayuda a identificar los modelos matemáticos más apropiados para optimizar los objetivos ambientales específicos de las industrias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Técnica de Ambato, a la Dirección de Investigación y Desarrollo DIDE y a la Facultad de Contabilidad y Auditoría por apoyar el desarrollo del presente artículo como producto del proyecto de Investigación denominado "ESTRATEGIAS DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL BAJO

PRINCIPIOS DE ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA DE MANUFACTURA DEL ECUADOR. UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN." con código PFCAUD 18, aprobado mediante resolución Nro. UTA-CONIN-2023-0038-R.

"Ponencia presentada en el V Congreso Internacional Economía y Contabilidad Aplicado a la Empresa y Sociedad, ECAES 2024, desarrollado en la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador"

VI. REFERENCIAS

- Alcocer Quinteros, P., Knudsen González, J., Marrero Delgado, F., & Miranda Casanova, B. (2020). Modelo multicriterio para la gestión integral de residuos sólidos urbanos en Quevedo – Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales*. <https://orcid.org/0000-0002-5470-2572>
- Aldás, D., Mula, J., & Diaz-Madroñero, M. (2024). *Dimensions and Challenges to Integrate Operations Strategies into a Sustainable and Circular Supply Chain* (pp. 403–408). https://doi.org/10.1007/978-3-031-57996-7_69
- Alzate, A., Ramírez, J., & Alzate, S. (2018). 74 *REVISTA CHILENA DE ECONOMÍA Y SOCIEDAD, JUNIO 2018 MODELO DE GESTIÓN AMBIENTAL ISO 14001: EVOLUCIÓN Y APORTE A LA SOSTENIBILIDAD ORGANIZACIONAL*.
- Aznar Bellver, J., & García García, F. (2011). *Una alternativa multicriterio a la valoración de empresas: aplicación a las Cajas de Ahorro A Multicriteria Alternative to Companies' Valuation: Application to a Spanish Savings Bank*. www.revista-eea.net,
- Beheshtinia, M. A., & Fathi, M. (2023). Energy-efficient and sustainable supply chain in the manufacturing industry. *Energy Science and Engineering*, 11(1), 357–382. <https://doi.org/10.1002/ese3.1337>
- Brundtland. (1987). *Desarrollo y cooperación económica internacional: medio ambiente*. https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMA-Informe-Comisión-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf

- Cornejo-Cañameres, M., Medrano, N., & Olarte-Pascual, C. (2021). Environmental objectives and non-technological innovation in Spanish manufacturing SMEs. *Journal of Cleaner Production*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126445>
- Dehaghi, B. F., & Khoshfetrat, A. (2020). AHP-GP approach by considering the leopold matrix for sustainable water reuse allocation: Najafabad case study, Iran. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(2), 485–499. <https://doi.org/10.3311/PPci.14689>
- Feitó Cespón, M., Castro, R. C., & Rubio Rodríguez, M. A. (2016). Modelos de optimización para el diseño sostenible de cadenas de suministros de reciclaje de múltiples productos Optimization model to sustainable design of multiple-products recycling supply chain. In *Revista chilena de ingeniería* (Vol. 24, Issue 1).
- Gil Rodríguez, A., Pell del Rio, S., & Valdés, D. (2020). Guía metodológica para la gestión ambiental: una propuesta cubana. *Revista Cubana de Educación Superior*. <http://scielo.sld.cu/pdf/rces/v39n2/0257-4314-rces-39-02-e13.pdf>
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna* (McGraw-Hil).
- Hernández, A., González, G., & González, H. (2016). *Desarrollo sustentable: de la teoría a la práctica* (Ediciones).
- Ibn Batouta, K., Aouhassi, S., & Mansouri, K. (2023). Energy efficiency in the manufacturing industry – A tertiary review and a conceptual knowledge-based framework. *Energy Reports*, 9, 4635–4653. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2023.03.107>
- Jabarzadeh, Y., Reyhani Yamchi, H., Kumar, V., & Ghaffarinasab, N. (2020). A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable fruit closed-loop supply chain network. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 31(5), 1351–1373. <https://doi.org/10.1108/MEQ-12-2019-0276>
- Leff, E. (2006). Ética por la Vida. Elogio de la voluntad de poder. *Polis : Revista de La Universidad Bolivariana*, 5(13), 0.
- Madroñero Palacios, S., & Guzmán Hernández, T. (2018). Desarrollo sostenible.
- Aplicabilidad y sus tendencias. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(3). <https://doi.org/10.18845/tm.v31i3.3907>
- Muñoz, B., & Romana, M. G. (2016). Application of Multicriteria Decision Methods in Evaluating Alternative Solutions for Transportation Facilities.
- Mahjoub, N., & Sahebi, H. (2020). The water-energy nexus at the hybrid bioenergy supply chain: A sustainable network design model. *Ecological Indicators*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106799>
- Okorie, O., Charnley, F., Russell, J., Tiwari, A., & Moreno, M. (2021). Circular business models in high value manufacturing: Five industry cases to bridge theory and practice. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.2715>
- Oliveira, C., Baptista, J., & Cerveira, A. (2023). Self-Sustainability Assessment for a High Building Based on Linear Programming and Computational Fluid Dynamics. *Algorithms*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/a16020107>
- ONU. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. www.issuu.com/publicacionesespecial/stacks
- Páez, J. C. (2011). *Elementos de la Gestión Ambiental* (AMECUADOR).
- Rajak, S., Vimal, K. E. K., Arumugam, S., Parthiban, J., Sivaraman, S. K., Kandasamy, J., & Duque, A. A. (2022). Multi-objective mixed-integer linear optimization model for sustainable closed-loop supply chain network: a case study on remanufacturing steering column. *Environment, Development and Sustainability*, 24(5), 6481–6507. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01713-5>

Ríos-Almodóvar, J. G., & Carrillo-Regalado, S. (2014). El empleo calificado y no calificado en la manufactura de México ante la crisis de 2009. *Economía Sociedad y Territorio*, 2014. <https://doi.org/10.22136/est002014393>

Sánchez Juárez, I. L., & Moreno Brid, J. C. (2016). El reto del crecimiento en México: industrias manufactureras y política industrial. *Revista Finanzas*

y *Política Económica*, 8(2), 271–299. <https://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.2016.8.2.4>

Vidal, A., & Asuaga, C. (2021). Gestión ambiental en las organizaciones: una revisión de la literatura. *Revista Del Instituto Internacional de Costos*, 18, 84– 122.

Vidal, E., & Regaldo, L. (2022). *Gestión ambiental. Introducción a sus instrumentos y fundamentos*. www.unl.edu.ar/editorial