



**Diseño de Experimentos Factorial Completo 2k en
canaletas plásticas para controlar la apariencia (Color)
como una característica de calidad en base al peso del
componente**

Pacheco-Cisneros, M.A., Rojas-Mancera, E., Trasviña-Osorio, R.J.



**Multicriteria analysis computer program
with classical techniques and Unified Model**

**criteria analysis computer program using classical
techniques and Unified Model**

Gómez-Rivera, U.A., Pérez-Olguín, I.J.C., Medina-Zarate, J.,
Rodríguez-Picón, L.A., Pérez-Domínguez, L.A.



**Arquitectura IoT-MQTT para Monitoreo de la Calidad del
Aire Interior**

Lúa-Madriral, O., Figueroa-Millán, P.E., López-Osuna, S.A.



**A Novel Heuristic Approach for Simplifying Urban Risk
Zones in Distribution Route Planning**

Aguirre-Ibarra, D.A., Serrano-Rubio, J.P., Cano-Olivos, P.,
Cuautle-Cutiérrez, L.



**Microstructural effects of preconditioning materials on gray
iron and their impact on corrosion resistance**

Villarreal-Fuentes, B.O., Rodríguez-Reyes, M., Vázquez-Obregón, D.,
Sánchez-Arroyo, A., Olvera-Romero, G.D., Veloza-Matamoras, Z.,
Zamora-García, J.J., Acevedo-Dávila, J.L.



**Impacto de un videojuego educativo gamificado en el
rendimiento académico en Programación Orientada a
Objetos**

Flores-Redondo, S.A., Flores-Redondo, D.A., Cab-Chan, J.R.,
Carpizo-Acuña, C.R., Hernández-Meza, M.E.



**Evaluación de aceites vegetales en la formulación de
oleogeles con base de cera de candelilla orgánica y su
aplicación en el desarrollo de una tortilla de harina**

Borjas-Celaya, A., Martínez-Ávila, G.C.G., Rodríguez-Romero, B.A.,
Rojas-Molina, R., Aranda-Ledesma, N.E.

Cintillo Legal

RIIT REVISTA INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA, Vol. 14, No. 82. Septiembre - Octubre 2026, es una publicación bimestral editada y publicada por Universidad Autónoma de Coahuila, boulevard Venustiano Carranza s/n colonia República Oriente, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, Tel. (844) 414 85 82, <https://riit.com.mx/>, correo electrónico: publicacionesriit@uadec.edu.mx. Editor responsable: Dra. Antonia Mtz. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-021512364600-102, ISSN: 2007-9753, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Departamento de Divulgación y Comunicación Digital de la Dirección de Investigación y Posgrado de la UAdeC, Q.F.B. Fernando García, Edificio "D" planta alta, unidad Camporredondo, Saltillo, Coahuila, C.P. 25280, Tel. (844) 414 85 82, fecha de última modificación: 01 Septiembre 2026.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de Universidad Autónoma de Coahuila.

Tabla de Contenido

Título artículo/ Autores	Páginas
Diseño de Experimentos Factorial Completo 2k en canaletas plásticas para controlar la apariencia (Color) como una característica de calidad en base al peso del componente Pacheco-Cisneros, M.Á., Rojas-Mancera, E., Trasviña-Osorio, R. J.	1 – 13
Multicriteria analysis computer program using classical techniques and Unified Model Gómez-Rivera, U.A., Pérez-Olguín, I.J.C., Medina-Zarate, J., Rodríguez-Picón, L.A., Pérez-Domínguez, L.A.	14 - 37
Arquitectura IoT-MQTT para Monitoreo de la Calidad del Aire Interior Lúa-Madrigal, O., Figueroa-Millán, P.E., López-Osuna, S.A.	38 - 59
A Novel Heuristic Approach for Simplifying Urban Risk Zones in Distribution Route Planning Aguirre-Ibarra, D.A., Serrano-Rubio, J.P., Cano-Olivos, P., Cuautle-Gutiérrez, L.	60 - 77
Microstructural effects of preconditioning materials on gray iron and their impact on corrosion resistance Villarreal-Fuentes, B.O., Rodríguez-Reyes, M., Vázquez-Obregón, D., Sánchez-Arroyo, A., Olvera-Romero, G.D., Veloza-Matamoros, Z., Zamora-García, J.J., Acevedo-Dávila, J.L.	78 - 96
Impacto de un videojuego educativo gamificado en el rendimiento académico en Programación Orientada a Objetos Flores-Redondo, S.A., Flores-Redondo, D.A., Cab-Chan, J.R., Carpizo-Acuña, C.R., Hernández-Meza, M.E.	97 - 111
Evaluación de aceites vegetales en la formulación de oleogeles con base de cera de candelilla orgánica y su aplicación en el desarrollo de una tortilla de harina Borjas-Celaya, A., Martínez-Ávila, G.C.G., Rodríguez-Romero, B.A., Rojas-Molina, R., Aranda-Ledesma, N.E.	112 - 125



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Diseño de Experimentos Factorial Completo 2^k en canaletas plásticas para controlar la apariencia (Color) como una característica de calidad en base al peso del componente

Full Factorial Design of Experiments 2^k in plastic cable channels to control appearance (color) as a quality characteristic based on component weight

Pacheco-Cisneros, M.Á.^a, Rojas-Mancera, E.^{b*}, Trasviña-Osorio, R. J.^c

Tecnológico Nacional de México/ ITS de Purísima del Rincón; Blvd. Del valle 2301.Col. Guardarrayas, Purísima del Rincón, Guanajuato. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3170-9644>, <https://orcid.org/0000-0002-5965-9120>^{*}, <https://orcid.org/0000-0003-0895-2009>.
mps23110002@purisima.tecnm.mx; erick.rm@purisima.tecnm.mx^{*}, rosa.to@purisima.tecnm.mx

Innovación tecnológica: En esta investigación se implementa un modelo de análisis estadístico dentro de los diseños experimentales. Para lograr la optimización y control de calidad visual en el producto mediante la definición de parámetros basados en el resultado del diseño experimental que permitan sustituir los ajustes empíricos en el proceso de inyección.

Área de aplicación industrial: Manufactura de componentes plásticos, específicamente dentro del sector automotriz, donde se emplean procesos de inyección de polímeros de alta precisión con ingeniería de procesos y cuyo objetivo sea lograr la transición de un control de calidad empírico a un control basado en modelos estadísticos.

Recibido: 02 marzo 2026

Aceptado: 03 agosto 2026

Abstract

The application of statistical methods in the plastic injection molding industry provides a robust approach for improving manufacturing processes and product quality. In this study, a (2^k) factorial design of experiments (DOE) was implemented to optimize the plastic injection molding process, focusing on a critical quality characteristic: part color. Variations in this characteristic resulted in the production of nonconforming parts, generating annual losses estimated at USD 153,568. A total of 32 experimental runs were conducted, and the experimental data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) with a 95% confidence level. The results identified the optimal combination of injection time and metering time, significantly improving color consistency and ensuring compliance with the required quality specifications for the molded parts.

Keywords: Plastic injection molding, Design of Experiments (DOE), ANOVA, quality improvement, color consistency, factorial design.

Resumen

La aplicación de métodos estadísticos en la industria de inyección de plásticos constituye una estrategia robusta para optimizar los procesos de manufactura y mejorar la calidad de los productos. En este trabajo se implementó un Diseño de Experimentos (DDE) factorial (2^k) completo con el propósito de optimizar el proceso de inyección de plásticos, enfocándose en una característica crítica de calidad: el color de la pieza. La variación de esta característica ocasionaba la generación de productos no conformes, lo que representaba pérdidas económicas estimadas en 153,568 USD anuales. Para el desarrollo del estudio se realizaron 32 corridas experimentales, cuyos resultados fueron analizados mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95%. Los resultados permitieron identificar la combinación óptima de los parámetros tiempo de inyección y tiempo de dosificación, logrando una mejora significativa en la uniformidad del color y asegurando el cumplimiento de las especificaciones de calidad de las piezas inyectadas.

Palabras clave: Inyección de plásticos, Diseño de Experimentos (DDE), ANOVA, mejora de la calidad, diseño factorial, color de la pieza.

Introducción

Los procesos de inyección de plástico son actualmente uno de los procesos con mayor auge en la industria mexicana. Enfocado en el sector automotriz, estos permiten la fabricación de componentes de casi cualquier forma, y tamaño, con un alto desempeño funcional (Hernández-Vega et al., 2024). Por lo anterior, la planificación de la calidad y el análisis estadístico de los procesos es un medio por el cual se puede lograr el cumplimiento a las especificaciones del producto, con el objetivo conjunto de volver eficientes los costos derivados de la mala calidad. Bajo este contexto se identifica la industria automotriz como una de las principales fuentes de aportación al PIB del país. Según un artículo de 2022 de revista Jóvenes en la Ciencia. La industria automotriz es de gran relevancia para la economía mexicana ya que contribuye al 3% del Producto Interno Bruto (PIB). Lo que se traduce en un acumulado de 51.2 billones de dólares y genera al menos 900,000 empleos directos (Heira & Ximena, 2022).

De manera regional, Guanajuato es un estado en el cual la industria automotriz se ha

asentado con gran fuerza, y donde se han podido desarrollar numerosas investigaciones en pro del desarrollo tecnológico. Guanajuato es una de las entidades con mayor presencia de ensambladoras de autos en México, que incluye Mazda, Honda, Toyota, GM, VW, las cuales cuentan con una amplia cadena de suministro. El estado se ha beneficiado con la inyección masiva de IED (Inversión Extranjera Directa) a tal punto que entre 2019 creció en un 350% con la característica importante de que esa inversión a la región particular del Bajío (Raymundo M. & Germán A., 2023). Existen 380 empresas localizadas en 22 parques industriales en 19 municipios del estado, la industria automotriz en el estado en los últimos cinco años creció alrededor del 71.9% representando cerca del 20.6% del PIB estatal (Silva & Arciniega, 2021). Aunado a lo anterior, los centros de investigación y desarrollo, así como las diferentes instituciones que brindan colaboración, han sido pilar importante para el crecimiento de la industria en el estado. El dinamismo de desarrollo y economía se puede constatar de las siguientes cifras según datos de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

(SECIHTI). La localización geográfica de Guanajuato es una de sus principales ventajas competitivas comprendiendo los siguientes porcentajes en ocupación automotriz industrial. León 18%, Silao 28%, Irapuato y Celaya cerca del 20%. Los cuales concentran el dinamismo de la industria automotriz (Silva & Arciniega, 2021).

La relevancia de la información del presente artículo se fundamenta en la aplicación de técnicas estadísticas como lo es el DDE en los procesos de inyección de plástico. Aunque se ha demostrado efectividad en la aplicación de dichos modelos, aún existe un área de oportunidad derivada de la falta de metodologías estandarizadas u holísticas que se puedan establecer como un marco de referencia en la relación sistemática de las variables de control en los procesos de inyección. El alcance del presente trabajo se sustenta en cinco fases que conjuntan el análisis y la estandarización de métodos y variables para lograr definir los parámetros del proceso de inyección, con el fin de mantener la calidad del producto, cumplir las especificaciones, conservar la capacidad y estabilidad del proceso. Aunque hoy en día la tecnología de la inyección de plástico es muy avanzada. La necesidad de definir parámetros óptimos de proceso siempre será inherente una vez que se lleva a la práctica real o aplicación el proceso de inyección. En su proyecto “Metodología para problemas de moldeo de plástico en partes con superficie clase A” desarrollado en la Universidad Autónoma de Cd. desarrolló un modelo causal en un proceso de moldeo de doble disparo con un enfoque de diseño y se mejoraron los parámetros de proceso de tiempo, temperatura y velocidad tangencial, se utilizó un (DOE) diseño de experimentos factorial que fue clave para mejorar la calidad de las piezas moldeadas a un 90%. (Señorans Gorga, 2018). Estudios como el anterior y la presente investigación, ofrecen una clara referencia de un algoritmo de innovación

tecnológica en la toma de decisiones y resolución de problemas de aplicación en relación al área de oportunidad mencionada en el control del proceso y a su alta efectividad en las exigencias de la industria automotriz.

Materiales y Métodos

Análisis de Varianza & Terminología Experimental.

Actualmente la estadística en la industria es una práctica que ha adquirido mayor relevancia en la Industria. Actualmente, es común realizar experimentos y pruebas con el fin de comprobar una idea y resolver un problema; el querer saber que material es mejor para un componente o si el diseño propuesto cumple con los requerimientos establecidos (Almaguer Crespo & Edgar, 2022). Las industrias utilizaban limitadamente las técnicas estadísticas avanzadas de experimentación, principalmente por el hecho de estar condicionados al conocimiento de estrategias primitivas, normalmente menos eficientes. Las condiciones del entorno actual permiten la aplicación de métodos y herramientas más asertivas que día a día en base a los resultados experimentales, comprueban los beneficios de su uso. La aplicación de las técnicas estadísticas como el DDE en los procesos de inyección, es una de esas prácticas que cada día se vuelve más común, debido a que el resultado en la salida del proceso (componente) puede cambiar gracias a la cantidad de variables que se manejan. El diseño de experimentos es esencialmente una estrategia para la planificación de experimentos de manera tal que las conclusiones relevantes sean alcanzadas en forma eficiente y económica. Identificación de parámetros que influyen el proceso de inyección se han estudiado mediante el uso de Diseño de Experimentos, dando como resultado la selección de los parámetros que

tienen mayor influencia en este proceso (Todorov et al., 2025).

El diseño de experimentos completo factorial ha mostrado ser útil para la optimización de parámetros como el tiempo de enfriado, temperatura de fundición, temperatura de moldeo y tiempo de presión en los procesos de inyección de plásticos para la simulación de la resistencia de las piezas (Moayyedian et al., 2024).

El análisis de varianza es una técnica estadística cuyo objetivo principal es el análisis de los datos experimentales. La varianza es la dispersión de un conjunto de datos que se puede analizar mediante el método análisis de varianza (ANOVA) en el DDE. Es precisamente lograr la separación de la variación total en cada una de las partes, factores o fuentes de variación del experimento. La meta es comparar las medias de los factores para poder concluir si alguno de los mismos está ocasionando influencia directa en la variable de respuesta (Hartono & Akbar Pratama, 2025).

La ANOVA se ha usado para el control de calidad en piezas generadas por procesos de inyección, como para identificar las variables que generan deformaciones en las piezas durante el proceso de inyección (Chen et al., 2023).

En este trabajo se presenta la implementación de un diseño de experimentos factorial completo 2k en el proceso de inyección de canaletas automotrices. Primeramente, se definieron los factores involucrados (Tiempo de Inyección, Temperatura de Cañón, Tiempo de Dosificación, Tiempo de Enfriamiento y Temperatura del molde) con sus niveles correspondientes. Posteriormente, se realizó el DDE ejecutando las corridas experimentales acorde al principio de aleatorización, y finalmente con base al análisis de varianza (ANOVA), se ajustaron

los parámetros para la inyección de las piezas (Canaletas). De esta manera, se descartó la hipótesis nula " H_0 " y se valida la hipótesis alternativa " H_1 " la cual refiere que hay un efecto significativo entre las variables que interactúan.

Taxonomía de los Diseños Experimentales

La aplicación apropiada del DDE depende en un 80% de la selección adecuada del modelo experimental. Acorde a la autoría de Gutiérrez Pulido en su libro "Análisis y Diseño de Experimentos 2" el autor redacta que existen cinco aspectos que son la base medular para la correcta selección y ejecución de un DDE.

1. El objetivo del experimento.
2. El número de factores a estudiar.
3. El número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta).
5. El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

En resumen, el objetivo del experimento se utiliza como un criterio general de clasificación de los diseños experimentales, mientras que los otros cuatro puntos son útiles para subclasificarlos (Gutiérrez Pulido, 2008).

Diseños Experimentales Factoriales, Fraccionados y completos 2k

El DDE es una técnica de estadística aplicada, que consiste en la planeación, ejecución y análisis de pruebas experimentales con el objetivo de proporcionar respuestas y/o soluciones a las interrogantes del proceso. Los diseños factoriales, son una parte de la taxonomía del DDE. Estos modelos por su parte tienen la principal característica de ser o adaptarse a condiciones en las cuales el costo de las corridas experimentales (Aspecto medular del DDE) puede ser una restricción

para su aplicación. En otras palabras, la configuración del diseño que se realiza se fundamenta en los tratamientos de un diseño factorial completo con la intención de estudiar el efecto de los factores en la variable de respuesta ejecutando menos corridas experimentales.

Para entender la concepción del DDE, es necesario iniciar con las definiciones teóricas de lo que implica la teoría experimental. La unidad experimental; será siempre el resultado físico palpable del experimento en el cual se plasmará la salida de los niveles y factores del experimento. Dicho lo anterior se puede categorizar que los factores como controlables y no de controlables. Los primeros, refieren a aquellas variables del proceso que pueden ser definidas y trabajadas a un nivel específico. A los factores controlables también se les llama variables de entrada, condiciones de proceso, variables de diseño, parámetros del proceso, las “x” de un proceso o simplemente factores (Gutiérrez Pulido, 2008). Los factores no controlables, también son conocidos como factores o señales de ruido. Como su nombre lo estipula, son parámetros del proceso que no se pueden fijar o ser definidas a un nivel especificado durante la ejecución del experimento.

Se denomina Niveles a los valores que pueden ser alcanzados por los factores dentro del experimento. Por otro lado, se conoce

como Puntos de diseño o Tratamientos a la combinación generada entre los factores o parámetros del proceso. Dentro del DDE se tiene la posibilidad de generar el Error experimental, el cual es el resultado de la condición humana del experimentador al momento de planear y ejecutar el experimento. Por último, pero no menos importante, el Error aleatorio del DDE surge naturalmente de la variación del proceso, y de la interacción de los factores no estudiados.

La Tabla 1 muestra el modelo básico del ANOVA. En la primera columna se compilan los factores a analizar, los cuales son identificados como aquellos que deben de ser controlados para eliminar la variación. Seguido de ello la suma de cuadrados refiere a la cantidad que cada una de las fuentes de variación atribuye a la variación total, sean estas independientes o al entrar en interacción.

En la tercera columna están los grados de libertad, estos comprenden la diferencia bajo la cual los datos pueden ser analizados bajo la varianza, y en ese sentido, la varianza estimada es la media estadística que muestra la dispersión de los datos comparados con un promedio. Por último y más importante, el valor F, el cual es el estadístico que evalúa la discriminación entre los diferentes grupos para poder concluir si son o no significativas.

Tabla 1. Análisis de varianza (ANOVA) para el modelo básico.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	F ₀
Tratamientos A	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{SS_A}{MS_E}$
Tratamientos B	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{SS_B}{MS_E}$
Interacción	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{SS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n - 1)$	$MS_T = \frac{SS_T}{ab(n - 1)}$	
Total	SS_T	$abn - 1$		

Métodos experimentales

Definición y Codificación de Variables.

Para el problema o caso de estudio, se definió la característica de calidad, es decir se definió la variable de respuesta del modelo la cual traduciría los resultados de cada corrida experimental. La variable fue seleccionada por su relación directa con la condición de apariencia del componente. Posteriormente,

con ayuda de los expertos del proceso, se definieron los factores que influían directamente en el comportamiento de la variable de respuesta (Tabla 2). Con los factores definidos se desarrolló la estructura del DDE. Para efectos prácticos de la ejecución del experimento, se implementó la codificación correspondiente en base a la nomenclatura de “Yates”.

Tabla 2. Factores que influyen en la variable de respuesta.

Factor	Nombre	Unidad	Tipo	Subtipo	Mínimo	Máximo	Low	High
A	Tiempo de Inyección	Seg	Númerica	Continuo	19,34	19,38	"-1"	"+1"
B	Temperatura de Cañón	C°	Númerica	Continuo	250,6	251,6	"-1"	"+1"
C	Tiempo de Dosificación	Seg	Númerica	Continuo	8,12	9,27	"-1"	"+1"
D	Tiempo de Enfriamiento	Seg	Númerica	Continuo	53,04	53,2	"-1"	"+1"
E	Temperatura de molde	C°	Númerica	Continuo	259,6	260,2	"-1"	"+1"

Etapla Preliminar: Planteamiento de la hipótesis del modelo experimental.

Para resumir el resultado del modelo o diseño factorial, se plantearon 2 hipótesis que

evaluaron la importancia de las variables tratadas en el modelo factorial completo. La prueba de hipótesis en el modelo DDE 2k fue la siguiente:

$$H_0 = \text{No hay efecto significativos entre las variables.}$$

$$H_1 = \text{Hay efecto significativos entre las variables.}$$

Etapla de Planeación y Ejecución: Realizar las corridas experimentales.

Para este estudio se utilizó un diseño factorial completo 25-1 No replicado sin bloques. Se llevaron a cabo 32 corridas experimentales de

manera aleatorizada haciendo uso del software estadístico Desing Expert ® (Tabla 3). Cada uno de los resultados de las corridas fue registrado según las predisposiciones de la corrida.

Tabla 3. Corridas Experimentales.

Orden Std	Corrida	Factor 1 Tiempo de Inyección	Factor 2 Temperatura de Cañón	Factor 3 Tiempo de Dosificación	Factor 4 Tiempo de Enfriamiento	Factor 5 Temperatura del Molde	Peso (grms)
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	63,3
10	2	1	-1	-1	1	-1	63,2
24	3	1	1	1	-1	1	95,62
12	4	1	1	-1	1	-1	59,41
15	5	-1	1	1	1	-1	75,68
6	6	1	-1	1	-1	-1	97,24
31	7	-1	1	1	1	1	79,17
3	8	-1	1	-1	-1	-1	57,05
8	9	1	1	1	-1	-1	90,76
25	10	-1	-1	-1	1	1	36,96

21	11	-1	-1	1	-1	1	55,3
11	12	-1	1	-1	1	-1	32,09
16	13	1	1	1	1	-1	79,13
30	14	1	-1	1	1	1	71,43
17	15	-1	-1	-1	-1	1	66,17
13	16	-1	-1	1	1	-1	71,58
14	17	1	-1	1	1	-1	79,44
19	18	-1	1	-1	-1	1	60,4
18	19	1	-1	-1	-1	1	36,98
29	20	-1	-1	1	1	1	71,95
28	21	1	1	-1	1	1	57,05
27	22	-1	1	-1	1	1	32,09
20	23	1	1	-1	-1	1	37,65
22	24	1	-1	1	-1	1	93,69
32	25	1	1	1	1	1	71,58
4	26	1	1	-1	-1	-1	40
5	27	-1	-1	1	-1	-1	61,15
2	28	1	-1	-1	-1	-1	47,06
26	29	1	-1	-1	-1	1	56,12
7	30	-1	1	1	-1	-1	55,36
23	31	-1	1	1	-1	1	49,3
9	32	-1	-1	-1	1	-1	38,59

Discusión de Resultados

Bajo un enfoque de estadística inferencial básica. El diagrama de cajas (Figura 1) nos muestra que la variable de respuesta “Peso” presenta un promedio de 61,95gr con respecto a un rango de 32.09gr hasta un máximo de 97.24gr a la interacción completa de los cinco

factores en las diferentes combinaciones de niveles “Alto/Bajo”. En conclusión, este rango experimental representa el amplio espectro de control que se logró con el DDE para controlar la variación del material fundido dentro de la cavidad del molde durante las fases de la inyección con la interacción de los principales parámetros.

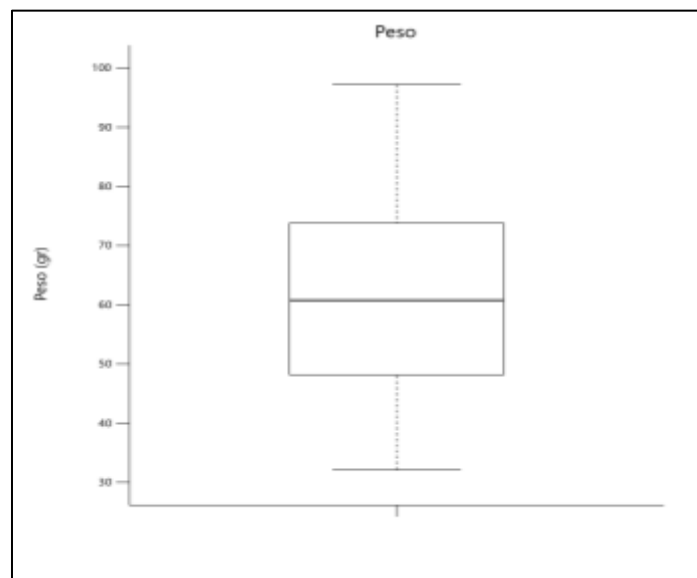


Figura 1. Gráfica de caja de peso de pieza plástica.

Por otro lado, el Histograma de frecuencias (Figura 2), nos presenta los diferentes grupos o categorías de resultado de las 32 corridas experimentales realizadas. Como se observa la categorización de la variable de respuesta se encuentra dentro del rango previamente mencionado, 32.09gr hasta 97.24gr. Desde lenguaje técnico de la inyección científica y la física de los polímeros, y en específicamente en este experimento. Las variaciones en el peso pueden representar diferentes “defectos” como resultado de la

variación del volumen fundido dentro de la cavidad. En otras palabras, pesos menores o cercanos a 32.09gr al momento de la contracción, podrían ocasionar condiciones de fallas de llenado de material, lo que es comúnmente conocido como “Shot short” o “Disparo corto”. Por otro lado, masas muy cercanas a 97.24 impactan en la compactación afectando características como dimensión e incluso dando origen a defectos como “Rebabas”.

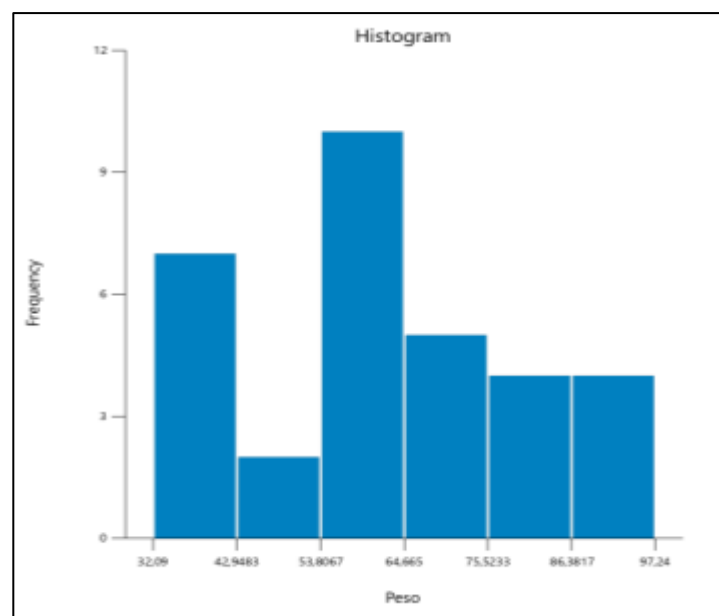


Figura 2. Histograma de distribución de peso acorde a las 32 corridas del DDE.

La Figura 3 muestra el resultado de algunas corridas aleatorias como sustento de la ejecución experimental. Como se puede observar, la variación de color de la pieza surge de la interacción de los factores y niveles a la variable de respuesta (Color). El hallazgo clave del presente estudio se encuentra en el nivel de significancia de impacto estadístico $P < 0.0001$ de las interacciones de orden doble y tripe de los factores tiempo de inyección (A), tiempo de dosificación (C) y el tiempo de enfriamiento (D).

Al realizar una revisión de contraste con diferentes fuentes de literatura referidas a la aplicación industrial del DDE, los resultados de la Figura 4 coinciden en los enfoques actuales de la implementación de métodos estadísticos aplicando técnicas del DDE en entornos de manufactura real como lo describes el autor Horacio Napolitano en su artículo Industria y Química (Napolitano, 2021).



Figura 3. a) y b) Road map de resultados de las 32 corridas experimentales.

Etapas de Análisis: Aplicación del ANOVA.

El análisis de varianza permitió de manera preliminar determinar los efectos más importantes que tuvieron una influencia directa en la variable de respuesta. Acorde al nivel de confianza estadístico el modelo presenta un valor P considerablemente bajo

($P < 0.0001$). Esto refiere a que la probabilidad del error del modelo es menor al 0.01%, lo cual supera el nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$) para determinar los efectos significativos que influenciaron la variable de respuesta (Tabla 4).

Tabla 5. Resultados del diseño de experimentos factorial completo (ANOVA).

ANOVA	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado medio	F-Valor	p-Valor	
Modelo	10450,17	4	2612,54	153,65	< 0.0001	sign
A-Tiempo de Inyección	905,46	1	905,46	53,25	< 0.0001	
C-Tiempo de Dosificación	5362,85	1	5362,85	315,41	< 0.0001	
AC	689,88	1	689,88	40,57	< 0.0001	
ACD	3491,97	1	3491,97	205,38	< 0.0001	
Residual	459,07	27	17,00			
Corrida Total	10909,24	31				

Una vez terminado el análisis ANOVA, se documentó y plasmó los resultados obtenidos, interpretando los valores paramétricos estadísticos y logrando así concluir el experimento con el mejor tratamiento de factores en sus correspondientes niveles. Resultado del diseño experimental DDE-2k: El resultado final del experimento demostró que el control en los tres factores con significancia en el modelo (tiempo de inyección (A), tiempo de dosificación (C) y el tiempo de enfriamiento

(D). Son los principales contribuyentes para la conservación de la característica de calidad. Los factores en control producen una pieza de peso de entre 54.76-64.65 g, la cual tendrá la condición óptima de calidad visual. Es decir, no se presenta contaminación (Figura 4a). Si los factores que influyen el proceso de inyección no se ajustan de acuerdo con lo obtenido en el DEE, el peso de la pieza fluctuará y se obtendrán piezas con pesos diferentes y como consecuencia visualmente con defectos (Figura 4 a, b, c y d).

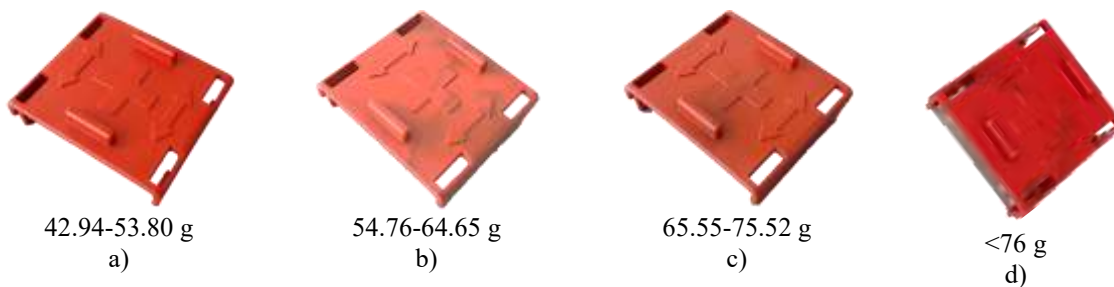


Figura 4. a) Calidad visual óptima utilizando los parámetros obtenidos con el DEE, b), c) y d) ejemplos de piezas con defectos visuales.

Con un coeficiente de determinación de $R^2=0,9579$ indica que el 95.79% del resultado o comportamiento de la variable de respuesta puede ser explicada por el ANOVA factorial completo tras la interacción de dichas variables y solo el restante 4.21% representa la incertidumbre o el error.

Al evaluar el coeficiente de determinación ajustado (R^2), el cual refiere un resultado del

$R^2=0,9517$ donde se limita la aportación de aquellas variables que no representan un aporte significativo al modelo, se puede afirmar que el 95.17% expresa el comportamiento directo de la variable independiente, es decir que se tuvo una disminución del 0.62% el cual indica el sesgo de las variables evaluadas. Por otro lado, al evaluar el coeficiente de determinación de predicción se obtiene un resultado del

$R^2=0,9409$ equivalente al 94.09% el cual nos indica que el modelo estadístico presentado es capaz de predecir los datos con una confiabilidad del 94.09%, es decir que nuevos datos del modelo actual podrían ser capaces de ser analizados.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación concluyen que el cumplimiento de la característica de calidad depende de una sincronización exitosa entre el tiempo de Inyección y tiempo de Dosificación como principales factores. En otras palabras, se pueden definir como los parámetros claves del proceso de inyección. Con el modelo DDE Factorial Completo fue posible mediante la aplicación estadística poder desarrollar una estrategia completa tanto técnica como económica que logró mantener la estabilidad del proceso de inyección, preservar la eficiencia operativa y desarrollar un impacto tecnológico.

La correlación estadística de los factores identificados en el ANOVA tiene una relación directa con el comportamiento físico/químico del polímero durante las fases del ciclo de inyección. Las conclusiones son las siguientes. En base a los resultados del análisis de varianza, se determinó concluyentemente que el Tiempo de Dosificación (Factor C) ejerce la influencia mayor sobre el proceso, al presentar valores ($F = 315.41$) y ($p < 0.0001$). En términos del moldeado científico, se controla la viscosidad y densidad volumétrica del polímero fundido antes de la fase de llenado. Por otro lado, la interacción de los factores ACD con valores ($F = 205.38$) y ($p < 0.0001$) demuestra la fortaleza de una conjunción de características termomecánicas entre el Tiempo de Inyección (A) la Dosificación (C) y el Tiempo de Enfriamiento (D). Esto genera que pueda lograrse un control y estabilidad la transferencia de masa de la unidad de inyección hacia la

cavidad del molde. Fijando una ventana operativa de peso de 54.76 g y 64.65 g que se traduce en piezas de calidad y sin defecto. Logrando así una optimización significativa del proceso, sustentando estadísticamente las interacciones de alto orden que asocian las variables significativas del proceso.

Esta optimización y aportación tecnológica trasciende y se consolida en un resultado físico y sustentado de manera financiera garantizando un ahorro estimado en 153,568 USD/Año. Desde el eje científico y de investigación, se aporta un modelo estadístico controlado, el cual reemplaza la ejecución empírica en el proceso de inyección por una ejecución científica asegurando el cumplimiento de las especificaciones del producto y la viabilidad económica en un sector de gran importancia y competitividad como lo es el sector automotriz. Es importante mencionar que al tratarse de un DOE fraccionado completo, se da prioridad a la eficiencia experimental por lo que la validez matemática y estadística del enfoque propuesto se encuentra respaldada por un coeficiente de determinación ajustado ($R^2 = 95.17\%$) y un sobresaliente coeficiente de predicción (R^2 de predicción = 94.09%). Además el valor P que interpreta la probabilidad del error del modelo es menor al 0.01%, lo cual supera el nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$). El área de oportunidad en realizar corridas experimentales más completas no es necesario, con ello se garantiza que la muestra es estadísticamente significativa. Finalmente, las variables externas como lo es el lote de material, desgaste del molde o humedad, representan una fuente de variación exógenas que pueden, aunque mínimas, ocasionar variación. En ese sentido es de suma importancia aplicar y replicar la metodología de las cinco fases validadas en el presente trabajo con las mismas premisas y así lograr y garantizar una solución viable en el control y estabilidad de los procesos de inyección.

Referencias

- Almaguer Crespo, B. A., & Edgar, C. F. (2022). Métodos de Muestreo para la Optimización de Diseño de Experimentos. *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya*, 14(9), 39-44.
- Chen, J., Cui, Y., Liu, Y., & Cui, J. (2023). Design and Parametric Optimization of the Injection Molding Process Using Statistical Analysis and Numerical Simulation. *Processes*, 11(2), 414. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr11020414>
- Gutiérrez Pulido, H. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA.
- Hartono, M., & Akbar Pratama, F. (2025). The Effect of Injection Pressure and Injection Temperature in The Compression Moulding Process on Flashing Defects of Shoulder Product. *Logic: Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi*, 25(1), 13-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.31940/logic.v25i1.13-18>
- Heira, V. B., & Ximena, C. G. (2022). La industria automotriz y de autopartes en México. *XXVII Verano De la Ciencia*, 1-10.
- Hernández-Vega, J., Reynoso-Guajardo, L., Gallardo-Morales, M., Macias-Arias, M., Hernández, A., de la Cruz, N., Soto-Soto, J., & Hernández-Santos, C. (2024). Plastic injection molding process analysis: Data integration and modeling for improved production efficiency. *Applied Sciences*, 14(22), 10279. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app142210279>
- Kariminejad, M., Tormey, D., Ryan, C., O'Hara, C., Weinert, A., & McAfee, M. (2024). Single and multi-objective real-time optimisation of an industrial injection moulding process via a Bayesian adaptive design of experiment approach. *Scientific Reports*, 14(1), 29799. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-024-80405-2>
- Moayyedian, M., Chalak Qazani, M., Jourabchi Amirkhizi, P., Asadi, H., & Hedayati-Dezfooli, M. (2024). Multiple objectives optimization of injection-moulding process for dashboard using soft computing and particle swarm optimization. *Sci Rep*, 14, 237267. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-024-62618-7>
- Napolitano, H. (2021). Diseño de Experimentos. *INDUSTRIA & QUIMICA*, 62-78.
- Raymundo M., C. V., & Germán A., C. O. (2023). Impacto de la industria automotriz en el desarrollo del Bajío en México. *Problemas del desarrollo*, 54(213), 31-71. <https://doi.org/https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2023.213.69963>
- Señorans Gorga, L. J. (2018). *Análisis del proceso de moldeo por inyección utilizando un software comercial*. Bonaerense de Mar del Plata: Creative Commons.
- Silva, R., & Arciniega, A. (24 de Abril de 2021). Nueva Forma de Organización de la Producción en la Industria

Automotriz en México: Modelo Flexible y Redes de Empresas. *Espacio y Desarrollo*, 36, 49-80. <https://doi.org/https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.202002.003>

Todorov, T., Todorov, G., & Romanov, B. (2025). Parameter Optimization

Using Experimental Design and Statistical Modeling for Injection Molding. In *2025 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)* (pp. 35-40). Varma, Bulgaria: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAI67591.2025.11324749>



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Multicriteria analysis computer program using classical techniques and Unified Model Programa de cómputo de análisis multicriterio con técnicas clásicas y Modelo Unificado

Gómez-Rivera, U.A.*, Pérez-Olguín, I.J.C., Medina-Zarate, J., Rodríguez-Picón, L.A., Pérez-Domínguez, L.A.

Department of Industrial Engineering and Manufacturing, Institute of Engineering and Technology, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, C.P.32310, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3008-7908>*, <https://orcid.org/0000-0003-2445-0500>, <https://orcid.org/0009-0005-7502-1695>, <https://orcid.org/0000-0003-2951-2344>, <https://orcid.org/0000-0003-2541-4595>.

uriel.gomez@uacj.mx*; ivan.perez@uacj.mx; al251636@alumnos.uacj.mx; luis.picon@uacj.mx; luis.dominguez@uacj.mx

Technological Innovation: This paper presents the technological development of a software program that integrates various classic multi-criteria analysis techniques, along with the operation of an innovative technique based on the unified methodology. This approach allows for the identification of significant advances in technological innovation within this field.

Industrial Applications: In the educational sphere, specifically in postgraduate programs, it is used in courses related to operations research and multi-criteria decision-making. It also has practical applications in industry, particularly in supply chain management.

Received: March 07th, 2026

Accepted: August 3th, 2026

Resumen

Con el paso del tiempo, el campo de la toma de decisiones ha adquirido una relevancia creciente, alcanzando un alto nivel de importancia en los contextos contemporáneos. En este marco, el presente artículo introduce un programa computacional multicriterio diseñado para abordar problemas complejos de toma de decisiones. El sistema propuesto integra diversas metodologías multicriterio clásicas dentro de un modelo unificado, lo que permite examinar estos desafíos desde una perspectiva más amplia.

De manera específica, el estudio incorpora métodos ampliamente reconocidos como el Modelo de Suma Ponderada (WSM), el Modelo de Producto Ponderado (WPM), el Método de Evaluación de Suma y Producto Agregados Ponderados (WASPAS), el Método de Organización de Clasificación de Preferencias para Evaluaciones de Enriquecimiento (PROMETHEE II), la Técnica para el Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS) y el Método de Optimización

Multicriterio y Solución de Compromiso (VIKOR), con el objetivo de facilitar y apoyar los procesos de toma de decisiones. Además, se describen los principios operativos de cada metodología y se proporcionan los códigos de programación (códigos QR) para mejorar la visualización y accesibilidad.

La herramienta propuesta presenta contribución tanto en el ámbito académico, científico y tecnológico. El software desarrollado integra con éxito estas seis técnicas clásicas de toma de decisiones multicriterio (MCDM) en un único entorno computacional, junto con la Metodología Unificada propuesta. El sistema permite generar clasificaciones, almacenar resultados intermedios y exportar soluciones finales en formato CSV. La implementación experimental demostró la correcta ejecución de todos los algoritmos incorporados, proporcionando un entorno unificado para el análisis multicriterio en aplicaciones académicas e industriales.

Palabras clave: Programa informático, MCDM, WSM, WPM, WASPAS, PROMETHEE, VIKOR, TOPSIS, metodología unificada.

Abstract

Over recent decades, research on decision making has expanded significantly, becoming a key area within computer science, particularly in fields concerned with data-driven methods, intelligent computational systems, and algorithmic optimization. Within this context, this article introduces a computational tool designed to support the analysis of decision problems involving multiple criteria. The system brings together several well-established multicriteria decision-making approaches within a single framework, allowing these problems to be examined from a broader and more methodologically consistent standpoint.

The study incorporates a set of widely recognized multicriteria decision-making methods, including the Weighted Sum Model (WSM), the Weighted Product Model (WPM), the Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS), the Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE II), the Technique for Order of Preference by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS), and the Multicriteria Optimization and Compromise Solution (VIKOR). The integration of these approaches aims to enhance and support structured decision-making processes. Additionally, this document details the fundamental operating principles of each method and provides their corresponding programming implementations. These implementations are made available through QR codes to improve accessibility, comprehension, and ease of use. The proposed tool contributes directly to academic, scientific and technological domains.

The developed software successfully integrates these six classic multi-criteria decision-making (MCDM) techniques into a single computational environment, along with the proposed Unified Methodology. The system allows for generating rankings, storing intermediate results, and exporting final solutions in a CSV format. Experimental implementation demonstrated the correct

execution of all incorporated algorithms, providing a unified environment for multi-criteria analysis in academic and industrial applications.

Keywords: Computer program, MCDM, WSM, WPM, WASPAS, PROMETHEE, VIKOR, TOPSIS, unified methodology.

1. Introduction

As multicriteria decision making tackles a wide range of issues, it has become increasingly important in the modern era. This approach can be used in both academic and industrial settings. Because these advancements are applicable in fields such as supply chain management and other engineering specialties, the creation and innovation of computational programs have greatly aided in the adaptation of multicriteria decision making within the context of Industry 4.0 (Zhang et al., 2020).

This background highlights the significance of computational tools in contemporary decision science. These solutions are primarily concerned with data management and analysis in scenarios involving large datasets and multiple assessment criteria. As a result, they can consider the preferences, constraints, and unique situations of each decision maker. By employing algorithm-based processes to generate solutions that adhere specific requirements and application settings, these systems provide structured decision support.

Despite the increasing availability of computational tools for multicriteria decision making (MCDM), most existing software implementations focus on a single methodology or provide only a limited subset of classical techniques. Consequently, researchers and practitioners often need to rely on multiple software environments to compare results obtained from different MCDM methods. This fragmented approach complicates methodological consistency, limits the direct comparison of alternatives, and increases the time and effort required to

perform comprehensive decision analyses. Furthermore, the lack of an integrated computational environment capable of incorporating the principal classical MCDM techniques restricts users' ability to obtain consistent results under a common analytical framework, making the interpretation and comparison of outcomes more challenging for both researchers and decision-makers.

Although several computational implementations of individual MCDM methods have been reported in the literature, few studies have proposed an integrated computational environment capable of combining multiple classical techniques within a unified computational framework while simultaneously allowing the storage, comparison, and aggregation of their results. Most existing implementations focus on a single methodology rather than providing an environment that supports comparative multicriteria analysis under a common analytical structure. This lack of integrated computational platforms represents the research gap addressed in this study.

To overcome these limitations, this research proposes the development of an integrated computational platform named MCDM LAB, which incorporates six widely used classical MCDM techniques (WSM, WPM, WASPAS, PROMETHEE II, TOPSIS, and VIKOR) together with a Unified Methodology that enables the aggregation of their individual results into a single decision-support framework. The proposed software contributes by providing a unified computational environment that facilitates comparative analyses, improves methodological consistency, and supports

both academic and industrial decision-making applications.

Computational decision-support systems also contribute to reducing human error when processing large volumes of complex information. By automating mathematical procedures and providing systematic evaluations, these tools improve the objectivity, consistency, and reliability of multicriteria analyses (Wu et al., 2022). Consequently, computational implementations enhance the quality of decision-making by supporting more transparent and reproducible evaluation processes.

From an industrial perspective, multicriteria decision-making (MCDM) software plays a fundamental role in supporting managerial and operational decisions. Organizations frequently face complex decision-making problems involving resource allocation, risk management, supplier selection, and supply chain optimization. In these contexts, MCDM tools provide a systematic framework for evaluating financial, operational, and strategic criteria simultaneously, enabling decision-makers to select alternatives based on comprehensive and objective analyses (Belton & Stewart, 2002; Haider et al., 2023). By integrating information from multiple organizational dimensions, these tools improve decision quality, reduce uncertainty, and contribute to enhanced organizational performance.

Among the various industrial applications of MCDM, supplier selection represents one of the most extensively studied and practically relevant problems. Multicriteria techniques enable organizations to evaluate suppliers based on cost, quality, delivery performance, production capability, and regulatory compliance, facilitating decisions that are better aligned with long-term organizational objectives (Jalil et al., 2023). Consequently,

the adoption of integrated MCDM software not only improves decision quality but also strengthens organizational competitiveness in increasingly dynamic and globalized markets. Given this context, the main purposes of this research are as follows:

- To identify the advantages and limitations associated with the use of multicriteria decision-making tools in higher education, particularly in areas such as operations research and inventory planning.
- To analyze the application of MCDM software in industrial settings, with emphasis on its role in supporting strategic decision-making processes such as supplier selection and supply chain optimization.
- To compare the effectiveness of classical MCDM techniques with more recent approaches, considering aspects such as accuracy, response time, and user acceptance.
- To propose improvements in the design of multicriteria decision-making tools aimed at maximizing their applicability and usability in both academic and industrial environments.

This study is guided by specific objectives and a set of research questions that structure the analysis:

How can using a multicriteria decision-making system based on classical methods improve the accuracy and efficiency of academic decision-making, especially in areas like operations research and inventory management?

What are the most important advantages and disadvantages of using multicriteria decision-making software in industrial management, especially concerning supplier selection and logistics optimization?

What are the differences in the quality and effectiveness of decisions made with traditional MCDM methods compared to those made with more advanced methods, like AI algorithms or predictive analytics?

How can multicriteria decision-making technologies help businesses in highly competitive and globalized industries become more sustainable and competitive?

When developing or updating MCDM software, what factors must be considered to ensure it works well and is user-friendly in both academic and industrial environments?

2. Background

The next section explains the theoretical underpinning of the multicriteria decision making program and gives a detailed look at the classical models that make it up.

2.1. Multicriteria decision-making

This subject in question involves a collection of strategies designed to prioritize alternatives by identifying evaluation criteria within a particular decision problem (González & Ríos, 2003). Moreover, these methodologies have been extensively employed to assist decision-makers by facilitating choices that align with their preferences and contextual circumstances, irrespective of the domain of application.

The decision-making process can be organized into four primary components (Ho, 2008), as outlined below.

The initial phase involves problem identification and analysis, considering the evaluation criteria, information accessibility, and potential conflicts among various stakeholders. These requirements are generally associated with the diagnostic severity of the issue, which may warrant the utilization of multiple multicriteria methods

or techniques.

The second stage entails the identification of viable alternatives. Such possibilities are delineated based on the established evaluation criteria and may arise either before the examination of the chosen procedures or during their formulation. Although the number of alternatives is often restricted in real-world scenarios, the spectrum of potential options can be quite extensive.

The third stage emphasizes the identification of evaluative criteria. To ensure the analysis is meaningful and the problem is accurately delineated, it is necessary to have more than two criteria. The chosen criteria must fulfill two essential requirements. Initially, it must be quantifiable, guaranteeing the availability of adequate data for examination. Secondly, they must be pertinent, in that they affect the interests of various stakeholders or decision-makers. Criteria may be categorized as either cost-type or benefit-type, contingent upon the individual application (Zargami & Szidarovszky, 2011).

The fourth and last step pertains to the decision-making process, encompassing the selection of suitable data collection and evaluation methodologies from a multicriteria standpoint. At this juncture, various criteria are concurrently evaluated to ascertain the most appropriate solution. The allocation of weights to each criterion is crucial, underscoring the significance of various weighting and assessment methodologies.

Furthermore, collaborative decision-making methodologies are analyzed in contexts that may not require multiple decision-makers, focusing specifically on the active engagement of decision makers in the discourse around evaluation factors.

The science of decision-making has played a

fundamental role in research and development. As a result, it has been the subject of global database searches. Through bibliometric analysis, indicators related to the number of citations and documents have been evaluated across different time periods. These periods span from 2014 to 2017, followed by the years 2018 and 2019, and finally, the period from 2020 to 2023. These bibliometric results are presented in Figure 1.

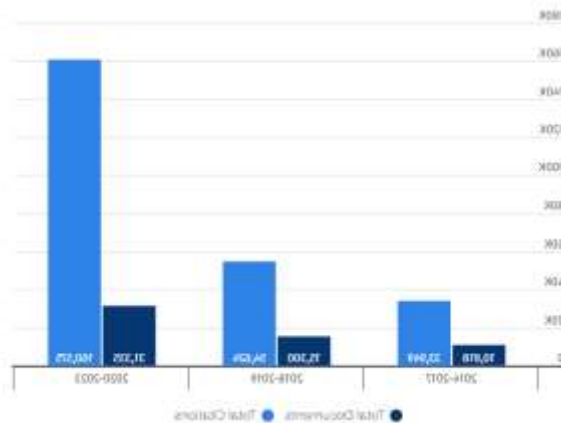


Figure 1. Documents and citations through the years.

Furthermore, the most cited sources, according to the analysis, for the 2014-2017 period are presented in Figure 2.

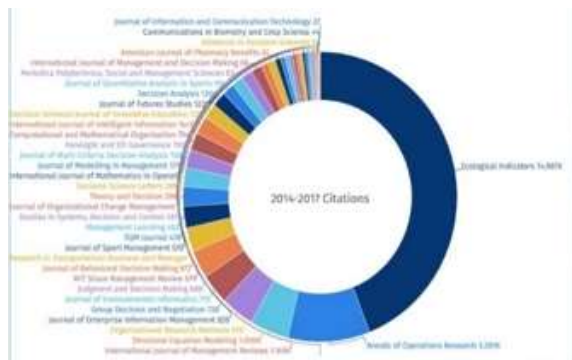


Figure 2. Citations of documents under the branch of decision science (2014-2017).

The corresponding distribution of citations for 2018-2019 is presented in Figure 3.

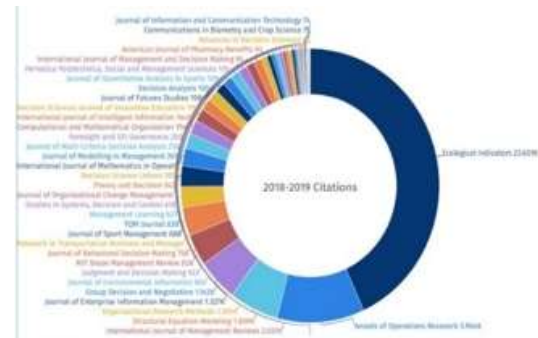


Figure 3. Citations of documents under the branch of decision science (2018-2019).

Finally, the distribution of citations for 2020-2023 is presented in Figure 4.

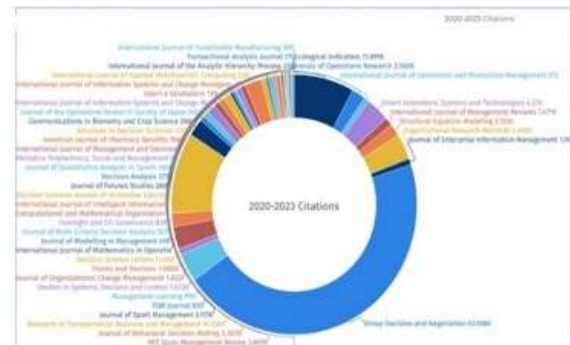


Figure 4. Citations of documents under the branch of decision science (2020-2023).

According to the previously presented figure, an increase in the number of citations over time is observed, particularly in high-impact journals. This rise suggests the growing relevance of this field today. Additionally, the methods employed in each document focus on specific problems or particular areas of development. The following section details the methods used in the present research.

2.2. Weighted Sum Model (WSM)

The weighted sum model is one of the simplest and most widely used methods. Its purpose is to evaluate alternatives and select the best option based on a predefined set of criteria. By way of example, Rao and Venkatasubbaiah (2016) used this method in the analysis of one-dimensional problems, relying on computational tools within the

field of industrial machinery. Likewise, the methodology has been applied to assess the competencies of industrial workers, allowing for the identification of the most suitable alternative based on different criteria and available options.

Finally, once the results are obtained, the alternative that achieves the highest value is selected, as it is considered the most favorable option for the decision-maker.

2.3. Weighted Product Model (WPM)

This strategy is frequently utilized to address selection issues in scenarios with multiple alternatives, such as the selection of mobile phones or electronic tablets. Within this comparative framework, decision-making is facilitated by the application of weighted criteria domains (Atmojo et al., 2014). The concept has also been utilized in the food business to tackle food scarcity, with decisions regarding food selection informed by the available possibilities to attain the best results (Adiyendi, 2015).

2.4. Weighted Aggregate Sum Product Assessment (WASPAS)

The Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) method is a combination of two well-known models: the Weighted Sum Model (WSM) and the Weighted Product Model (WPM). This method is typically used to help decision-makers choose among multiple alternatives. One of its primary advantages is that it's easy to use and computationally simpler than earlier methods. WASPAS has also demonstrated its ability to provide dependable rankings of alternatives across many application contexts (Chakraborty et al., 2015).

WASPAS has been widely used a lot to solve design and production problems. Chakraborty et al. (2015) assert that prevalent applications

include the selection of flexible manufacturing systems, machinery within flexible manufacturing cells, autonomous vehicles, fleet management systems, and industrial robots. The method has consistently yielded favorable outcomes across several application domains.

2.5. Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations II (PROMETHEE II)

This multicriteria approach is a useful method for weighing the advantages and disadvantages of different choices and strategies when making complex decisions. One of its key features is the availability of various selection tools that let users choose among options based on their specific priorities. Consequently, the method is especially helpful for overcoming the limitations of other methods and managing situations involving diverse and sometimes conflicting criteria (Tuzkaya et al., 2010).

The PROMETHEE II method illustrates how a decision-maker perceives the differences between pairs of alternatives for each criterion being evaluated. Depending on the type of criteria, different preference functions can be used to better reflect the evaluator's judgment (Dağdeviren, 2008). This method is commonly used in Decision and Prediction Models (DPM), especially in finance, where it helps with detailed and organized analysis in both business and industrial settings (Mousavi & Lin, 2020). It has also been used in robotics, where it facilitates improved decision-making by building upon insights gained from earlier studies (Taillandier & Stinckwich, 2011).

2.6. Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS)

This approach is based on the idea that the best choice is the one that is closest to an ideal reference point, which is measured by the

Euclidean distance. Therefore, preferences are determined by how similar each alternative is to the ideal solution (Shen et al., 2018). This method is commonly employed in academic research, particularly in contexts where the recruitment of suitable personnel is crucial to organizational performance. Using this method, decision-makers can consider a broader range of factors during the selection process (Kelemenis & Askounis, 2010).

This method has also been used to compare different alternatives based on various time-related criteria. For example, it has been applied in research to track the development of the information society in regions such as the European Union (Łatuszyńska, 2014).

2.7. VIKOR

The VIKOR approach is a well-known method for addressing multi-objective optimization and finding a compromise in decision-making. Its primary purpose is to assist in decision-making when the evaluation criteria are ambiguous or conflicting. The method also highlights the importance of obtaining input from all stakeholders, considering multiple alternatives, and identifying solutions that address challenges with conflicting attributes. This assists decision-makers in finding optimal solutions.

In this context, “compromise” refers to an agreed-upon solution that is as close to the ideal option as feasible achieved through a consensus-based process. VIKOR has been highly beneficial in academic settings, such as in the selection of faculty members. The method serves as a valuable addition to the field of decision science (Radhika et al., 2013) as it simultaneously evaluates multiple factors, such as technical expertise, communication skills, and professional experience.

2.8. Positional Values for the Unified Methodology

In the context of the unified methodology, positional values are represented as numerical digits assigned to specific positions in the equation. They function similarly to weighting factors; however, they are only applied after the user has evaluated different classical multicriteria decision-making methods according to their preferences. These positional values are defined as decimal numbers and are symbolically denoted as a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 and a_6 .

Once numerical values are assigned to each position, they are incorporated into the corresponding unified methodology equation, where they are substituted to perform the final computation.

3. Algorithmic implementation

The software was developed utilizing C#, a high-level, object-oriented programming language integral to the Microsoft .NET framework. Selecting this language enables users to fully utilize the pre-existing libraries within the .NET framework. C# offers access to an extensive array of development tools within the .NET framework, facilitating the creation of more robust system architectures and improving the application's overall visual design.

This research effort involved the development of several user interface components, including forms, text boxes, buttons, panels, DataGridView controls, toolbars, and labels. These components were utilized in the development of the computational algorithms associated with each technique. The subsequent phases delineate the implementation of the Weighted Sum Model (WSM) multicriteria technique. The WSM operation diagram is shown in Annex 1.

Given the operation diagram, the core coding relies on generating a weighted normalized matrix. This matrix is computationally obtained from the mathematical equation characterizing the Weighted Sum Model (WSM) methodology. Subsequently, the results are stored in the normalized matrix for use in the Unified Methodology.

Additionally, the computational algorithm corresponding to WSM is accessible through the QR code shown in Figure 5.



Figure 5. WSM computational algorithm.

In the analysis, the computational algorithm, like other incorporated techniques, operates based on the selection criteria and weight values. This generates results based on a normalized and weighted matrix. The system also allows saving these results for subsequent reuse in the Unified Methodology.

Regarding the computational algorithm of the WPM methodology, its functioning is similar, following the same algorithmic principle. The difference lies in the final mathematical equation, as shown in the operation diagram in Annex 2.

In the analysis, the distinction between the WPM methodology and the WSM methodology lies in its final mathematical equation. The computational algorithm can

be accessed through the QR code shown in Figure 6.



Figure 6. WPM computational algorithm.

In the analysis, the main difference lies in the weighted normalized matrix, as it is at this point that the mathematical equation identifying the algorithm is found. Subsequently, similar to other methodologies, the results from this matrix can be stored in the internal memory of the computing program for later use in the Unified Methodology.

On the other hand, the WASPAS methodology offers a more developed process compared to WPM and WSM, as it results from their fusion. Additionally, it is necessary for the user to input an additional value called 'lambda' for its operation, as without this value, the algorithm cannot be executed. Its overall operability is illustrated in Annex 3.

The Annex 3 diagram illustrates the behavior of the algorithm and, in particular, shows its functionality through the final mathematical equation. Figure 7 provides QR-code access to the associated computational algorithm.



Figure 7. WASPAS computational algorithm.

The WASPAS computational algorithm, like the other incorporated methods, produces its results based on the criteria and weights provided by the user. However, unlike the previous methodologies (WSM and WPM), the WASPAS code generates a final matrix based on the corresponding normalized weighted matrices of WSM and WPM. This final matrix is obtained by executing the WASPAS algorithm, where a user-entered lambda value is requested.

Furthermore, the results are stored internally for use in the Unified Methodology. On the other hand, the implementation of the PROMETHEE II methodology is more complex, as its mathematical algorithm involves continuous interaction with all alternatives. In other words, each alternative is compared, and the resulting value is substituted into the final equation that identifies it. The process is illustrated in Annex 4.

The PROMETHEE II algorithm is based on the minimum and maximum values to establish comparisons and perform the final operation based on the cells of the corresponding matrix. The generation of these results is based on the evaluation of the differences for each alternative entered by the user, as well as on the calculation of the negative and positive flow for each criterion, together with the calculation of the total flow.

As a result, the computational algorithm is derived from the process operation diagram

and is available through the QR code shown in Figure 8.



Figure 8. PROMETHEE II computational algorithm.

Finally, the algorithm generates the weighted normalized matrix, and the values are stored internally in the computer program for reuse in the Unified Methodology. Next, the TOPSIS methodology is shown, and its operation process is visualized in the operation diagram in Annex 5.

The TOPSIS computational algorithm is less complex compared to PROMETHEE II, as it does not require extensive compilation; it relies solely on the type of criteria and the Euclidean distance. The algorithm generates two results: the ideal values (best) and the non-ideal values (worst). Finally, the results are obtained using the weighted normalized matrix and can be stored internally for later reuse.

The TOPSIS computational algorithm is accessible through the QR code shown in Figure 9.



Figure 9. TOPSIS computational algorithm.

Regarding the final classic multicriteria decision-making technique, the operation diagram for the VIKOR methodology is shown in Annex 6. The diagram represents the generation of the results associated with each mathematical equation that composes it.

The VIKOR methodology, like previous methodologies, is based on the types of criteria related to ideal (best) and non-ideal (worst) values. Its computational algorithm generates a final value using the weighted normalized matrix. These values can be stored internally for later use in the Unified Methodology.

The corresponding computational algorithm is embedded in the QR code shown in Figure 10.



Figure 10. VIKOR computational algorithm.

Each of these algorithms is essential for the creation of the Unified Methodology. Its implementation plays a fundamental role in improving the precision of multicriteria decision-making. The combination of the six classic methodologies incorporated in the multicriteria computing program (WSM, WPM, WASPAS, PROMETHEE II, TOPSIS and VIKOR) contributes from both a technological and scientific perspective.

This operation is based on the following process:

It begins with the stored results of two or more multicriteria methodologies; these can include any combination of the following:

WSM, WPM, WASPAS, TOPSIS, PROMETHEE II, and VIKOR. Therefore, weighting or positional values (a_n) are entered for each generated methodology. Finally, the equation that represents the Unified Methodology is implemented:

$$A^{MCDM LAB} = a_1 A^{WSM} + a_2 A^{WPM} + a_3 A^{WASPAS} + a_4 A^{TOPSIS} + a_5 A^{PROMETHEE II} + a_6 A^{VIKOR} \text{ (Eq. 1)}$$

The behavior of this process is shown in Annex 7.

In this way, the computational code that represents the Unified Methodology is shown through the QR code in Figure 10.



Figure 10. Unified Methodology computational algorithm.

The behavior of the computational algorithm is encoded by a series of conditions. First, it displays the results of the classic methodologies that the user has previously stored in the output interface. Then, the user or decision-maker assigns positional values to execute the computational algorithm corresponding to the Unified Methodology.

It is important to note that if the system does not find an assigned positional value, it will automatically be assigned positional value, so that the total sum is equal to 1. When the algorithm is executed, results are generated in the matrix associated with this methodology.

4. Results

The results of the code processing are

satisfactory, demonstrating the program's interface and its operation centered on the Unified Methodology. First, the program initialization screen, shown in Figure 11, presents the name "MCDM LAB", meaning "Multicriteria Decision Making Laboratory".



Figure 11. MCDM LAB home screen.

Considering the implementation of the algorithm, when any classic methodology is executed and the results are displayed, the user has the option to execute the Unified Methodology. If the user decides to do so, the system displays a text box asking whether

they want to save the final results of the selected methodology. If yes, these results are stored in the internal memory. Subsequently, using an "if" condition, the matrices necessary to process the data are initialized.

This data processing involves assigning value types to quantitative data, that is, processing both integer and float data as entered by the user. Once all the required data has been processed, it is used in a loop to multiply it by each positional value entered by the user. Otherwise, by default, a value of 0.25 is used (represented in the code by the variables VP1, VP2, VP3, VP4, VP5, and VP6). These positional values are entered into a special matrix or table for the operability of the Unified Methodology. Then, a final cycle is initiated for the sum of the values resulting from the product of each multicriteria methodology generated by its positional value, and finally, these results are displayed in the corresponding matrix. The resulting interface is shown in Figure 12.

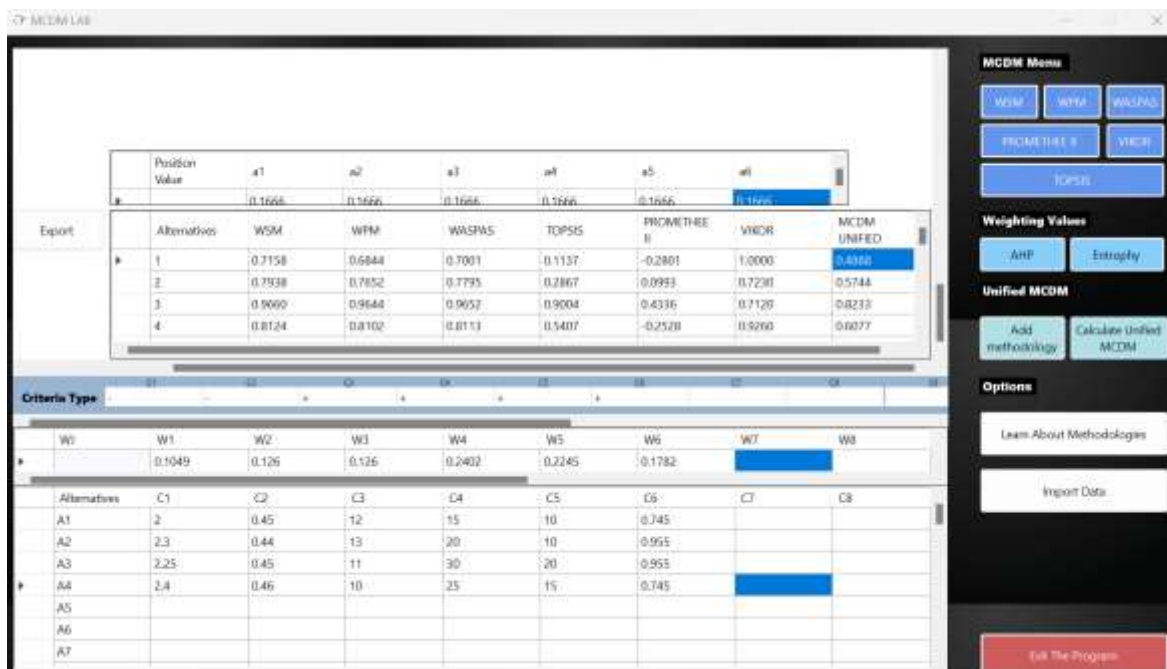


Figure 12. Unified methodology.

In this way, the Unified Methodology is created, and in addition, the option to generate an export file in .csv format is

offered. The user can save a copy of the results matrix, as shown in Figure 13.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Alternatives	WSM	WPM	WASPAS	TOPSIS	PROMETHEE	VIKOR	MCDM UNIFIED
2	1	0.71577235	0.68435783	0.70006509	0.1137328	-0.2801375	1	0.48876951
3	2	0.79380072	0.76516385	0.77948229	0.28674517	0.09931806	0.72302788	0.57435982
4	3	0.96595983	0.96441282	0.96518633	0.90038178	0.43364583	0.712	0.82326833
5	4	0.81241781	0.81024832	0.81133307	0.54070038	-0.2528264	0.92602757	0.60774027
6								

Figure 13. Unified methodology data export.

It is important to highlight that the unified methodology is beneficial for the user, since it allows generating precise results based on the perspective of the six methodologies incorporated in the program. Furthermore, the interface is user-friendly, and its use is intuitive, as long as the appropriate data is available for simulation and resolution of problems related to the incorporated multicriteria techniques.

4.1. Validation of the TOPSIS Algorithm

To verify the correctness of the TOPSIS algorithm implemented in MCDM LAB, a benchmark case study reported by

Dhanalakshmi et al. (2022) was reproduced using exactly the same decision matrix, criteria weights, and evaluation parameters described in the original publication. The selected study addresses a biomass material selection problem based on a hybrid FAHP–TOPSIS model and reports a final preference value of 0.6699 for the best alternative.

The following section presents the input information proposed by the authors; which ranges from the criteria and alternatives to the respective weights of each criterion in the computer program developed in this project, starting with the decision matrix shown in Figure 14.

Criteria Type	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
W1	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
	0.0676	0.1979	0.1409	0.3342	0.0992	0.0404	0.1190	
Alternatives	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	18	32.1	24	79	10.7	6	4.3	
A2	17	48.4	34.6	73.7	18.8	3.5	4	
A3	27.5	47.5	25	79.2	15	3.6	2.2	
A4	17.5	37	22.5	58.8	21	16.1	4.1	
A5	13.4	39	47.6	80.2	11.3	5.4	3.1	
A6	15	52.5	32.5	78.39	6.54	12.77	2.3	
A7	44	27.7	21.6	67.2	19.7	11	2.1	

Figure 14. Decision matrix introduced in MCDM LAB.

As shown in Figure 14, the table displays the input data such as the type of criterion, the respective weights and the alternatives. The

results of the normalized matrix are shown below (Figure 15).

	C1	C2	C3	C4
▶	0.2840	0.2925	0.2934	0.4026
	0.2683	0.4410	0.4229	0.3756
	0.4339	0.4328	0.3056	0.4037
	0.2761	0.3372	0.2750	0.2997
	0.2114	0.3554	0.5818	0.4088

	C5	C6	C7
▶	0.2601	0.2384	0.4950
	0.4570	0.1390	0.4605
	0.3646	0.1430	0.2533
	0.5105	0.6396	0.4720
	0.2747	0.2145	0.3569

Figure 15. Normalized decision matrix (TOPSIS).

Consequently, the weighted normalized decision matrix also generated by MCDM LAB is obtained (Figure 16).

Therefore, the final results are shown below (Figure 17).

	C1	C2	C3	C4
▶	0.0192	0.0579	0.0413	0.1346
	0.0181	0.0873	0.0596	0.1255
	0.0293	0.0857	0.0431	0.1349
	0.0187	0.0667	0.0388	0.1002
	0.0143	0.0703	0.0820	0.1366

	C5	C6	C7
▶	0.0258	0.0096	0.0593
	0.0453	0.0056	0.0552
	0.0362	0.0058	0.0303
	0.0506	0.0258	0.0565
	0.0272	0.0087	0.0428

Figure 16. Weighted Normalized Decision Matrix (TOPSIS).

	SI+	SI-	(SI+) + (SI-)	Pi
▶	0.0677	0.0490	0.1167	0.4195
	0.0375	0.0683	0.1059	0.6455
	0.0451	0.0670	0.1121	0.5974
	0.0719	0.0480	0.1199	0.4005
	0.0366	0.0743	0.1109	0.6699

Pi Results	ALTERNATIVES
0.4195	A1
0.6455	A2
0.5974	A3
0.4005	A4
▶ 0.6699	A5

Figure 17. Final results of the exercise (TOPSIS).

The validation results demonstrate that MCDM LAB accurately reproduces the benchmark case reported by Dhanalakshmi et al. (2022), obtaining the same final preference value (0.6699) and selecting the same optimal alternative. This agreement confirms the correctness of the mathematical implementation of the TOPSIS algorithm and indicates that the computational procedures incorporated into the proposed software preserve the analytical behavior described in the original study.

Unlike the original study, which focuses exclusively on the application of the TOPSIS

methodology to a biomass selection problem, the proposed software integrates this algorithm within a unified computational environment that also incorporates WSM, WPM, WASPAS, PROMETHEE II, and VIKOR. This integration enables users not only to reproduce individual analyses but also to compare and aggregate the outcomes of multiple classical MCDM techniques through the Unified Methodology.

From a practical perspective, this capability reduces the need to employ multiple software packages for multicriteria analysis and facilitates methodological consistency when

comparing alternative solutions. Consequently, the proposed platform extends the applicability of classical MCDM methods in academic research and industrial decision-support scenarios.

Although the validation presented in this study focuses on the TOPSIS methodology, the remaining classical techniques incorporated into MCDM LAB were developed under the same modular software architecture and according to their corresponding mathematical formulations. Therefore, the TOPSIS benchmark provides direct evidence of the correctness of this specific implementation and illustrates the validation procedure that can be extended to the other incorporated methods.

4.2. Discussion

Previous studies have generally applied individual MCDM techniques to specific decision problems. For example, Budiharjo et al. (2017) compared WSM and WPM in an educational selection problem, Chakraborty and Zavadskas (2014) applied WASPAS to manufacturing decisions, Mousavi and Lin (2020) employed PROMETHEE in financial decision-making, and Dhanalakshmi et al. (2022) used TOPSIS for biomass material selection. In contrast, MCDM LAB incorporates these classical methods within a single computational environment and enables their results to be stored, compared, and subsequently aggregated through the Unified Methodology. Therefore, the principal contribution of the proposed platform lies not in replacing the individual mathematical methods, but in facilitating their integrated computational application under a common decision-support framework.

5. Conclusions

Based on the previous results, we can conclude that the multicriteria computing

program is a useful and intuitive tool for users or decision-makers, since it allows them to operate the system without difficulty.

Among the classic multicriteria methodologies, the Unified Methodology stands out, which represents a scientific contribution by unifying six classic approaches. Regarding the computational algorithms of each multicriteria methodology, it is observed that the code presents a modular organizational structure, which facilitates modifications and adaptations for special situations with the aim of improving its application in scientific research problems.

The development environment utilized for software creation offers significant advantages, as it includes packages containing pre-built functions for executing mathematical computations and enhancing the overall code structure. The MCDM LAB program provides significant technical and intellectual value to decision-making by enabling users to manage certain domains more efficiently through accurate and comprehensible data.

6. References

1. Zhang, Q., Li, H., Wan, X., Skitmore, M., & Sun, H. (2020). An intelligent waste removal system for smarter communities. *Sustainability*, 12(17), 6829. <https://doi.org/10.3390/su12176829>
2. Wu, J., Zhang, Y., & Li, X. (2022). Advances in decision support systems for multicriteria analysis. *Computers & Industrial Engineering*, 165, 107927.
3. Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615->

1495-4

4. Haider, A., Khan, M. A., & Ahmed, R. (2023). Integrating multicriteria decision-making models in industrial management. *Industrial Management Review*, 19(2), 88–104.
5. Jalil, R., Hamid, S., & Rahman, K. (2023). Supplier selection using multicriteria decision analysis: Case studies and frameworks. *International Journal of Supply Chain Management*, 12(4), 32–49.
6. González, A. G., & Ríos, R. G. (2003). Aplicación de las técnicas multicriteriales en la evaluación y selección de proveedores. *Ingeniería Industrial*, 24(2), 2.
7. Ho, W. (2008). Integrated analytic hierarchy process and its applications: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 186(1), 211–228.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.004>
8. Zarghami, M., & Szidarovszky, F. (2011). *Multicriteria analysis: Applications to water and environment management*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-17937-2>.
9. Budiharjo, Windarto, A. P., & Muhammad, A. (2017). Comparison of weighted sum model and multi attribute decision making weighted product methods in selecting the best elementary school in Indonesia. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 11(4), 69–90.
<https://doi.org/10.14257/ijseia.2017.11.4.06>
10. Rao, C. M., & Venkatasubbaiah, K. (2016). Application of MCDM approach-TOPSIS for the multi-objective optimization problem. *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 9(10), 17–32.
<https://doi.org/10.14257/ijgdc.2016.9.10.02>.
11. Chourabi, Z., Khedher, F., Babay, A., & Cheikhrouhou, M. (2019). Multi-criteria decision making in workforce choice using AHP, WSM and WPM. *The Journal of the Textile Institute*, 110(7), 1092–1101.
<https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1541434>.
12. Triantaphyllou, E., & Mann, S. H. (1989). An examination of the effectiveness of multi-dimensional decision-making methods: A decision-making paradox. *Decision Support Systems*, 5(3), 303–312.
[https://doi.org/10.1016/0167-9236\(89\)90037-7](https://doi.org/10.1016/0167-9236(89)90037-7)
13. Atmojo, R. N. P., Cahyani, A. D., & Lie, Y. (2014). Simulation modeling of tablet PCs selection using weighted-product algorithm. *Applied Mathematical Sciences*, 8(115), 5705–5719.
<https://doi.org/10.12988/ams.2014.47531>
14. Adriyendi. (2015). Multi-attribute decision making using simple additive weighting and weighted product in food choice. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*, 7(6), 8–14.
<https://doi.org/10.5815/ijieeb.2015.06.02>
15. Chakraborty, S., Zavadskas, E. K., & Antucheviciene, J. (2015).

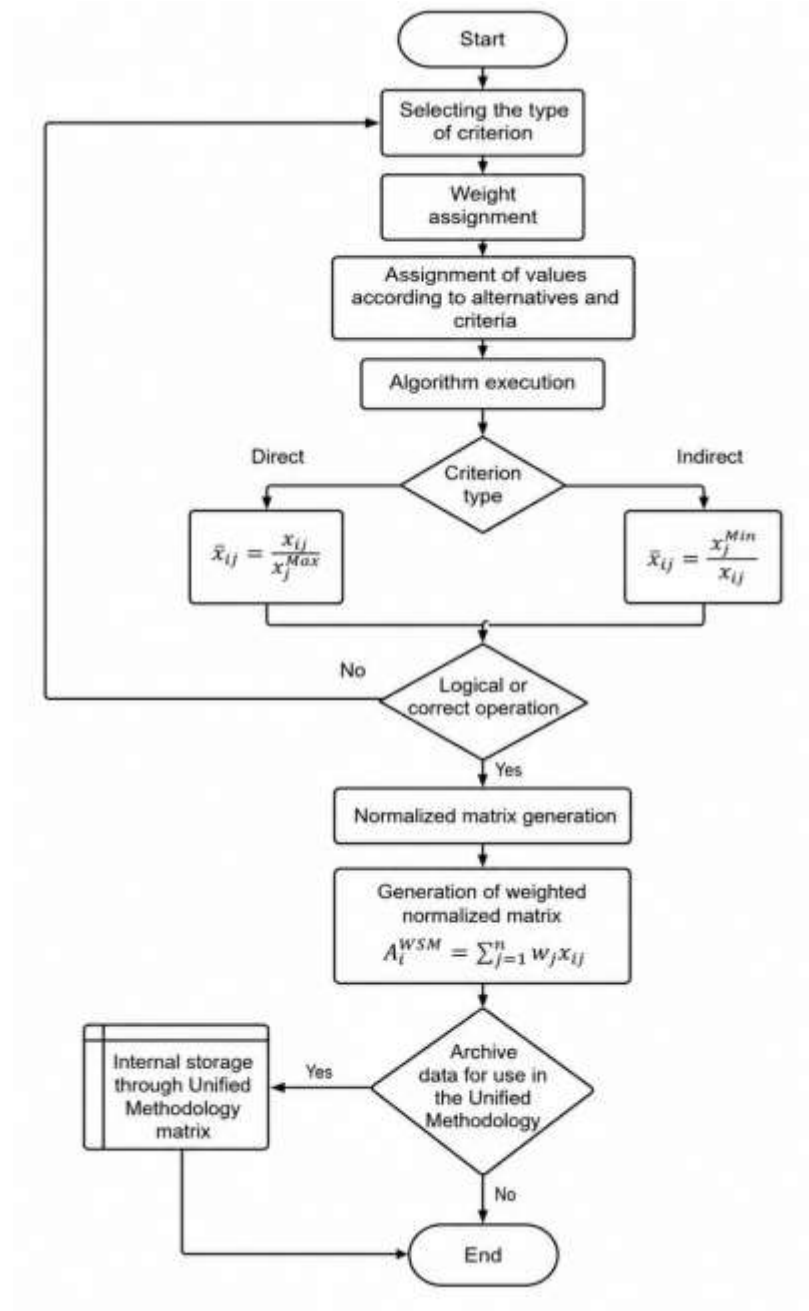
- Applications of WASPAS method as a multi-criteria decision-making tool. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 49(1), 5–22.
16. Chakraborty, S., & Zavadskas, E. K. (2014). Applications of WASPAS method in manufacturing decision making. *Informatica*, 25(1), 1–20. <https://doi.org/10.15388/Informatica.2014.01>
 17. Tuzkaya, G., Gülsün, B., Kahraman, C., & Özgen, D. (2010). An integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application. *Expert Systems with Applications*, 37(4), 2853–2863. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.09.004>
 18. Dağdeviren, M. (2008). Decision making in equipment selection: An integrated approach with AHP and PROMETHEE. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(4), 397–406. <https://doi.org/10.1007/s10845-008-0091-7>
 19. Mousavi, M. M., & Lin, J. (2020). The application of PROMETHEE multi-criteria decision aid in financial decision making: Case of distress prediction models evaluation. *Expert Systems with Applications*, 159, Article 113438. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113438>
 20. Taillandier, P., & Stinckwich, S. (2011). Using the PROMETHEE multi-criteria decision-making method to define new exploration strategies for rescue robots. In 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (pp. 321–326). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2011.6106747>
 21. Shen, K.-Y., Zavadskas, E. K., & Tzeng, G.-H. (2018). Updated discussions on “Hybrid multiple criteria decision-making methods: A review of applications for sustainability issues.” *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 31(1), 1437–1452. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2018.1483836>
 22. Kelemenis, A., & Askounis, D. (2010). A new TOPSIS-based multi-criteria approach to personnel selection. *Expert Systems with Applications*, 37(7), 4999–5008. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.12.013>
 23. Łatuszyńska, A. (2014). Multiple-criteria decision analysis using TOPSIS method for interval data in research into the level of information society development. *Folia Oeconomica Stetinensia*, 13(2), 63–76. <https://doi.org/10.2478/fofi-2013-0015>
 24. Radhika, S., Kumar, D. S., & Swapna, D. (2013). VIKOR method for multi criteria decision making in academic staff selection. *Journal of Production Research & Management*, 3(2), 30–35. <https://doi.org/10.37591/joprmm.v3i2.7145>
 25. Ghareb, M. I., & Ahmed, A. M. (2016). The use of programming language Java and C-Sharp in academic institutes of Kurdistan Region Government. *International*

Journal of Research in Engineering,
IT and Social Sciences, 6(8), 1–9.

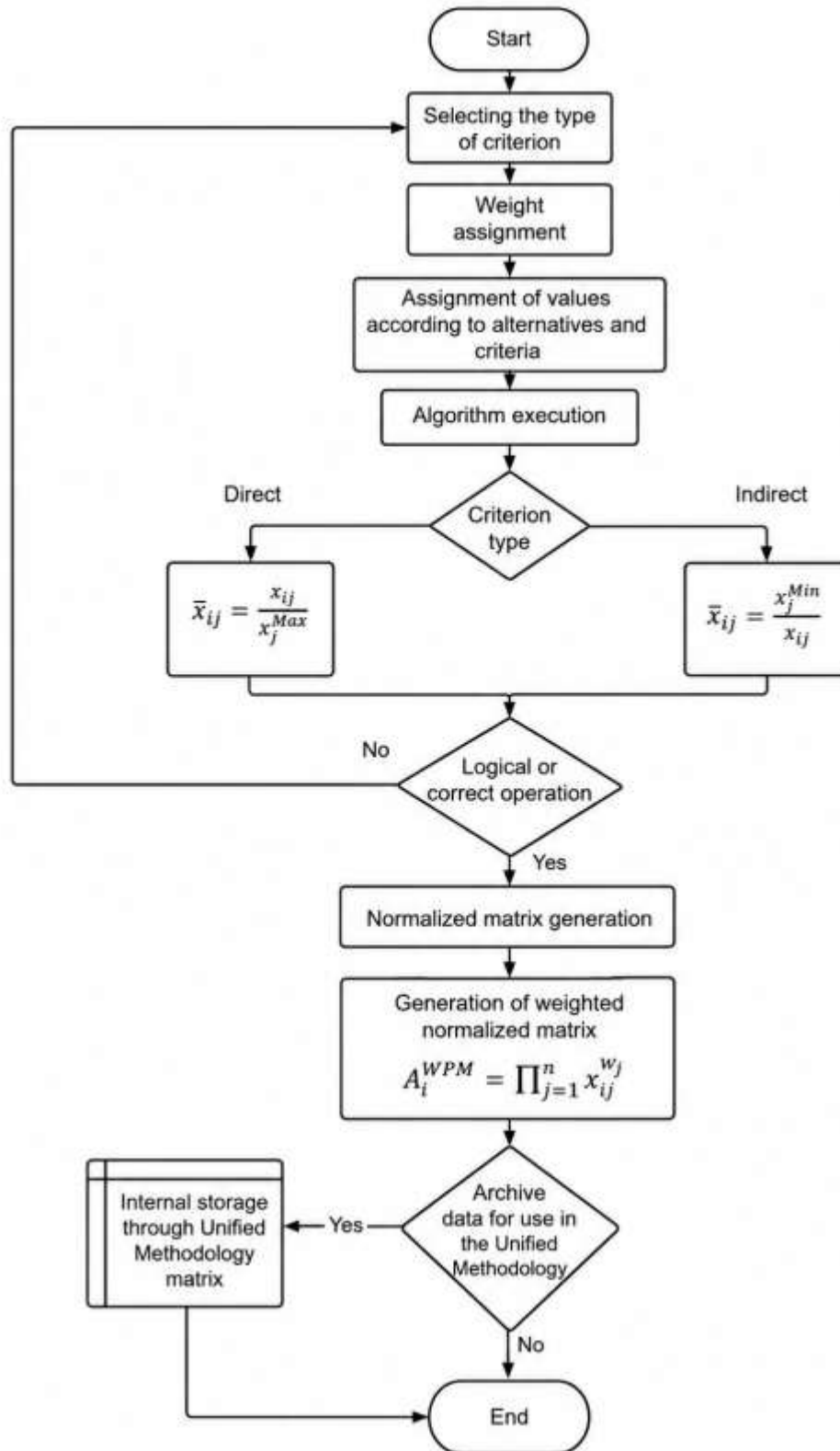
26. Dhanalakshmi, C. S., Madhu, P., Karthick, A., Mathew, M., & Kumar, R. V. (2022). A comprehensive MCDM-based approach using

TOPSIS and EDAS as an auxiliary tool for pyrolysis material selection and its application. Biomass Conversion and Biorefinery, 12(12), 5845–5860.

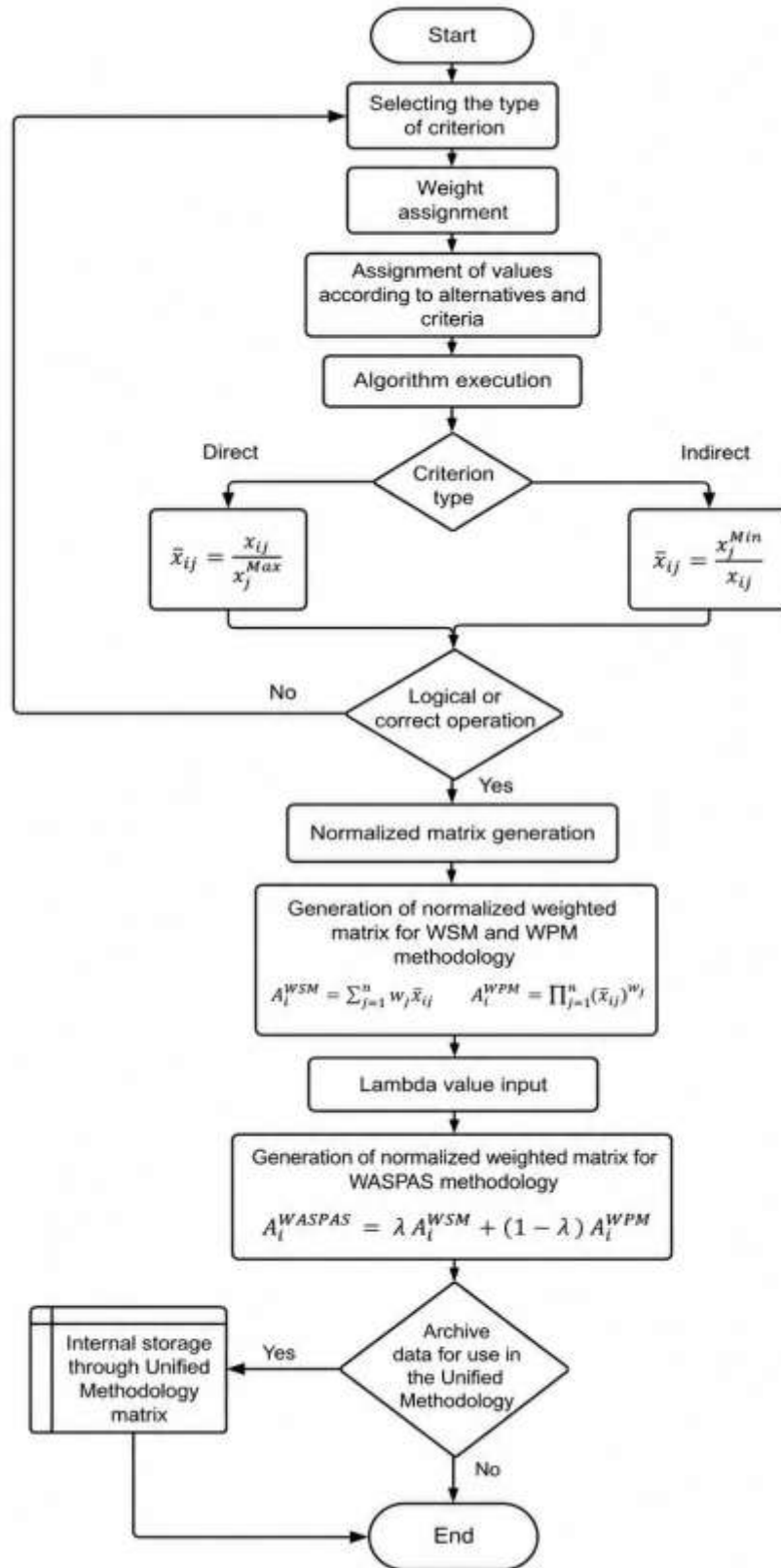
<https://doi.org/10.1007/s13399-020-01009-0>



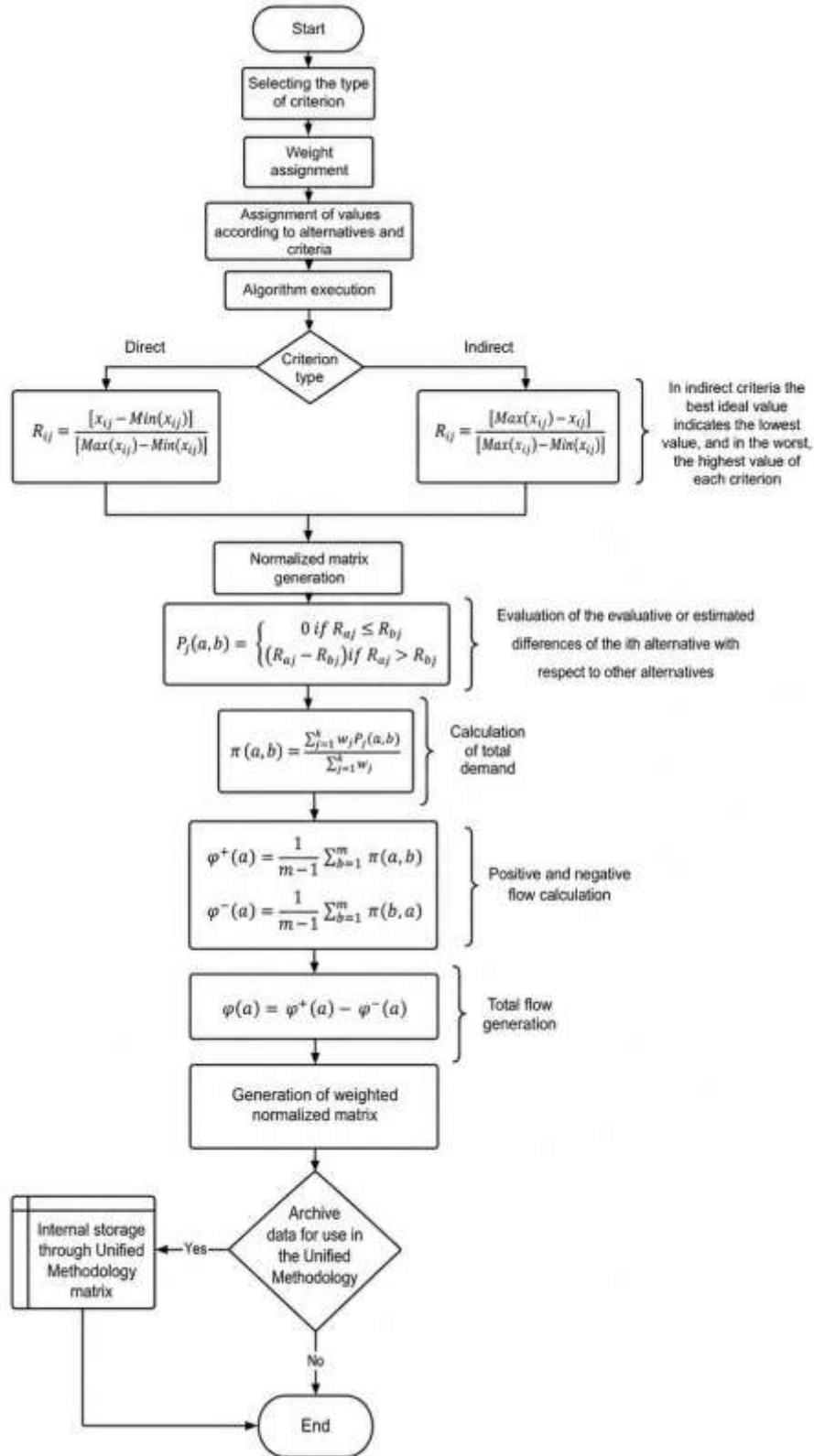
Annex 1. Operation diagram of the WSM algorithm.



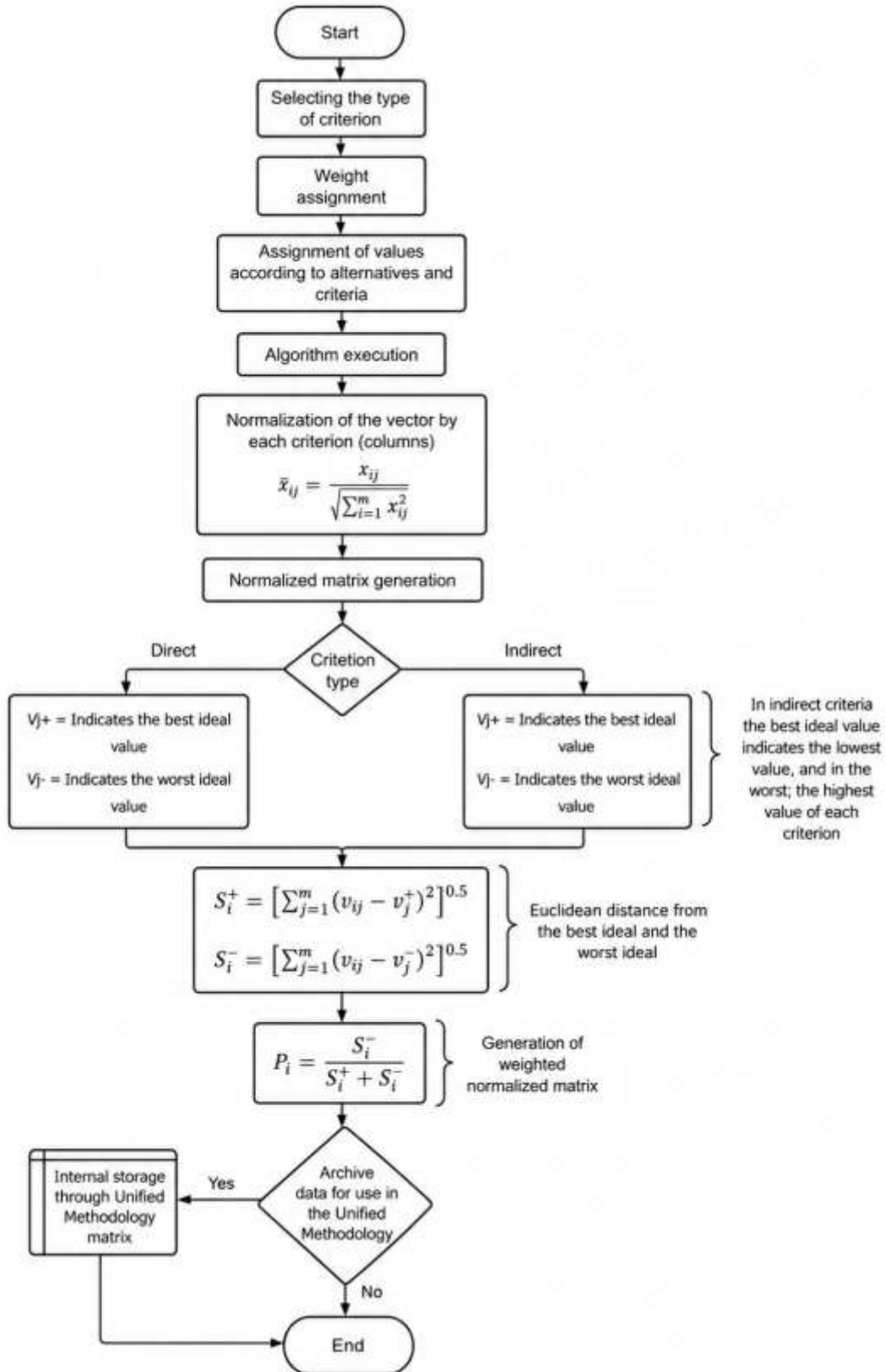
Annex 2. Operation diagram of the WPM algorithm.



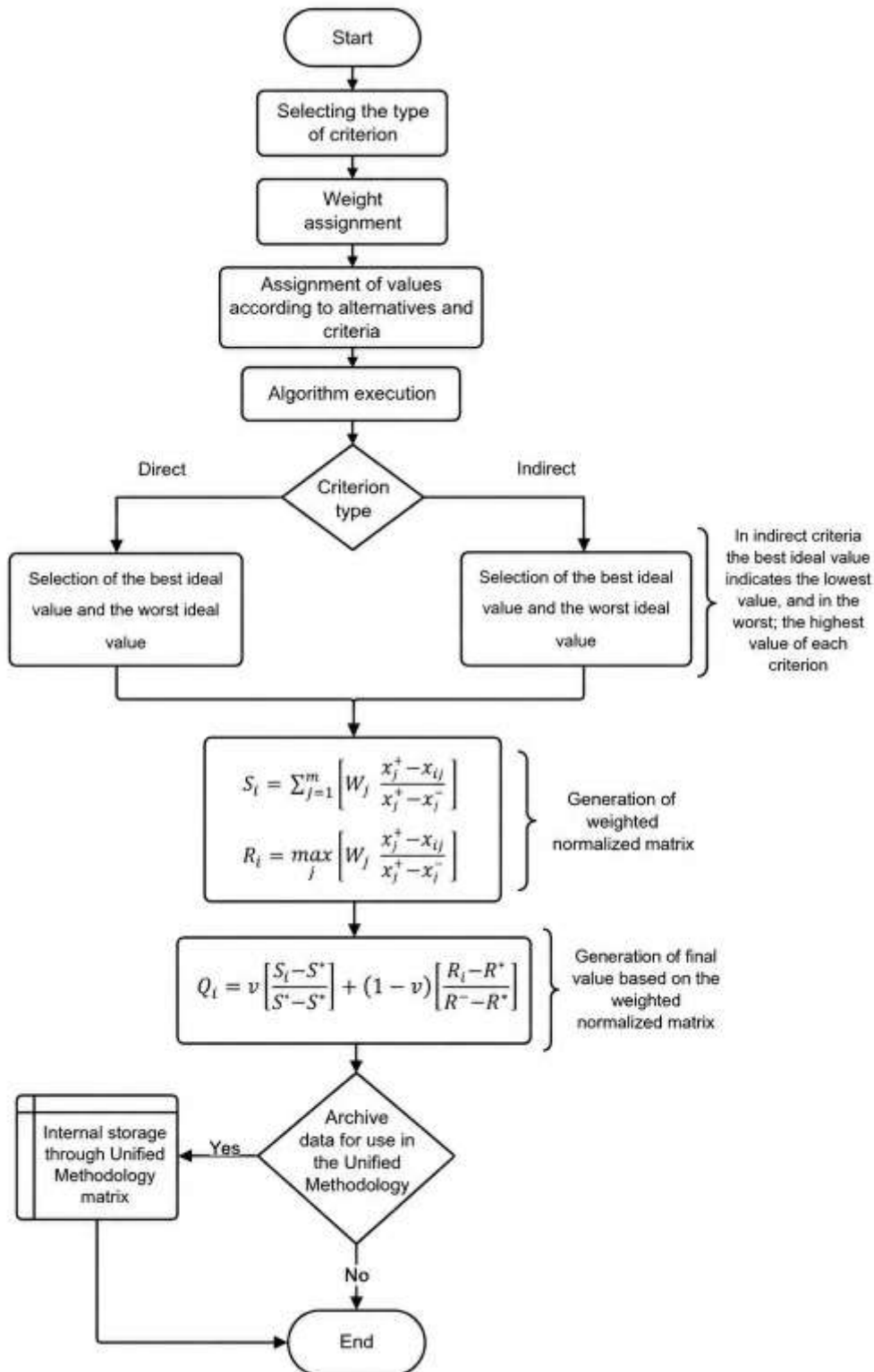
Annex 3. Operation diagram of the WASPAS algorithm.



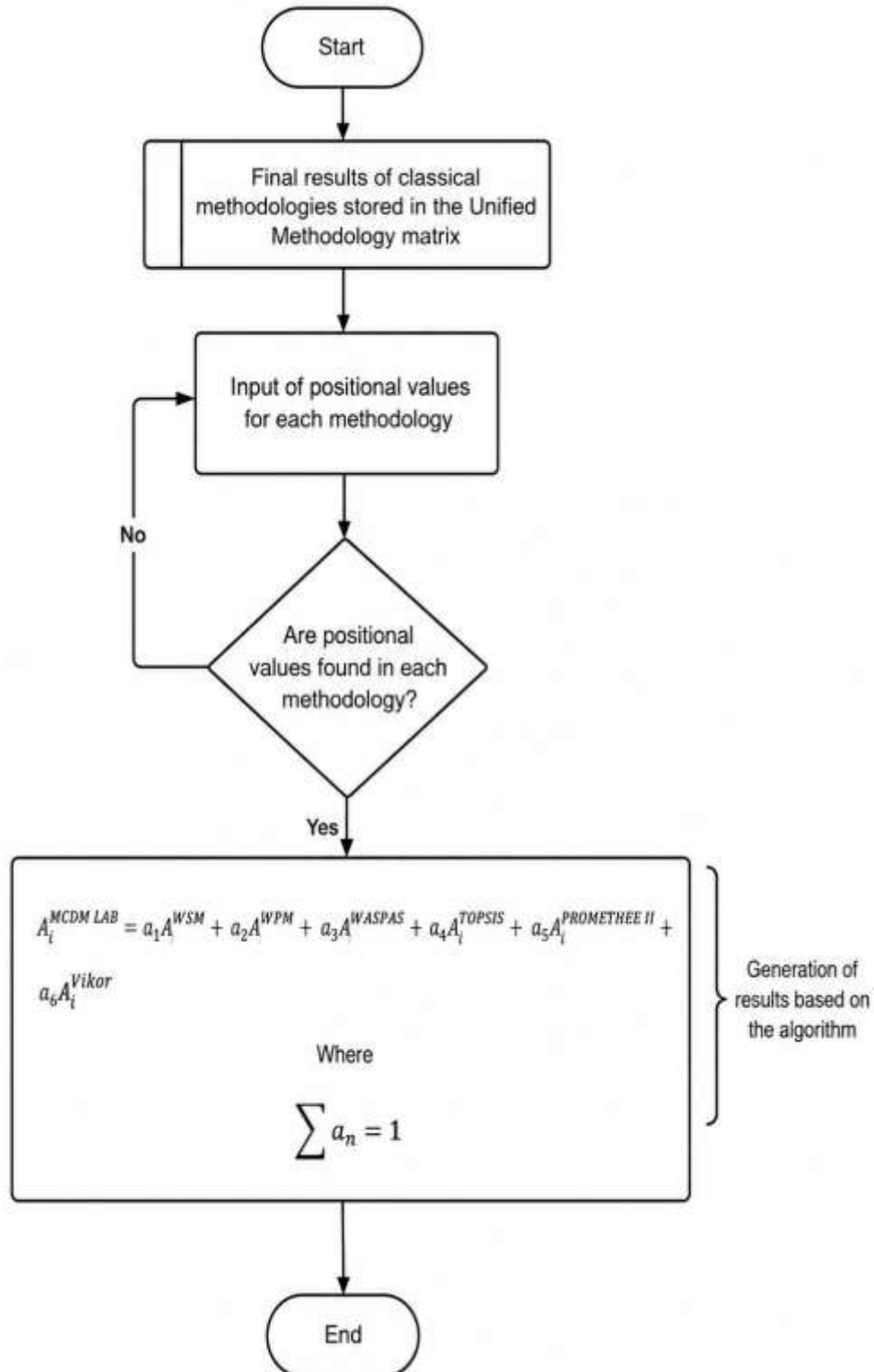
Annex 4. PROMETHEE II operation diagram.



Annex 5. TOPSIS operation diagram.



Annex 6. VIKOR operation diagram.



Annex 7. Unified methodology operation diagram.



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Arquitectura IoT-MQTT para Monitoreo de la Calidad del Aire Interior IoT-MQTT Architecture for Indoor Air Quality Monitoring

Lúa-Madriral, O.¹, Figueroa-Millán, P.E.^{2*}, López-Osuna, S.A.³

¹ Profesor adjunto del Departamento Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Tecnológico Nacional de México/I.T. Colima, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9477-3059>.

² Profesor adjunto de la División de Estudios de Posgrado del Tecnológico Nacional de México/I.T. Colima, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7562-7578>*

³ Profesor investigador miembro del Comité doctoral de CEPC Universidad, Colima, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4073-1019>.

olimpolua@colima.tecnm.mx; patricia.figueroa@colima.tecnm.mx*; skary.lopez@cepc.com.mx

Innovación tecnológica: Arquitectura IoT-MQTT de acceso abierto para el monitoreo y control de la calidad del aire interior.

Área de aplicación industrial: Gestión de ambientes interiores en sectores educativo, laboral, salud, comercial e industrial ligera.

Recibido: 16 diciembre 2025

Aceptado: 14 julio 2026

Abstract

Indoor Air Quality (IAQ) is a crucial factor in mitigating respiratory diseases, as individuals spend up to 90% of their time indoors, especially in academic spaces where occupants remain for extended periods. However, traditional IAQ monitoring systems commonly rely on proprietary commercial ecosystems, restricting accessibility, interoperability, and adaptability. This study presents an IoT-MQTT architecture based on open-access technologies for near-real-time IAQ monitoring, which considers parameters such as carbon dioxide (CO₂), total volatile organic compounds (TVOC), temperature, and relative humidity. It was developed through a four-phase methodology encompassing technological research and surveillance, design, development, and testing. The system integrates three sensing nodes built upon the ESP32 microcontroller with CCS811 and DHT22 sensors, embedding a custom linear offset compensation algorithm within its firmware for thermo-hygrometric variables. Technical and operational validation testing of the architecture was conducted in a 60.48 m² university classroom over five consecutive days, utilizing a 10-second sampling interval to transmit data to a broker hosted on ThingSpeak, alongside local replication on a Raspberry Pi with persistence in Supabase. The system successfully detected

microclimatic variations linked to occupancy and ventilation, revealing peaks up to approximately 1300 ppm of CO₂ and 220 ppb of TVOC under high occupancy and limited air exchange conditions. The results demonstrate the feasibility, stability, and replicability of the architecture based on affordable open-access technologies, establishing a solid architectural foundation for the future implementation of automated environmental ventilation control strategies in academic environments.

Keywords: Air quality, indoor spaces, IoT, IAQ, MQTT.

Resumen

La calidad del aire interior (IAQ) es un factor crucial para mitigar enfermedades respiratorias, ya que las personas pasan hasta 90% de su tiempo en interiores, especialmente en espacios académicos en donde las personas permanecen durante largos periodos de tiempo. Sin embargo, los sistemas tradicionales de monitoreo de IAQ suelen basarse en ecosistemas comerciales propietarios, limitando su accesibilidad, interoperabilidad y adaptabilidad. En este trabajo se presenta una arquitectura IoT-MQTT basada en tecnologías de acceso abierto para el monitoreo de la IAQ en tiempo cuasi-real, la cual considera parámetros como dióxido de carbono (CO₂), compuestos orgánicos volátiles totales (TVOC), temperatura y humedad relativa. Ésta se desarrolló bajo una metodología de cuatro fases: investigación y vigilancia tecnológica, diseño, desarrollo y pruebas. El sistema integra tres nodos de sensado basados en el microcontrolador ESP32 con sensores CCS811 y DHT22 que incorporan en su firmware un algoritmo propio de compensación lineal de desfase (*offset*) para las variables termo-higrométricas. Las pruebas de validación técnica y operativa de la arquitectura se realizaron en un aula universitaria de 60.48 m² durante cinco días consecutivos, con una frecuencia de muestreo de 10 segundos permitiendo el envío de los datos hacia un broker alojado en ThingSpeak y replicación local en una Raspberry Pi con persistencia en Supabase. El sistema detectó variaciones microclimáticas asociadas al aforo y la ventilación, evidenciando picos de hasta 1300 ppm de CO₂ y 220 ppb de TVOC aproximadamente en condiciones de alta ocupación y renovación de aire limitada. Los resultados demuestran la viabilidad, estabilidad y replicabilidad de la arquitectura basada en tecnologías asequibles de acceso abierto, estableciendo una base arquitectónica sólida para el despliegue futuro de estrategias de control automático de ventilación ambiental en entornos académicos.

Palabras clave: Calidad del aire interior, IoT, IAQ, MQTT, monitoreo.

1. Introducción

La calidad del aire de los espacios que se frecuentan, especialmente en interiores, es un factor clave que afecta la salud; considerando que, acorde con la Organización Mundial de la Salud (OMS) se pasa entre el 80 y 90 % del tiempo en éstos y donde la Agencia de

Protección Ambiental (EPA) estima que la calidad del aire es de dos a cinco veces peor que en exteriores, debido a la mezcla de contaminantes externos e internos. Esto puede causar somnolencia, dolores de cabeza, alergias y otras condiciones de salud,

afectando la productividad y el bienestar general de las personas (Figols et al., 2020).

Además, es importante considerar que debido a la reciente pandemia ocasionada por el SARS-CoV-2 y a la disminución de las medidas sanitarias, se ha incrementado la necesidad de controlar mejor la calidad del aire en interiores (Chávez-Bracamontes et al., 2023), ya que existe evidencia de que los virus respiratorios pueden transmitirse por el aire. Por lo tanto, en espacios mal ventilados, las concentraciones virales pueden ser suficientes para infectar a personas, aumentando el riesgo de transmisión aérea con la permanencia prolongada en éstos, ya que las partículas virales pueden viajar más de dos metros debido a nubes de gas turbulento que atrapan y transportan gotas de diferentes tamaños. Los aerosoles pueden flotar en el aire durante minutos o horas, contribuyendo a la transmisión de enfermedades como la COVID-19 (Videa y Rodríguez, 2023).

En específico, la propagación del virus SARS-CoV-2 ocurre a través de gotículas (de tamaño mayor a 5 a 10 μm) y aerosoles ($\leq 5 \mu\text{m}$) emitidos por personas infectadas al respirar, hablar, toser o estornudar. Aunque las medidas tradicionales se centran en controlar las gotículas, gran parte de la COVID-19 se propaga mediante aerosoles, especialmente por personas asintomáticas. Las gotículas varían en tamaño y comportamiento en el aire, afectadas por gravedad, inercia y evaporación. Los aerosoles pueden transportarse por el aire, penetrar profundamente en los pulmones y propagar el virus antes de que aparezcan síntomas (Prather et al., 2020).

Por consiguiente, es importante considerar que, la respiración humana libera aerosoles y dióxido de carbono (CO_2) y en espacios cerrados, la concentración de CO_2 incrementa según la actividad realizada y factores

personales como sexo, edad y peso. Las tasas de emisión promedio de CO_2 para hombres y mujeres de 21 a 30 años, dependiendo de la actividad, son: 0.0056 litros/segundo estando sentados; 0.0080 litros/segundo caminando lentamente; 0.0120 litros/segundo con ejercicio ligero y 0.0160 litros/segundo con ejercicio moderado (Velarde et al., 2020).

Por lo tanto, cada persona dentro de un edificio puede exhalar alrededor de 8 litros de aire por minuto, el cual ha estado en contacto con los pulmones y que puede contener virus. Dado que la transmisión aérea es el principal factor en la propagación de los virus, los niveles de CO_2 en espacios cerrados pueden servir como un indicador del riesgo de transmisión de COVID-19. Por ejemplo, un estudio sobre un brote de tuberculosis en la Universidad de Taipei, Taiwán realizado en 2019, mostró que muchas habitaciones mal ventiladas tenían niveles de CO_2 superiores a 3000 ppm, cuando estos niveles se redujeron a menos de 600 ppm, el brote se detuvo. Esto demuestra que los altos niveles de CO_2 en edificios están vinculados directamente con la propagación de infecciones (Bohórquez et al., 2021).

Acorde con Zhao et al. (2020), cuando la concentración de CO_2 se duplica, el riesgo de contagio se sitúa en un 1%. Este riesgo experimenta un aumento significativo al alcanzar los 2,000 ppm, llegando al 4%. Continúa incrementándose hasta alcanzar un punto crítico del 11.5% cuando la concentración alcanza los 5,000 ppm, considerados niveles de saturación; lo cual, establece un alto riesgo para la transmisión de virus, destacando la importancia de implantar acciones preventivas.

Por lo tanto, factores como la concentración de dióxido de carbono, la temperatura y la humedad relativa, así como las partículas suspendidas $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} , y los compuestos orgánicos volátiles (COV),

incluido el formaldehído, son indicadores clave que definen las condiciones de la calidad del aire interior (IAQ) (Montero et al., 2023). Por ejemplo, cuando la humedad relativa supera el 60%, puede impactar negativamente la calidad del aire, favoreciendo la aparición de síntomas respiratorios y oculares, los cuales pueden volverse más severos durante la jornada laboral (Daza et al., 2015). En este sentido, de acuerdo con los criterios utilizados por Rodríguez y Ortega (2024), los niveles de calidad del aire basados en la concentración de CO₂ se clasifican como: excelente (menos de 500 ppm), buena (500–600 ppm), regular (600–800 ppm) y mala (más de 800 ppm).

Aunque las recomendaciones de concentración de CO₂ varían entre países e instituciones, asociaciones como la Asociación Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) y la Federación de Asociaciones Europeas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (REHVA) establecen pautas claras. ASHRAE recomienda no superar los 1100 ppm en espacios cerrados, mientras que REHVA aconseja mantener niveles entre 800 y 1000 ppm. Una concentración de CO₂ por debajo de 1000 ppm es segura, entre 1000 y 2000 ppm es peligrosa, y cualquier nivel superior es inaceptable. Además, en espacios interiores como aulas donde la ocupación de personas puede ser más alta, el Centro de Investigación de Química Atmosférica de la UCC, sugiere un objetivo de 1000 ppm de CO₂ como indicador de COVID-19. Por tanto, superar este nivel puede aumentar la acumulación de virus en el aire y el riesgo de infección, incluso en habitaciones mal ventiladas (Bohórquez et al., 2021).

La enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) es la cuarta causa de muerte en el mundo y fue responsable de aproximadamente 3,5 millones de

fallecimientos en 2021, representando el 5% de todas las muertes globales (Organización Mundial de la Salud, 2023). Esta enfermedad afecta principalmente a personas en países de ingresos bajos y medios, donde factores como el tabaquismo y la contaminación del aire en interiores son comunes. Entre estas afecciones, destacan el COVID-19 y la Influenza, ocupando respectivamente el cuarto y noveno puesto en la lista de las diez principales causas de mortalidad en México durante los años 2021 y 2022 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2023).

Considerando lo anterior, ha habido una demanda creciente de soluciones tecnológicas orientadas al monitoreo y mejora de la calidad del aire interior, como una estrategia para enfrentar diversos aspectos relacionados con la propagación de enfermedades respiratorias y promover ambientes saludables. El Internet de las Cosas (IoT), que ha surgido para simplificar las actividades y rutinas cotidianas de los seres humanos, facilita el seguimiento de las pautas y precauciones de seguridad proporcionadas por la OMS (Ghaleb et al., 2021). Investigaciones previas han demostrado que las aplicaciones basadas en IoT pueden desempeñar un papel importante para enfrentar los efectos de la COVID-19 (Singh et al., 2020).

El IoT permite que los objetos físicos vean, oigan, piensen y realicen tareas haciéndolos "hablar" entre sí para compartir información y coordinar decisiones (Al-Fuqaha et al., 2015), sin requerir interacción humana mediante el empleo de diversos protocolos de comunicación y mensajería, los cuales facilitan la transmisión de datos segura y confiable. Entre éstos, se encuentran protocolos como: Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP), Constrained Application Protocol (CoAP) y Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). En particular, MQTT se ha utilizado en

monitoreo de atención médica, agricultura inteligente, hogares inteligentes y aplicaciones industriales debido a su protocolo de mensajería liviano y comunicación eficiente entre dispositivos de máquina a máquina (Abdulah Al Hanif y Ilyas, 2024).

MQTT es un protocolo de mensajería que sigue una arquitectura publicador-suscriptor, diseñado para reducir al mínimo el uso del ancho de banda y los recursos del dispositivo, garantizando la entrega confiable de mensajes incluso en redes lentas o poco fiables, con bajo consumo de energía (Mishra y Kertesz, 2020). Este protocolo utiliza un modelo de suscriptor/publicador que permite una conexión flexible entre dispositivos, con publicadores que envían mensajes a través de canales (tópicos) y suscriptores que los reciben, gestionados por un bróker (OASIS, 2019). MQTT ofrece tres niveles de calidad de servicio (QoS): QoS 0 (entrega según las capacidades de la red, sin confirmación ni reintentos), QoS 1 (entrega garantizada al menos una vez, con posibles duplicaciones) y QoS 2 (entrega exacta una vez, sin pérdidas ni duplicaciones, siendo el más lento y costoso) (Mosquera, 2023).

No obstante, la interoperabilidad y la complejidad de integración de las soluciones IoT es un factor clave para el éxito de estas implementaciones, ya que la heterogeneidad de dispositivos, protocolos, plataformas y ecosistemas comerciales cerrados pueden dificultar el despliegue, la escalabilidad y la adaptación contextual de los sistemas de monitoreo de calidad del aire, haciendo que su implementación sea compleja y en ocasiones un factor limitante para su implementación.

Por consiguiente, en el presente artículo se presenta una arquitectura IoT-MQTT para el monitoreo de la calidad del aire interior mediante indicadores como temperatura,

humedad relativa, CO₂ y TVOC en aulas universitarias. El objetivo de esta investigación es diseñar, desarrollar y validar técnica y operativamente una arquitectura IoT-MQTT para el monitoreo de la calidad del aire interior en tiempo cuasi-real, demostrando su viabilidad como herramienta de apoyo para la supervisión de las condiciones ambientales y como base para futuras estrategias de control automático de ventilación y confort en espacios interiores. El alcance del artículo se enfoca en la validación técnico-operativa mediante experimentación de esta arquitectura, con la finalidad de establecer una base arquitectónica sólida para futuros desarrollos.

El artículo está organizado como sigue, en la sección de revisión de la literatura se presenta la revisión de diversos estudios y trabajos similares. La metodología describe los procedimientos y técnicas utilizadas para recolectar y analizar los datos. Los resultados presentan los hallazgos de esta investigación y en la discusión se proporciona un análisis cualitativo de los beneficios de la presente investigación relacionándolos con estudios previos, discutiendo las implicaciones, limitaciones y posibles direcciones futuras de investigación. Finalmente, el artículo proporciona las conclusiones y trabajo futuro que resume los hallazgos principales y su relevancia.

1.2 Revisión de la literatura

El monitoreo de calidad del aire mediante el empleo de soluciones de IoT es aún un área de investigación actual, derivado de las estrategias de mitigación de la COVID-19. A continuación, se presenta esta revisión de la literatura desde dos perspectivas: estudios previos sobre la observación y análisis de la calidad del aire en espacios interiores mediante la medición de CO₂ y otros parámetros; prototipos y sistemas de

monitoreo remoto de la calidad del aire a través de IoT.

1.2.1 Estudios sobre análisis de la calidad del aire en espacios interiores

Videa y Rodríguez (2023) realizaron un estudio con la finalidad de medir los niveles de CO₂, temperatura y humedad relativas en cinco aulas mediante un sensor infrarrojo marca ARANET4, donde participaron 86 estudiantes, los datos medidos fueron comparados con los niveles de CO₂ estándares; además, analizaron la correlación con la temperatura y humedad. Los resultados, analizados mediante tablas dinámicas, evidenciaron niveles bajos de CO₂ sin riesgo significativo para la transmisión de la COVID-19, así como una correlación negativa entre CO₂ y temperatura.

Guijarro et al., (2021) realizaron un estudio de los niveles de CO₂, con una frecuencia de muestreo de cada 10 segundos durante tres días en un aula del Instituto Ramiro de Maeztu utilizando sensores Wohler-cdl-210. Además, se midió la velocidad del aire con un dispositivo Testo 445, registrando aperturas y cierres de ventanas y puertas para correlacionar los niveles de CO₂ con el flujo de ventilación. En la configuración del experimento cuando no se abrieron las ventanas y puertas el nivel de CO₂ alcanzó hasta 1000 ppm, al abrirlas se redujo a 750 ppm, de igual manera se probaron con distintas configuraciones, concluyendo que la ventilación adecuada es crucial para mantener niveles seguros de CO₂ en las aulas.

Rodríguez y Ortega (2024) realizaron un estudio en un salón escolar de 80 m², equipado con una puerta de 1.8 m² y una ventana de 1 m². El horario escolar era de 7:30 a.m. a 2 p.m., con 15 estudiantes de preparatoria y un profesor diferente en cada clase. Durante el monitoreo, se instruyó mantener la puerta y la ventana abiertas para

asegurar una ventilación adecuada; sin embargo, en algunas clases, estas se cerraron, lo que provocó un aumento en los niveles de CO₂ de hasta 1600 ppm en un lapso de 4 horas, partiendo de 400 ppm. La concentración de CO₂ disminuía a niveles aceptables (800 ppm) durante los recesos y cuando el salón estaba vacío, pero aumentaba rápidamente al ocupar nuevamente el espacio.

Quiroga (2023) llevó a cabo un estudio para medir la concentración promedio de CO₂ en diversas actividades dentro de las aulas y calcular la probabilidad de infección de COVID-19 para personas susceptibles. Los resultados, presentados, indican que durante actividades de tipo exposición oral la concentración más alta de CO₂, promedió entre 1342 ± 620 ppm con una probabilidad de infección del 0.0094%. El trabajo en grupo mostró la segunda concentración más alta de CO₂, con un promedio de 322 ± 79 ppm y una probabilidad de infección del 0.0028%. En contraste, durante una clase magistral y exámenes se presentaron concentraciones más bajas de CO₂ (240 ± 38 ppm y 231 ± 53 ppm, respectivamente) y probabilidades de infección más bajas (0.0004% y 0.0003%). Esto sugiere que actividades con niveles más altos de CO₂ podrían implicar un mayor riesgo de transmisión de COVID-19, destacando la importancia de la ventilación adecuada en espacios cerrados.

Finalmente, Chung-Yen et al., (2021), recomiendan que para el monitoreo de la concentración de CO₂ en interiores, se deben seguir los siguientes requisitos técnicos. Ubicar el sensor de CO₂ a una altura de 1.2-1.5 m del suelo y al menos a 20 cm de fuentes de CO₂, como personas, preferiblemente en el centro del área de actividad. El aire interior debe estar bien mezclado; un sensor es adecuado para espacios menores de 24 m², mientras que áreas más grandes requieren varios sensores. Evitar colocar el sensor en

contacto directo con el flujo de aire del sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés) o de las ventanas para prevenir lecturas inexactas. Calibrar y utilizar el sensor según las instrucciones del fabricante.

Desde el punto de vista normativo, diversas organizaciones internacionales han establecido recomendaciones para la evaluación de la calidad del aire interior. La Asociación Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) recomienda mantener concentraciones de CO₂ inferiores a 1000 ppm en espacios ocupados, mientras que la Federación de Asociaciones Europeas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (REHVA) sugiere niveles entre 800 y 1000 ppm como referencia para una ventilación adecuada. Asimismo, organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS) destacan la importancia de la ventilación y el monitoreo continuo de contaminantes para reducir riesgos asociados a la exposición prolongada en espacios interiores. Estas recomendaciones constituyen referencias ampliamente utilizadas para la evaluación y gestión de la calidad del aire interior.

1.2.2 Prototipos o sistemas de monitoreo remoto de la calidad del aire mediante IoT

Mosquera (2023) desarrolló un sistema de monitoreo remoto de la calidad del aire en espacios interiores y utilizó el bróker AWS IoT Core, compatible con MQTT 3.1.1, el cual reduce la necesidad de infraestructura adicional y proporciona kits de desarrollo de software (SDKs, por sus siglas en inglés) para varios dispositivos y lenguajes de programación como C, C++, Python, Java y JavaScript.

Gómez et al. (2023) configuraron y desplegaron una red de sensores de CO₂ en un

edificio universitario para monitorear y gestionar remotamente las aulas, empleando tecnología inalámbrica Wi-Fi para su conexión a una Raspberry Pi, la cual actuó en el borde de la red para recopilar datos de cada sensor mediante peticiones HTTP, preprocesarlos, identificar su origen, adaptarlos en formato JSON y encapsularlos en mensajes MQTT para enviarlos al servidor ThingsBoard. Este servidor centralizó el monitoreo de los niveles de CO₂ en todo el edificio, verificó la coherencia de los datos recibidos y configuró el motor de reglas de la plataforma para emitir alertas cuando los valores fueran anómalos. Además, se utilizó un panel de control y visualización de ThingsBoard. En el nodo Edge también se implementaron servicios locales de bases de datos de series temporales (InfluxDB) y visualización de datos (Grafana), proporcionando alternativas locales a algunas funcionalidades de la plataforma IoT.

Soledispa (2020) desarrolló un prototipo para medir la calidad del aire en aulas de clases en Guayaquil. El objetivo era evaluar la concentración de CO₂ y la humedad. Para este propósito, se seleccionó el sensor MQ-135, que tiene la capacidad de medir ambas variables. Su rango de detección abarca desde 300 ppm hasta 10,000 ppm. El objetivo era observar el rendimiento de los estudiantes cuando los niveles de CO₂ superan las 1,000 ppm, que se considera el límite permisible.

Chávez-Bracamontes et al., (2023) presentaron un sistema IoT que tuvo como objetivo supervisar y gestionar la calidad del aire en espacios cerrados. Consta de cuatro componentes principales: a) un sistema inalámbrico de monitoreo, b) una plataforma en línea con servicios en la nube gestionados por ThingSpeak y FireBase, c) un sistema automatizado de control de ozono, y d) una aplicación móvil para registrar usuarios, visualizar datos en tiempo cuasi-real y guardar registros históricos. El sistema

requiere un punto de acceso Wi-Fi para que el monitoreo inalámbrico pueda transmitir las mediciones de gases interiores. Los sensores de CO₂ y O₃, integrados en el sistema de monitoreo inalámbrico, se conectan a un microcontrolador ESP32 para la transmisión de los datos vía Wi-Fi a la plataforma en línea para su procesamiento y almacenamiento.

Quiroga (2023) presentó la creación e implementación de una red inalámbrica compuesta por un sensor de CO₂, un sensor de partículas y un módulo Wi-Fi, la cual se conectó a una red de malla para transmitir datos a un servidor en la nube. Este servidor, a su vez, utilizó Node-RED para el procesamiento de datos y ThingSpeak para su visualización. Las alarmas se basaron en umbrales de CO₂ ajustables según la actividad en el aula.

Romero et al. (2022) desarrollaron un sistema embebido para monitorear la concentración de CO₂ en un espacio cerrado y emitir alarmas sonoras cuando se superaran los parámetros establecidos. El sistema utilizó un sensor MQ135 para detectar los niveles de CO₂, una tarjeta ESP32 para la transmisión de los datos vía Wi-Fi, una pantalla OLED SSD130 para mostrar los datos y un DFPlayer Mini para las alarmas sonoras. Asimismo, se empleó la plataforma ThingSpeak utilizando MQTT para el almacenamiento y visualización de los datos, posibilitando su análisis posterior.

Gómez-Meza et al., (2022) diseñaron un prototipo IoT para el monitoreo de material particulado en espacios reducidos mediante cuatro módulos de sensado, cada uno con un sensor Nova SDS011 y un microcontrolador ESP32, éstos configurados en una red en malla y los datos se transmiten a una Raspberry Pi 4 que actúa como servidor local y se publican en la plataforma ThingSpeak para la visualización y análisis remoto de los resultados.

Figols et al., (2020) desarrollaron una propuesta para mejorar la calidad del aire interior en edificios utilizando el dispositivo MICA, que mide parámetros por ampliar el concepto de calidad del aire al incluir más contaminantes, permitir una monitorización continua para detectar patrones y ajustar medidas, y utilizar la plataforma My inBiot para gestionar y visualizar datos en tiempo real.

En conjunto, los trabajos revisados muestran diferentes enfoques para la implementación de arquitecturas IoT orientadas al monitoreo de la calidad del aire interior. Algunas propuestas utilizan infraestructuras en la nube especializadas, como AWS IoT Core (Mosquera, 2023), mientras que otras incorporan procesamiento en el borde, servidores locales o redes en malla para mejorar la gestión de los datos (Gómez et al., 2023; Quiroga, 2023; Gómez-Meza et al., 2022). Asimismo, existen soluciones que integran mecanismos de control automático, aplicaciones móviles o algoritmos avanzados de análisis (Chávez-Bracamontes et al., 2023; Figols et al., 2020). Sin embargo, se observa una limitada cantidad de estudios enfocados en la validación técnico-operativa de arquitecturas basadas en MQTT para entornos educativos, utilizando plataformas de acceso abierto y configuraciones simplificadas que faciliten su implementación y evaluación en condiciones reales.

2. Materiales y métodos

A continuación, se presenta la metodología de desarrollo para la arquitectura IoT-MQTT para monitoreo de la calidad del aire en interiores presentada en este artículo; además, del escenario experimental para la validación de la arquitectura. como temperatura, humedad, CO₂, TVOC. Los datos se transmiten a la plataforma IoT “ThingSpeak”

en la nube. La metodología que se siguió se describe a continuación.

2.1 Metodología de desarrollo

Para el diseño, desarrollo y validación de la arquitectura, se implementó la metodología ilustrada en la Figura 1, la cual consta de cuatro fases: investigación y vigilancia tecnológica, diseño, desarrollo y pruebas.

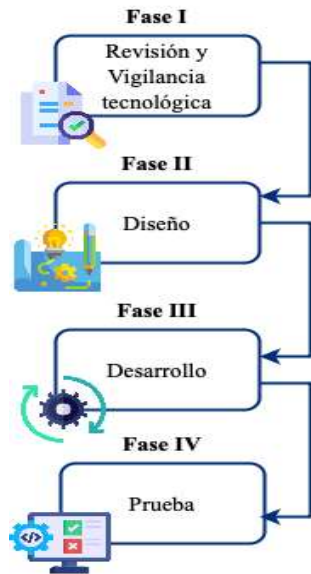


Figura 1. Metodología en Fases.
Fuente: Elaboración propia.

La primera fase, tiene como objetivo identificar soluciones existentes e identificar las limitaciones y áreas de oportunidad para el prototipo de la arquitectura presentada. Esta fase permitió analizar el estado del arte de sistemas IoT orientados al monitoreo ambiental y seleccionar las tecnologías más adecuadas en función de los requisitos de comunicación, seguridad, escalabilidad y flexibilidad, así como las necesidades específicas del entorno académico donde se validó el sistema.

En la segunda fase, se elaboró la memoria de ingeniería básica y de detalle, que comprendió la creación de diagramas eléctricos, electrónicos y de control, así como los planos en 2D y 3D de la estructura del

sistema. También se desarrollaron los diagramas de la lógica de programación, que incluyeron la definición del protocolo de mensajería, la topología de la red, la identificación del bróker MQTT, y la estructura de los tópicos empleados para la comunicación entre los dispositivos de la arquitectura.

En la fase de desarrollo, se gestionó la selección de componentes de hardware y software, así como la mejor estrategia para la fabricación y ensamblaje del prototipo. Además, se configuró el bróker MQTT en ThingSpeak, se desarrolló el firmware para módulos de sensado, y se integraron los dispositivos en la red.

Finalmente, en la cuarta fase, se llevaron a cabo las pruebas unitarias e integrales. Se inició con las pruebas de los componentes individuales antes del ensamblaje, seguidas de pruebas a nivel de subsistema y del sistema completo. Estas incluyeron pruebas de conectividad y validación de funcionalidad general de la arquitectura IoT-MQTT mediante experimentación.

2.2 Escenario Experimental

El diseño experimental se llevó a cabo con el propósito de validar el desempeño de la arquitectura IoT-MQTT en su función de monitoreo, comprobando su capacidad para registrar, transmitir y visualizar en tiempo casi real las condiciones de la calidad del aire interior (IAQ). El estudio se realizó en el Aula W8 del Edificio de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Colima, un espacio donde se desarrollan actividades docentes con ocupación variable.

El aula cuenta con un sistema de aire acondicionado y ventilación natural proporcionada por ventanales. Tiene una superficie de 60.48 m² y un volumen de 169.34 m³, con capacidad aproximada para 42

personas. La distribución de los sensores y el mobiliario se muestra en la Figura 2, donde se

aprecia la disposición del aula y la ubicación relativa de las zonas de monitoreo.

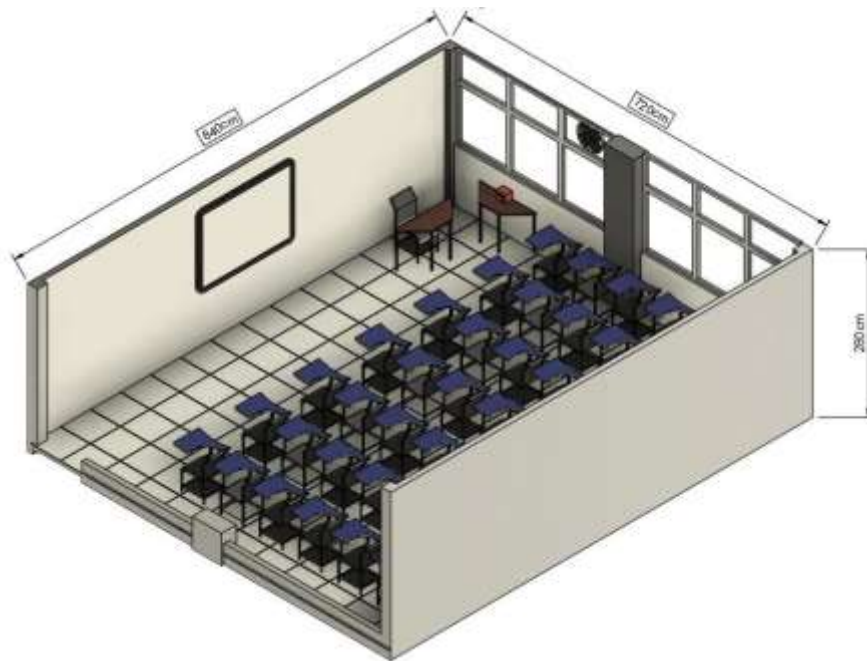


Figura 2. Distribución de dispositivos IoT de sensado y extracción.

Fuente: Elaboración propia.

Para el experimento se emplearon tres módulos de sensado, identificados como Módulo B, Módulo C y Módulo D, los cuales registraron de manera continua temperatura, humedad relativa, CO₂ y TVOC. La transmisión de datos hacia la plataforma ThingSpeak en la nube se configuró a intervalos de 10 segundos mediante el protocolo MQTT, utilizando una red Wi-Fi local. Cada módulo se ubicó estratégicamente para capturar gradientes espaciales dentro del aula. Aunque el sistema se desplegó mediante éstos tres módulos distribuidos en distintos puntos del aula, el análisis que se presenta en la sección de resultados se centró en el Módulo D, debido a que su ubicación en el escritorio del profesor permitió captar con mayor precisión las fluctuaciones ambientales locales provocadas por la interacción entre los alumnos, el flujo de aire acondicionado y las condiciones de ventilación natural.

Para esto, se registraron las mediciones durante cinco días consecutivos de clases ordinarias, así como observaciones sobre las condiciones del aula (número aproximado de ocupantes, apertura o cierre de puertas y ventanas, uso del sistema de aire acondicionado o de ventilación natural) a través de una bitácora. Estas observaciones permitieron interpretar con mayor precisión las fluctuaciones observadas en los niveles de CO₂ y TVOC.

Además, se aplicaron dos enfoques de calibración y reducción de errores sobre el firmware del microcontrolador de la placa ESP32, con la finalidad de garantizar la confiabilidad y precisión de los datos recolectados por los módulos de sensado. Estos enfoques son: 1) implementación de un algoritmo de compensación lineal de desfase (offset) por software para el sensor de temperatura y humedad DHT22, debido a que se identificaron desviaciones constantes en

las lecturas crudas del módulo durante las pruebas experimentales preliminares; por tanto, se calcula en cada iteración una supresión de $-0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la temperatura y de -4.5% para la humedad relativa, asegurando lecturas alineadas con el comportamiento esperado. 2) activación de los mecanismos de calibración digital que emplea el sensor CCS811, basados en tecnología de óxido metálico semiconductor (MOX) mediante el empleo de la librería Adafruit_CCS811.h y la instrucción `ccs.begin()`. Este componente aprovecha un algoritmo integrado de Corrección Automática de Línea Base (ABC), que evalúa la resistencia eléctrica del sensor en periodos de no ocupación para reajustar de forma autónoma el umbral base de $\sim 400\text{ ppm}$ de CO_2 equivalente (eCO_2), corrigiendo sin requerir calibración manual externa.

Por otro lado, los datos recolectados fueron preprocesados aplicando normalización de formatos, conversión de marcas de tiempo y corrección de separadores decimales. Se eliminaron valores faltantes, lecturas inválidas como valores de CO_2 y TVOC

iguales a cero (característicos de estados no operativos del sensor) y valores fuera de rangos creíbles. Finalmente, se generaron series temporales, ordenándose y agrupándose por módulo para la generación de las estadísticas presentadas en la sección de resultados (promedio, nivel de confianza y análisis ANOVA.).

El diseño experimental permitió caracterizar la dinámica ambiental del aula bajo diferentes condiciones de ocupación, ventilación natural o uso del sistema de aire acondicionado, evidenciando la utilidad de la arquitectura IoT-MQTT como herramienta para el monitoreo continuo y contextualizado de la calidad del aire interior en entornos académicos.

2.3 Arquitectura IoT-MQTT para monitoreo y control de IAQ

La arquitectura IoT-MQTT para el monitoreo de la calidad del aire interior se basa en un modelo publicador-suscriptor implementado mediante el protocolo de mensajería MQTT (Figura 3).

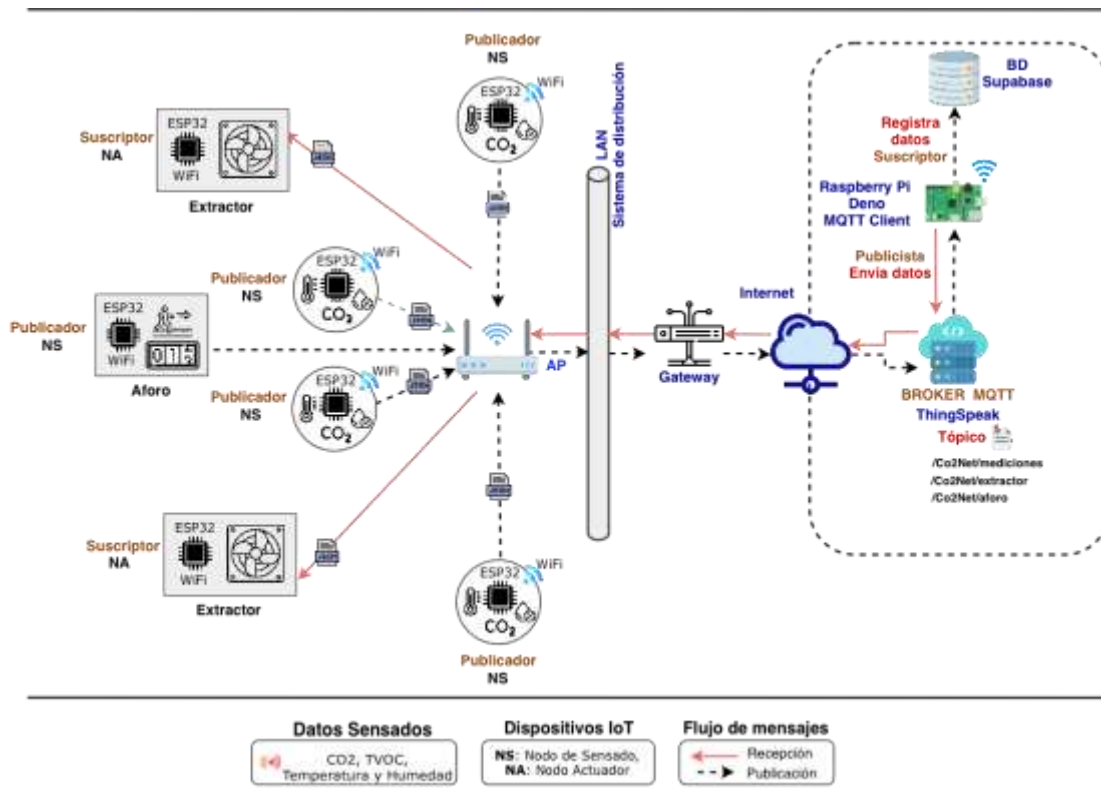


Figura 3. Arquitectura IoT-MQTT para monitoreo y control de IAQ.

Fuente: Elaboración propia.

MQTT es ampliamente reconocido como el estándar por defecto para el intercambio de datos en aplicaciones IoT debido a su bajo consumo de recursos, escalabilidad y eficiencia en redes inestables o de bajo ancho de banda.

Los nodos de sensado publican datos (CO_2 , TVOC, temperatura y humedad relativa) en tiempo cuasi real utilizando MQTT a través de la red Wi-Fi institucional, enviando las mediciones hacia un bróker MQTT alojado en la plataforma ThingSpeak que se comporta como un intermediario entre los dispositivos y la plataforma de monitoreo remoto, donde éstos son almacenados y graficados para supervisar su comportamiento de ser necesario. Para esto, los nodos de sensado implementan en su firmware esta transferencia de datos mediante el uso de la API ThingSpeak.h en combinación con un cliente TCP (WiFiClient), funcionando como una capa de software que traduce las lecturas

de los sensores y las publica de forma transparente hacia los canales de la plataforma remota, garantizando la compatibilidad con el paradigma publicador-suscriptor definido en la arquitectura IoT-MQTT del sistema. Su ejecución se realiza a través de un ciclo cerrado síncrono secuencial (void loop) diseñado con un periodo de refresco de 10 segundos (10,000 ms). Este flujo se efectúa en tres etapas controladas por retardos precisos: 1) 2 segundos donde se accede al sensor químico mediante `ccs.readData()` y se proyectan localmente los valores de eCO_2 y TVOC en una pantalla LCD de 16x2 caracteres (mapeada en los pines GPIO 19, 23, 18, 17, 16, 15); 2) 2 segundos donde se muestrea la temperatura y humedad relativa mediante el sensor DHT22 (Pin GPIO 2), se aplican las ecuaciones de offset por software y se transmiten las cuatro variables ambientales hacia el canal en la nube (2590906) mediante `ThingSpeak.writeFields()`; y 3) 6 segundos de

espera antes de reiniciar el ciclo. Por consiguiente, la Raspberry Pi fue configurada como cliente MQTT con el objetivo de almacenar localmente las mediciones en una base de datos Supabase y evaluar la futura integración de un módulo de control. Aunque el diseño arquitectónico prevé que el módulo de control permita integrar nodos actuadores (por ejemplo, extractores de aire), esta funcionalidad no fue implementada durante las pruebas experimentales, por lo que no formó parte del proceso de validación técnico-operativa de la arquitectura.

La comunicación entre los dispositivos se realiza mediante una red local LAN que enlaza los puntos de acceso con el Gateway institucional, proporcionando conectividad estable hacia Internet y garantizando la transmisión de datos hacia el bróker en la nube. Este esquema asegura un flujo continuo de información desde los sensores hacia las plataformas de análisis y almacenamiento.

3. Resultados

Los resultados que se presentan describen dos aspectos del sistema, su validación técnica del Sistema IoT-MQTT y el análisis e interpretación de los datos recolectados.

3.1 Validación técnica del Sistema IoT-MQTT

La validación técnica del sistema IoT-MQTT se centró en comprobar el funcionamiento del flujo completo de adquisición, transmisión y recepción de datos ambientales conforme a la arquitectura propuesta. Para ello, se evaluó el desempeño de los nodos de sensado (ver Figura 4), la conectividad a la red Wi-Fi institucional, la publicación de datos mediante el protocolo MQTT, la operación del bróker en la nube y la recepción local

desde una Raspberry Pi configurada como cliente suscriptor.



Figura 4. Nodo de sensado (CO₂, TVOC, Temperatura, Humedad).

Los módulos de sensado basados en ESP32 demostraron estabilidad en la adquisición continua de temperatura, humedad relativa, CO₂ y TVOC, enviando una lectura cada 10 s sin interrupciones significativas durante las sesiones de monitoreo. Cada variable sensada se publicó en un tópico o canal específico siguiendo un esquema jerárquico que facilitó la clasificación y trazabilidad de los mensajes.

La Figura 5 muestra un ejemplo representativo del comportamiento temporal de las cuatro variables monitorizadas, generado mediante un MATLAB Visualization directamente sobre el canal MQTT. En dicho panel se aprecia la continuidad del flujo de datos, la ausencia de discontinuidades atribuibles al bróker y la correspondencia exacta entre el intervalo de muestreo configurado y la frecuencia de actualización observada.

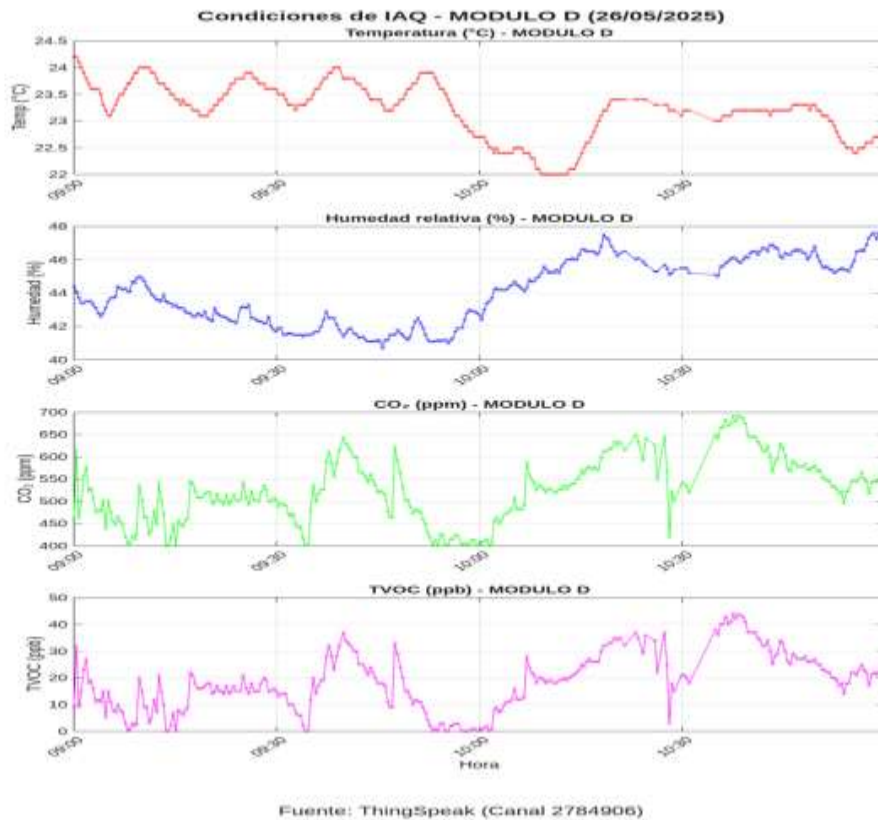


Figura 5. Panel de visualización generado en ThingSpeak mediante MATLAB Visualization para el módulo de monitoreo D del 26/05/2025, mostrando la evolución temporal de la temperatura, humedad relativa, CO₂ y TVOC.

De manera paralela, la Raspberry Pi actuando como cliente MQTT suscrito a los tópicos recibió todas las publicaciones emitidas por los módulos de sensado, validando así la implementación del modelo publicador-suscriptor y los almacenó en la base de datos Supabase, demostrando la integración del sistema con mecanismos externos de persistencia en la nube.

Por tanto, la validación técnica confirma que la arquitectura IoT-MQTT proporciona un canal estable, eficiente y escalable para el monitoreo continuo de la calidad del aire interior. El sistema mantuvo una comunicación estable entre sensores (publicadores), bróker y cliente suscriptor, cumpliendo con los requisitos operativos de la arquitectura y estableciendo las bases para futuras extensiones, como la activación

automática de mecanismos de control ambiental.

3.2 Análisis e interpretación de los datos recolectados.

Como se mencionó anteriormente, para el análisis e interpretación de los datos recolectados, se seleccionó el Módulo D. La experimentación se realizó durante el periodo comprendido entre el 26 y el 30 de mayo de 2025, registrándose mediciones continuas de temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ y TVOC. Es importante, recordar que las observaciones de campo obtenidas durante la experimentación se emplearon para contextualizar los cambios detectados en cada variable.

Las Figuras 6 a 9 ilustran la evolución de las variables monitoreadas durante este periodo

junto con sus respectivos Intervalos de Confianza al 95% (IC 95%). Además, para determinar si las tendencias temporales durante los cinco días de muestreo eran estadísticamente significativas, se ejecutó un análisis de varianza (ANOVA) individual para cada una de éstas. Los resultados indican que todas las variables presentaron fluctuaciones diarias estadísticamente significativas ($p < 0.001$), lo que confirma que las variaciones temporales observadas no

están asociadas al error de medición o a fluctuaciones aleatorias del entorno. En conjunto, estas tendencias evidencian que las variaciones presentadas, por ejemplo, en cuanto a concentraciones elevadas de CO_2 y TVOC, se deben a condiciones de aforo alto y ventilación limitada, y reducciones en momentos de menor actividad o mayor intercambio de aire. A continuación, en la Figura 6 se presenta el comportamiento de la temperatura.

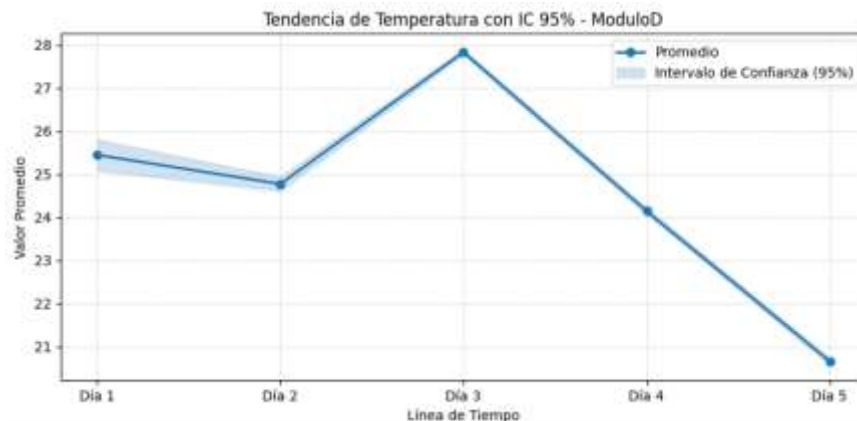


Figura 6. Evolución diaria de la temperatura promedio e intervalos de confianza (IC 95%) en el Módulo D.

La temperatura presentó una tendencia descendente (ver Figura 6), pasando de promedios cercanos a 25.5 °C el 26 de mayo a aproximadamente 20.6 °C el 30 de mayo. El análisis de varianza confirmó la significancia de estas variaciones temporales a lo largo del ciclo de 5 días ($F=463.60$, $p < 0.001$). Los intervalos de confianza (IC 95%) muestran una mayor dispersión en las mediciones durante los primeros dos días, lo cual se asocia a una alta ocupación (25 alumnos), uso de aire acondicionado y movimiento frecuente de puerta y alumnos, generando fluctuaciones por intercambio de aire con el exterior. Por el contrario, el incremento observado el 28 de mayo representó el punto máximo del periodo (aproximadamente 27.8 °C).

Hacia los últimos días, la reducción en los márgenes de los intervalos de confianza y la

estabilización térmica reflejan una mayor eficiencia del sistema de climatización y menor densidad de ocupación, condiciones que favorecieron un equilibrio térmico más estable dentro del aula.

Por otro lado, la humedad relativa (ver Figura 7) mostró un incremento gradual desde el inicio del periodo hasta alcanzar su valor máximo el 29 de mayo con un promedio de aproximadamente 56.1%, seguido de una disminución marcada el 30 de mayo (aproximadamente 42.5%). El análisis de varianza confirmó que estas variaciones diarias son estadísticamente significativas, registrando el efecto temporal más pronunciado del estudio ($F = 1272.19$, $p < 0.001$). La tendencia ascendente y la concentración de los intervalos de confianza (IC 95%) coinciden con los periodos de cierre del aula y el uso continuo del aire

acondicionado, condiciones que redujeron la ventilación natural y propiciaron la

acumulación de humedad por la exhalación de los ocupantes.

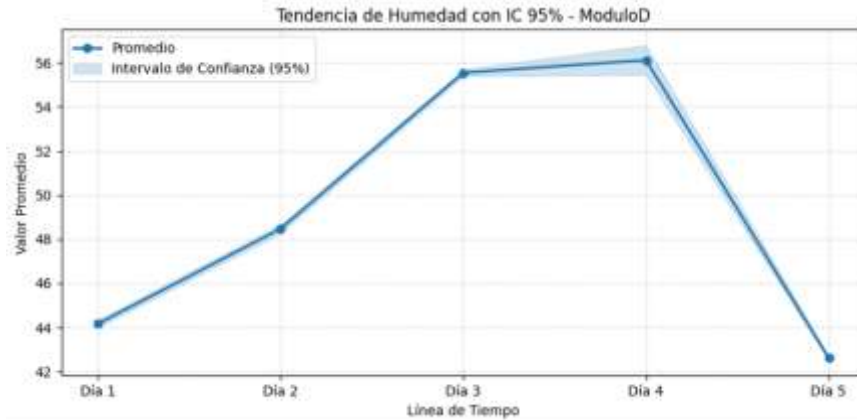


Figura 7 Evolución diaria de la humedad relativa promedio e intervalos de confianza (IC 95%) en el Módulo D.

El 29 de mayo se registró el promedio diario más elevado del periodo, acompañado de una ligera ampliación en el intervalo de confianza en comparación con los días previos, lo que denota una mayor fluctuación en las condiciones de humedad durante esa jornada. Por el contrario, el 30 de mayo la humedad promedio descendió sensiblemente hasta estabilizarse en aproximadamente 42.5%, presentando un intervalo de confianza sumamente estrecho que indica un ambiente térmico más seco, homogéneo y controlado hacia el final del ciclo experimental.

Las concentraciones de CO₂ (ver Figura 8) alcanzaron su máximo diario el 27 de mayo

con un promedio de aproximadamente 1292 ppm, periodo en el que el aula registraba una ocupación media de alrededor de 15 alumnos y condiciones de ventilación limitada. El análisis de varianza evidenció que las fluctuaciones diarias en los niveles de CO₂ fueron estadísticamente significativas a lo largo de los 5 días ($F = 340.40$, $p < 0.001$). Asimismo, la amplitud del intervalo de confianza (IC 95%) durante este pico refleja una mayor dispersión en los registros de esa jornada, lo cual es consistente con la variabilidad en los flujos de ocupación y los periodos de confinamiento del aire.

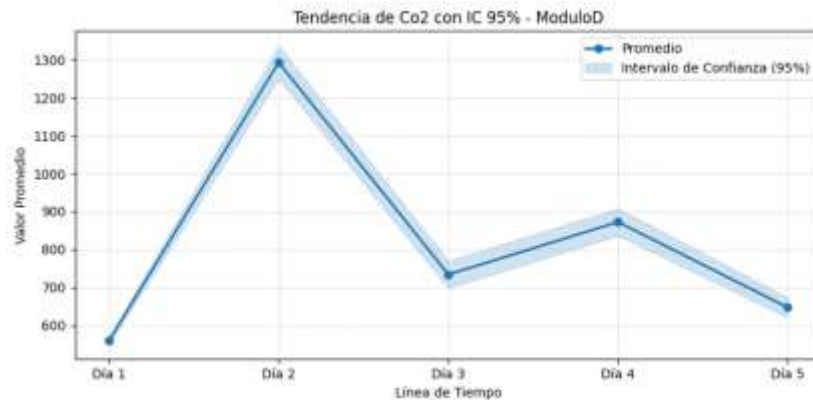


Figura 8. Evolución diaria de CO₂ promedio e intervalos de confianza (IC 95%) en el Módulo D.

Como se puede observar, en los días siguientes el promedio descendió gradualmente hasta situarse en aproximadamente 649 ppm (30 de mayo); lo cual, coincidió con un estrechamiento en el intervalo de confianza que confirma condiciones ambientales más homogéneas debido a una mejor ventilación y menor ocupación del aula. Confirmándose con esto la correlación entre alta ocupación, ventilación deficiente y acumulación de CO₂, fenómeno ampliamente documentado en estudios de calidad del aire interior. Las concentraciones máximas observadas superan el umbral de 1000 ppm, lo que indica momentos de ventilación insuficiente durante el periodo de mayor ocupación.

Por otro lado, el TVOC alcanzó su pico máximo el 27 de mayo con un promedio de aproximadamente 218 ppb, para luego iniciar

un descenso sostenido con un leve repunte el 29 de mayo, finalizando el periodo con el valor de 5 ppb (ver Figura 9) promedio más bajo el 30 de mayo. Adicionalmente, el análisis de varianza validó la significancia estadística de estas fluctuaciones diarias a lo largo del periodo de estudio ($F=299.57$, $p<0.001$). Acorde con la bitácora de observaciones, se identificó que el incremento inicial coincide con la mayor densidad de ocupación y escasa ventilación del aula, condiciones que favorecen la acumulación de compuestos volátiles emitidos por personas, materiales y productos de limpieza. Las concentraciones disminuyeron conforme se mejoró la ventilación natural y se redujo el número de alumnos, facilitando la disipación de contaminantes gaseosos lo que se refleja hacia el final del periodo.

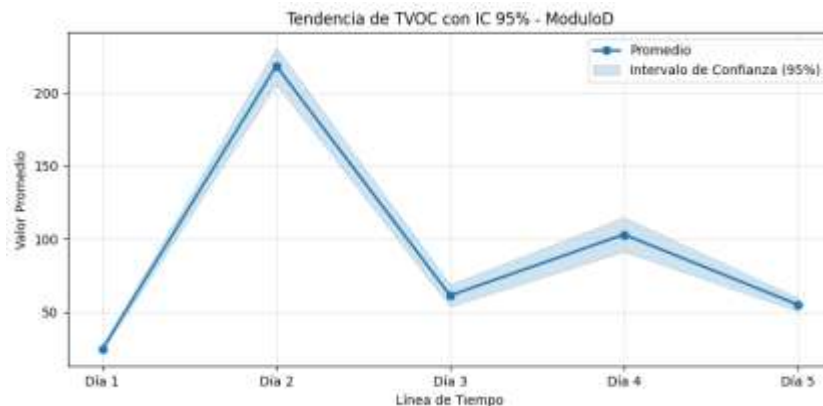


Figura 9. Evolución diaria de TVOC promedio e intervalos de confianza (IC 95%) en el Módulo D.

Por consiguiente, se puede afirmar que las mediciones confirman la sensibilidad de la arquitectura IoT-MQTT para detectar cambios ambientales originados por el uso del espacio y lo cual se respalda por la consistencia de los intervalos de confianza. Así, los descensos observados evidencian hacia el final del periodo un ambiente interior más estable y saludable, relacionado a menor ocupación y ventilación sostenida del aula. Estos resultados estadísticos validan la

factibilidad técnica y operativa de la arquitectura propuesta como herramienta de apoyo para monitorear condiciones de calidad del aire en aulas universitarias.

3.3 Consideraciones sobre la calidad del aire interior y confort térmico

Los resultados muestran la relación directa entre la ocupación, la ventilación y la climatización del aula. En consonancia con la literatura sobre Calidad Ambiental Interior

(IEQ, por sus siglas en inglés), el incremento simultáneo de CO₂ y TVOC durante los días de mayor aforo confirma que la actividad humana es la fuente principal de emisión en el espacio, con una variabilidad diaria estadísticamente significativa en todos los parámetros.

La posterior disminución de estos contaminantes, junto con el descenso térmico y la estabilización de la humedad, valida el uso del aire acondicionado combinado con ventilación natural como estrategia eficaz para la dilución de impurezas.

Respecto al confort térmico, los promedios diarios de temperatura (20.6 °C a 27.8 °C) y humedad relativa (42.5% a 56.1%) se mantuvieron dentro de los rangos recomendados por las normativas internacionales, asegurando condiciones confortables para los ocupantes durante la mayor parte del periodo evaluado.

No obstante, los promedios de CO₂ superiores a 1000 ppm en los días de mayor aforo revelan tasas de ventilación insuficientes. Esto sugiere la necesidad de implementar en futuras etapas un sistema de ventilación o extracción forzada, dimensionado específicamente según las tasas de generación de CO₂ y TVOC registradas durante los picos de ocupación.

En este sentido, la arquitectura IoT-MQTT desarrollada no solo demuestra viabilidad para el monitoreo en tiempo cuasi-real, sino que sienta los fundamentos técnicos para el diseño de estrategias predictivas y de control automático orientadas a garantizar el confort térmico y la calidad del aire interior.

3.4 Discusión

La arquitectura IoT-MQTT propuesta demuestra ser una solución escalable y eficaz para el monitoreo de aire interior en tiempo

cuasi real. Frente a desarrollos previos como los de Mosquera (2023) y Gómez-Meza et al. (2022), esta implementación simplifica el despliegue al centralizar el flujo de datos en el bróker MQTT de ThingSpeak. De este modo, se evita la complejidad de configurar entornos como AWS IoT Core, servidores locales o procesamiento Edge, ofreciendo un sistema de bajo costo y fácil mantenimiento idóneo para instituciones de recursos limitados.

A diferencia de propuestas como la de Quiroga (2023), que incorporan redes en malla y herramientas de procesamiento como Node-RED, esta arquitectura utiliza un modelo publicador-suscriptor para priorizar la simplicidad operativa y facilitar su adopción. Asimismo, frente a sistemas más complejos como el de Chávez-Bracamontes et al. (2023) que integran monitoreo multigas, almacenamiento avanzado y aplicaciones móviles dedicadas, el diseño desarrollado se limita a la medición de CO₂, TVOC, temperatura y humedad relativa. Esta delimitación ofrece una alternativa ligera y viable para identificar variaciones significativas en la calidad del aire interior sin elevar la complejidad del hardware.

Gómez et al. (2023) y Figols et al. (2020), incorporan motores de reglas o algoritmos de inteligencia artificial (IA); sin embargo, la arquitectura presentada y validada en este estudio se limitó al monitoreo continuo y a la comunicación entre dispositivos IoT mediante MQTT, demostrando la integración funcional entre los nodos de sensado, el bróker MQTT y los nodos de actuación, constituyendo una base para futuras extensiones orientadas a la implementación de estrategias de control ambiental y la posible inclusión de técnicas de IA para la adquisición de conocimiento.

Asimismo, desarrollos como los de Romero et al. (2022) y Soledispa (2020) se limitan a

la emisión de alertas o al seguimiento de parámetros aislados de calidad del aire. En contraste, la arquitectura aquí presentada integra la medición simultánea de CO₂, TVOC, temperatura, humedad y aforo, incorporando además la activación automática de extractores para la ventilación del espacio. Como limitación metodológica, este estudio no contempló un análisis de correlación cruzada entre las variables ambientales ni la cuantificación del impacto directo de la extracción sobre la tasa de renovación del aire, aspectos que se perfilan como prioridades para la siguiente fase experimental.

Por otra parte, la validación técnico-operativa confirmó la estabilidad en la comunicación de los dispositivos IoT, la consistencia del tráfico de datos mediante MQTT y la interoperabilidad de ThingSpeak y Supabase para el almacenamiento y gestión de la información. Específicamente, ThingSpeak operó con éxito como bróker MQTT, sosteniendo el flujo continuo de mensajería entre nodos publicadores y suscriptores a lo largo de toda la fase experimental.

Es importante precisar que el alcance de esta investigación se limitó a la validación técnico-operativa de la arquitectura propuesta, priorizando la estabilidad de la comunicación y la integración funcional de los dispositivos en un entorno real. Por lo tanto, quedan fuera de este estudio el análisis de viabilidad económica, las pruebas de estrés para escalabilidad masiva, la evaluación avanzada de consumo energético y el análisis correlacional multivariable entre los parámetros ambientales registrados; vertientes que se perfilan como trabajos futuros clave para consolidar la robustez técnica y el valor analítico del sistema.

Por lo tanto, la investigación confirma la viabilidad de la arquitectura IoT-MQTT diseñada para el monitoreo ambiental en

interiores. Al integrar de manera estable hardware de sensado, actuadores y almacenamiento en la nube, se consolida la estructura técnica necesaria para futuros trabajos enfocados en el control automático, la analítica avanzada de variables y la gestión eficiente de la ventilación.

4. Conclusiones

Este estudio demostró la viabilidad técnica de una arquitectura IoT-MQTT basada en hardware comercial de bajo costo (ESP32, CCS811 y DHT22) para el monitoreo continuo de la calidad del aire interior. El sistema garantizó una transmisión de datos estable con un intervalo de muestreo de 10 segundos hacia ThingSpeak, validando además la comunicación síncrona con un cliente suscriptor local en Raspberry Pi sin pérdida de paquetes.

Durante la validación de cinco días en un aula con aforo de hasta 25 alumnos, la plataforma operó de forma ininterrumpida, capturando con alta sensibilidad las fluctuaciones microclimáticas y de contaminantes generadas por la ocupación y el uso de aire acondicionado. La solidez de estas lecturas quedó respaldada estadísticamente mediante pruebas ANOVA de alta significancia ($p < 0.001$). Aunque el diagrama arquitectónico incluye extractores como nodos de actuación para ilustrar la proyección del sistema, su evaluación física quedó fuera del alcance experimental de esta fase.

Como trabajos futuros derivados de esta investigación, se plantea evaluar cuantitativamente el desempeño de la red (latencia y pérdida de paquetes) y analizar el impacto real de la extracción mecánica automatizada sobre la renovación del aire. Asimismo, la disponibilidad de este flujo de datos continuo permitirá desarrollar análisis correlacionales multivariables de largo plazo para modelar la dinámica entre aforo,

variables climáticas y contaminantes (CO₂ y TVOC), facilitando la integración de algoritmos de aprendizaje automático para el control predictivo en aulas inteligentes.

5. Agradecimientos

Se reconoce el valioso apoyo de los estudiantes que colaboraron en el montaje de la red de sensores y en las pruebas de campo de la arquitectura IoT-MQTT.

6. Referencias

Figols González, M., Díaz de Garayo Balsategui, S., & Aláez Sarasibar, X. (2020). La monitorización de la calidad del aire interior como herramienta de evaluación y mejora de la salubridad de un espacio (Indoor air quality monitoring as a tool for evaluating and improving the healthiness of a space). *Anales de Edificación*, 6(3), 13–20. <https://doi.org/10.20868/ade.2020.4610>

Chávez-Bracamontes, R., Mancilla-Peña, F., Sepúlveda-Rubio, S., & Mejía-Cárdenas, C. (2023). Wireless CO₂ and ozone monitoring with IoT technology for indoor air quality. En *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático 2023* (Acapulco, Guerrero, México, 25–27 de octubre de 2023). Asociación Mexicana de Control Automático. <https://doi.org/10.58571/CNCA.AMCA.2023.1045>

Videa Galo, M., & Rodríguez Corea, N. (2023). Evaluación de medidas para reducir la transmisión de COVID-19 en espacios cerrados, Tegucigalpa, Honduras. *Revista Médica Hondureña*, 91(2), 94–99. <https://doi.org/10.5377/rmh.v91i2.16614>

Prather, K. A., Wang, C. C., & Schooley, R. T. (2020). Reducing transmission of SARS-CoV-2: Masks and testing are necessary to combat asymptomatic spread in aerosols and

droplets. *Science*, 368(6498), 1422–1424. <https://doi.org/10.1126/science.abc6197>

Velarde, F., Mamani-Paco, R., & Andrade-Flores, M. (2020). Estimación de la probabilidad de contagio de COVID-19 por aerosoles en ambientes cerrados: Aplicaciones a casos en la ciudad de La Paz, Bolivia. *Revista Boliviana de Física*, 37(37), 22–30. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232020000200004

Bohórquez, M. C., Chapa, J. L., López, D., Manrique, M. A., Miranda, C., & Tintero Caballero, R. (2021). Use of filters and special materials in classrooms, based on the assessment of the presence of CO₂ as an indicator of COVID reduction and control in closed spaces. *Building & Management*, 5(3), 51–62. <https://doi.org/10.20868/bma.2021.3.4714>

Zhao, M., Wang, M., Zhang, J., Ye, J., Xu, Y., Wang, Z., Ye, D., Liu, J., & Wan, J. (2020). Advances in the relationship between coronavirus infection and cardiovascular diseases. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 127, 110230. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110230>

Montero Gutiérrez, P., Cerezo Narváez, A., Pastor Fernández, A., Otero Mateo, M., & Quesada Silva, P. (2023). Monitoring and control of basic air quality conditions in a university education facility. *DYNA*, 98(5), 1–7. <https://doi.org/10.6036/10819>

Daza Pérez, M. Á., Martínez Benavidez, D. X., & Caro Hernández, P. A. (2015). Contaminación microbológica del aire al interior y el síndrome del edificio enfermo. *Biociencias*, 10(2), 37–50. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5460365>

Rodríguez Muñoz, N. A., & Ortega Ávila, N. (2024). Medidores de CO₂: ¿Útiles para reducir el contagio de la COVID-19? *Milenaria, Ciencia y Arte*, (23), 43–46. <https://doi.org/10.35830/mcy.vi23.461>

World Health Organization. (2023). Chronic obstructive pulmonary disease (COPD). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-\(copd\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-(copd))

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). Estadística de defunciones registradas de enero a junio de 2022 (preliminar) (Comunicado de prensa núm. 29/23). <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/DR/DR-Ene-jun2022.pdf>

Ghaleb, T. A., Bin-Thalab, R. A., & Abdullah Alselwi, G. A. A. (2021). How Internet of Things responds to the COVID-19 pandemic. *PeerJ Computer Science*, 7, e776. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.776>

Singh, R. P., Javaid, M., Haleem, A., & Suman, R. (2020). Internet of Things (IoT) applications to fight against COVID-19 pandemic. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 14(4), 521–524. <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2020.04.041>

Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>

Al Hanif, A., & Ilyas, M. (2024). Effective feature engineering framework for securing MQTT protocol in IoT environments. *Sensors*, 24(6), 1782. <https://doi.org/10.3390/s24061782>

Mishra, B., & Kertesz, A. (2020). The use of MQTT in M2M and IoT systems: A survey. *IEEE Access*, 8, 201071–201086. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035849>

Mosquera Escobar, C. (2023). Desarrollo de un sistema de monitoreo remoto de la calidad del aire en espacios interiores [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/33202/1/MosqueraCristian_2023_MonitoreoRemotoAire.pdf

Guijarro Miragaya, P., Estay Leal, T., Patrón Saade, L., & Tendero Caballero, R. (2021). The CO₂ assessment in a school classroom for an optimal natural ventilation strategy. *Building & Management*, 5(3), 29–43. <https://doi.org/10.20868/bma.2021.3.4712>

Quiroga Barrios, D. A. (2023). Implementación de una red inalámbrica de sensores de CO₂ usando IoT como sistema de alerta ante una ventilación deficiente frente al COVID-19 en aulas de clase [Trabajo de grado, Universidad Antonio Nariño]. https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UAntonioN2_3e88f0c47105dbdc2403f6bb9dbbd598

Chung-Yen Chen, Ping-Hui Chen, Jia-Kun Chen, & Ta-Chen Su. (2021). Recommendations for ventilation of indoor spaces to reduce COVID-19 transmission. *Journal of the Formosan Medical Association*, 120(12), 2055–2060. <https://doi.org/10.1016/j.jfma.2021.08.007>

Gómez D'Orazio, L., Medina, S., & Montezanti, D. (2023). Integración de una red de sensores con una plataforma IoT para control inteligente de aulas. Instituto de Investigación en Informática LIDI (III-LIDI), Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata–Comisión de

Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.

http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/149527/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Soledispa Villegas, J. T. (2020). Análisis de niveles muy altos de CO₂ en las aulas de clases mediante el sensor MQ-135 [Trabajo de titulación, Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/58211>

Romero López, Y., Álvarez González, R., Maya Ramírez, R. L., & Sánchez Gálvez, A. M. (2022). Desarrollo de un sistema embebido para advertir sobre las condiciones de riesgo de contagio de COVID-19 mediante el monitoreo de la calidad del aire. *Research in Computing Science*, 151(12), 171–180. https://rcs.cic.ipn.mx/2022_151_12/Desarrollo%20de%20un%20sistema%20embebido%20para%20advertir%20sobre%20las%20condiciones%20de%20riesgo.pdf

Gómez-Meza, J. S., Matute-Arias, S. V., & Negrete Peña, T. J. (2022). Diseño de un prototipo IoT para el monitoreo de material particulado en espacios reducidos utilizando ESP32 con servidor hospedado en la nube. *Sinergia Académica*, 4(3), 1–18. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8079673>



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

A Novel Heuristic Approach for Simplifying Urban Risk Zones in Distribution Route Planning

Método heurístico para la simplificación de zonas de riesgo urbano en la planificación de rutas de distribución

Aguirre-Ibarra, D.A.^{a*}, Serrano-Rubio, J.P.^b, Cano-Olivos, P.^a, Cuautle-Gutiérrez, L.^a

^a Universidad Popular Autónoma de Puebla. Calle 17-A Sur 901, Barrio de Santiago, CP. 72410, Heroica Puebla de Zaragoza, Puebla. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1553-3346>^{*}, <https://orcid.org/0000-0003-1754-6619>, <https://orcid.org/0000-0003-2424-2381>.

^b Tecnológico Nacional de México/ITS Irapuato. Carretera Irapuato-Silao km 12.5, El Copal, CP 36821, Irapuato, Guanajuato. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3705-5112>.
daniel@upaep.edu.mx^{*}; juan.sr@irapuato.tecnm.mx; patricia.cano@upaep.mx; luis.cuautle@upaep.mx

Technological innovation: A geometric risk-aware routing framework is proposed that transforms heterogeneous urban incident data into circular conflict zones and integrates them into a Vehicle Routing Problem through a secant-based arc–zone interaction mechanism.

Industrial application: The proposed methodology enables logistics operators to incorporate urban accident and crime exposure into route planning, reducing operational risk while maintaining acceptable transportation efficiency in real-world distribution networks.

Received: April 10, 2026

Accepted: July 28, 2026

Resumen

Las operaciones logísticas urbanas están expuestas a accidentes de tránsito e incidentes delictivos que pueden afectar la eficiencia del transporte y la seguridad operacional. Este trabajo propone un marco heurístico geométrico para incorporar estructuras de riesgo urbano dentro de un Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad (CVRP). La metodología integra registros georreferenciados de accidentes y robos, técnicas de agrupamiento espacial, análisis de empalmes, transformación de regiones irregulares en zonas circulares de riesgo y un mecanismo secante para evaluar la exposición de las rutas. Las zonas de riesgo se incorporan al modelo mediante una penalización multiplicativa que permite equilibrar costo y riesgo. La metodología fue evaluada utilizando datos reales de la ciudad de Irapuato, México, correspondientes al periodo 2020–2025 y una red de distribución de 97 clientes. Los resultados muestran que el enfoque propuesto identifica estructuras

persistentes de conflicto urbano y las incorpora al proceso de optimización. El análisis de sensibilidad evidenció una reducción de los cruces por zonas de conflicto de seis a cero con un incremento moderado en la distancia recorrida. Los hallazgos demuestran la utilidad de la heurística propuesta para la planificación logística urbana sensible al riesgo.

Palabras clave: Ruteo Vehicular, Riesgo Urbano, Agrupamiento Espacial, Heurística Geométrica, Logística Sensible al Riesgo.

Abstract

Urban logistics operations are increasingly affected by traffic accidents and criminal incidents that may compromise transportation efficiency and operational safety. This study proposes a geometric heuristic framework for incorporating urban risk structures into a Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP). The methodology combines georeferenced accident and robbery records, spatial clustering, overlap analysis, transformation of irregular conflict regions into circular risk zones, and a secant-based mechanism for evaluating route exposure to risk. The resulting zones are integrated into the routing model through a multiplicative penalty structure that balances transportation cost and risk avoidance. The framework was evaluated using real-world data from Irapuato, Mexico, including accident and crime records collected between 2020 and 2025 and a distribution network of 97 customers. Results show that the proposed methodology successfully identifies urban conflict structures and incorporates them into routing decisions. Sensitivity analysis revealed a clear trade-off between routing efficiency and risk exposure, reducing conflict-zone crossings from six to zero with a moderate increase in routing cost. The findings demonstrate the practical applicability of the proposed geometric heuristic for risk-aware urban logistics planning.

Keywords: Vehicle Routing Problem, Urban Risk, Spatial Clustering, Geometric Heuristics, Risk-Aware Logistics.

Introduction

The vehicle routing problem (VRP) has been a fundamental area of research in logistics (Sar & Ghadimi, 2023) and operational optimization, particularly in contexts where efficiency in distribution and transportation is critical for improving performance and reducing costs. Since its original formulation by Dantzig and Ramser (1959), a wide range of extensions have been proposed to better represent real-world logistics systems, including capacitated variants, multi-depot configurations, time windows, and stochastic demand structures (Tang et al., 2015; Vidal et al., 2015; Güner et al., 2017). More recent applications have expanded toward urban

logistics and e-commerce distribution systems, where operational constraints and service requirements are increasingly complex (Torres et al., 2022).

The main contribution of this work is the proposal of a geometric heuristic framework capable of transforming heterogeneous urban accident and crime data into circular risk zones, integrating them directly into a vehicle routing model. This approach enables the simultaneous consideration of efficiency and safety when planning routes in complex urban environments.

A relevant stream within this literature considers the incorporation of heterogeneous cost structures and operational restrictions into the routing process. In particular, VRP variants with route penalties have been proposed to discourage the use of certain arcs or regions of the network, thereby promoting compliance with regulatory constraints or improving operational safety. These formulations typically introduce additional costs associated with specific edges or nodes, rather than explicitly removing them from the feasible solution space (Wen & Eglese, 2014; Xiong et al., 2024). However, despite their flexibility, most of these approaches assume that such penalties are exogenously defined and spatially static.

In parallel, the increasing complexity of urban systems has led to the consideration of spatially explicit restrictions within logistics planning. Urban freight distribution is associated with externalities such as congestion, noise, and environmental pollution, as well as public health impacts (Haarstad et al., 2024; Yang et al., 2025; Zhao et al., 2025; Espadaler-Clapés et al., 2023). Given the uneven spatial distribution of these impacts, policy instruments such as zoning regulations, low-emission zones, congestion pricing schemes, and time-window restrictions have been widely implemented to regulate freight mobility in cities (Fried et al., 2025; Ma et al., 2025). These interventions effectively transform classical routing problems into constrained VRP variants that incorporate spatial, temporal, and environmental restrictions (Şahin & Yaman, 2024; Boriboonsomsin et al., 2023; Álvarez-Horcajo, et al., 2024; Bruglieri et al., 2025).

While these approaches have been extensively studied in European and Asian contexts, Latin American cities present additional challenges associated with heterogeneous infrastructure conditions and uneven urban development patterns. In these

settings, infrastructure limitations and road safety issues significantly affect distribution efficiency. For instance, Barrera-Jiménez and Stevenson (2025) show that urban structure and road infrastructure quality influence traffic safety outcomes and enable the identification of collision-prone zones. Similarly, recent studies highlight that congestion, informal circulation patterns, and regulatory variability further complicate urban freight operations in these environments (Rodríguez et al., 2026; Román-Cedillo & Bautista-Hernández, 2026).

Within this context, the identification and representation of spatial risk zones has emerged as a complementary research direction in urban logistics optimization. Rather than treating risk regions as predefined inputs, recent studies emphasize the importance of deriving such structures from spatial data distributions. In this regard, clustering techniques have been widely used to extract meaningful spatial groupings from georeferenced data, which can subsequently be incorporated into optimization models (Tiwari et al., 2023). Among these methods, k-means clustering has been extensively adopted due to its computational efficiency and its ability to produce compact and interpretable partitions defined by centroids (Zhang, 2022; Zhang et al., 2025). However, its assumption of convex and isotropic cluster geometry limits its representational flexibility in complex urban environments.

Density-based methods such as DBSCAN have been proposed as an alternative due to their ability to detect arbitrarily shaped clusters (Tu et al., 2022). Nevertheless, their performance is sensitive to parameter selection and varying density distributions, which may reduce robustness in heterogeneous urban contexts (Khan et al., 2018). In comparison, k-means provides a more stable and computationally efficient

framework, particularly when the objective is not only pattern detection but also the integration of spatial structures into optimization models as operational constraints or cost modifiers.

Motivated by these considerations, this study adopts k-means as the basis for the identification of spatial risk structures. To overcome its geometric limitations, cluster centroids are transformed into circular influence zones representing localized risk areas. These regions are then integrated into the routing problem through a geometric intersection mechanism between network arcs and risk zones, enabling an explicit evaluation of route exposure to urban risk.

The resulting formulation extends the classical VRP by introducing cost structures that depend not only on distance or travel time but also on the spatial interaction between vehicle trajectories and endogenous risk regions. Accordingly, the proposed method can be interpreted as a VRP with geometry-dependent penalties, where route feasibility and cost are influenced by intersection with dynamically generated risk zones. This framework allows the direct integration of spatial analytics into routing optimization without relying exclusively on exogenous or static spatial restrictions.

This article addresses a VRP with route penalties defined by spatially generated risk zones. A heuristic is proposed to construct such zones based on clustering and geometric transformation of spatial data, and to incorporate them into the routing model through arc-level penalty adjustments. The objective is to minimize total routing cost, including both travel distance and penalties associated with the traversal of high-risk areas, which is particularly relevant for urban freight applications in environments characterized by heterogeneous infrastructure and elevated spatial uncertainty.

The remainder of this paper is organized as follows. The Methodology section describes the proposed heuristic framework and its technical components in detail. The Results section presents the application of the model to a real-world urban distribution case study. Finally, the Conclusion section discusses the main findings, the limitations of the proposed approach, and potential directions for future research.

Methodology

This study proposes a spatially informed heuristic framework for incorporating urban risk structures into a Vehicle Routing Problem (VRP). The methodology integrates georeferenced incident data, clustering-based spatial abstraction, geometric transformation of risk regions, and arc-level penalization within a routing optimization model.

The central idea is to transform heterogeneous urban risk observations into continuous geometric structures that can be evaluated directly within a network representation of the transportation system. This allows the routing model to incorporate spatial exposure effects without relying on predefined administrative boundaries or static risk maps.

The methodological framework consists of six sequential stages: (i) collection and georeferencing of urban incident data, (ii) spatial clustering using k-means, (iii) identification of overlapping risk structures, (iv) transformation of irregular spatial patterns into circular risk zones, (v) geometric evaluation of route–zone interactions through a secant-based approach, and (vi) integration of risk penalties into a capacitated VRP model.

Figure 1 illustrates the overall framework adopted in this research.

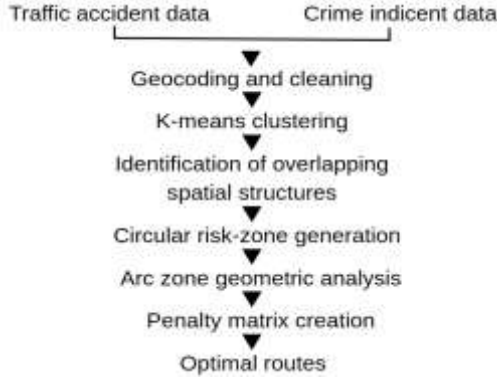


Figure 1. Proposed methodological framework.

Two independent datasets were employed to characterize urban risk conditions:

1. Traffic accident records.
2. Crime incident records associated with robbery events.

Both datasets were obtained from governmental open-data repositories through public information access mechanisms. Since the original records contained textual location descriptions, a georeferencing procedure was implemented in Python to convert addresses into geographic coordinates. Each observation was georeferenced and represented by:

$$x_i = (\alpha_i, \beta_i) \in \mathbb{R}^2$$

Sets and parameters:

N : set of nodes
 $V = \{0, 1, \dots, n\}$: set of customers
 $A = \{(i, j) \mid i, j \in N, i \neq j\}$: set of arcs
 $S = \{1, \dots, m\}$: set of vehicles
 $K = \{1, \dots, L\}$: set of risk zones
 α_i : latitude of node i
 β_i : longitude of node i
 P_i : position of node i
 $c_k = (h_k, l_k)$: center of risk zone k
 h_k : x - coordinate of center
 l_k : y - coordinate of center
 r_k : radius of risk zone k
 λ : risk sensitivity parameter
 δ_{ij}^k : intersection indicator

γ_i^k : node inclusion indicator
 for each node $i \in N: x_i = (\alpha_i, \beta_i) \in \mathbb{R}^2$

Risk zone $k \in K: Z_k = \{x \in \mathbb{R}^2: \|x - c_k\|^2 \leq r_k\}$

q_i = demand of customer i

Q = vehicle capacity

d_{ij}

= Harvesine distance between nodes

c_{ij} = base travel cost

x_{ijs}

$\in \{0, 1\}$: decision variable, 1 if vehicle s traverses arc (i, j) , 0 otherwise

Let:

D^{acc}

$= \{x_i^{acc}\}_{i=1}^{n_1}$: traffic accident dataset

$D^{inc} = \{x_j^{inc}\}_{j=1}^{n_2}$: crime incident dataset

The geocoding process was implemented in Python and transformed textual addresses into geographic coordinates.

To identify latent spatial structures of risk, k-means clustering is independently applied to each dataset.

For accidents:

$$C^{acc} = \{C_1^{acc}, \dots, C_{k_1}^{acc}\}$$

For crime incidents:

$$C^{inc} = \{C_1^{inc}, \dots, C_{k_1}^{inc}\}$$

Each cluster is characterized by its centroid:

$$c_k = \frac{1}{|C_k|} \sum_{x \in C_k} x$$

To capture overlapping slaping risk patterns, clusters from both datasets are intersected in the spatial domain.

Let:

$$C^* = \{C_p^{acc} \cap C_q^{inc} \neq \emptyset\}$$

Every composite region C_k^* is transformed into a circular approximation to ensure computational tractability within the routing model.

The centroid of each region is computed as:

$$c_k = (\alpha_k, \beta_k)$$

The radius is defined as:

$$r_k = \max_{x \in C_k^*} \|x - c_k\|$$

Thus, each risk region is represented as a circular zone:

$$Z_k = \{x \in \mathbb{R}^2: \|x - c_k\|^2 \leq r_k\}$$

This approximation allows complex spatial polygons to be embedded into a tractable geometric structure compatible with routing evaluation.

To define the arc-zone interaction model, the transportation network is defined as a directed graph:

$$G = (N, A)$$

Where each arc $(i, j) \in A$ represents a potential route segment.

For the geometric evaluation of arc-zone intersections, let P_i and P_j be the coordinates of nodes i and j . Each arc is represented as a line segment $\overline{P_i P_j}$. For each zone Z_k , the minimum distance between its center c_k and the segment is computed using a projection-based operator:

$$t_{ij}^k = \frac{(c_k - P_i) \cdot (P_j - P_i)}{\|P_j - P_i\|^2}$$

The closest point on the segment is:

$$P^* = \begin{cases} P_i + t_{ij}^k(P_j - P_i), & 0 \leq t_{ij}^k \leq 1 \\ \arg \min(\|c_k - P_i\|, \|c_k - P_j\|), & \text{otherwise} \end{cases}$$

The distance to the zone is:

$$d_k(i, j) = \|c_k - P^*\|^2$$

An arc is considered to intersect a risk zone if:

$$\delta_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } d_k(i, j) \leq r_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

This defines a secant-based risk interaction mechanism.

Let γ_i^k indicate whether node i lies within zone k :

$$\gamma_i^k = \begin{cases} 1 & \text{if } P_i \in Z_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Nodes located inside risk zones must be serviced regardless of route penalties, ensuring feasibility of the VRP solution.

The final penalty associated with arc (i, j) is defined as:

$$p_{ij} = 1 + \lambda \sum_{k \in K} \delta_{ij}^k (1 - \max(\gamma_i^k, \gamma_j^k))$$

This formulation ensures that arcs crossing risk zones are penalized unless they connect mandatory nodes within the same zone. The parameter λ controls the importance assigned to risk avoidance during route construction. When $\lambda = 0$, the model reduces to a classical capacitated VRP and no risk consideration is incorporated. As λ increases, route segments intersecting risk zones become progressively less attractive, encouraging the optimization model to select alternative trajectories whenever feasible. A sensitivity analysis was conducted using different λ values to evaluate the trade-off between transportation cost and risk exposure.

A multiplicative penalty structure is adopted (Table 1) instead of a classical Big-M formulation to avoid numerical instability and excessive dominance of risk terms in the objective function. This formulation allows a continuous trade-off between travel cost and risk exposure, which is more consistent with real-world urban logistics decision-making.

Table 1. Interpretation.

Situation	Penalized
Arc outside the circle	No
Secant arc and no customer inside	Yes
Secant arc and destination customer inside	No
Secant arc and both customers inside	No

The geographical coordinates associated with customers and depot locations were used to construct the transportation network. Since the nodes are represented by latitude and longitude coordinates, the distance between nodes was calculated using the Haversine formulation, which accounts for the curvature of the Earth and provides more accurate estimates than Euclidean distances when working with geospatial data.

The resulting problem is formulated as a capacitated VRP with spatially dependent arc cost:

Objective function

$$\min Z = \sum_{s \in S} \sum_{(i,j) \in A} x_{ijs} c_{ij} p_{ij}$$

Subject to

Customer assignment:

$$\sum_{j \in N} \sum_{s \in S} x_{ijs} = 1 \quad \forall i \in V$$

Flow conservation:

$$\sum_{j \in N} x_{ijs} - \sum_{j \in N} x_{jis} = 0$$

Depot constraint:

$$\sum_{j \in N} x_{0js} = 1 \quad \forall s \in S$$

Capacity constraint:

$$\sum_{i \in V} q_i \sum_{j \in N} x_{0js} \leq Q$$

The proposed methodology is implemented through a sequential heuristic composed of clustering, geometric processing and routing optimization stages. The following algorithm summarizes the procedure.

Algorithm: Risk-Zone Routing Heuristic

- Step 1. Import accident records.
- Step 2. Import robbery records.
- Step 3. Geocode all observations.
- Step 4. Apply k-means clustering to accident data.
- Step 5. Apply k-means clustering to crime data.
- Step 6. Detect overlapping clusters.
- Step 7. Compute centroids of overlapping regions.
- Step 8. Calculate maximum-distance radius.
- Step 9. Generate circular risk zones.
- Step 10. Construct the set of route arcs.
- Step 11. Evaluate arc-circle intersections.
- Step 12. Compute penalty coefficients.
- Step 13. Calculate Haversine distances.
- Step 14. Generate penalized cost matrix.
- Step 15. Solve the capacitated VRP.
- Step 16. Return optimal routes.

To ensure the reproducibility of the proposed approach, the clustering process was conducted by evaluating fifteen different configurations, with 20 clusters ultimately selected as the optimal representation of urban incidents. Outliers were removed by

excluding observations located more than 5 km from the global centroid, thereby improving cluster compactness. The radius of each circular risk zone was defined as the maximum distance between the cluster centroid and its farthest observation, ensuring a consistent representation of the spatial extent of risk. The CVRP model was configured with a network of 93 customers and a homogeneous fleet of vehicles, incorporating multiplicative penalties according to the level of exposure to risk zones.

From a practical perspective, the sensitivity analysis showed that setting $\lambda = 1$ achieved a balanced solution by reducing route crossings through risk zones at the cost of a 13.9% increase in total travel distance. Increasing the penalty to $\lambda = 3$ completely eliminated crossings while requiring an additional increase of less than 1 km compared with the previous scenario. Therefore, the appropriate penalty value should be selected according to the desired trade-off between a substantial reduction in risk exposure and a moderate increase in travel distance. The secant-based mechanism improves the accuracy of the exposure assessment by explicitly evaluating the interaction between route segments and circular risk zones, thereby avoiding overestimation. Although representing irregular risk regions as circles simplifies the computational process, it also introduces a geometric approximation of the actual spatial distribution of risk.

Results

The proposed methodology was evaluated using a real-world urban logistics scenario in the city of Irapuato, Guanajuato, Mexico. Traffic accident and robbery records collected between 2020 and 2025 were obtained through public information access mechanisms and subsequently georeferenced.

The routing network considered 97 customer locations distributed throughout the urban area. After applying the proposed clustering and overlap procedure, six risk zones were identified and incorporated into the routing model.

The present study employs traffic accident and robbery records collected between 2020 and 2025 to identify urban conflict zones. The objective of the proposed methodology is not to predict future incidents but rather to detect persistent spatial structures associated with elevated operational risk. Consequently, a multi-year observation window was adopted to reduce the influence of short-term fluctuations and isolated events.

Using a longer temporal horizon offers two methodological advantages. First, it increases the statistical robustness of the clustering process by incorporating a larger number of observations. Second, it allows the identification of recurring spatial patterns that remain relatively stable over time and therefore are more representative of the structural characteristics of the urban environment.

From a logistics perspective, routing decisions are typically designed considering medium-term operational conditions rather than temporary incident concentrations. Therefore, zones repeatedly associated with accidents and criminal activity over several years constitute more reliable indicators of exposure risk than hotspots derived from a single year of observations.

For these reasons, the period 2020–2025 was considered adequate to identify stable conflict zones capable of supporting strategic routing decisions within the proposed vehicle routing framework (Figure 2).

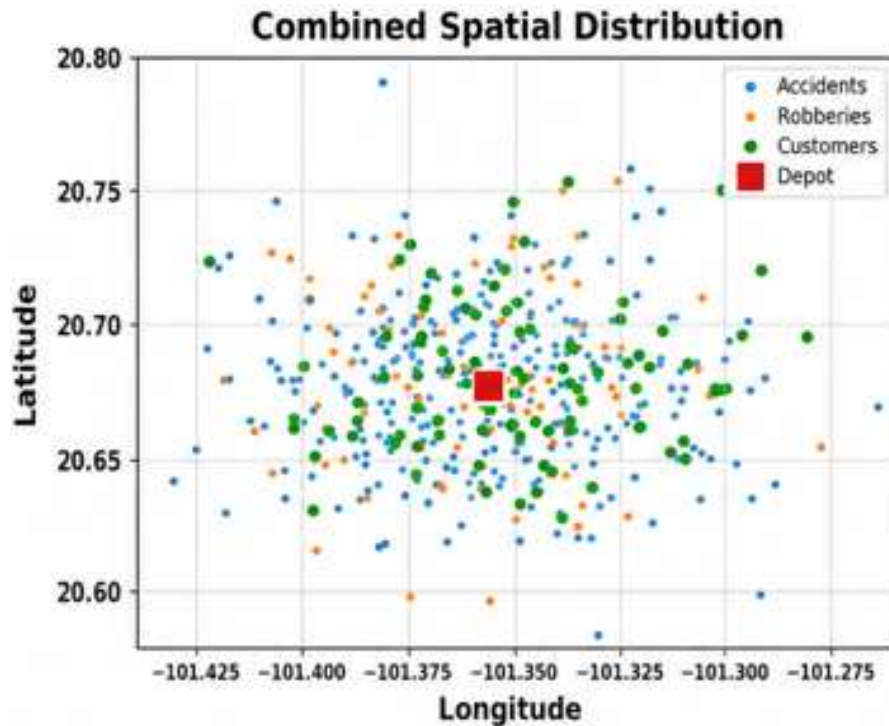


Figure 2. Combined Spatial Distribution.

To identify an appropriate representation of urban risk structures, multiple clustering configurations were evaluated. Since the proposed approach relies on transforming spatial clusters into circular penalty zones, the selection of the number of clusters has direct implications for the resulting radius sizes and, consequently, for the behavior of the routing model. A very small number of clusters tends to generate excessively large circles that overestimate risk exposure, whereas an excessive number of clusters produces fragmented regions with limited practical relevance for route planning.

A total of fifteen clustering configurations were evaluated. Each experiment was assessed according to the spatial coherence of the resulting clusters, the resulting radius lengths, and the interpretability of the identified risk zones. Among the tested configurations, Experiment 6, corresponding to 20 clusters, provided the most balanced representation of the spatial distribution of incidents.

Prior to the final clustering stage, observations located more than 5 km from the global centroid of the dataset were excluded. These observations represented isolated events with low spatial density and exhibited a strong influence on centroid allocation. Their inclusion generated clusters with disproportionately large radii and reduced the spatial discrimination capacity of the model. Consequently, removing these outliers improved cluster compactness and produced risk zones more consistent with the actual spatial concentration of incidents.

Figure 3 and Table 2 summarize the results obtained during the clustering calibration process. The selected configuration generated twenty spatial clusters that adequately captured the main concentration patterns of urban incidents while maintaining manageable radius values for subsequent integration into the routing model.

Table 2. Representative cluster characteristics.

Cluster	Points	Centroid lat	Centroid lon	Max radius (km)
1	30	20.679710	-101.353250	1.50
2	14	20.630728	-101.375326	1.78
3	25	20.690042	-101.335087	1.58
4	18	20.680632	-101.400713	2.53

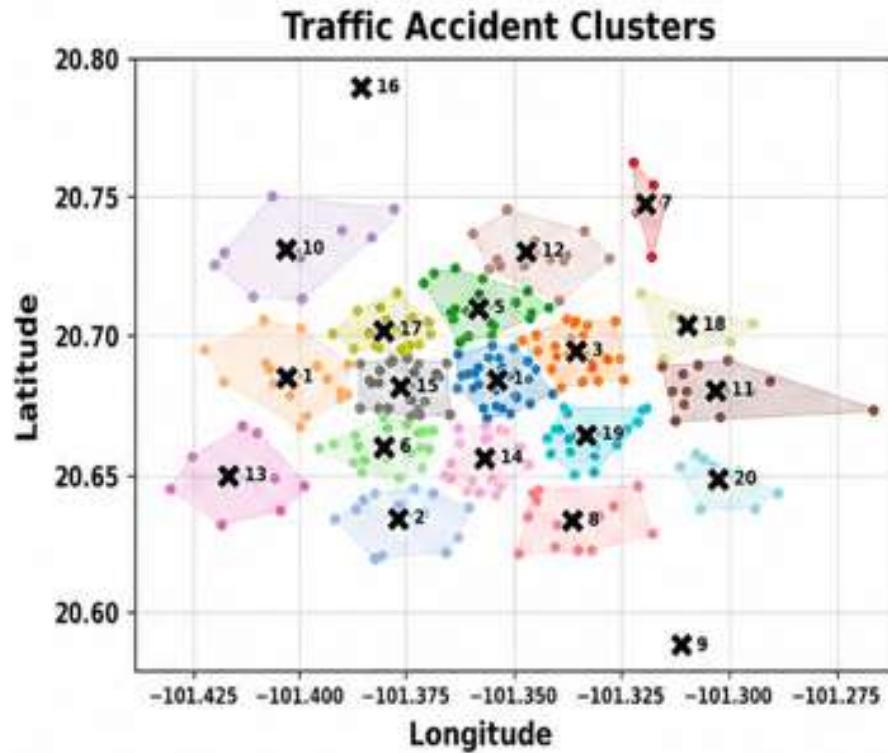
**Figure 3.** Traffic accident clusters.

Figure 3 presents the final assignment of incident observations to the twenty clusters. At this stage, only the cluster centroids and their associated observations are identified. The geometric boundaries of the future penalty zones are not yet defined, as the objective of this phase is solely to detect latent spatial structures within the incident data.

A more detailed visualization of the cluster geometry is presented in Figure 4. The figure illustrates the irregular spatial distributions generated by the clustering process, highlighting the heterogeneous nature of urban risk patterns. These irregular structures constitute the basis for the subsequent overlap analysis.

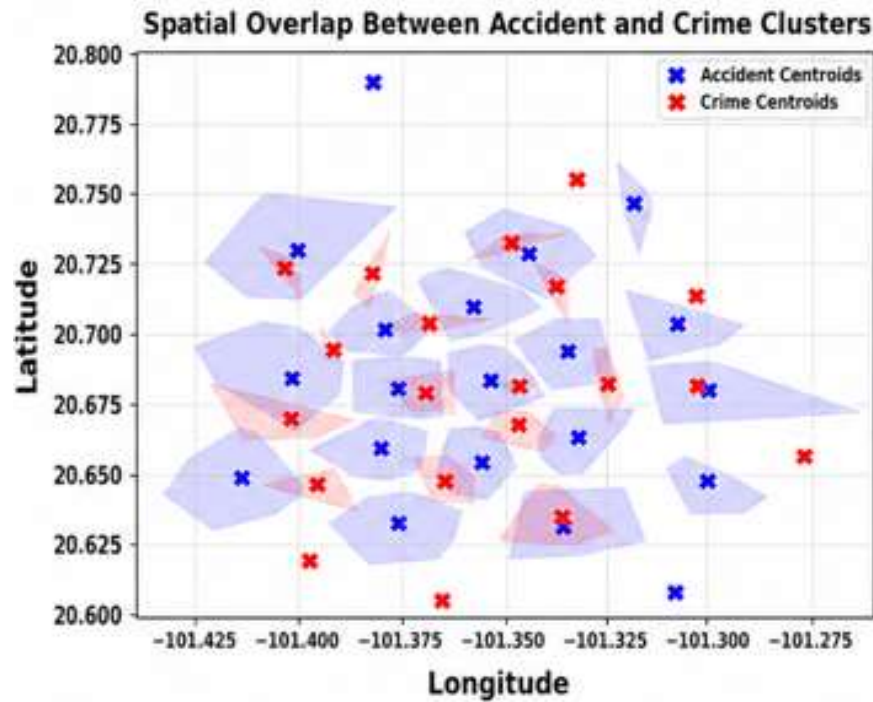


Figure 4. Spatial overlap.

Figure 5 presents the spatial overlap between accident clusters and robbery clusters. The overlapping areas represent locations where multiple sources of urban risk coexist simultaneously. These regions are

particularly relevant from a logistics perspective because they combine elevated accident exposure with security-related concerns, increasing the operational risk associated with vehicle movements.

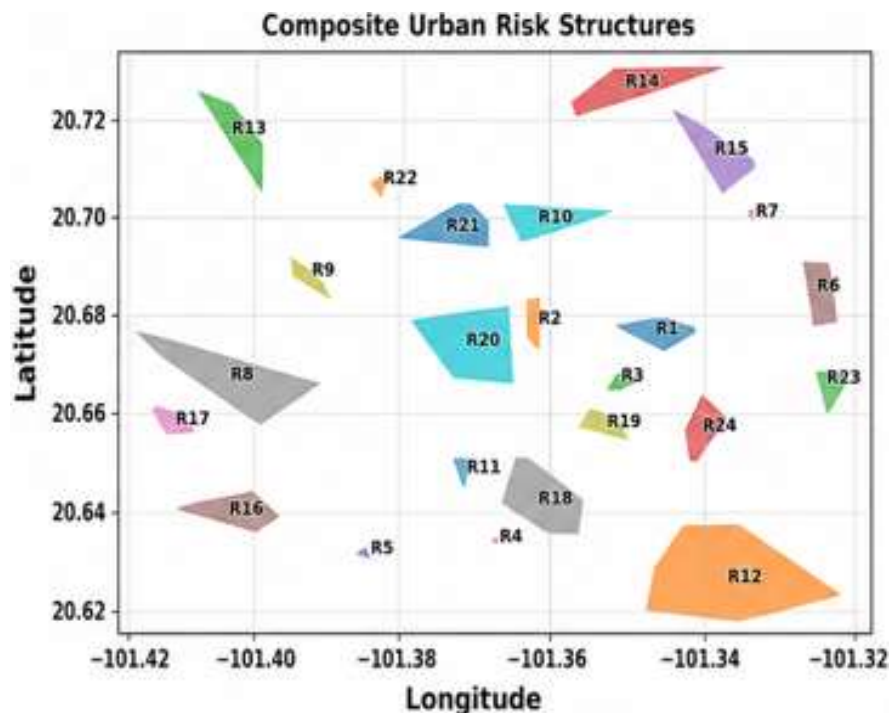


Figure 5. Intersections.

The intersection regions identified in Figure 5 were subsequently processed to calculate a new centroid and a representative radius. Specifically, a composite spatial structure was generated from each overlap area, and the maximum distance between the new centroid and the outermost point of the composite structure was used to define the radius of influence.

Figure 6 illustrates the resulting circular risk zones generated through this procedure. The resulting circles constitute the final penalty

regions employed in the routing model. Unlike administrative boundaries or predefined restricted areas, these zones emerge directly from historical urban risk patterns and therefore provide a data-driven representation of the spatial conditions faced by distribution vehicles. This characteristic allows the proposed methodology to dynamically adapt the routing process to local urban risk structures while maintaining computational tractability within the VRP formulation.

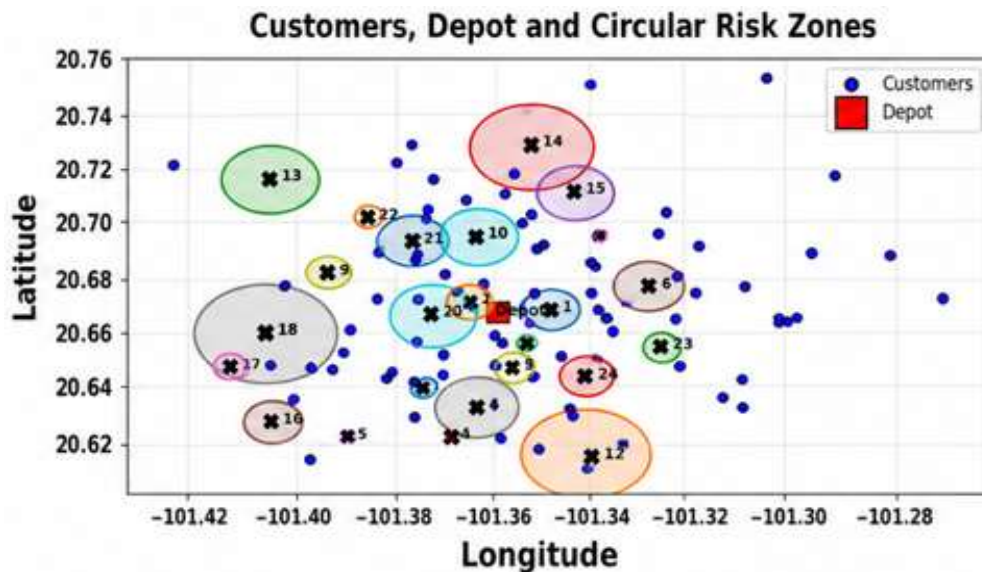


Figure 6. Risk zones.

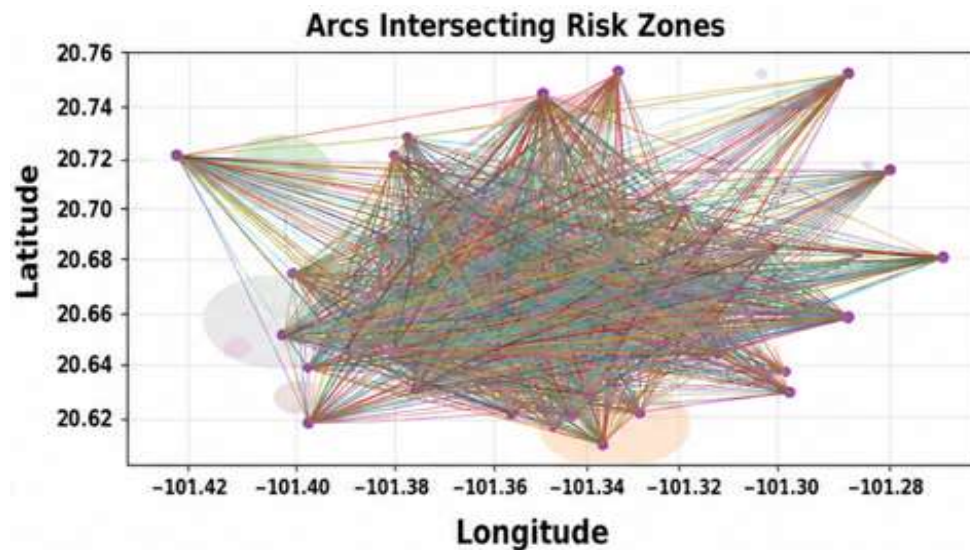


Figure 7. Arcs.

Figure 7 illustrates the complete set of potential route segments generated from the transportation network together with the circular risk zones identified from overlapping accident and crime structures. Each line represents a candidate arc connecting two network nodes, while the shaded circles correspond to the risk zones incorporated into the routing model.

A multiplicative penalty structure is adopted instead of a classical Big-M formulation to avoid numerical instability and excessive dominance of risk terms in the objective function. This formulation allows a continuous trade-off between travel cost and risk exposure, which is more consistent with real-world urban logistics decision-making.

The resulting solution demonstrates how the proposed methodology modifies route construction in response to the spatial distribution of urban risk. Rather than treating risk zones as prohibited areas, the model incorporates them as penalized regions within the objective function. Consequently, routes tend to avoid conflict zones whenever economically feasible, while still allowing traversal when the additional detour would generate a disproportionate increase in transportation cost or when customers located near risk zones must be serviced. The figure illustrates the balance achieved between transportation efficiency and risk avoidance, showing that the proposed framework can incorporate urban conflict structures into routing decisions without compromising network feasibility.

The sensitivity analysis revealed a clear trade-off between transportation efficiency and risk exposure. Increasing the risk weight from $\lambda=0$ to $\lambda=1$ reduced the number of risk-zone crossings from six to two, at the expense of a 13.9% increase in total routing cost. Further increasing the risk weight to $\lambda=3$ completely eliminated all risk-zone crossings

while increasing the routing cost by less than 1 km compared to $\lambda=1$. These results suggest the existence of an operational equilibrium where substantial reductions in risk exposure can be achieved with relatively limited increases in transportation cost.

Table 3. Sensitivity analysis.

Lambda	Total cost (km)	Risk crossings
0	112.81	6
1	128.45	2
3	129.41	0

For the selected risk sensitivity level ($\lambda = 1$), the routing solution reduced the number of conflict-zone crossings from six to two while maintaining a feasible three-vehicle configuration. This result confirms that the proposed geometric penalization mechanism effectively influences route selection and encourages safer trajectories throughout the distribution network.

The resulting solution demonstrates how the proposed methodology modifies route construction in response to the spatial distribution of urban risk. Rather than treating risk zones as prohibited areas, the model incorporates them as penalized regions within the objective function. Consequently, routes tend to avoid conflict zones whenever economically feasible, while still allowing traversal when the additional detour would generate a disproportionate increase in transportation cost or when customers located near risk zones must be serviced.

Figure 8 presents the optimal routing solution obtained after incorporating the proposed risk penalization mechanism into the VRP model. The red square denotes the depot location, while blue points represent customer locations. The shaded circles correspond to the circular risk zones derived from overlapping accident and robbery structures.

The colored routes represent the tours assigned to the three vehicles.

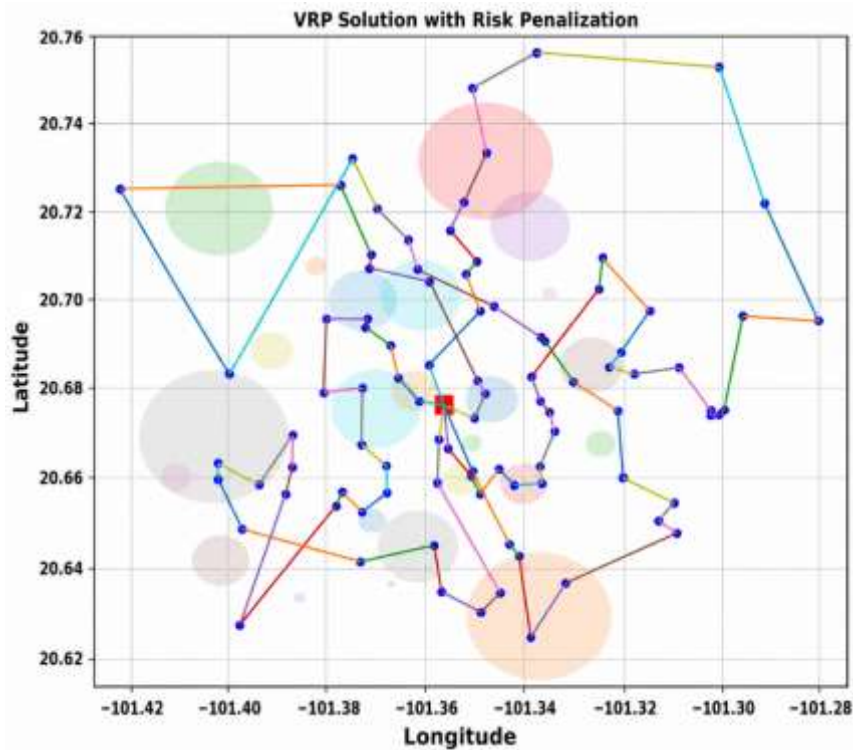


Figure 8. VRP solution.

Vehicle 1: [0, 48, 78, 35, 30, 34, 72, 84, 6, 68, 42, 37, 85, 28, 86, 11, 14, 60, 62, 8, 76, 77, 67, 26, 79, 58, 21, 59, 4, 0]

Vehicle 2: [0, 40, 54, 31, 25, 20, 15, 43, 2, 70, 45, 9, 74, 91, 17, 16, 89, 65, 80, 64, 69, 90, 50, 83, 73, 22, 56, 71, 92, 18, 0]

Vehicle 3: [0, 87, 82, 41, 55, 49, 66, 10, 63, 3, 88, 53, 24, 13, 75, 29, 19, 7, 57, 47, 33, 23, 38, 36, 27, 32, 39, 81, 51, 52, 12, 1, 44, 5, 61, 46, 0]

Although the proposed methodology discourages route segments intersecting conflict zones, some penalized arcs remained in the optimal solution. This behavior is expected because the penalty mechanism does not prohibit risk exposure but rather incorporates it as an additional cost component. Consequently, when the detour

required to avoid a conflict zone becomes disproportionately large, the optimization process may still select a penalized arc. This characteristic reflects realistic logistics decision-making, where complete risk avoidance is often impractical and must be balanced against operational efficiency.

Conclusion

This study proposed and evaluated a geometric heuristic framework for incorporating urban risk structures into a Vehicle Routing Problem (VRP). The primary objective was to develop a methodology capable of transforming heterogeneous urban incident data into spatially explicit risk representations that could be directly integrated into routing decisions. The results obtained demonstrate that this objective was successfully achieved.

The proposed framework combines georeferenced accident and robbery records, clustering techniques, spatial overlap analysis, geometric abstraction, and route optimization. Starting from historical urban incident data, the methodology identifies latent spatial risk structures, detects overlapping regions associated with multiple risk sources, and transforms these irregular spatial patterns into circular risk zones suitable for integration within a capacitated VRP model. This transformation constitutes one of the main contributions of the study, as it provides a practical mechanism for converting complex urban risk information into computationally tractable routing inputs.

A second contribution is the development of a secant-based geometric interaction mechanism that evaluates whether a route segment intersects a risk zone. Unlike approaches that rely on administrative boundaries or predefined restricted areas, the proposed formulation allows risk exposure to be quantified directly from the geometric relationship between route arcs and data-driven conflict zones. This provides a flexible and transferable framework that can be adapted to different urban environments and risk sources.

The computational experiments conducted using real-world data from the city of Irapuato, Mexico, confirmed the practical applicability of the methodology. The clustering and overlap procedures successfully identified persistent urban conflict structures, which were subsequently incorporated into the routing model through a multiplicative penalty mechanism. The resulting framework preserved computational feasibility while allowing risk considerations to influence route construction.

The sensitivity analysis demonstrated a clear trade-off between transportation efficiency and risk exposure. The classical VRP solution

($\lambda = 0$) generated six crossings through conflict zones and a total routing cost of 112.81 km. Introducing moderate risk sensitivity ($\lambda = 1$) reduced the number of crossings to two while increasing routing cost by approximately 13.9%. Increasing the risk parameter to $\lambda = 3$ completely eliminated all crossings through conflict zones while requiring less than one additional kilometer compared with the $\lambda = 1$ scenario. These results provide empirical evidence that the proposed heuristic is capable of significantly reducing exposure to urban risk while maintaining acceptable transportation efficiency.

An important characteristic of the proposed approach is that risk zones are not treated as prohibited regions. Instead, risk is incorporated as a continuous cost component that allows the optimization process to balance safety considerations and operational efficiency. Consequently, the methodology reflects realistic logistics decision-making environments in which complete risk avoidance may not always be economically justified.

Overall, the results demonstrate that the proposed geometric heuristic constitutes a useful and effective mechanism for integrating urban risk information into vehicle routing decisions. The methodology enables the identification of meaningful spatial conflict structures, their transformation into tractable geometric representations, and their incorporation into route optimization models through a mathematically consistent framework.

Future research may extend the proposed methodology in several directions. A particularly promising avenue consists of integrating predictive spatial-risk models based on machine learning techniques to generate dynamic risk zones derived from anticipated accident and crime patterns rather

than solely historical observations. Additional extensions may include time-dependent risk representations, multi-objective formulations that explicitly balance transportation cost and risk exposure, and the incorporation of additional urban risk factors such as traffic congestion, flooding events, infrastructure disruptions, or social disturbances. These developments could further enhance the ability of routing systems to operate under complex and evolving urban conditions.

Although the results confirm the usefulness of the proposed heuristic framework, several limitations should be acknowledged. The methodology relies on historical data, whose validity may be affected by dynamic changes in the road infrastructure. In the case study analyzed, the identified urban conflict patterns reflect persistent spatial structures; however, their representativeness may decrease if substantial modifications occur in the transportation network. The moderate increase in travel distance is offset by the elimination of route crossings through risk zones, representing an acceptable trade-off in exchange for improved operational safety. When scaling the model to megacities with higher traffic density and more complex crime patterns, adjustments to the clustering model will likely be required to preserve the quality of the risk representation. Finally, the effectiveness of the proposed framework depends on the timely updating of georeferenced risk data, as delays in data acquisition or reporting may reduce the accuracy of the resulting risk zones.

References

Sar, K., & Ghadimi, P. (2023). A systematic literature review of the vehicle routing problem in reverse logistics operations. *Computers & Industrial Engineering*, 177, 109011. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109011>

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. In *Management Science* (Vol. 6, Issue 1, pp. 80–91). Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>

Tang, J., Yu, Y., & Li, J. (2015). An exact algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem of pickup and delivery of customers to the airport. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.11.001>

Vidal, T., Battarra, M., Subramanian, A., & Erdogan, G. (2015). Hybrid metaheuristics for the clustered vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 58, 87–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.10.019>.

Güner, A. R., Murat, A., & Chinnam, R. B. (2017). Dynamic routing for milk-run tours with time windows in stochastic time-dependent networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 97, 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.10.014>

Torres, F., Gendreau, M., & Rei, W. (2022). Crowdsipping: An open VRP variant with stochastic destinations. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 140, 103677. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103677>

Wen, L., & Eglese, R. (2014). Minimum cost VRP with time-dependent speed data and congestion charge. *Computers & Operations Research*, 56, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.10.007>

Xiong, Y., & Li, X. (2024). The dynamic mechanism of tentative governance for emerging technologies: A case study of China's new energy vehicle subsidy. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 484, p. 144328). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144328>

- Haarstad, H., Rosales, R., & Shrestha, S. (2024). *Freight logistics and the city*. *Urban Studies*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/00420980231177265>
- Yang, Y., Chen, Y., Bai, Y., Liu, J., & Cheng, S. (2025). Mobility data uncover spillover impacts of freight activities on urban neighborhoods. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 138, 103902. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.107032>
- Zhao, P., Li, Z., He, Z. et al. Reducing the road freight emissions through integrated strategy in the port cities. *Nat Commun* 16, 2563 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57861-z>
- Espadaler-Clapés, J., Barmounakis, E., & Geroliminis, N. (2023). Traffic congestion and noise emissions with detailed vehicle trajectories from UAVs. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 118, 103822. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103822>
- Fried, T., Tejada, C., Dennis-Bauer, S., Bolbaatar, O., Goodchild, A., Marshall, J. D., Olmedo, O., & García, L. (2026). Logistics of Zoning, Zoning for Logistics: Toward Healthy and Equitable Development for Urban Freight. *Journal of the American Planning Association*, 92(1), 15–32. <https://doi.org/10.1080/01944363.2025.2515134>
- Ma, Y., Ampong, D.K. & Mészáros, F. Access restrictions in urban logistics: a systematic review of policy effectiveness and sustainability. *Futur Bus J* 11, 259 (2025). <https://doi.org/10.1186/s43093-025-00675-8>
- Şahin, M. K., & Yaman, H. (2024). The vehicle routing problem with access restrictions. *Transportation Science*, 58(5), 1101–1120. <https://doi.org/10.1287/trsc.2023.0261>
- Boriboonsomsin, K., Tanvir, S., & Barth, M. (2024). *Modeling the impacts of low emission zone on route diversion and emissions of heavy-duty trucks: A Southern California case study*. *Transportation Research Record*, 2678(1), 794–805. <https://doi.org/10.1177/03611981231172747>
- Álvarez-Horcajo, J., Oliet-Villalba, J. M., Moreno-Saavedra, L. M., Carral, J. A., & Salcedo-Sanz, S. (2025). *Optimal reassignment of green vehicles for improving last-mile delivery distribution in cities with low emissions zones*. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 17, 100282. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100282>
- Bruglieri, M., Çatay, B., Keskin, M., Mancini, S., & Pisacane, O. (2025). *The mixed-fleet vehicle routing problem with low emission zones*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 201, Article 104230. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104230>
- Barrera-Hernández, H., & Stevenson, M. (2025). Multilevel análisis of urban form and road safety: An application for developing-country cities. *Latin American Transport Studies*, 4, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.latran.2026.100053>
- Rodríguez, S., Corzo-Forero, J., Guerrero-Guevara, L. F., León-Prieto, C., & Rodríguez-Jaime, M. F. (2026). Profile of Bogotá: Urban dynamics, transportation, and mobility challenges in a Latin American city. *Latin American Transport Studies*, 4, 100059. <https://doi.org/10.1016/j.latran.2026.100059>
- Román-Cedillo, D., & Bautista-Hernández, D. A. (2026). Transportation systems in Mexico: Challenges and trends. *Latin American Transport Studies*, 4, 100060. <https://doi.org/10.1016/j.latran.2026.100060>
- Arellano-Avelar, M., Medina, M. G., Martínez-Abarca, J., & Preciado-Caballero, N. (2025). Contaminación auditiva por autobuses de tránsito rápido. *Entropía y neguentropía en la metrópoli de Guadalajara*,

México. CG Ciudad Glocal Revista Científica Mexicana de Movilidad Urbana, Transporte y Territorio. 1. <https://doi.org/10.65937/ciudadglocal.2025.4.v1.n1>

Tiwari, A., Singhal, B., Aditya, A., Tiwari, A., Jain, S., Mukherjee, D., & Mukherjee, D. (2023). A unified geospatial clustering framework to identify varying density clusters in e-commerce logistics. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. <https://doi.org/10.1609/aaai.v40i47.41488>

Zhang, M. (2022). Weighted clustering ensemble: A review. Pattern Recognition, 124, 108428. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2021.108428>

Zhang, X., Jia, Y., Song, M., & Wang, R. (2025). Similarity and dissimilarity guided co-association matrix construction for

ensemble clustering. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 37(11), 6694–6707. <https://doi.org/10.1109/KEEICT.2018.8628138>

Tu, X., Fu, C., Huang, A., Chen, H., & Ding, X. (2022). DBSCAN spatial clustering analysis of urban production–living–ecological space based on POI data. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(9), 5153. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095153>

Khan, M. M. R., Siddique, M. A. B., Arif, R. B., & Oishe, M. R. (2018). ADBSCAN: Adaptive density-based spatial clustering of applications with noise for identifying clusters with varying densities. In Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEICT 2018).



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Microstructural effects of preconditioning materials on gray iron and their impact on corrosion resistance

Efecto microestructural de materiales precondicionadores en hierro gris y su impacto en la resistencia a la corrosión

Villarreal-Fuentes, B.O.^a, Rodríguez-Reyes, M.^{a*}, Vázquez-Obregón, D.^b, Sánchez-Arroyo, A.^a, Olvera-Romero, G.D.^c, Veloza-Matamoros, Z.^a, Zamora-García, J.J.^b, Acevedo-Dávila, J.L.^b

^a División de Estudios de Posgrado e Investigación; Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Saltillo; C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8933-5105>, <https://orcid.org/0009-0009-5977-3116>^{*}, <https://orcid.org/0009-0005-7095-2677>, <https://orcid.org/0000-0002-3958-3157>.

^b Departamento de Metal-Mecánica; Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Saltillo; C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4830-3763>, <https://orcid.org/0009-0003-4740-3202>, <https://orcid.org/0000-0002-2439-2649>.

^c Facultad de Ingeniería; Universidad Autónoma de Coahuila; C.P. 25350, Arteaga, Coahuila, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0885-1761>.
d22050001@saltillo.tecnm.mx; mario.rr@saltillo.tecnm.mx^{*}; dagoberto.vo@saltillo.tecnm.mx;
m20051903@saltillo.tecnm.mx; golvera@uadec.edu.mx; zully.mv2@saltillo.tecnm.mx; jose.zg@saltillo.tecnm.mx;
jorge.ad@saltillo.tecnm.mx

Technological innovation: Improved microstructural effects and reduced gray iron corrosion.

Industrial application area: Metallurgical and automotive industries.

Received: November 21, 2025

Accepted: July 21, 2026

Resumen

La corrosión de los discos de freno de hierro gris en ambientes agresivos representa un desafío creciente para la industria automotriz, particularmente en los vehículos híbridos y eléctricos, donde la menor frecuencia de frenado favorece los procesos de degradación por corrosión. Este fenómeno no solo afecta el desempeño y la vida útil de los componentes, sino que también contribuye a la emisión de material particulado con potencial impacto sobre la salud humana y el medio ambiente. El presente estudio evaluó la influencia de tres materiales precondicionadores (grafito metalúrgico, grafito de electrodo y coque metalúrgico) sobre la microestructura y la resistencia a la corrosión del hierro gris. Se realizaron tres coladas independientes bajo condiciones idénticas

de fusión a 1450 °C, empleando cada material preacondicionador por separado. De cada colada se obtuvieron tres probetas para la caracterización microestructural y electroquímica. La cuantificación microestructural se realizó mediante análisis de imágenes utilizando diez mediciones por condición experimental para determinar la fracción de perlita fina, la densidad de inclusiones de MnS y el espaciamiento interlaminar de la perlita. La resistencia a la corrosión se evaluó mediante ensayos de polarización potenciodinámica en una solución de NaCl al 3.5% en peso, utilizando una velocidad de barrido de 0.1667 mV/s y un intervalo de potencial de ± 0.5 V respecto al potencial de corrosión. Se realizaron cinco mediciones por probeta y los resultados reportados corresponden al valor promedio. Las diferencias entre las condiciones experimentales se evaluaron mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA), encontrándose diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

El hierro gris preacondicionado con coque metalúrgico presentó la mayor densidad de inclusiones de MnS (226 ± 5 MnS/mm²), la mayor fracción de perlita fina ($55.35 \pm 0.84\%$) y el menor espaciamiento interlaminar de la perlita (170 ± 3.50 nm). En correspondencia, esta aleación exhibió la menor densidad de corriente de corrosión y la menor velocidad de corrosión (0.016 ± 0.002 mm/año), lo que representa una reducción aproximada del 65% con respecto a la aleación preacondicionada con grafito de electrodo. Los resultados indican que la mejora en la resistencia a la corrosión está asociada con la influencia combinada del material preacondicionador seleccionado y de las condiciones metalúrgicas resultantes, incluidas las diferencias en el contenido de azufre, la relación Mn/S, el equivalente de carbono, la densidad de inclusiones de MnS y el refinamiento de la perlita. Estos hallazgos demuestran que una adecuada selección del material preacondicionador puede modificar el comportamiento de solidificación y la evolución microestructural del hierro gris, mejorando su desempeño frente a la corrosión en ambientes agresivos.

Palabras clave: Resistencia a la corrosión, Microestructura perlítica, Hierro gris, Materiales preacondicionadores.

Abstract

The corrosion of gray cast iron brake discs in aggressive environments is a growing concern for the automotive industry, particularly in hybrid and electric vehicles, where reduced brake usage promotes corrosion-related degradation. This phenomenon not only affects brake performance and service life but also contributes to particulate matter emissions with potential environmental and health impacts. The present study evaluated the influence of three preconditioning materials (metallurgical graphite, electrode graphite, and metallurgical coke) on the microstructure and corrosion resistance of gray cast iron. Three independent heats were produced under identical melting conditions at 1450 °C, using each preconditioning material separately. Three specimens were obtained from each heat for microstructural and electrochemical characterization. Quantitative image analysis was performed using ten measurements per experimental condition for the determination of the fine pearlite fraction, MnS inclusion density, and pearlite interlamellar spacing. Corrosion resistance was evaluated by potentiodynamic polarization in a 3.5 wt.% NaCl

solution using a scan rate of 0.1667 mV/s over a potential range of ± 0.5 V with respect to the corrosion potential. Five measurements were performed for each specimen, and the reported values represent mean values. Statistical differences among the evaluated conditions were assessed by one-way ANOVA ($p < 0.05$).

The gray cast iron preconditioned with metallurgical coke exhibited the highest MnS inclusion density (226 ± 5 MnS/mm²), the largest fraction of fine pearlite ($55.35 \pm 0.84\%$), and the smallest pearlite interlamellar spacing (170 ± 3.50 nm). Correspondingly, this alloy exhibited the lowest corrosion current density and corrosion rate (0.016 ± 0.002 mm/year), representing an approximately 65% reduction compared with the alloy preconditioned using electrode graphite. The results indicate that the improved corrosion resistance is associated with the combined influence of the selected preconditioning material and the resulting metallurgical conditions, including differences in sulfur content, Mn/S ratio, carbon equivalent, MnS inclusion density, and pearlite refinement. These findings demonstrate that appropriate selection of the preconditioning material can modify the solidification behavior and microstructural evolution of gray cast iron, thereby improving its corrosion performance in aggressive environments.

Keywords: Corrosion resistance, Pearlitic microstructure, Gray iron, Preconditioning materials.

1. Introduction

Global vehicle sales were estimated at 77 to 89 million units in 2024 (1). This figure gives an indication of the scale of the design, manufacturing, and commercial activities associated with the automotive industry. The types of vehicles entering this market have also begun to change. Battery electric vehicles (BEVs), hybrid electric vehicles (HEVs), and plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) are becoming more common. Environmental concerns and the increasing cost of fossil fuels are among the factors behind this shift (2–5). In these vehicles, regenerative braking recovers some of the kinetic energy that would normally be lost during deceleration. This energy is converted into electricity and returned to the battery. Its recovery reduces energy losses and can increase the distance traveled between charges (6, 7).

Regeneration, however, does not eliminate the need for a friction brake. Both electric and conventional vehicles use friction

braking systems, and a widely used arrangement pairs a gray cast iron disc with a composite pad. The pad may be manufactured from semimetallic or ceramic materials (8). Because this system directly affects braking performance, it must operate reliably under the various operating conditions encountered by vehicles. However, studies have shown that prolonged parking periods or exposure to aggressive environmental conditions can promote adhesion between the brake pad and disc surfaces, making brake release difficult and potentially reducing braking efficiency due to disc corrosion (8–10). Gray iron is the metal commonly used in brake discs, so it has been extensively studied to fulfill the purpose of braking, focusing on thermal and mechanical properties such as thermal conductivity, fatigue resistance and hardness (11–13). However, research into the corrosion resistance of this material has generated considerable interest among researchers in the metallurgical, environmental, and health sectors.

The corrosion of gray iron components not only leads to the deterioration of their mechanical and functional properties, potentially compromising braking performance, but also poses significant environmental and health concerns. During brake operation, corrosion products generated from iron-containing materials can be released into the environment, contributing to increased concentrations of airborne particulate matter (14, 15). Many of these particles have diameters below 100 nm. Their small size allows them to penetrate deep into the respiratory system and may facilitate their transport to other organs, including the brain. In addition to their size, their high bioreactivity represents a potential health concern because exposure to these particles has been associated with the development and progression of neurodegenerative conditions, including Parkinson's disease and Alzheimer's disease.

Several routes have been studied to reduce the corrosion of gray iron. These include the addition of alloying elements, the use of protective coatings, heat treatments that produce more stable microstructures, and the incorporation of reinforcing phases. Depending on the approach, corrosion resistance can be improved through changes in the surface condition or in the microstructure of the material. Bruna et al. (17) studied ferritic gray iron exposed to solutions representative of marine environments. Their results showed that additions of copper and nickel reduced the corrosion rate.

A. H. Seikh et al. (18) investigated copper additions to austempered gray iron. They identified ferrite, bainite, and austenite with a high carbon content in the resulting microstructure. Under the conditions examined, this material resisted corrosion better than conventional gray iron. A different method was reported in (19), where

bone particles were added to gray iron as reinforcement. The authors related the improvement in corrosion resistance to the formation of a passive layer and to changes produced by microstructural refinement.

Lamellar graphite in gray iron is distributed through a matrix containing pearlite and ferrite. The relative amount of pearlite is particularly important because it contributes to the mechanical strength of the material. Pearlite formation is affected by the composition of the melt and by its cooling history. For this reason, both the metallic charge and the materials added during preconditioning, especially carburizers, can alter the final microstructure and properties of the casting (20, 21).

The present study compared different preconditioning materials and examined the changes associated with each one.

The study examined the changes in pearlite refinement, MnS formation, graphite nucleation, and corrosion behavior produced under each condition. A practical objective was to obtain the required properties during casting, without adding a later heat treatment. If this operation can be avoided, the production sequence becomes shorter and less costly. Better resistance to degradation may also reduce the release of fine particles while the material is in service. This possible environmental benefit was not measured directly in the present study.

2. Materials and equipment

Gray iron samples were produced using a medium-frequency induction furnace with a capacity of 5 kg. The chemical composition of the irons was determined by optical emission spectroscopy (OES) using a SPECTRO M11 spectrometer. Microstructural characterization was performed using a NIKON optical

microscope (OM) and a JEOL JSM-6610LV scanning electron microscope (SEM).

Metallurgical graphite (MG), electrode graphite (EG), and metallurgical coke (MC),

all with particle sizes smaller than 800 μm , were used as preconditioning materials. The purity of these materials is presented in Table 1.

Table 1. Purity of preconditioning materials (wt%).

Pre-cond.	C	Humidity	Vol. Mat.	Ash	S
MG	98.50	0.22	1.32	1.32	0.02
EG	93.10	0.53	1.43	5.47	0.13
MC	83.51	0.57	2.65	13.84	0.50

The corrosion behavior of the different gray irons was evaluated by potentiodynamic polarization testing using an electrochemical cell equipped with a platinum mesh counter electrode and a saturated calomel electrode (SCE) as the reference electrode. Electrochemical measurements were performed using a Solartron SI 1287 Electrochemical Interface potentiostat/galvanostat system.

3. Experimental method

Three gray cast irons were produced using different preconditioning materials: metallurgical graphite, electrode graphite, and metallurgical coke. One independent heat was produced for each experimental condition under identical melting conditions using a 5 kg metallic charge. All melting operations were carried out at 1450 °C. After complete melting and homogenization, the liquid metal was poured into standard Shell sand thermal analysis cups to produce the test specimens, and three specimens were obtained from each heat for subsequent microstructural and electrochemical characterization.

The amount of preconditioning material added to each heat was adjusted according to the carbon balance required to obtain the target chemical composition. Specifically, additions of 0.81 wt.%, 0.86 wt.%, and 0.96 wt.% (relative to the 5 kg metallic charge) were employed for the melts preconditioned

with metallurgical graphite, electrode graphite, and metallurgical coke, respectively. These additions were selected according to the carbon content and purity of each preconditioning material while maintaining identical melting parameters for all experimental conditions.

To promote gradual carbon dissolution and improve chemical homogenization, the total amount of preconditioning material was divided into three equal additions. Approximately one-third (33%) was introduced together with the initial metallic charge at the beginning of melting, the second third was added after approximately 50% of the metallic charge had melted, and the remaining third was incorporated once complete melting of the metallic charge had been achieved. Immediately after each addition, the molten bath was manually stirred to facilitate the incorporation and dissolution of the preconditioning material. This manual stirring was performed only at the time of each addition and was not maintained throughout the melting process. During the remainder of melting, bath homogenization was provided by the electromagnetic stirring naturally generated during induction melting. Following the final addition, the melt was maintained under homogenization conditions for 5–7 min before pouring.

The specimens were sectioned and metallographically prepared by progressive grinding using silicon carbide (SiC) abrasive papers with grit sizes from 120 to 1000, followed by polishing with a short-fiber cloth and 1 μm diamond paste. The polished surfaces were subsequently etched with a 2% Nital solution to reveal the microstructure.

Microstructural characterization was performed by optical microscopy (OM) according to ASTM A247 and the AFS 5-J classification for graphite morphology. Representative optical and scanning electron microscopy (SEM) images were acquired from randomly selected fields distributed throughout each specimen to minimize the influence of local microstructural heterogeneity. The pearlite interlamellar spacing was determined using the Underwood method (22), according to Equation (1):

$$S_t = \frac{\pi d_c}{4n_c} \quad (\text{Eq. 1})$$

where S_t is the pearlite interlamellar spacing, d_c is the diameter of the test circle superimposed on the pearlitic colony, and n_c is the number of ferrite/cementite lamellae intercepted by the diameter of the test circle.

Quantitative microstructural characterization was performed using ImageJ software. The fraction of fine pearlite was determined by area fraction analysis based on color thresholding of the etched optical micrographs, whereas the number density of MnS inclusions (inclusions MnS/mm^2) was determined from SEM micrographs. For each experimental condition, ten measurements distributed among the three specimens were performed to determine the fine pearlite fraction, pearlite interlamellar spacing, and MnS inclusion density. The reported values correspond to the average of these measurements.

Corrosion resistance was evaluated by potentiodynamic polarization tests in accordance with ASTM G5 using a conventional three-electrode electrochemical cell containing a 3.5 wt.% NaCl solution at room temperature. Each electrochemical test used a platinum mesh as the counter electrode and a saturated calomel electrode (SCE) as the reference. Surface preparation consisted of grinding with 1000 grit SiC paper, followed by polishing and cleaning with distilled water and ethanol. The area exposed to the electrolyte was 1 cm^2 . After immersion, the open circuit potential (OCP) was followed for 5 min before the polarization scan was started. Measurements were made from 0.5 V below E_{corr} to 0.5 V above E_{corr} using a scan rate of 0.1667 mV/s. Five curves were obtained under each experimental condition, and the reported electrochemical parameters are their average values. Tafel extrapolation was applied to the linear sections of the anodic and cathodic branches to determine the corrosion current density (I_{corr}) and corrosion potential (E_{corr}). The slope for each branch was obtained from a separate linear fit of the corresponding section of the semilogarithmic curve.

The experimental procedure was designed as a comparative single-factor study, in which the type of preconditioning material was established as the primary processing variable, while all melting, specimen preparation, metallographic characterization, and electrochemical testing conditions were maintained constant. Although minor variations in the final chemical composition resulted from the intrinsic characteristics of each preconditioning material, the adopted experimental design enabled a systematic comparison of their influence on the microstructure and corrosion behavior of the gray cast irons.

4. Results and discussion

For clarity, the gray irons were identified according to the preconditioning material used. GI1 corresponds to metallurgical graphite, GI2 to electrode graphite, and GI3 to metallurgical coke. Their chemical compositions are listed in Table 2. Among the three alloys, GI1 had the highest carbon equivalent (C.E.), followed by GI2 and GI3. Gray iron castings intended for engineering applications commonly have carbon equivalent values between 3.0 and 4.5 wt.%. This range favors the mechanical and chemical characteristics expected from this type of cast iron (23). The calculated Mn/S ratios were 10 for GI1, 8 for GI2, and 5 for GI3. All three values are within the recommended interval of 5 to 15. Within this interval, conditions for MnS formation become more favorable as the ratio approaches the lower limit (24, 25).

GI3 had the lowest Mn/S ratio because metallurgical coke introduced more sulfur into the melt than metallurgical graphite or electrode graphite. Part of the sulfur contained in the coke was transferred to the molten metal during processing, resulting in a sulfur concentration of 0.08 wt.% in GI3 (20, 21). Sulfur is commonly classified as a residual element in cast iron. Its concentration, however, does not fully describe how it will affect the material because the amount of manganese available in the melt also has to be taken into account (26). GI3 had the highest sulfur content of the three alloys, but its Mn/S ratio did not fall outside the recommended interval for gray cast iron. The manganese present in this alloy was therefore sufficient for sulfur to combine preferentially as MnS, reducing the likelihood of forming harmful FeS phases (25).

Table 2. Chemical composition (wt%) of the different gray irons.

Gray Iron	C	Si	Mn	P	S	C.E	
GI1	3.19	1.96	0.38	0.03	0.04	3.90	10
GI2	2.86	1.90	0.40	0.05	0.05	3.50	8
GI3	2.75	1.85	0.37	0.03	0.08	3.40	5

4.1 Microstructure

4.1.1 Effect of preconditioners on microstructure

Figure 1 shows the microstructures of the GI1, GI2, and GI3 gray irons. All samples exhibited a predominantly pearlitic matrix containing Type E graphite. However, quantitative image analysis revealed differences in the fraction of fine pearlite among the evaluated systems.

A higher fraction of fine pearlite was observed in the GI3 system compared with GI1 and GI2. Quantitative phase analysis revealed fine pearlite fractions of $55.35 \pm 0.84\%$ for GI3, $51.00 \pm 0.87\%$ for GI1, and $49.18 \pm 1.08\%$ for GI2. Pearlite refinement

has been widely associated with processing variables such as cooling rate and alloy chemistry. Lima et al. (27) reported that increasing the cooling rate promotes pearlite refinement, whereas additions of alloying elements such as Cu, Mo, and Cr further enhance this effect. Conversely, annealing treatments reduce the fraction of fine pearlite by promoting microstructural coarsening (28).

To better understand the formation of the pearlitic matrix and graphite structure, the nucleation mechanisms of both phases were analyzed. It is well established that during the solidification of gray iron, once the temperature falls below the eutectic

temperature, the microstructure consists of austenite (γ -iron with dissolved carbon) and graphite (29). As cooling progresses, the carbon dissolved in the austenitic matrix diffuses toward regions with higher carbon affinity and enhanced atomic mobility, such as graphite flakes and grain boundaries (30, 31). Under slow to moderate cooling conditions, when the eutectoid temperature is reached, the carbon remaining in solid solution within the matrix and not incorporated into the graphite flakes precipitates as cementite (Fe_3C). This process leads to the formation of pearlite, a lamellar microconstituent composed of alternating ferrite (α -iron) and cementite layers (32).

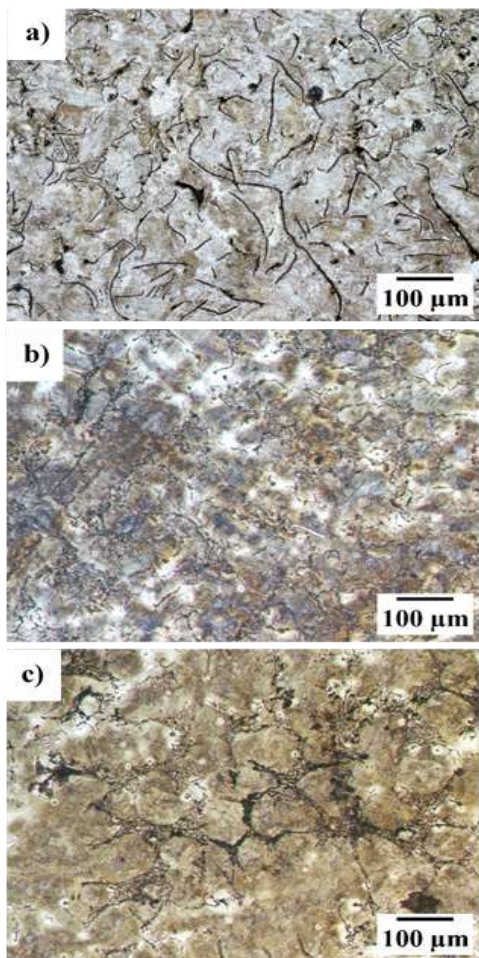


Figure 1. OM images of microstructures of gray irons a) GI1, b) GI2, and c) GI3.

However, the formation of graphite flakes directly influences the fraction of pearlite developed in gray iron, as both microstructural constituents compete for the available carbon. For graphite to precipitate, heterogeneous nuclei must first form, primarily consisting of MnS inclusions, which act as the main nucleation sites for graphite because of the low crystallographic mismatch between the two phases (33).

Figure 2 presents SEM micrographs of the GI1, GI2, and GI3 systems, in which MnS inclusions were identified. Quantitative analysis revealed a higher density of these nucleation sites in the GI3 system, with $226 \pm 4.6 \text{ MnS/mm}^2$, compared with 101 ± 4.2 and $122 \pm 2.7 \text{ MnS/mm}^2$ for GI1 and GI2, respectively. The increased MnS density is primarily associated with the concentrations of Mn, S, and microinclusions, which are commonly oxide-based.

The formation of complex MnS inclusions, which subsequently serve as nucleation sites for graphite, requires the prior presence of microinclusions typically composed of deoxidizing elements such as Si, Al, Ca, Ti, Zr, Ba, and Sr. These particles act as substrates for the nucleation and growth of MnS inclusions. Once MnS inclusions have formed, graphite preferentially nucleates and grows along crystallographic planes that minimize lattice distortion, leading to the development of eutectic cells (29).

For this reason, inoculation is a critical process in iron foundries, as inoculating agents are added to increase the number of graphite nucleation sites, reduce undercooling, and promote the formation of a favorable microstructure (29). In addition to inoculation, conditioning materials may also influence the microstructure through their impurity content and their contribution to the final chemical composition of the melt. Dwulat and Janerka (34). suggested that the

quality of conditioning materials, including their impurity content, may affect the formation of microinclusions that subsequently act as graphite nucleation sites.

Therefore, SEM characterization of the impurities (ash) in metallurgical graphite, electrode graphite and metallurgical coke was carried out in order to determine their main constituents. The results obtained are shown in Figures 3, 4 and 5.

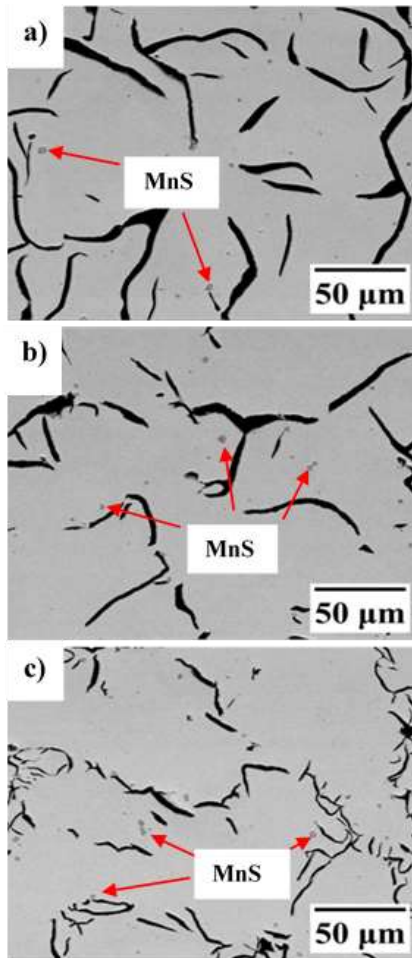


Figure 2. SEM images of the different irons: a) GI1, b) GI2, c) GI3.

The analysis revealed that the impurities were primarily composed of O, Si, Al, Ca, and Fe, elements commonly associated with heterogeneous nucleation phenomena in gray cast irons. These oxide-based particles can act as preferential substrates for MnS

precipitation during solidification. Therefore, the higher MnS inclusion density observed in GI3 is likely associated with the combined influence of the higher impurity content and sulfur contribution of the metallurgical coke, together with the resulting lower Mn/S ratio. Under these conditions, a greater number of effective MnS nucleation sites could be generated, favoring graphite nucleation and contributing to the refinement of the pearlitic microstructure.

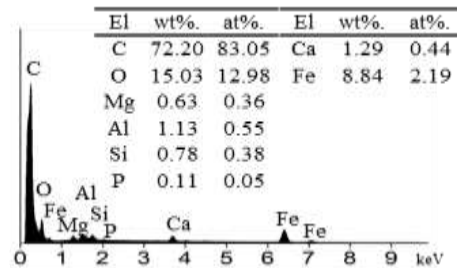
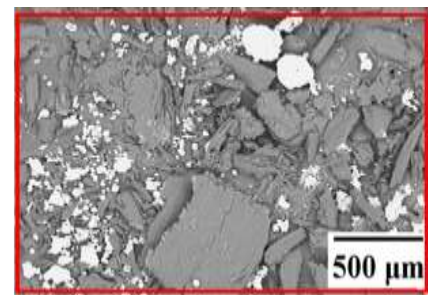


Figure 3. SEM and EDS images of metallurgical graphite ash.

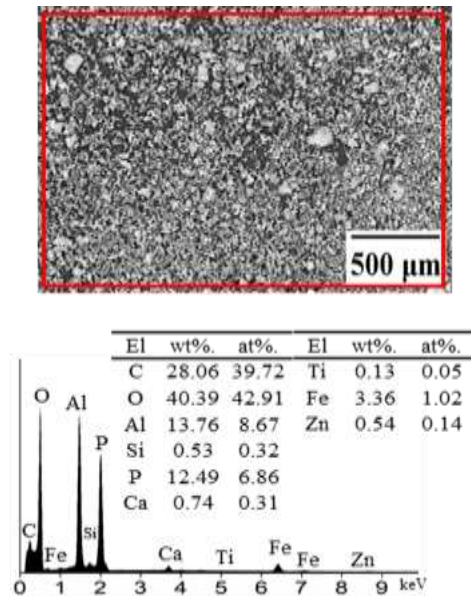


Figure 4. SEM and EDS images of graphite electrode ash.

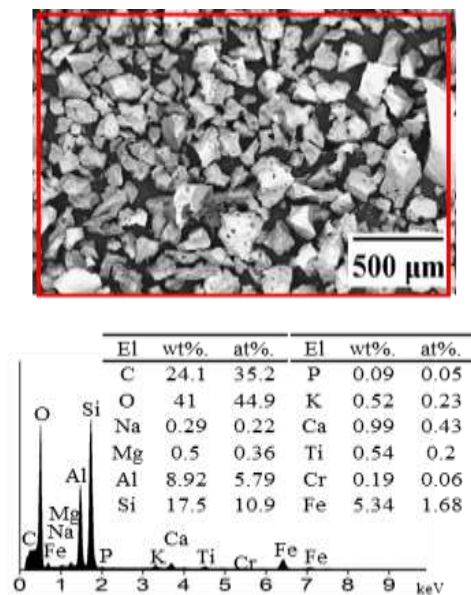


Figure 5. SEM and EDS images of metallurgical coke ash.

Smaller interlamellar spacing resulting from a finer pearlitic microstructure improves

corrosion resistance by promoting a more uniform distribution of microgalvanic pairs (35).

Figure 6 shows images of fine pearlite in the different gray irons. The interlamellar spacing of fine pearlite ranged from 120 to 260 nm. The average interlamellar spacings were 173 ± 4.2 nm for GI1, 193 ± 3.8 nm for GI2, and 170 ± 3.5 nm for GI3, as summarized in Table 3. These values are comparable to those reported by Siswanto et al. (36), who observed a reduction in pearlite interlamellar spacing from 203 to 169 nm by increasing the Cu content from 0.3 to 0.4 wt.%, indicating that variations in alloy chemistry can significantly influence pearlite refinement. Likewise, in the present study, the smaller interlamellar spacing observed in GI3 is interpreted as the result of the combined influence of the selected preconditioning material and the associated differences in chemical composition. In particular, the higher sulfur content and the lower Mn/S ratio favored the formation of a greater density of MnS inclusions, which promoted graphite nucleation during solidification, while the slight variation in carbon equivalent may also have contributed to the eutectic solidification behavior and the subsequent pearlitic transformation. Therefore, the refined pearlitic microstructure observed in GI3 should be interpreted as the consequence of the combined metallurgical conditions generated by the selected preconditioning material rather than the effect of a single isolated variable.

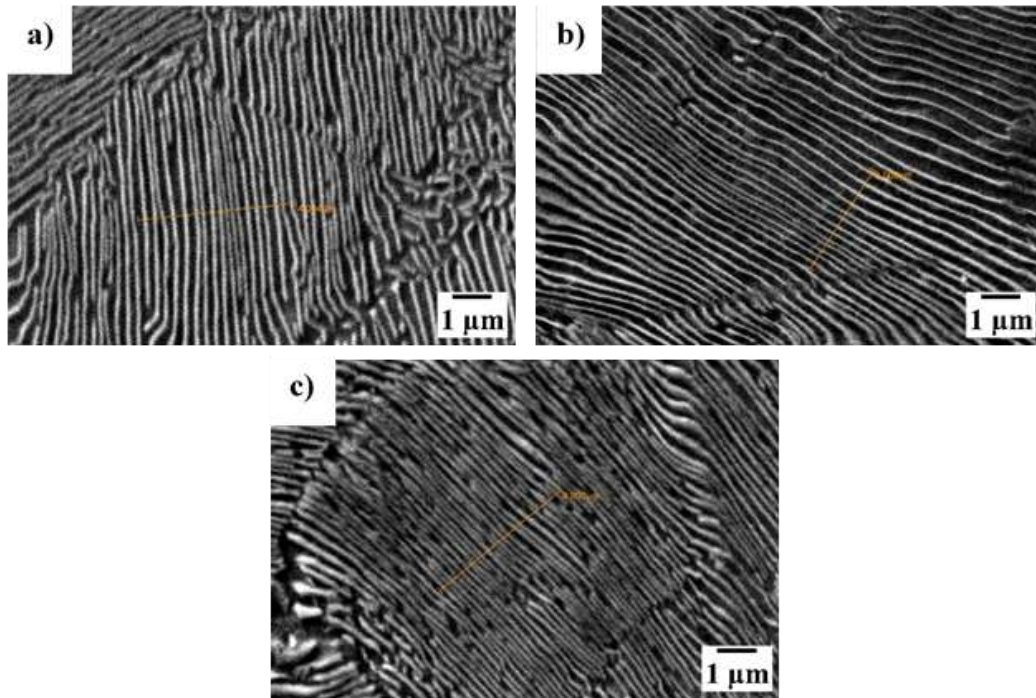


Figure 6. SEM images of fine pearlitic microstructure a) GI1, b) GI2 and c) GI3.

Table 3. Interlamellar spacing of fine pearlite in the different gray iron systems.

Gray iron	Average interlamellar spacing (nm)
GI1	173 ± 4.2
GI2	193 ± 3.8
GI3	170 ± 3.5

4.1.2 Corrosion resistance analysis

The polarization curves obtained from potentiodynamic tests conducted in a 3.5 wt.% NaCl solution are presented in Figure 7. The anodic and cathodic branches were analyzed using the Tafel extrapolation method to determine the corrosion potential (E_{corr}) and corrosion current density (I_{corr}), the values of which are summarized in Table 4. The gray irons investigated exhibited E_{corr} values ranging from -0.689 to -0.761 V, which are typical for ferrous materials of this type (17).

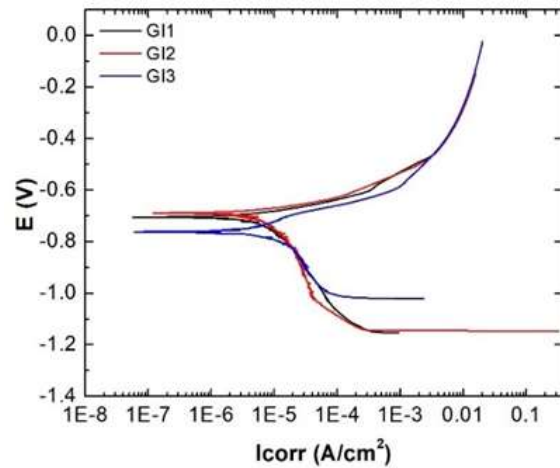


Figure 7. Polarization curves for GI1, GI2, and GI3.

Based on the I_{corr} values, the corrosion rate can be calculated and expressed in millimeters per year (mm/year) (37). Among the evaluated alloys, GI3 exhibited the lowest corrosion current density and, consequently, the lowest corrosion rate. The corrosion resistance followed the order $GI3 > GI1 > GI2$, corresponding to the inverse trend observed for corrosion rate ($GI3 < GI1 < GI2$), as illustrated in Figure 8.

The improved corrosion behavior observed for GI3 is consistent with the refined microstructure developed under the evaluated processing conditions, which was characterized by the highest density of MnS inclusions, the greatest fraction of fine pearlite, and the smallest average pearlite interlamellar spacing. These microstructural characteristics are expected to reduce local electrochemical heterogeneities and promote a more uniform corrosion process, thereby contributing to the lower corrosion rate observed for this alloy (17, 37). It should be noted, however, that this behavior cannot be attributed exclusively to the selected preconditioning material. As discussed in the previous sections, the different preconditioning materials also produced slight variations in sulfur content, Mn/S ratio, and carbon equivalent, which are expected to influence the solidification behavior and the resulting microstructure. Therefore, the superior electrochemical performance of GI3 is more appropriately interpreted as the combined effect of these metallurgical variables rather than the consequence of a single processing factor.

For comparison, A. H. Seikh et al. (18) reported an I_{corr} value of $70 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ for conventional gray cast iron, which decreased

to approximately $7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ after austempering heat treatment, demonstrating a significant improvement in corrosion resistance. Similarly, Bruna et al. (17) reported enhanced corrosion resistance through Cu and Ni alloying, obtaining the lowest corrosion rate of approximately 0.097 mm/year with 1 wt.% Cu. In the present study, GI3 exhibited a corrosion rate of 0.016 mm/year . Although direct comparison among different investigations should be made with caution because of differences in alloy composition, processing conditions, and electrochemical testing procedures, the corrosion rate obtained for GI3 is lower than those reported in the cited studies. These results suggest that the metallurgical conditions developed during processing were favorable for improving corrosion resistance without requiring additional alloying additions or post-solidification heat treatments.

Table 4. Quantification of potentiodynamic test results.

Gray iron	E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate (mm/year)
GI1	-0.704	5.130 ± 0.080	0.044 ± 0.004
GI2	-0.689	5.380 ± 0.080	0.046 ± 0.004
GI3	-0.761	1.820 ± 0.050	0.016 ± 0.002

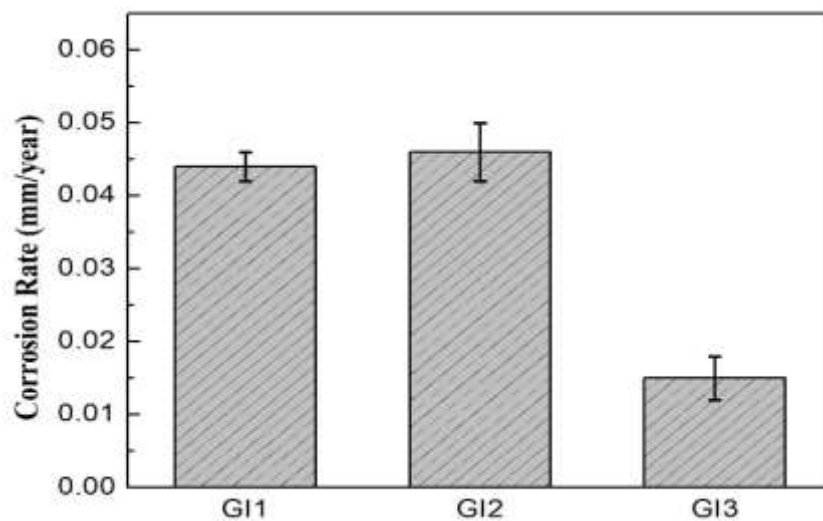


Figure 8. Corrosion rates for GI1, GI2, and GI3.

4.1.3 Microstructural analysis after corrosion

Figure 9 presents SEM images of the different gray irons after corrosion testing.

GI1 exhibited the most severe surface corrosion, followed by GI2, whereas GI3 showed the least damage. These observations are consistent with the results obtained from the potentiodynamic polarization tests.

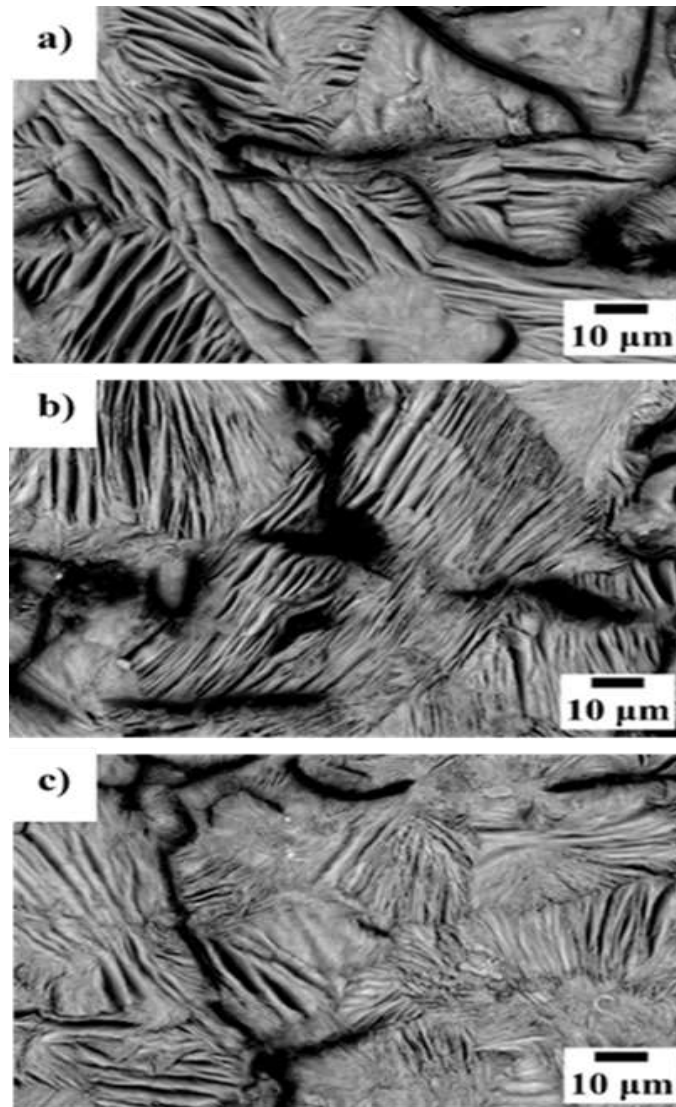


Figure 9. SEM images of the gray irons after corrosion: a) GI1, b) GI2, and c) GI3.

4.1.4 Statistical analysis of microstructural and corrosion results

The statistical analysis results are summarized in Table 5. ANOVA revealed statistically significant differences among the GI1, GI2, and GI3 systems for all evaluated microstructural and electrochemical

parameters ($p < 0.05$). Among the variables analyzed, MnS inclusion density showed the greatest differences among the evaluated gray iron systems, followed by corrosion current density, indicating that the metallurgical conditions developed during processing significantly influenced both the microstructural evolution and the corrosion behavior.

Table 5. Statistical analysis of the microstructural and electrochemical parameters.

Parameter	Calculated F-value	p-value	Statistical significance
Fine pearlite (%)	57.69	6.99×10^{-7}	Yes ($p < 0.05$)
Inclusions (MnS/mm ²)	1445.27	4.99×10^{-15}	Yes ($p < 0.05$)
Interlamellar spacing of fine pearlite (nm)	56.29	7.99×10^{-7}	Yes ($p < 0.05$)
I _{corr} (μA/cm ²)	3961.91	1.20×10^{-17}	Yes ($p < 0.05$)
Corrosion rate (mm/year)	119.35	1.20×10^{-8}	Yes ($p < 0.05$)

As summarized in Table 6, the GI3 system exhibited the highest MnS inclusion density (226 ± 4.6 MnS/mm²), the largest fraction of fine pearlite ($55.35 \pm 0.84\%$), and the smallest interlamellar spacing of fine pearlite (170 ± 3.5 nm). These microstructural characteristics were associated with the lowest corrosion current density (1.82 ± 0.05 μA/cm²) and corrosion rate (0.016 ± 0.002 mm/year), demonstrating the influence of the metallurgical conditions developed during processing on the resulting microstructure and electrochemical behavior.

Compared with GI2, the GI3 system achieved an approximately 65% reduction in corrosion rate. This improvement is consistent with the higher density of MnS inclusions, which promoted graphite nucleation and pearlite refinement during solidification. Together with the slight differences in sulfur content, Mn/S ratio, and carbon equivalent discussed previously, these factors contributed to a more homogeneous microstructure, reducing local electrochemical heterogeneities and mitigating the formation of galvanic microcells.

Table 6. Microstructural and electrochemical parameters of the gray cast iron systems.

Gray iron	Fine Pearlite (%)	Inclusions (MnS/mm ²)	Interlamellar spacing of fine pearlite (nm)	I _{corr} (μA/cm ²)	Corrosion Rate (mm/year)
GI1	51.00 ± 0.87	101 ± 4.2	173 ± 4.2	5.13 ± 0.08	0.044 ± 0.004
GI2	49.18 ± 1.08	122 ± 2.7	194 ± 3.8	5.38 ± 0.08	0.046 ± 0.004
GI3	55.35 ± 0.84	226 ± 4.6	170 ± 3.5	1.82 ± 0.05	0.016 ± 0.002

The experimental comparison was based on the material used for preconditioning. All three heats followed the same melting procedure, while specimen preparation, metallographic examination, and electrochemical testing were performed in the same manner. The preconditioning materials did not have identical compositions or purity levels. Consequently, their addition introduced small differences in the final alloy

chemistry. These differences formed part of the overall effect associated with each material, even though the remaining processing and testing conditions were kept constant.

One heat was produced for each preconditioning condition. Three specimens were prepared from every heat and used for the microstructural and electrochemical

evaluations. The quantitative microstructural data were obtained from ten measurements distributed among the three specimens. The electrochemical values represent the mean of five potentiodynamic polarization tests for each condition. Since no additional heats were produced, the measurements describe variation within each heat but do not account for possible differences between separate heats prepared with the same material. The ANOVA results in Table 5 identified significant differences among the three conditions and support the trends observed in this experiment. They do not, however, establish whether the same magnitude of difference would be reproduced in other heats. Future work should include replicate heats for every preconditioning material to assess this source of variation.

5. Conclusions

The three preconditioning materials did not produce exactly the same alloy chemistry. Small differences were measured in sulfur content, carbon equivalent, and the balance between manganese and sulfur. Since each of these variables can affect solidification, they were taken into account when comparing the microstructures.

The most refined microstructure was observed in the gray iron prepared with metallurgical coke. Its MnS inclusion density reached 226 ± 4.6 MnS/mm², which was the highest value among the three conditions. Fine pearlite accounted for $55.35 \pm 0.84\%$ of the evaluated microstructure, while the measured interlamellar spacing was 170 ± 3.5 nm. No other condition showed a larger fraction of fine pearlite or a smaller spacing between pearlite lamellae. These measurements show that the microstructure obtained with metallurgical coke was finer than those produced with metallurgical graphite and electrode graphite.

The electrochemical results followed a similar trend. The alloy produced with metallurgical coke had the lowest corrosion current density and a corrosion rate of 0.016 ± 0.002 mm/year. This rate was approximately 65% lower than that measured for the alloy produced with electrode graphite. The ANOVA results showed statistically significant differences among the evaluated conditions ($p < 0.05$).

The improvement observed in the alloy produced with metallurgical coke cannot be attributed to a single factor. Its corrosion response was accompanied by differences in sulfur content, Mn/S ratio, carbon equivalent, MnS inclusion density, and pearlite refinement. Since the contribution of each variable was not evaluated independently, the effect of any one of them could not be quantified. Nevertheless, their combined variation was associated with the microstructural and electrochemical differences measured among the three gray irons.

In this experiment, preconditioning affected more than the adjustment of carbon content. The selected material was also related to changes in solidification, microstructure, and corrosion behavior. The results suggest that an appropriate choice of preconditioning material may help improve the corrosion resistance of gray cast iron without additional alloying elements or heat treatments after solidification.

6. Acknowledgements

The authors would like to thank the Tecnológico Nacional de México (TecNM) / Instituto Tecnológico de Saltillo and the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) for their financial support in the form of a doctoral scholarship (CVU 998922), and the Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores

(SNII) for its support in the development of this project.

7. References

1. ACEA (2025) Economic and Market Report Global and EU auto industry: Full year 2024. *Acea*.
2. de Souza, A., de Oliveira-Júnior, J.F., Cardoso, K.R.A. and Gautam, S. (2025) Impact of vehicular emissions on ozone levels: A comprehensive study of nitric oxide and ozone interactions in urban areas. *Geosystems and Geoenvironment*, **4**, 100348. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2024.100348>
3. Al-Sabbagh, T.A. and Shreaz, S. (2025) Impact of Lead Pollution from Vehicular Traffic on Highway-Side Grazing Areas: Challenges and Mitigation Policies. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **22**, 1–30. <https://doi.org/10.3390/ijerph22020311> <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/40003536>
4. Selvi, M.S. and Önem, Ş. (2025) Impact of Variables in the UTAUT 2 Model on the Intention to Use a Fully Electric Car. *Sustainability (Switzerland)*, **17**, 1–24. <https://doi.org/10.3390/su17073214>
5. Alvarez-Diazcomas, A., Estévez-Bén, A.A., Rodríguez-Reséndiz, J., Carrillo-Serrano, R. V. and Álvarez-Alvarado, J.M. (2023) A High-Efficiency Capacitor-Based Battery Equalizer for Electric Vehicles. *Sensors*, **23**, 1–16. <https://doi.org/10.3390/s23115009> <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/37299739>
6. Szumska, E.M. (2025) Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges. *Energies (Basel)*, **18**. <https://doi.org/10.3390/en18102422>
7. Jamadar, N.M. and Jadhav, H.T. (2021) Rule-based assistive hybrid electric brake system with energy generation for electric vehicle. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, **43**, 1–19. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.2015485>
8. Gweon, J., Shin, S., Jang, H., Lee, W., Kim, D. and Lee, K. (2018) The Factors Governing Corrosion Stiction of Brake Friction Materials to a Gray Cast Iron Disc. *SAE Technical Papers*, **2018-Octob**, 5–12. <https://doi.org/10.4271/2018-01-1899>
9. Gweon, J., Park, J., Kyu, W., Yeon, D. and Jang, H. (2021) Root cause study of corrosion stiction by brake pads on the grey iron disc. *Eng. Fail. Anal.*, **128**, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105583>
10. Motta, M., Fedrizzi, L. and Andreatta, F. (2023) Corrosion Stiction in Automotive Braking Systems. *Materials*, **16**. <https://doi.org/10.3390/ma16103710>
11. Mao, F., He, Y., Guo, A., Wang, X., Zhong, Y., Huang, Z., Chen, C. and Wei, S. (2025) Effect of vanadium and temperature on the tribological properties of gray cast iron. *Journal of Materials Research and Technology*, **38**, 3578–3590. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.211>

12. Kumar, A., Pandey, R., Kumar, R., Kumar, N. and Kiran, T.R. (2021) Materials Today: Proceedings Thermal analysis on car brake rotor using cast iron material with different geometries. *Mater. Today Proc.*, 10.1016/j.matpr.2021.05.299. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.299>
13. Liu, Y., Lee, H., Hess, D. and Coryell, J. (2025) Thermomechanical Fatigue Behavior of Gray Cast Iron in Brake Rotors. In *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2025-01-8319>
14. Wang, Y., Shuai, S. and Ge, Y. (2025) Controlling brake particle emissions: New brake disc needs more attention. *Results in Engineering*, 27, 107120. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107120>
15. Catapano, F., Iorio, S. Di, Magno, A., Sequino, L. and Vaglieco, B.M. (2025) Brake particle emissions: Effect of temperature and modeling of temperature behavior. *Results in Engineering*, 26, 104872. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104872>
16. Gonet, T. and Maher, B.A. (2019) Airborne, Vehicle-Derived Fe-Bearing Nanoparticles in the Urban Environment: A Review. *Environ. Sci. Technol.*, 53, 9970–9991. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01505> <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31381310>
17. Bruna, H., Allende-Seco, R., Artigas, A., Monsalve, A. and Sánchez, C. (2024) Effect of Copper and Nickel Content on the Corrosion Mechanisms in Ferritic Matrix Gray Cast Irons under Simulated Marine Environments. *Metals (Basel)*, 14, 1489. <https://doi.org/10.3390/met14060696>
18. Seikh, A.H., Sarkar, A., Singh, J.K., Mohammed, S.M.A.K., Alharthi, N. and Ghosh, M. (2019) Corrosion characteristics of copper-added austempered gray cast iron (AGCI). *Materials*, 12, 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma12030503>
19. Godwin, I., Sunday, O., Fayomi, I. and Nwankwo, P. (2023) Investigation of the microstructure, corrosion resistance and hardness of bone particle reinforced cast iron for engine blocks application in automotive and marine industries. 2.
20. Dwulat, R., Janerka, K., Grzesiak, K. and Gałuszka, M. (2023) Influence of Charge Materials on the Metallurgical Quality of Gray Cast Iron. *Archives of Foundry Engineering*, 23, 66–71. <https://doi.org/10.24425/afe.2023.144297>
21. Futas, P., Pribulova, A., Petrik, J., Blasko, P., Junakova, A. and Sabik, V. (2023) Metallurgical Quality of Cast Iron Made from Steel Scrap and Possibilities of Its Improvement. *Metals (Basel)*, 13, 1–10. <https://doi.org/10.3390/met13010027>
22. Scherbring, S., Adams, B. and Mola, J. (2024) Impact of interlamellar spacing and non-pearlitic features on mechanical properties and cyclic damage initiation in near-eutectoid pearlitic steels. *Materials Science and Engineering: A*, 889. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145846>
23. Genculu, S. (2024) Cast Irons -Properties and Applications. *CAB worldwide*.

24. Srivastava, R., Singh, B. and Saxena, K.K. (2019) Influence of S and Mn on mechanical properties and microstructure of grey cast iron: An overview. *Mater. Today Proc.*, **26**, 2770–2775.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.577>
25. De Santiago-Méndez, L.F., Castro-Román, M. de J., Herrera-Trejo, M., Mancha-Molinar, H. and Bravo, B. (2025) Influence of S and Mn Initial Concentrations on the Graphite Branching in Gray Cast Iron as Quantified by 2D Image Analysis. *Materials*, **18**.
<https://doi.org/10.3390/ma18214837>
26. Stefan, E., Chisamera, M., Riposan, I. and Stan, S. (2021) Graphite nucleation sites in commercial gray cast irons. *Materials Today: Proceedings*, **45**, 4091–4095.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.009>
27. Lima, M.L., Albertin, E., Correa, E.R., Rabello, R.B. and Uehara, S. (2020) Pearlite Refining Strategies for Hypoeutectic Gray Cast Iron. *International Journal of Metalcasting*, **14**, 766–773.
<https://doi.org/10.1007/s40962-020-00413-6>
28. Roučka, J., Prochazka, J., Kana, V., Krutis, V. and Nedelova, K. (2019) The influence of lamellar graphite cast iron annealing on hardness and structure. *Archives of Foundry Engineering*, **19**, 105–112.
<https://doi.org/10.24425/afe.2019.129639>
29. Stefanescu, D.M., Alonso, G., Larrañaga, P. and Suarez, R. (2016) On the stable eutectic solidification of iron-carbon-silicon alloys. *Acta Mater.*, **103**, 103–114.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.09.043>
30. Alloys, I. (2020) Recent Developments in Understanding Nucleation and Crystallization of Spheroidal Graphite in.
31. Eiken, J. (2020) Calphad-based phase-field study of the interplay between spheroidal graphite growth and chemical segregation in ductile cast iron Calphad-based phase-field study of the interplay between spheroidal graphite growth and chemical segregation in ductile cast. *Materials Science and Engineering*, **861**, 1–8.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/861/1/012055>
32. Yin, R. yu (2021) Review on the study of metallurgical process engineering. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **28**.
<https://doi.org/10.1007/s12613-020-2220-z>
33. Ștefănescu, D.M., Alonso, G., Larrañaga, P., De La Fuente, E. and Suarez, R. (2018) Reassessment of crystal growth theory of graphite in cast iron. *Materials Science Forum*, **925 MSF**, 36–44.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.925.36>
34. Dwulat, R. and Janerka, K. (2023) Evaluation of the Metallurgical Quality of Nodular Cast Iron in the Production Conditions of a Foundry. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, **7**.
<https://doi.org/10.3390/jmmp7010018>

35. Wang, Z., Zhang, X., Yu, H., Liu, J., Cheng, L., Hu, S.E. and Wu, K. (2022) Effects of pearlite on corrosion initiation and propagation in weathering steels in marine environments. *J. Mater. Sci.*, **57**, 6039–6055. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07001-5>
36. Siswanto, A., Widodo, R. and Ardiansyah, E. (2020) Effect of interlamellar spacing on tensile strength gray cast iron with copper variations. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1450**. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1450/1/012127>
37. Zhang, Y., Feng, X., Huang, Q., Li, Y., Hao, X. and Wang, C. (2023) The corrosion characteristics and mechanism of directionally solidified Mg-3Zn-xCa alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, **11**, 3673–3687. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.02.010>



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Impacto de un videojuego educativo gamificado en el rendimiento académico en Programación Orientada a Objetos

Impact of a gamified educational video game on academic performance in Object-Oriented Programming

Flores-Redondo, S.A.^a, Flores-Redondo, D.A.^b, Cab-Chan, J.R.^a, Carpizo-Acuña, C.R.^a, Hernández-Meza, M.E.^{a*}

^a Facultad de Sistemas Computacionales; Tecnológico Nacional de México Campus Campeche; C.P. 24500 San Francisco de Campeche, Campeche, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3793-5825>, <https://orcid.org/0000-0003-1043-629X>, <https://orcid.org/0009-0003-7903-7905>, <https://orcid.org/0009-0003-8635-3236>.*

^b Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 126; Calkiní, Campeche, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0721-5827>.

salvador.fr@campeche.tecnm.mx; davidfredondo@hotmail.com; jose.cc@campeche.tecnm.mx; cecilio.ca@campeche.tecnm.mx; manuel.hm@campeche.tecnm.mx*

Innovación tecnológica: Diseño e implementación de un videojuego educativo tipo RPG (Tales from the South II) como estrategia de gamificación para la enseñanza de Programación Orientada a Objetos en Educación Superior Tecnológica.

Área de aplicación industrial: Educación Superior Tecnológica; Tecnologías de la Información y Comunicación aplicadas a la enseñanza; Desarrollo de Software Educativo; Ingeniería en Sistemas Computacionales.

Recibido: 08 julio 2026

Aceptado: 08 agosto 2026

Abstract

Video games are rarely used in academic contexts and are commonly associated with leisure. This study analyzes the impact of a video game as a gamification tool on the academic performance of second-semester students enrolled in the Object-Oriented Programming (OOP) course at the Tecnológico Nacional de México, Campeche campus. A quantitative methodology with a quasi-experimental design was applied, comprising a control group (n=22) and an experimental group (n=31), totaling 53 students—20 women and 33 men, aged 18 to 23. The educational video game Tales from the South II, developed in RPG Maker MV, served as the gamification tool. Pre- and post-tests with dichotomous items were administered to both groups; instrument reliability was validated using the Kuder-Richardson coefficient (KR-20 = 0.799). Due to heterogeneous

variances confirmed by Levene's test ($F=7.719$, $p=0.008$), Welch's t-test was applied ($\alpha=0.05$). Results showed a statistically significant difference favoring the experimental group ($t=3.535$, $df=43.92$, $p=0.001$), with a large effect size (Cohen's $d=0.99$). These results suggest favorable evidence that the use of a video game as a gamification strategy positively impacts OOP academic performance and contributes to the design of innovative pedagogical strategies for engineering programs in higher education.

Key words: academic performance, educational video game, gamification, higher education, object-oriented programming.

Resumen

Los videojuegos son una herramienta escasamente utilizada en el ámbito académico, comúnmente asociada al ocio y entretenimiento. Este estudio analiza el impacto del videojuego como herramienta de gamificación en el rendimiento académico de estudiantes del segundo semestre de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Tecnológico Nacional de México campus Campeche, en la materia de Programación Orientada a Objetos (POO). Se empleó una metodología cuantitativa con diseño cuasiexperimental, con un grupo control ($n=22$) y un grupo experimental ($n=31$), que suman 53 estudiantes —20 mujeres y 33 hombres de 18 a 23 años—. El videojuego *Tales from the South II*, desarrollado en RPG Maker MV, fue la herramienta de gamificación. Se aplicaron pretest y postest con reactivos dicotómicos; la confiabilidad del instrumento se validó con KR-20 (0.799). Ante varianzas heterogéneas confirmadas por la prueba de Levene ($F=7.719$, $p=0.008$), se aplicó la prueba t de Welch ($\alpha=0.05$). Los resultados muestran una diferencia estadísticamente significativa a favor del grupo experimental ($t=3.535$, $gl=43.92$, $p=0.001$), con un tamaño del efecto grande (d de Cohen=0.99). Los resultados aportan evidencia favorable de que el videojuego como estrategia de gamificación impacta positivamente en el rendimiento académico en POO y contribuyen al diseño de estrategias pedagógicas innovadoras para programas de ingeniería en educación superior.

Palabras clave: Educación Superior, Gamificación, Programación Orientada a Objetos, Rendimiento Académico, Videojuego educativo.

1. Introducción

Las tecnologías aplicadas en la didáctica en la educación superior han impulsado a fortalecer nuevos caminos pedagógicos que combinan la teoría y la práctica, la informática y el aprendizaje en la práctica. El Tecnológico Nacional de México campus Campeche, tiene la oportunidad de proponer los videojuegos como herramienta de gamificación relacionada con la experiencia de aprender jugando con la construcción del

conocimiento, especialmente con asignaturas de resolución de problemas matemáticos y lógicos como la Programación Orientada a Objetos (POO).

Las Instituciones de Educación Superior enfrentan grandes retos ante una necesidad social demandante [1]. El aprendizaje en asignaturas de Fundamentos de Programación y particularmente en POO representan dificultades para los estudiantes y

docentes, en las carreras de ingeniería [2]. Los altos índices de reprobación y deserción escolar en materias de programación en los primeros semestres ha sido una constante que afecta la retención, permanencia y eficiencia terminal [3]. Esta problemática se confirma en los propios datos del presente estudio: en el diagnóstico previo a la intervención (pretest), el 90.6% de los estudiantes (48 de 53) no alcanzó la calificación mínima aprobatoria, evidenciando un dominio prácticamente nulo de los contenidos de Programación Orientada a Objetos antes de recibir instrucción formal sobre el tema.

La gamificación se define como el uso de las características de videojuegos —las dinámicas, mecánicas y componentes propios de los juegos— en contextos no lúdicos [4], y ha aumentado su presencia como estrategia pedagógica. Parra-González y Segura-Robles [11] señalan un crecimiento exponencial de la producción científica sobre gamificación educativa a partir de 2011, con un 72.1% de la producción total concentrada entre 2014 y 2016, lo que evidencia el interés sostenido de la comunidad académica por esta metodología.

Estudios señalan que los estudiantes presentan obstáculos en la comprensión de conceptos de abstracción, propios de la POO como son: herencia, polimorfismo, encapsulamiento, modelado de objetos, entre otros. Almarales-Sarasola y García-Fernández [5] documentan estos conceptos como elementos difíciles de asimilar para estudiantes de ingeniería, con índices de aprobación del 74%, situación que se agrava por la falta del desarrollo del pensamiento lógico abstracto. Ante esta adversidad, se requiere una estrategia didáctica específica que favorezca la motivación intrínseca y el aprendizaje significativo. Sin embargo, existe un vacío en la literatura sobre el uso específico de videojuegos educativos como herramienta de gamificación para la

enseñanza de POO en educación superior tecnológica de contexto latinoamericano [6].

La teoría de la autodeterminación [7] establece que la motivación intrínseca se fortalece cuando se satisfacen las necesidades psicológicas de competencia, autonomía y relación. La teoría del flujo [8] describe un estado de completa inmersión en una actividad que potencia el aprendizaje. Ambas teorías sustentan el diseño del videojuego educativo *Tales from the South II* como herramienta de gamificación.

El objetivo de este trabajo es analizar el impacto del uso del videojuego *Tales from the South II* como herramienta de gamificación en el rendimiento académico de estudiantes del segundo semestre de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Tecnológico Nacional de México campus Campeche, en la materia de Programación Orientada a Objetos. El artículo se organiza de la siguiente manera: en primer lugar, se presenta el marco teórico; a continuación, se describen los materiales, equipos y métodos experimentales; posteriormente se exponen los resultados y la discusión; y finalmente se presentan las conclusiones, limitaciones y líneas futuras.

2. Marco teórico

2.1 Gamificación en educación superior

La gamificación se define como la aplicación de elementos y mecánicas propios de los videojuegos en contextos no lúdicos [4]. Según Corchuelo-Rodríguez [9], la gamificación en el contexto universitario, la describe como una herramienta de transformación educativa que permite motivar e impulsar a los estudiantes y fortalecer el desarrollo de contenidos en el aula, superando el modelo tradicional.

Una estrategia de gamificación exitosa debe de ser implementada bajo seis elementos,

según Werbach y Hunter [10]: definir claramente los objetivos educativos, delimitar los comportamientos deseados, identificar a los jugadores, establecer los ciclos de actividades con sus mecánicas, incorporar diversión y definir los recursos necesarios. Este marco ha sido aplicado con éxito en experiencias universitarias en América Latina y Europa [9].

Pegalajar Palomino [6], en su revisión sistemática sobre la percepción del estudiante universitario hacia estrategias de gamificación —que incluyó 20 estudios publicados entre 2010 y 2019 en WoS y Scopus—, identificó que estas prácticas generan implicaciones positivas en tres dimensiones: cognitiva (mejora del rendimiento académico y retención del conocimiento), procedimental (desarrollo de competencias y trabajo colaborativo) y actitudinal (aumento de motivación, autoeficacia y compromiso). La autora concluye que existe una predisposición favorable generalizada del estudiante universitario hacia la gamificación.

Parra-González y Segura-Robles [11] constatan, a través de un análisis cuantitativo de 345 documentos indexados en Web of Science, que la gamificación educativa se encuentra en fase de crecimiento exponencial. Las revistas del núcleo Bradford para esta temática incluyen *Computers & Education* y el *International Journal of Game-Based Learning*, lo que indica que la intersección entre tecnología y educación es el espacio privilegiado de publicación.

2.2 Videojuegos en educación

Los videojuegos favorecen el desarrollo de habilidades cognitivas como la coordinación, la deducción y la resolución de problemas, así como aspectos socioafectivos como la empatía, la colaboración y la autonomía [12]. Investigaciones en la Universidad de

Glasgow demostraron que los videojuegos modernos fomentan el pensamiento crítico y la resolución de problemas en estudiantes universitarios [13].

La gamificación, a diferencia de los juegos educativos tradicionales, parte de un contenido didáctico al que se añaden elementos y espíritu de juego [14]. Con una actividad gamificada, los estudiantes aprenden como si estuvieran jugando, sin el esfuerzo aparente que supone el aprendizaje formal [15]. Además, los juegos permiten experimentar y aprender de los errores sin miedo, lo que favorece la autonomía y la confianza en el propio aprendizaje [16].

Subhash y Cudney [17] y Montenegro-Rueda et al. [18] reportan mejoras en motivación intrínseca, desempeño académico y compromiso estudiantil en plataformas gamificadas en educación superior. Marín et al. [19] documentaron específicamente beneficios de la gamificación en cursos de programación, reportando mayor compromiso y mejores resultados académicos en el grupo gamificado.

2.3 Programación Orientada a Objetos en Educación Superior

La Programación Orientada a Objetos es una asignatura básica en la Ingeniería en Sistemas Computacionales. Los contenidos abstractos como herencia, encapsulamiento, polimorfismo, modelado UML, entre otros temas, generan obstáculos cognitivos y desconexión en los temas escolares que se traducen en altas tasas de reprobación en los primeros semestres [2].

Corchuelo-Rodríguez [9] afirma que el 96.2% de los estudiantes universitarios que participaron en estrategias de gamificación consideraron que son útiles para el desarrollo de contenidos escolares, y el 88% las calificó como motivantes. Estos resultados refuerzan

la idea de aplicar estrategias de gamificación en asignaturas complejas como la POO, donde la motivación intrínseca es un factor determinante para la permanencia académica.

2.4 Modalidades de gamificación: del videojuego al juego presencial

La literatura señala diversas modalidades de gamificación aplicada en educación superior, no limitadas a entornos digitales. García Lázaro [20] implementa el modelo de Escape Room educativo, donde los estudiantes deben resolver retos secuenciales dentro de un tiempo determinado, para escapar de una sala, esta actividad fomenta el trabajo colaborativo, la creatividad y el razonamiento deductivo. Escape Room es de naturaleza presencial y grupal, contrasta con el enfoque individual y digital adoptado en este estudio, pero comparte el mismo sustento teórico: la transformación de contenidos curriculares en retos con estructura lúdica.

De igual manera, Corchuelo-Rodríguez [9] implementó una estrategia de gamificación basada en ClassDojo, donde los estudiantes obtenían puntos por asistencias, participación entrega de trabajos y calidad académica, posteriormente eran canjeados por incentivos académicos. A diferencia del videojuego narrativo, tipo Rol Play Game (RPG), empleado en este estudio, dicha estrategia se apoya en un sistema de puntos y recompensas extrínsecas aplicado de forma transversal a toda la sesión de clase, sin una narrativa inmersiva. Ambos enfoques, - el sistema de puntos transversal y el videojuego narrativo- han demostrado eficacia, lo que sugiere que la gamificación admita múltiples implementaciones válidas, según el contexto y los recursos disponibles.

Para el diseño de cualquier estrategia de gamificación efectiva, Werbach y Hunter [10] advierten sobre la importancia de evitar la "diversión obligatoria", fenómeno

mediante el cual los estudiantes perciben las actividades lúdicas como una imposición adicional y no como una experiencia genuina de aprendizaje. En este sentido, el diseño narrativo de Tales from the South II buscó integrar los contenidos de POO de manera orgánica dentro de la historia del juego, evitando que las preguntas de evaluación se perciban como exámenes disfrazados.

3. Materiales y equipos

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron los siguientes recursos:

- a) Videojuego educativo Tales from the South II, desarrollado en RPG Maker MV, con mecánicas de rol (RPG), sistema de recompensas, niveles de dificultad progresiva y contenidos de POO integrados en la narrativa (herencia, encapsulamiento, polimorfismo y UML).
- b) Instrumento de evaluación: cuestionario dicotómico con reactivos sobre los elementos del modelo de objetos y UML, aplicado como pretest y posttest. La validez de contenido fue determinada mediante juicio de expertos.
- c) Equipos de cómputo del laboratorio de informática del Tecnológico Nacional de México campus Campeche para la ejecución del videojuego.
- d) Software estadístico para el procesamiento de datos mediante estadística descriptiva e inferencial, incluyendo la prueba de Levene, la prueba t de Welch y el cálculo de la d de Cohen.

3.1 Descripción del videojuego educativo

Tales from the South II es un videojuego de rol bidimensional (RPG 2D) desarrollado específicamente para este estudio con el motor RPG Maker MV. El jugador controla a Artemis, un personaje cuyo desarrollo — nivel, puntos de experiencia, fuerza, inteligencia, agilidad y suerte— está directamente vinculado al dominio progresivo de los contenidos de POO. El mapa principal del juego (Figura 1)

representa de forma simbólica las unidades temáticas del curso: la Academia del Código, el Bosque de Clases, la Cueva de Objetos, la Tienda de Herencia y la Torre del Polimorfismo, cada una correspondiente a un bloque curricular específico.



Figura 1. Pantalla principal del videojuego Tales from the South II, mostrando el mapa de unidades temáticas de POO.

Fuente: elaboración propia (2024).

El sistema de combate (Figura 2) constituye el mecanismo central de evaluación formativa dentro del juego. Los enemigos están nombrados con conceptos propios de la programación —como "NullPointer" y "ArraySlime"— y las acciones de combate (Atacar, Habilidad, Objeto, Defender) están condicionadas a la correcta resolución de preguntas sobre POO. Este diseño retoma el principio señalado por Kapp [21] de que el juego debe provocar una reacción emocional ligada a un resultado cuantificable, en este caso, el desempeño académico del estudiante.



Figura 2. Sistema de combate del videojuego, donde los enemigos representan errores comunes de programación.

Fuente: elaboración propia (2024).

La figura 3 nos muestra una pantalla emergente de preguntas de opción múltiple organizado por niveles y tema curricular. En el ejemplo, 2.1 definición de una clase, se hace una pregunta con cuatro posibles respuestas, donde una es verdadera y las demás son falsas, se otorgan recompensas inmediatas en puntos de experiencia (XP) y monedas en el juego al responder correctamente. Este mecanismo de retroalimentación es consistente con lo señalado por Bodnar et al. [22], quienes destacan que los juegos sobresalen al informar a los participantes sobre su progreso y motivarlos con recompensas para avanzar.



Figura 3. Pantalla emergente de preguntas relacionadas con temas curriculares específicos de POO.

Fuente: elaboración propia (2024).

La figura 4 nos muestra un sistema de misiones o quest, es donde se va estructurando el avance del estudiante mediante objetivos claros, por ejemplo, “Responde correctamente 5 preguntas sobre clases y objetos”, con una barra de progresión visible y una lista de temas abordados que el estudiante puede consultar en cualquier momento. Este elemento conecta al segundo componente del modelo de Werbach y Hunter [10]: la delimitación de comportamientos que se desean potencializar en el jugador, en este caso el estudio sistemático y la autorregulación del aprendizaje.



Figura 4. Sistema de misiones (quests) dentro del juego.

Fuente: elaboración propia (2024).

Finalmente, la figura 5 nos muestra el estado del personaje, integra un panel de "Código" que muestra fragmentos reales de programación orientada a objetos asociados a las habilidades del personaje —en la imagen aparece, la definición de una clase "Personaje" con un atributo privado "vida" y un método "atacar()"—.

Esta característica vincula explícitamente las mecánicas de juego (equipo, inventario, habilidades) con la sintaxis real de programación, favoreciendo la transferencia del aprendizaje del contexto lúdico al contexto técnico, tal como demuestran Laura-Ochoa et al. [23] al utilizar entornos de animación para introducir conceptos de programación orientada a objetos que posteriormente se trasladan a código real.



Figura 5. Ficha de personaje con panel de código, vinculando habilidades del juego con sintaxis real de POO.

Fuente: elaboración propia (2024).

Con el propósito de describir la estructura pedagógica de la intervención, la Tabla 1 presenta la secuencia didáctica implementada

en el videojuego Tales from the South II. Para cada etapa, el docente ofreció una explicación breve de la actividad a realizar (duración indicada en la tabla), tras la cual los estudiantes dedicaron el tiempo restante de la sesión (3-4 horas en total) a jugar de forma autónoma, repitiendo combates, misiones y retos según su propio ritmo de avance. Se relacionan las etapas de aprendizaje, los componentes del videojuego, las actividades desarrolladas por los estudiantes, la duración aproximada de la explicación de cada etapa, los mecanismos de retroalimentación, las evidencias de aprendizaje obtenidas durante la interacción y los resultados de aprendizaje evaluados. Esta organización permite comprender la correspondencia entre el diseño del videojuego y los objetivos de aprendizaje de Programación Orientada a Objetos, además de facilitar la replicabilidad de la intervención en contextos educativos similares.

Tabla 1. Secuencia didáctica del videojuego Tales from the South II y su contribución al aprendizaje de Programación Orientada a Objetos.

Etapa de aprendizaje	Componente del videojuego	Actividad del estudiante	Duración de la explicación	Retroalimentación	Evidencia de aprendizaje	Resultado de aprendizaje evaluado
Exploración	Academia del Código y Bosque de Clases	Explora el mapa e interactúa con personajes y objetos que introducen los conceptos de clases y objetos.	≈20 min	Desbloqueo de zonas, mensajes del juego y obtención de XP.	Registro de exploración, respuestas correctas y nivel alcanzado.	Identifica correctamente los conceptos de clase y objeto.
Comprensión conceptual	Sistema de preguntas	Responde preguntas sobre clases, encapsulamiento, herencia, polimorfismo y UML.	≈20 min	XP, monedas y retroalimentación inmediata.	Porcentaje de respuestas correctas registrado por el videojuego.	Comprende los conceptos fundamentales de POO.
Aplicación	Sistema de combate RPG	Supera combates respondiendo correctamente las preguntas.	≈25 min	Victoria o derrota, recompensas y progreso.	Enemigos derrotados, porcentaje de aciertos y progreso.	Aplica conceptos de POO en situaciones del juego.

Consolidación	Sistema de misiones (Quest)	Completa objetivos curriculares y desbloquea nuevas actividades.	≈15 min	Barra de progreso y recompensas.	Número de misiones completadas y porcentaje de avance.	Consolida el aprendizaje mediante la práctica.
Transferencia	Panel "Código"	Analiza fragmentos reales de código asociados al personaje.	≈10 min	Relación inmediata entre código y habilidad.	Interpretación correcta del código.	Transfiere los conocimientos al contexto real.
Evaluación	Pretest y postest	Responde el instrumento antes y después de la intervención.	≈20 min	Calificación obtenida.	Resultados del pretest y postest.	Evidencia el aprendizaje alcanzado.

Fuente: elaboración propia (2024).

4.

Métodos experimentales

4.1 Diseño de investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y un diseño cuasiexperimental con grupo control no equivalente y mediciones pretest-postest. Este diseño se adapta a los contextos reales de aula con grupos intactos previamente establecidos y permite controlar amenazas a la validez interna cuando los grupos son equivalentes en la medición inicial [24].

4.2 Participantes

Participaron 53 estudiantes del segundo semestre de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Campeche, distribuidos en dos grupos académicos previamente establecidos: grupo experimental (n=31) y grupo control (n=22). La muestra incluyó 20 mujeres y 33 hombres con edades de entre 18 y 23 años. Los participantes firmaron una carta de consentimiento informado y sus datos fueron tratados de forma anónima y confidencial, conforme a los principios éticos de la investigación con seres humanos.

4.3 Instrumento

Se diseñó un cuestionario dicotómico con reactivos basados en los contenidos de POO: herencia, encapsulamiento, polimorfismo, UML y modelado de objetos. El cuestionario estuvo compuesto por 10 reactivos de opción múltiple con cuatro alternativas de respuesta (una correcta y tres distractores), aplicado en formato impreso. Aunque el formato de presentación es de opción múltiple, la calificación de cada reactivo se ponderó de forma dicotómica (1 = respuesta correcta, 0 = respuesta incorrecta), lo que permite el cálculo de índices de confiabilidad propios de este tipo de escalas (KR-20) sin verse afectado por la presencia de distractores. Los reactivos se distribuyeron de forma equitativa entre los cuatro bloques temáticos evaluados: 3 reactivos de herencia, 3 de encapsulamiento, 2 de polimorfismo y 2 de modelado UML. La confiabilidad del instrumento fue evaluada mediante el coeficiente Kuder-Richardson (KR-20), obteniéndose un valor de KR-20 = 0.799, que indica una consistencia interna adecuada del instrumento (≥ 0.70). La validez de contenido fue determinada mediante juicio de 5 expertos en el área de Ingeniería en Sistemas Computacionales y Licenciatura en

Informática, todos con más de 10 años de experiencia docente (tres con maestría en Educación y dos con maestría en Tecnologías de la Información). Cada experto calificó la pertinencia de los 10 ítems mediante una escala de 1 a 4 (1 = no pertinente, 2 = poco pertinente, 3 = pertinente, 4 = muy pertinente), a partir de la cual se calculó el coeficiente V de Aiken por ítem y de forma global, con un criterio de aceptación de $V > 0.80$. Los valores obtenidos por ítem oscilaron entre 0.905 y 1.000, con una V de Aiken global de 0.943, lo que indica una validez de contenido adecuada; en consecuencia, la versión original de 10 ítems se mantuvo sin modificaciones. La puntuación bruta de cada estudiante (0 a 10 aciertos) fue transformada a una escala de 0 a 100 mediante la fórmula $(\text{aciertos}/10) \times 100$, con el fin de facilitar la interpretación porcentual del rendimiento académico.

4.4 Procedimiento

La intervención se llevó a cabo durante el ciclo académico agosto-diciembre de 2024, con una duración aproximada de seis semanas, en tres fases:

Fase 1. Aplicación del pretest a ambos grupos para establecer la línea base del rendimiento académico en POO.

Fase 2. Implementación del tratamiento: el grupo experimental participó en una sesión informativa sobre el videojuego Tales from the South II y posteriormente lo jugó (duración promedio: 3-4 horas). El grupo control continuó con la metodología de enseñanza tradicional. El grupo control fue atendido por el mismo docente que impartió la sesión al grupo experimental, y abordó los mismos bloques temáticos de POO (herencia, encapsulamiento, polimorfismo y UML) mediante metodología de enseñanza tradicional —exposición magistral, ejercicios en pizarrón y ejercicios de codificación en computadora sin elementos de gamificación—, dentro del horario regular de

la asignatura (4 horas semanales durante las seis semanas de intervención). El tiempo dedicado a la explicación directa de cada bloque temático varió entre 30 minutos y 1 hora según su complejidad, complementado con sesiones de resolución de ejercicios y dudas.

Fase 3. Aplicación del postest a ambos grupos con el mismo instrumento del pretest.

4.5 Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se realizaron con Microsoft Excel (Microsoft 365, versión para Mac), utilizando el complemento "Herramientas para el análisis" (Data Analysis ToolPak) para el cálculo de la prueba de Levene y las pruebas t de Student y de Welch; el análisis de covarianza (ANCOVA) se calculó mediante la opción "Regresión" del mismo complemento. Los datos fueron analizados con estadística descriptiva (media, mediana, desviación estándar, mínimo y máximo) para cada grupo en pretest y postest. Para la comparación inferencial entre grupos se verificó primero el supuesto de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Cuando las varianzas resultaron homogéneas se utilizó la prueba t de Student; cuando fueron heterogéneas, la prueba t de Welch. En este estudio, tanto el pretest como el postest presentaron heterogeneidad de varianzas, por lo que se empleó la prueba de Welch en ambas comparaciones ($\alpha=0.05$).

Adicionalmente, se calculó el tamaño del efecto mediante la d de Cohen para valorar la magnitud práctica de las diferencias observadas, complementando la interpretación basada en el p-valor.

5.1 Resultados del pretest: comparación inicial de grupos

Previo a la intervención se comparó a ambos grupos mediante la prueba t para muestras independientes sobre las calificaciones del

pretest, con el fin de verificar su equivalencia inicial. Los resultados descriptivos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos del pretest por grupo.

Grupo	n	Media	Mediana	D.E.	Mín-Máx
Control	22	17.27	0	26.76	0-70
Experimental	31	2.26	0	12.57	0-70

Fuente: Elaboración propia (2024).

La prueba de Levene evidenció varianzas heterogéneas entre los grupos ($F=7.480$, $p=0.0086$), por lo que se aplicó la prueba t de Welch. Esta arrojó $t=2.447$, $gl=27.62$, $p=0.021$. Dado que $p<0.05$, se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos en el pretest: el grupo Control partía con un nivel de conocimiento previo ligeramente superior al del grupo Experimental. Esta falta de equivalencia inicial se aborda de forma directa mediante un análisis de covarianza (ANCOVA) en la sección 5.2, que permite controlar estadísticamente el efecto del pretest al comparar los resultados del postest.

5.2 Resultados del postest

Tras la intervención gamificada, se analizaron los datos del postest. En primer lugar, la prueba de Levene evidenció varianzas heterogéneas entre los grupos ($F=7.719$, $p=0.008$), por lo que se aplicó la prueba t de Welch en lugar de la t estándar. Los estadísticos descriptivos del postest se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos del postest por grupo.

Grupo	n	Media	Mediana	D.E.	Mín-Máx
Control	22	80.00	80	5.35	70-90
Experimental	31	85.16	90	5.08	80-90

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4. Resultados de la prueba de Levene y la prueba t de Welch (postest).

Estadístico	Valor
Prueba de Levene (F)	7.719
p-valor Levene	0.0076
Estadístico t (Welch)	3.535
Grados de libertad	43.92
p-valor (bilateral)	0.0010
Diferencia de medias	5.16 puntos
IC 95%	[2.22, 8.10]
d de Cohen	0.99 (efecto grande)
g de Hedges	0.98 (efecto grande)

Fuente: Elaboración propia (2024).

Los resultados de la prueba t de Welch muestran un estadístico $t=3.535$ con 43.92 grados de libertad y un p-valor bilateral de 0.0010. Dado que $p<\alpha=0.05$, se rechaza la hipótesis nula: existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del postest del grupo experimental ($M=85.16$, $D.E.=5.08$) y del grupo control ($M=80.00$, $D.E.=5.35$). La diferencia de medias fue de 5.16 puntos, con un intervalo de confianza del 95% que no incluye el cero [2.22, 8.10], lo que refuerza la significancia del hallazgo.

El tamaño del efecto, calculado mediante la d de Cohen, fue de 0.99 (g de Hedges = 0.98), clasificado como efecto grande según la escala convencional [25]. Este indicador es especialmente relevante en diseños cuasiexperimentales, ya que complementa el p-valor al cuantificar la magnitud práctica de la diferencia observada, independientemente del tamaño de la muestra.

Dado que el pretest reveló una diferencia inicial estadísticamente significativa entre los grupos (sección 5.1), se realizó un ANCOVA con la calificación del postest como variable dependiente, el grupo (control/experimental) como factor y la calificación del pretest como

covariable, con el fin de controlar estadísticamente esa diferencia de partida. El efecto del grupo se mantuvo estadísticamente significativo ($F(1,50)=17.28$, $p<0.001$, $\eta^2_{\text{parcial}}=0.257$) incluso después de ajustar por el pretest, el cual también resultó un predictor significativo del postest ($F(1,50)=4.12$, $p=0.048$, $\eta^2_{\text{parcial}}=0.076$). Este resultado es central para la validez del estudio: confirma que la ventaja del grupo Experimental en el postest se sostiene aun controlando estadísticamente el hecho de que los grupos no partieron en igualdad de condiciones.

Tabla 5. Resultados del ANCOVA (postest ajustado por pretest).

Fuente	F	gl	p	η^2_{parcial}
Grupo	17.28	1, 50	<0.001	0.257
Pretest (covariable)	4.12	1, 50	0.048	0.076

Fuente: Elaboración propia (2024).

5.3 Discusión

Los resultados del uso del videojuego Tales From the South II como herramienta de gamificación produjo un impacto positivo y estadísticamente significativo en el rendimiento académico en POO. Estos resultados son consistentes de acuerdo con lo que señalan Marín et al. [19], quienes documentaron beneficios empíricos en el uso de la gamificación, específicamente en cursos de programación, y con la evidencia sistemática de Pegalajar Palomino [6], quien identificó que las estrategias gamificadas en educación superior genera mejoras en la dimensión cognitiva, incluyendo mayor comprensión y retención del conocimiento. En la dimensión actitudinal encuentra aumentos en la motivación y compromiso estudiantil.

El estadístico d de Cohen nos muestra el efecto grande ($d=0.99$), lo que demuestra que la intervención tuvo una magnitud practica

relevante, más allá de la significancia estadística. Con este resultado direcciona al videojuego como una herramienta con capacidad real de transformación del aprendizaje, no solo como un elemento motivacional superficial.

De acuerdo con Corchuelo-Rodríguez [9], en su experiencia con la gamificación en educación superior, reportó que el 88% de los estudiantes calificó la estrategia como motivante y el 96.2% la consideró útil para el desarrollo de contenidos didácticos, lo que refuerza la dimensión actitudinal que complementa los resultados cognitivos aquí obtenidos.

La narrativa del videojuego integra los conceptos de herencia, polimorfismo, encapsulamiento y UML dentro de la historia de rol, esto parece haber facilitado la comprensión de contenidos abstractos al presentarlos como parte de diálogos en un contexto significativo y motivador. Este mecanismo se relaciona con la teoría del flujo [8]: el mayor rendimiento académico observado en el grupo experimental podría explicarse, desde un plano teórico, por una mayor inmersión y atención sostenida durante la interacción con el juego, aunque este estudio no incorporó un instrumento específico para medir dicha variable de forma directa. Esta interpretación se conecta con la teoría del flujo, la cual señala que la inmersión sostenida durante una actividad favorece el estado óptimo de aprendizaje. Por su parte, Deci y Ryan [7], a través de la teoría de la autodeterminación, ayudan a explicar el resultado: el videojuego cubrió las necesidades de competencia (superando retos de programación), autonomía (decisiones propias dentro del juego) y relación (contexto narrativo con personajes).

Cabe destacar que el grupo experimental alcanzó estos resultados con un tiempo de exposición considerablemente menor (3-4

horas en una sola sesión) frente al tiempo de instrucción tradicional acumulado por el grupo control a lo largo de las seis semanas, lo que refuerza la eficiencia del videojuego como herramienta de aprendizaje.

Según Pegalajar Palomino [6], existe un vacío de investigación empírica sobre gamificación en educación superior tecnológica latinoamericana, y desde esta perspectiva del contexto mexicano, este estudio contribuye en generar nuevos aportes. Los resultados tienen implicaciones directas para el Tecnológico Nacional de México, donde la reprobación en asignaturas de programación es una problemática sistémica documentada por diversos autores [2, 3], y sugieren que la integración de videojuegos educativos puede ser una estrategia viable para mejorar el rendimiento académico y la retención estudiantil en estas materias.

6. Conclusiones y limitaciones

La investigación concluye que el videojuego educativo *Tales from the South II*, utilizado como herramienta de gamificación, influye positivamente y de forma estadísticamente significativa en el rendimiento académico de los estudiantes de segundo semestre de Ingeniería en Sistemas Computacionales en la materia de Programación Orientada a Objetos del Instituto Tecnológico de Campeche ($t=3.535$, $gl=43.92$, $p=0.001$, $d=0.99$).

Si bien el pretest reveló una diferencia inicial estadísticamente significativa entre los grupos (Welch: $t=2.447$, $gl=27.62$, $p=0.021$), el análisis de covarianza (ANCOVA) confirmó que el efecto del videojuego sobre el rendimiento en el postest se mantuvo significativo incluso al controlar estadísticamente esa diferencia de partida ($F(1,50)=17.28$, $p<0.001$, $\eta^2_{\text{parcial}}=0.257$), lo que fortalece la validez de la conclusión pese a no haberse logrado la equivalencia

inicial de los grupos. El tamaño del efecto grande ($d=0.99$) indica que la estrategia tiene relevancia práctica más allá de la significancia estadística, lo que la posiciona como una alternativa pedagógica viable para asignaturas con alta abstracción conceptual.

En cuanto a las implicaciones prácticas, se recomienda a los docentes del área de programación del Tecnológico Nacional de México considerar la integración de videojuegos educativos como complemento a las estrategias de enseñanza tradicionales, especialmente en los primeros semestres donde la reprobación es más frecuente. Para los diseñadores instruccionales, los resultados sugieren que la narrativa inmersiva con contenido curricular integrado —más que la simple recompensa con puntos— es el elemento diferenciador de los videojuegos educativos efectivos.

No obstante, este estudio presenta las siguientes limitaciones: (1) el tamaño de muestra es relativamente pequeño ($n=53$), lo que limita la generalización de los hallazgos; (2) la intervención se realizó en un único campus del Tecnológico Nacional de México, lo que restringe la transferibilidad a otros contextos institucionales; (3) el diseño cuasiexperimental, al no incluir aleatorización, no permite controlar todas las variables extrañas; y (4) la duración de la intervención (seis semanas) no permite evaluar efectos a largo plazo en la retención del conocimiento; y (5) pese a que el ANCOVA permitió controlar estadísticamente la diferencia inicial entre grupos, el diseño cuasiexperimental no logró la equivalencia de grupos en el pretest ($p=0.021$), lo cual constituye una amenaza a la validez interna que estudios futuros deberían prevenir mediante procedimientos de asignación aleatoria o de emparejamiento (matching) previos a la intervención.

Como líneas futuras de investigación se propone: ampliar el estudio a múltiples campus del Tecnológico Nacional de México para aumentar la potencia estadística; incorporar instrumentos validados de medición de motivación intrínseca (como la Escala de Motivación Académica); analizar el efecto diferenciado por género; y explorar el impacto del videojuego en otras asignaturas del área de programación como Estructuras de Datos y Bases de Datos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Campeche, al Tecnológico Nacional de México y a los estudiantes participantes que hicieron posible este estudio.

Referencias

- [1] UNESCO. (2021). *Reimagining our futures together: A new social contract for education*. UNESCO Publishing.
- [2] Medeiros, R.P., Ramalho, G.L. y Falcão, T.P. (2019). A systematic literature review on teaching and learning introductory programming in higher education. *IEEE Transactions on Education*, 62(2), 77-90. <https://doi.org/10.1109/TE.2018.2864133>
- [3] Torres-Zapata, Á.E., Pérez-Jaimes, A.K., Lara-Gamboa, C.C. y Estrada-Reyes, C.U. (2022). Caracterización de los factores docentes en torno al índice de reprobación en universitarios. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 12(24), e310. <https://doi.org/10.23913/ride.v12i24.1123>
- [4] Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R. y Nacke, L. (2011). From game design elements to gamefulness: Defining gamification. *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference*, 9-15. <https://doi.org/10.1145/2181037.2181040>
- [5] Almarales-Sarasola, M. y García-Fernández, O. (2019). Tutorial interactivo para la enseñanza de la Programación Orientada a Objetos. *Revista de Investigación, Formación y Desarrollo: Generando Productividad Institucional*, 7(3), 65-72. <https://doi.org/10.34070/rif.v7i3>
- [6] Pegalajar Palomino, M.C. (2021). Implicaciones de la gamificación en Educación Superior: una revisión sistemática sobre la percepción del estudiante. *Revista de Investigación Educativa*, 39(1), 169-188. <https://doi.org/10.6018/rie.419481>
- [7] Deci, E.L. y Ryan, R.M. (2000). The "what" and "why" of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior. *Psychological Inquiry*, 11(4), 227-268. https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1104_01
- [8] Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The Psychology of Optimal Experience*. Harper & Row.
- [9] Corchuelo-Rodríguez, C.A. (2018). Gamificación en educación superior: experiencia innovadora para motivar estudiantes y dinamizar contenidos en el aula. *EDUTEC. Revista Electrónica de Tecnología Educativa*, 63, 29-41. <https://doi.org/10.21556/edutec.2018.63.927>
- [10] Werbach, K. y Hunter, D. (2012). *For the Win: How Game Thinking Can Revolutionize Your Business*. Wharton Digital Press.
- [11] Parra-González, M.E. y Segura-Robles, A. (2019). Producción científica sobre gamificación en educación: un análisis cuantitativo. *Revista de Educación*, 386, 113-135. <https://doi.org/10.4438/1988-592X-RE-2019-386-429>
- [12] Sedeño, A.M. (2002). Videojuegos como dispositivos culturales: las

competencias espaciales en educación. *Comunicar*, 18, 183-189.

[13] Barr, M. (2016). Video games can develop graduate skills in higher education students: A randomised trial. *Computers & Education*, 113, 86-97. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.09.002>

[14] Seaborn, K. y Fels, D. (2015). Gamification in theory and action: A survey. *International Journal of Human-Computer Studies*, 74(1), 14-31. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2014.09.006>

[15] Simões, J., Díaz, R. y Fernández, A. (2013). A social gamification framework for a K-6 learning platform. *Computers in Human Behavior*, 29(2), 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.06.007>

[16] Lee, J. y Hammer, J. (2011). Gamification in education: What, how, why bother? *Academic Exchange Quarterly*, 15(2), 146.

[17] Subhash, S. y Cudney, E.A. (2018). Gamified learning in higher education: A systematic review of the literature. *Computers in Human Behavior*, 87, 192-206. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.05.028>

[18] Montenegro-Rueda, M., Luque-de la Rosa, A., Sarasola Sánchez-Serrano, J.L. y Fernández-Cerero, J. (2023). Gamification in higher education: A systematic review. *Education Sciences*, 13(1), 63. <https://doi.org/10.3390/educsci13010063>

[19] Marín, B., Frez, J., Cruz, J. y Genero, M. (2019). An empirical investigation on the benefits of gamification in programming courses. *ACM Transactions on Computing Education*, 19(1), 1-22. <https://doi.org/10.1145/3231709>

[20] García Lázaro, I. (2019). Escape Room como propuesta de gamificación en educación. *Revista Educativa Hekademos*, 27, 71-79.

[21] Kapp, K.M. (2012). *The Gamification of Learning and Instruction: Game-Based Methods and Strategies for Training and Education*. John Wiley & Sons.

[22] Bodnar, C.A., Anastasio, D., Enszer, J.A. y Burkey, D.D. (2016). Engineers at play: Games as teaching tools for undergraduate engineering students. *Journal of Engineering Education*, 105(1), 147-200. <https://doi.org/10.1002/jee.20106>

[23] Laura-Ochoa, L., Bedregal-Alpaca, N., Delgado-Barra, L. y Guevara, K. (2023). Aprendizaje activo y aprendizaje cooperativo para la enseñanza de un curso de fundamentos de programación. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, E59, 64-77.

[24] Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M.P. (2018). *Metodología de la investigación* (7ª ed.). McGraw-Hill.

[25] Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2ª ed.). Lawrence Erlbaum Associates.



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Evaluación de aceites vegetales en la formulación de oleogeles con base de cera de candelilla orgánica y su aplicación en el desarrollo de una tortilla de harina

Evaluation of vegetable oils in the formulation of oleogels based on organic candelilla wax and their application in the development of wheat flour tortillas

Borjas-Celaya, A.^b, Martínez-Ávila, G.C.G.^a, Rodríguez-Romero, B.A.^a, Rojas-Molina, R.^a, Aranda-Ledesma, N.E.^{a*}

^a Laboratorio de Química y Bioquímica, Facultad de Agronomía, UANL, Francisco I. Madero S/N, Ex Hacienda el Cañada, 66050 Cdad. Gral. Escobedo, Nuevo León. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7276-8156>, <https://orcid.org/0000-0003-3010-5017>, <https://orcid.org/0000-0001-8947-6125>, <https://orcid.org/0009-0005-4333-4769>^{*}.

^b Universidad Abierta y a Distancia de México (UnADM). Av. Universidad 1200, Col. Xoco, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, Ciudad de México.
alberto.borjascel@nube.unadmexico.mx; guillermo.martinezavl@uanl.edu.mx; ; beatriz.rodriquezrm@uanl.edu.mx; romeo.rojasmln@uanl.edu.mx; nestor.arandald@uanl.edu.mx^{*}

Innovación tecnológica: Aplicación en la formulación de tortillas de harina.

Área de aplicación industrial: Desarrollo de alimentos funcionales abundantes en grasas insaturadas.

Recibido: 03 diciembre 2025

Aceptado: 18 junio 2026

Abstract

Oleogelation using organic candelilla wax represents an alternative for replacing saturated and partially hydrogenated fats in food products. In the present study, oleogels were formulated using candelilla wax (3, 6, and 9%) and vegetable oils (garlic, grape seed, and toasted sesame oils). Their physicochemical properties were evaluated in terms of hardness, acid value, peroxide value, melting point, and color, and compared with commercial fats (lard, butter, and vegetable shortening) using a completely randomized design and Tukey's test ($\alpha = 0.05$). The results showed that increasing the wax concentration enhanced hardness and melting point due to the formation of a more structured crystalline network. The oleogels exhibited lower hardness than vegetable shortening and butter, but a hardness similar to that of lard, which favors their functional performance. Acid and peroxide values remained within regulatory limits. The garlic oil oleogel stood out because of its hardness stability, oxidative stability, and thermal behavior, and was therefore selected for application in wheat flour tortillas. The replacement of vegetable shortening with the oleogel did not significantly affect hardness or fat migration, while it increased the

moisture content of the product. Therefore, oleogels based on candelilla wax and oils rich in unsaturated fatty acids constitute a viable and healthier alternative for the development of functional foods.

Keywords: Candelilla wax, Functional foods, Oleogel, Vegetable oils.

Resumen

La oleogelificación utilizando cera de candelilla orgánica representa una alternativa para sustituir grasas saturadas y parcialmente hidrogenadas en alimentos. En la presente investigación, se formularon oleogeles con cera de candelilla (3, 6 y 9 %) y aceites vegetales (ajo, pepita de uva y ajonjolí tostado). Se evaluaron sus propiedades fisicoquímicas mediante dureza, índice de acidez, índice de peróxidos, punto de fusión y color, comparándose con grasas comerciales (manteca de puerco, mantequilla, manteca vegetal) bajo un diseño completamente al azar y análisis de Tukey ($\alpha=0.05$). Los resultados mostraron que el incremento en la concentración de cera aumentó la dureza y el punto de fusión, debido a la formación de una red cristalina más estructurada. Los oleogeles presentaron dureza menor que la manteca vegetal y mantequilla, pero similar a la manteca de cerdo, lo que favorece su funcionalidad. Los índices de acidez y peróxidos se mantuvieron dentro de los límites normativos. El oleogel con aceite de ajo destacó por su estabilidad en cuanto a dureza, estabilidad oxidativa y comportamiento térmico, por lo que fue seleccionado para su aplicación en tortillas de harina. La sustitución de manteca vegetal por oleogel no afectó significativamente la dureza ni la migración de grasas, y aumentó la humedad del producto. Por lo tanto, el de oleogeles a base cera de candelilla y aceites ricos en ácidos grasos insaturados son una alternativa viable y saludable para el desarrollo de alimentos funcionales.

Palabras clave: Aceites vegetales, Alimentos funcionales, Cera de candelilla, Oleogel.

1. Introducción

El consumo generalizado a nivel mundial de grasas *trans* y grasas saturadas ha sido asociado con una mayor prevalencia y desarrollo de enfermedades cardiovasculares con efectos secundarios adversos como lo es una alteración en el perfil de lipoproteínas, obesidad, inflamación y estrés oxidativo que produce a su vez enfermedades como la diabetes tipo II y síndrome metabólico (Martins et al. 2023).

En este contexto, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA), eliminó las grasas *trans* de la lista de sustancias generalmente reconocidas como seguras, mientras que en 2020 prohibió por completo

el uso de aceites parcialmente hidrogenados. Además, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda una ingesta de grasas *trans* menor al 1% y menos del 10% de la energía diaria total debe de provenir de grasas saturadas (Tanislav et al. 2022). Por lo tanto, debido a estas disposiciones a nivel internacional, la industria alimentaria ha optado por tomar medidas para disminuir la ingesta de grasas *trans* y grasas saturadas en la dieta diaria con el fin de prevenir el desarrollo de enfermedades degenerativas.

Una alternativa prometedora y novedosa para la sustitución de estas grasas es la estructuración del aceite vegetal mediante el proceso de oleo gelificación, cuyo proceso

permite retener más del 90% aceite vegetal en una red tridimensional cristalina utilizando agentes gelificantes a concentraciones menores al 10%, además de no alterar el perfil insaturado, ni requerir la adición de agentes químicos para la formación de la red de gel, lo que permite minimizar el efecto de grasas saturadas y brinda al consumidor los beneficios característicos de las grasas insaturadas (Thakur et al. 2022). Diversas ceras, como la cera de candelilla, cera de salvado de arroz, cera de abeja y cera de carnauba son ideales para ser utilizados como oleogelificantes, tales como la calidad alimentaria, disponibilidad, bajo costo y su alta capacidad gelificante, lo que se atribuye a su composición que consiste principalmente en ácidos grasos saturados y alcoholes grasos de cadena larga lo que permite mantener una alta estabilidad estructural (Hamidioglu et al. 2022).

Los oleogeles a base de cera de candelilla, cera de salvado de arroz, cera de girasol, cera de carnauba y cera de abeja han sido ampliamente utilizadas para la estructuración de diversos aceites tales como; aceite de girasol, canola, colza, camelia, maíz y oliva (Xu et al. 2022, Wettlaufer et al. 2021). Cuyos usos abarcan desde la industria cosmética, alimentos y farmacéutica debido a su comportamiento similar a la de un sólido y a su bajo contenido en ácidos grasos saturados y *trans* (Liu et al. 2024a). En estudios recientes han sido utilizados para la producción de productos horneados (pasteles, galletas y pan), mejorando significativamente sus propiedades fisicoquímicas y sensoriales en comparación con las grasas convencionales (Liu et al. 2024a).

Los problemas asociados al alto consumo de grasas trans y saturadas constituyen un problema de salud pública en México, presentes en productos de consumo diario. En este contexto, la oleogelificación mediante cera de candelilla orgánica permite

estructurar aceites ricos en ácidos grasos insaturados *cis*, ofreciendo una alternativa para sustituir estas grasas. Tomando en cuenta lo anterior, la hipótesis del presente trabajo es que, dado que la cera de candelilla orgánica puede actuar como agente estructurante de aceites ricos en ácidos grasos insaturados en configuración *cis*, y promoviendo la formación de oleogeles con propiedades fisicoquímicas adecuadas, permite su incorporación como sustitutos de grasas saturadas en la elaboración de tortillas de harina. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue desarrollar y caracterizar oleogeles a partir de la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas, con el propósito de determinar su potencial de aplicación y su viabilidad tecnológica como sustitutos de grasa en la elaboración de tortillas de harina.

2. Materiales, equipos y métodos experimentales

2.1 Cera de candelilla

La cera de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) fue obtenida del ejido Lucio Blanco, Cuatrociénegas, Coahuila de Zaragoza, México durante los años 2021-2022. La cual fue extraída con ácido cítrico y posteriormente fue filtrada para eliminar impurezas (clarificado) utilizando bolsa filtro de tela de 25 x 24 cm para la eliminación de impurezas.

2.2 Elaboración de oleogeles

Los oleogeles se elaboraron en base a lo reportado por Flores-García et al. (2023) con ligeras modificaciones. Se formularon oleogeles a distintas concentraciones de cera de candelilla orgánica (3%, 6% y 9%) utilizando tres diferentes aceites vegetales ajo (San Lucas), pepita de uva (San Lucas) y ajonjolí tostado (Inés), adquiridos en establecimientos comerciales dentro del área metropolitana de Monterrey N.L. El aceite se calentó hasta 80°C con constante en una plancha de agitación magnética a 120 rpm,

posteriormente fue añadida la cera hasta lograr su integración a la mezcla y se mantuvo en agitación y temperatura constante durante 15 min. Finalmente, el oleogel se dejó reposar a temperatura ambiente hasta alcanzar la temperatura ambiental para luego ser transferido a refrigeración a 4°C durante 24 horas antes de su uso.

2.3 Evaluación de propiedades fisicoquímicas del oleogel

2.3.1 Extracción de grasas

Se realizó la extracción de grasas en base a lo reportado por Kozłowska et al. (2019) con algunas modificaciones. Un total de 100 g de muestra (de oleogel o tortilla) fueron colocados con 500 mL de hexano en agitación constante durante 50 min, posteriormente se realizó un filtrado para eliminar el materia sólido. La eliminación del solvente se llevó a cabo en un horno Jeio Tech 659122 a 40°C durante 24 horas. Finalmente, la grasa obtenida fue almacenada a 4°C hasta la realización de los análisis.

2.3.2 Índice de acidez, punto de fusión, dureza y color.

Para la determinación de las propiedades fisicoquímicas (índice de acidez, punto de fusión y dureza) de los oleogeles y las grasas, se empleó las metodologías reportadas por la; NMX-F-101-SCFI-2012 y por Flores-García et al. (2023). Mientras que para la evaluación de color se utilizó un colorímetro (WR10QC portable colorimeter BELEY 8mm Digital Precise with Color Screen Display) para la detección de las coordenadas CIEL*a*b*.

Se utilizaron como controles marcas comerciales de manteca vegetal (INCA), manteca de puerco (María Cristina) y mantequilla (Gloria sin sal), obtenidas de tiendas comerciales dentro del área metropolitana de Monterrey N.L. (Fernández Market Bodega 390, Av. Los Ángeles #1000 Int. 390 Col. Garza Cantú, San Nicolás de los

Garza Nuevo León, C.P. 66480 y Carnicería María Cristina Marcelino Juárez 100, Jardines de Casa Blanca, 67116 Guadalupe, N.L.) como puntos de comparación.

2.4 Elaboración de la tortilla de harina

Para la elaboración de la tortilla de harina, se pesaron 1000 g de harina de trigo, 60 g de oleogel, 16 g de sal, 10 g de polvo para hornear (REXAL) (bicarbonato de sodio, sulfato de aluminio y sodio, fécula de maíz, sulfato de maíz y sulfato monocalcico) y 535 mL de agua purificada. Para la tortilla de harina control se mantuvieron todas cantidades a excepción del oleogel que fue sustituido por 170 g de manteca vegetal y el volumen de agua fue ajustado a 500 mL (debido a la poca untuosidad de la manteca vegetal). Todos los ingredientes fueron mezclados a mano durante 8 minutos hasta lograr la consistencia deseada, posteriormente la cocción de la tortilla consistió en un tiempo de 2 min (1 min por lado) a una temperatura de plancha de 125 °C.

2.5 Evaluación de propiedades fisicoquímicas de la tortilla de harina

Una vez elaboradas las tortillas de harina, se procedió a extraer las grasas y se llevaron a cabo los análisis según las metodologías mencionadas en el apartado 2.3.1

2.5.1 Índice de acidez, punto de fusión, dureza y color.

Los análisis se llevaron a cabo en base a lo indicado en el apartado 2.3.2.

2.5.2 Humedad, migración de grasas e índice de peróxidos.

El contenido de humedad y el porcentaje de migración de grasas fueron determinados con base en lo reportado por Flores-García et al. (2023). Mientras que el índice de peróxidos se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos por el proveedor Hanna Instruments utilizando el kit de reactivos para

determinación del valor de peróxidos en aceites HI83730-20 con número de lote C011/24 y midiendo los valores con un fotómetro para índice de peróxido en aceite (Hanna Instruments HI83730 – 01).

2.6 Análisis de grupos funcionales por FTIR

El análisis de FTIR se llevó a cabo en base a lo reportado por Aranda-Ledesma et al. (2022). Utilizando un FTIR Agilent modelo Cary 630 acoplado al accesorio ATR con cristal de seleniuro de zinc (ZnSe). El análisis de FTIR se llevó a cabo con el propósito de identificar los grupos funcionales característicos de los oleogeles y compararlos con los observados en las grasas convencionales, permitiendo evaluar posibles cambios estructurales e interacciones moleculares generadas durante el proceso de oleogelación.

2.7 Análisis estadístico

Los ensayos se realizaron por triplicado. Para cada variable evaluada, los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar. Las diferencias entre tratamientos se determinaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, considerando cada formulación y control como un tratamiento independiente. Cuando se detectaron diferencias significativas ($\alpha = 0.05$), las medias se compararon mediante la prueba de Tukey. Todos los análisis estadísticos se realizaron usando el software MINITAB versión 21.2.

3. Resultados y discusión

3.1 Propiedades fisicoquímicas de los oleogeles

En la Tabla 1 se muestran las propiedades fisicoquímicas de los oleogeles preparados al 3%, 6% y 9% de cera de candelilla orgánica y su comparación con los controles que comprenden grasas de uso común utilizados en la elaboración de diversos alimentos, en

donde se muestra una clara diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre tratamientos para todas las variables evaluadas.

3.1.1 Color

El color es un factor esencial para determinar las propiedades sensoriales de los productos alimentarios. La escala de color CIE $L^*a^*b^*$ es una escala estándar para evaluar el índice de luminosidad psicométrica (L^*) que va del 0 (negro) al (100) blanco. El componente a^* varía de verde (negativo) a rojo (positivo), mientras que el componente b^* varía de azul (negativo) a amarillo (positivo) (Ropciuc et al. 2023). En el caso de los controles se observa valores altos de L^* indicando una alta luminosidad y una tendencia hacia lo blanco, mientras que los valores de a^* tienden hacia lo negativo y los valores de b^* muestran valores relativamente bajos para la manteca de puerco y manteca vegetal, mientras que para la mantequilla su valor de b^* muestra valores intermedios con una tendencia mayor hacia lo amarillo. Estos hechos indican una clara tendencia del color propio de estas grasas; blanco para la manteca de puerco y manteca vegetal y amarillo para la mantequilla. Mientras que en los oleogeles se muestra una disminución considerable en los valores de L^* respecto a los controles lo cual se debe a la presencia de cera que provoca cambios en el aceite haciéndolo más opaco y por lo tanto menos sensible a la luz. Esto es debido a la formación de nanopartículas de grasa que dan a los productos una apariencia mate (Ropciuc et al. 2023). En cuanto a los valores de a^* todas las muestras mostraron valores disminuidos esto debido al color propio de los aceites que tienen una tendencia hacia el verde. Por otra parte, se muestra un aumento en los valores de b^* respecto a los valores de color de la cera lo que origina un color de amarillez (Qu et al. 2024).

3.1.2 Dureza

La dureza es un parámetro importante para evaluar la calidad de las grasas, ya que determina el rendimiento culinario y la untabilidad (Chai et al. 2022). Al respecto, se muestra un incremento en la dureza de los oleogeles conforme aumenta la concentración de cera añadida, lo que se debe a una mayor formación de cristales y una red cristalina con mayor densidad debido al contenido de cera lo que resulta en una mayor rigidez (Chai et al. 2022). Además, el espacio cerrado dentro de la matriz del oleogel es esencial para el mantenimiento del sabor, un mayor nivel de dureza indica una red más densa lo que puede ralentizar más la movilidad del sabor (Liu et al. 2024b). Todas las muestras de oleogeles mostraron valores de dureza menores a los reportados por la manteca vegetal y mantequilla, esto debido al alto contenido de ácidos grasos específicamente aquellos saturados y de cadena larga lo que se traduce como una mayor firmeza lo que dificulta la untabilidad (Lapčíková et al. 2023) y de la misma manera presentó valores similares a los valores de dureza de la manteca de puerco, lo que puede favorecer las propiedades sensoriales y de fusión de los productos alimentarios elaborados a base de oleogel.

3.1.3 Índice de peróxido e índice de acidez

En el caso del índice de peróxido es de la prueba básica para medir el grado de oxidación en grasas y aceites, proporcionando una medida en la que el aceite ha sufrido una oxidación primaria (Godswill, et al. 2018). Si bien, los oleogel muestran valores de índice de peróxido superiores a los mostrados por los controles, se encuentran por debajo de lo establecido en el CODEX STAN 210-1999 (15 meq de O_2/kg). Además, se ha reportado que la presencia de la cera puede ayudar a reducir los procesos de oxidación debido a su capacidad dual lipofílica e hidrofílica generado de esta manera una reacción de

oxidación retardada (Ropciuc et al. 2023). Además, Kamali et al. (2019) indican que el proceso de refrigeración ($4^\circ C$) retarda el proceso de oxidación respecto al almacenamiento a temperatura ambiente, por lo que el proceso de oleogelificación en combinación con adecuados sistemas de almacenamiento evitan procesos de oxidación acelerada, lo que constituye otra ventaja de esta tecnología para su implementación.

Por otra parte, el índice de acidez es definido como la cantidad de ácidos grasos libres es decir aquellos que no están unidos a un alcohol, según la norma NMX-F-101-SCFI-2012. Al respecto, se muestra un incremento de los valores en los oleogeles conforme aumenta el contenido de cera. Esto es debido al contenido relativamente alto de los ácidos grasos libres del agente oleogelificante (cera de candelilla), que presenta altos niveles de acidez de la candelilla (18 mg de KOH/g) (Szymańska et al. 2021). Sin embargo, ninguna muestra de oleogel superó el valor de acidez mostrada por la manteca vegetal por lo que son comparables y puede ser sustituida sin incrementar los niveles de ácidos grasos libres.

3.1.4 Punto de fusión

El punto de fusión de las materias grasas se relaciona directamente con la dureza de esta, por lo que a mayor dureza mayor será el punto de fusión (Liu et al. 2024b). Los oleogeles mostraron un incremento del punto de fusión conforme aumentaba la concentración de cera de candelilla. Esto se asocia a un aumento de lipocristales, lo que permite la formación de la estructura de red de gel más compacta (Liu et al. 2024b). Esto ocurre durante el fraccionamiento del aceite en donde los triglicéridos de alto punto de fusión se separan causando un enfriamiento de la mezcla causando que el punto de fusión aumente y de la misma manera da lugar a la

producción de más cristales de grasa (Liu et al. 2024b). Esto representa una desventaja respecto a las grasas convencionales ya que el punto de fusión impacta directamente en otras propiedades fisicoquímicas y funcionales, como la cristalinidad y el comportamiento térmico, lo que afecta su desempeño en productos alimentarios, dado que las grasas convencionales que presentaron temperaturas entre 29.40 y 46.63 °C, lo que pone en evidencia un mayor contenido de grasa sólida y por lo tanto mayor estabilidad térmica,

mejorando así la retención de humedad (Faridah et al. 2025).

Una vez realizadas todas las pruebas fisicoquímicas con los diferentes aceites y concentraciones de cera de candelilla, se seleccionó el oleogel a base de aceite de ajo debido a los resultados finales obtenidos de las propiedades fisicoquímicas del producto final para la elaboración de las tortillas de harina.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los oleogeles comparadas con los controles.

	Muestras	Color			Dureza (N)	Índice de peróxido (meq O ₂ /kg)	Índice de acidez (%)	Punto de fusión (°C)
		L*	a*	b*				
Controles	Manteca	66.67	-0.00	23.07	0.52	8.66	1.35	29.40
	puerca	(±1.62) ^b	(±0.52) ^d	(±0.24) ^c	(±0.05) ^g	(±1.04) ^b	(±0.11) ^a	(±2.02) ^d
	Manteca vegetal	78.58	-2.87	9.02	37.39	0.00	0.33	46.63
		(±1.60) ^a	(±0.08) ^d	(±0.07) ^f	(±1.76) ^a	(±0.00) ^f	(±0.19) ^d	(±3.18) ^b
	Mantequilla	71.70	-0.93	52.00	19.08	2.50	0.62	32.76
Oleogel 3%		(±0.87) ^a	(±0.05) ^d	(±0.98) ^a	(±0.47) ^b	(±0.50) ^d	(±0.10) ^c	(±1.33) ^c
	Ajo	36.96	1.86	8.55	0.19	8.50	0.22	35.63
		(±8.74) ^b	(±1.54) ^c	(±4.55) ^f	(±0.02) ^f	(±0.50) ^b	(±0.00) ^e	(±0.98) ^c
	Pepita de	39.31	3.47	18.15	0.24	9.66	0.11	40.60
	Uva	(±5.91) ^b	(±0.83) ^c	(±2.18) ^d	(±0.02) ^f	(±0.76) ^b	(±0.00) ^f	(±4.45) ^b
Oleogel 6%	Ajonjolí	31.52	18.05	18.05	0.00	0.83	1.23	34.53
	Tostado	(±1.68) ^b	(±0.62) ^a	(±3.52) ^d	(±0.00) ^f	(±0.28) ^e	(±0.01) ^b	(±1.11) ^c
	Ajo	30.21	-3.59	13.09	3.17	4.50	0.22	45.60
		(±2.45) ^b	(±0.52) ^d	(±3.70) ^e	(±0.75) ^d	(±0.86) ^d	(±0.00) ^e	(±2.19) ^b
	Pepita de	34.43	-0.52	13.32	2.53	10.16	0.37	56.66
Oleogel 9%	Uva	(±3.35) ^b	(±1.57) ^d	(±1.49) ^e	(±0.04) ^d	(±1.25) ^a	(±0.17) ^d	(±1.83) ^a
	Ajonjolí	34.64	7.67	32.85	1.10	1.33	1.31	46.40
	Tostado	(±0.94) ^b	(±1.14) ^b	(±4.61) ^c	(±0.27) ^{ef}	(±0.57) ^e	(±0.21) ^a	(±2.45) ^b
	Ajo	34.66	-3.20	13.22	6.13	6.66	0.63	55.76
		(±4.05) ^b	(±0.16) ^d	(±0.96) ^e	(±0.25) ^c	(±0.76) ^c	(±0.06) ^c	(±0.95) ^a
	Pepita de	35.92	0.26	13.04	5.64	6.16	0.30	56.46
	Uva	(±0.30) ^b	(±0.24) ^c	(±0.77) ^e	(±0.63) ^c	(±2.02) ^c	(±0.06) ^d	(±0.23) ^a
	Ajonjolí	34.11	5.01	25.42	3.91	3.73	1.36	52.06
	Tostado	(±1.70) ^b	(±1.53) ^b	(±1.15) ^c	(±0.82) ^d	(±1.25) ^d	(±0.08) ^a	(±1.72) ^b

Letras diferentes indica una diferencia significativa Tukey ($\alpha=0.05$) por columna. Los datos indican la media de los triplicados con la desviación estándar respectivamente.

3.2 Propiedades fisicoquímicas de la tortilla de harina

En la Tabla 2, se observan las propiedades fisicoquímicas de la tortilla de harina elaborada a partir de un oleogel a base de aceite de ajo y su comparación con el control

elaborada con una receta base que sustituye el oleogel por manteca vegetal comercial.

3.2.1 Color

En el caso del color se observa una diferencia significativa ($\alpha=0.05$) para las tres variables ($L^*a^*b^*$) entre la tortilla con oleogel y la

tortilla control. El aumento de las coordenadas $L^*a^*b^*$ mostradas por la tortilla con oleogel se puede deber principalmente al color propio del aceite de ajo añadido en la formulación del oleogel. Además, la cantidad de ácidos grasos presentes también influyen en el parámetro de color, mientras que la manteca de origen animal tiene un color blanco y una mayor cantidad de ácidos grasos saturados con relación 16:0 mientras que los oleogeles son ricos en ácidos grasos insaturados con una relación promedio de 18:1 lo que influye en la absorbancia de color (Kim et al. 2024).

3.2.2 Dureza

La dureza es un factor crucial determinante en las preferencias del consumidor por los productos alimenticios y el uso de oleogeles permiten preservar o realzar sus cualidades de textura y su atractivo sensorial (Lui et al. 2024b). En la dureza no se observa una diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre tratamientos, lo que representa un aspecto positivo para la sustitución de grasas saturadas por insaturadas además considerando la dureza y la masticabilidad están correlacionadas negativamente con la calidad de los alimentos funcionales (Kim et al. 2024). Estos resultados evidencian que la adición de oleogel en la formulación de tortillas de harina no afecta esta propiedad de forma negativa. Además, el uso de una menor cantidad de oleogel para la elaboración de las tortillas indican una mejor plasticidad dentro del sistema, lo que facilita el manejo de la masa y por lo tanto la formación de las tortillas, lo que es suficiente para mantener la integridad del producto durante su elaboración y cocción desensañando adecuadamente la función respecto a las grasas convencionales con menores cantidades para su elaboración (Tavernier et al. 2017). Al mismo tiempo y debido a la naturaleza estructurada de los oleogeles se puede mejorar la distribución y retención de

sabor, mejorando su textura y reduciendo su untuosidad (Lui et al. 2024). Además, el uso de una menor cantidad de oleogel respecto al control.

3.2.3 Humedad

El contenido de humedad en un alimento impacta en el grado de hidratación de la masa lo que a su vez se permite una mayor estabilidad en cuanto a textura, sabor y la apariencia general del producto final (Pradham et al. 2023). En este sentido, en el contenido de humedad (%) se observa una diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre tratamientos, indicando que la adición de oleogeles en las formulaciones de tortillas de harina aumenta el contenido de humedad. Este aumento en las muestras elaboradas con oleogel se puede deber a la capacidad de formar una red cristalina ya que permite retener una mayor cantidad de agua dentro de su matriz (Walendziak et al. 2025), sin embargo, ambas muestras se encuentran dentro de los rangos establecidos por la NOM-247-SSA1 (15%). No obstante, es importante señalar que la estabilidad microbiológica de un alimento depende principalmente de su actividad de agua (A_w) y no únicamente de su contenido de humedad. Por lo tanto, es necesario determinar ambos parámetros para determinar la susceptibilidad al desarrollo microbiano.

3.2.4 Migración de grasas

La migración de grasa desde la matriz del producto es importante dentro de las propiedades sensoriales y de almacenamiento de un producto (Onacik-Gür y Żbikowska 2020). No se aprecian variaciones significativas ($\alpha=0.05$) entre tratamientos, lo que indica que la sustitución de manteca vegetal por oleogel en la formulación de tortillas de harina no tuvo un efecto adicional en la retención de grasas. Esto representa una ventaja en el uso de oleogeles, ya que altos porcentajes en la migración de las grasas (%)

se asocian a la formación de una capa de aceite en la superficie del producto y del envase que lo contiene, degradándose a una mayor velocidad que la que se encuentra dentro de la matriz, afectando negativamente las propiedades sensoriales y de almacenamiento (Onacik-Gür y Żbikowska et al. 2020). Además, estos autores indican que la cera de candelilla es el agente estructurante más eficaz para estabilizar el aceite respecto a otras ceras (abeja, cera de salvado de arroz y cera blanca), esto debido a la capacidad de formar una estructura cristalina de la red entre la cera y el aceite (Onacik-Gür y Żbikowska et al. 2020).

3.2.5 Índice de peróxido e índice de acidez

En el índice de peróxido, se muestra una diferencia significativa ($\alpha=0.05$), siendo mayor en la muestra adicionada con oleogel, indicando un mayor grado de oxidación respecto a las grasas convencionales. Esto se puede deber a la presencia de ácidos grasos insaturados tanto en los aceites vegetales como en la cera de candelilla, los cuales son

altamente susceptibles a sufrir procesos de oxidación lipídica específicamente aquellos poliinsaturados respecto a los monoinsaturados (Noonim et al. 2022). Sin embargo, ambas muestras se encuentran por debajo de lo establecido en la norma CODEX STAN 210-1999 cuyo rango máximo para aceites vírgenes es de 15 meq de O_2/kg . Por otra parte, en el índice de acidez no se observa una diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre tratamientos, lo que indica que el contenido de ácidos grasos libres es similar en ambos tipos de tortillas. En este sentido, la muestra adicionada con oleogel muestra un ligero aumento respecto al control, lo cual se puede deber a la presencia de ácidos grasos libres en la cera de candelilla (Flores-García et al. 2023). Sin embargo, ambos casos se encuentran dentro de lo establecido en la norma CODEX STAN 210-1999 para aceites vegetales, la cual establece el contenido máximo de ácidos grasos libres para aceites refinados (0.6 mg KOH/g), aceites vírgenes prensados en frío (4.0 mg KOH/g) y aceites vírgenes (10.0 mg KOH/g).

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de la tortilla de harina y su comparación con el control.

Muestras	Color			Dureza (N)	Humedad (%)	Migración de grasas (%)	Índice de peróxidos (meq O_2/kg)	Índice de acidez (%)
	L*	a*	b*					
Tortilla de Harina Control	55.18 (± 4.61) ^b	-1.13 (± 0.24) ^b	19.95 (± 1.15) ^b	7.81 (± 2.03) ^a	7.22 (± 0.25) ^b	0.94 (± 0.39) ^a	0.16 (± 0.28) ^b	0.47 (± 0.23) ^a
Tortilla Harina Oleogel	63.08 (± 2.83) ^a	-0.07 (± 0.03) ^a	23.22 (± 0.27) ^a	8.84 (± 1.48) ^a	9.02 (± 0.32) ^a	1.64 (± 1.84) ^a	5.50 (± 1.00) ^a	0.82 (± 0.52) ^a

Letras diferentes indica una diferencia significativa Tukey ($\alpha=0.05$) por columna. Los datos indican la media de los triplicados con la desviación estándar respectivamente.

3.3 Análisis de grupos funcionales por FTIR

3.3.1 Espectro IR de los oleogeles

En la Figura 1 se muestran los espectros IR de los oleogeles, los cuales muestran una huella

dactilar de absorción idéntica, la cual se describe a continuación. La primera señal ubicada a 2909 cm^{-1} y a 2847 cm^{-1} indica la deformación simétrica y no simétrica de enlaces CH_2 de los alcanos. Posteriormente, la

señal ubicada a 1740 cm^{-1} indica la presencia de estiramiento de enlace $\text{C}=\text{O}$ de los triglicéridos. Por otra parte, la señal ubicada a 1470 cm^{-1} indica el estiramiento de enlaces $\text{C}-\text{H}$, mientras que la señal ubicada a 1157 cm^{-1} se relaciona a estiramientos del grupo éster ($\text{C}-\text{O}$). Finalmente, la señal ubicada a 708 cm^{-1} indica una vibración equilibrada de enlaces $\text{C}-\text{H}$ de los lípidos.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Pang et al. (2020), quienes al evaluar diferentes aceites en conjunto con cera de abeja se produjeron espectros con señales características a los identificados en la investigación. Así mismo, Flores-García et al. (2023), indica que la señal prominente ubicada a 1740 cm^{-1} indica la interacción entre aceite-cera la cual es generada principalmente por ester de alto peso molecular, además las señales ubicadas a 2909 y 2847 cm^{-1} corresponde a estiramientos de grupos $\text{C}-\text{H}$. También indica vibraciones de estiramiento de la cadena principal metil- CH_3 y metileno- CH_2 de los n -alcanos característicos de la cera de candelilla y cuya señal se superpone con las generadas por el aceite vegetal. En este contexto, se han reportado previamente señales similares en grasas comerciales (manteca de origen animal y manteca vegetal) en donde las señales ubicadas entre 1740 y 1735 cm^{-1} indica estiramientos del enlace $\text{C}=\text{O}$. También, la señal ubicada en región de 1440 cm^{-1} se debe a la presencia de los enlaces $\text{C}-\text{H}$. Finalmente, en la región entre 730 y 700 cm^{-1} se evidencia el estiramiento de enlaces $\text{C}-\text{H}$ de los lípidos (Flores-García et al. 2023).

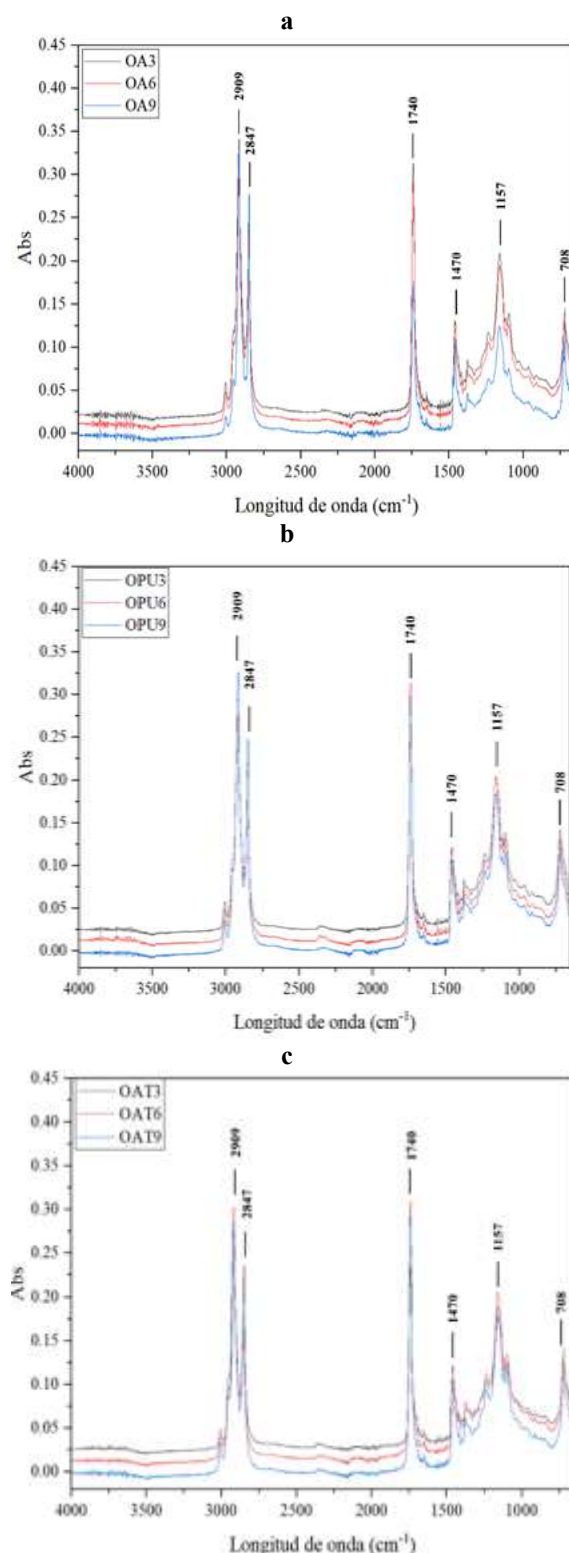


Figura 1. Espectros IR de los oleogeles; a) oleogel de ajo (OA3, OA6, OA9), b) oleogel pepita de uva (OPU3, OPU6, OPU9) y oleogel ajonjolí tostado (OAT3, OAT6, OAT9).

3.3.2 Espectro IR de tortillas de harina

En la Figura 2 se muestra la comparación de los espectros IR de la tortilla elaborada con oleogel y aquella elaborada con manteca vegetal y se muestra una similitud en la huella dactilar entre ambas muestras. La banda amplia ubicada a 3274 cm^{-1} indica vibraciones de estiramiento de grupos O-H. Mientras que las bandas ubicadas a 2918 y 2842 cm^{-1} indica vibraciones de estiramiento de enlaces C-H. Posteriormente, la señal ubicada a 1633 cm^{-1} corresponde a estiramientos del grupo carbonilo (C=O), seguido de las señales a 1540 y 1455 cm^{-1} que corresponde a interacciones de enlaces N-H y C-N, finalmente, las señales ubicadas 1153 y 993 cm^{-1} corresponden a interacciones de enlaces C-O, C-N y C-C.

Estos resultados, coinciden con lo reportado por Pradham et al. (2023) quienes indican que las bandas ubicadas entre 1400 y 1550 cm^{-1} corresponden a la región Amida II y se asocian a flexiones de grupos funcionales de las proteínas del gluten. Así, mismo Flores-García et al. (2023), encontraron similitudes entre los espectros IR de oleogeles y manteca vegetal, en las regiones ubicadas entre 2950 y 2800 cm^{-1} y entre la región 1700 a 1400 cm^{-1} . La similitud entre ambos espectros IR indica que la distribución y en comportamiento en el oleogel entre el aceite y la cera es similar a la que presenta la manteca vegetal comercial por lo que el reemplazo de esta es posible sin causar una alteración entre las interacciones entre la matriz del gel y el alimento funcional desarrollado.

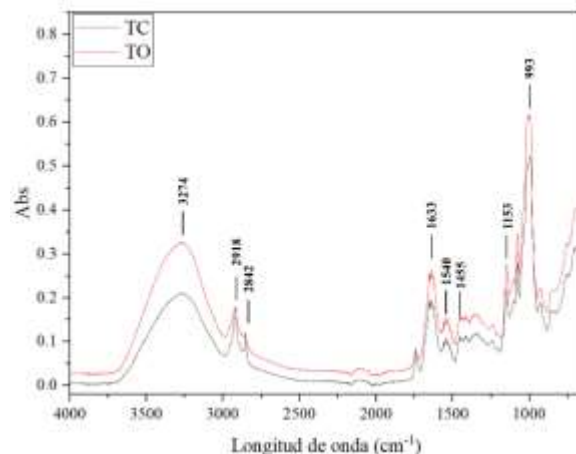


Figura 2. Espectro IR de la tortilla control (TC) y tortilla con oleogel (TO).

4. Conclusión

La formulación de oleogeles a base de cera de candelilla orgánica representa una alternativa viable para la sustitución de grasas saturadas y parcialmente hidrogenadas, debido a su capacidad para estructurar aceites vegetales ricos en ácidos grasos insaturados sin modificar su perfil lipídico, así como la capacidad para formar redes cristalinas estables y compatibilidad alimentaria.

La selección del oleogel a base de aceite de ajo basada en sus propiedades fisicoquímicas, particularmente su dureza comparable a la manteca de puerco, un índice de acidez y de peróxidos dentro de los límites normativos, así como un punto de fusión adecuado que favorece su funcionalidad tecnológica. Estas características permitieron obtener un oleogel con características favorables para su aplicación en productos alimentarios. Permitiendo la elaboración de tortillas de harina con propiedades deseables como la dureza, la migración de grasas y la estabilidad oxidativa, sin afectar negativamente la calidad del producto final.

En conjunto, estos resultados confirman que los oleogeles formulados con cera de candelilla orgánica y aceites ricos en ácidos grasos insaturados poseen características

funcionales similares a las grasas convencionales, por lo que representan una opción viable como sustitutos saludables con alto potencial para el desarrollo de alimentos funcionales alineados con las tendencias actuales de reducción de grasas en la dieta diaria.

5. Agradecimientos

Agradece a la SECIHTI por la beca de manutención de posgrado.

6. Referencias

1. Martins, A. J., Guimarães, A., Fuciños, P., Sousa, P., Venâncio, A., Pastrana, L. M., & Cerqueira, M. A. (2023). Food-grade bigels: Evaluation of hydrogel: Oleogel ratio and gelator concentration on their physicochemical properties. *Food Hydrocolloids*, 143, 108893. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108893>
2. Tanislav, A. E., Pușcaș, A., Păucean, A., Mureșan, A. E., Semeniuc, C. A., Mureșan, V., & Mudura, E. (2022). Evaluation of structural behavior in the process dynamics of oleogel-based tender dough products. *Gels*, 8(5), 317. <https://doi.org/10.3390/gels8050317>
3. Thakur, D., Singh, A., Prabhakar, P. K., Meghwal, M., & Upadhyay, A. (2022). Optimization and characterization of soybean oil-carnauba wax oleogel. *Lwt*, 157, 113108.
4. Hamidioglu, I., Alenčikienė, G., Dzedulionytė, M., Zabulionė, A., Bali, A., & Šalaševičienė, A. (2022). Characterization of the quality and oxidative stability of hemp-oil-based oleogels as an animal fat substitute for meat patties. *Foods*, 11(24), 4030. <https://doi.org/10.3390/foods11244030>
5. Xu, H. J., Li, T., Zhang, H. X., Shi, C. H., Cao, J. Q., & Zhang, X. R. (2022). The application of oleogels in food products: Classification, preparation, and characterisation. *Acta Alimentaria*, 51(4), 462-478. <https://doi.org/10.1556/066.2022.00099>
6. Wettlaufer, T., Hetzer, B., & Flöter, E. (2021). Characterization of Oleogels based on waxes and their hydrolyzates. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 123(7), 2000345. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202000345>
7. Liu, L., Gao, Z., Chen, G., Yao, J., Zhang, X., Qiu, X., & Liu, L. (2024a). A comprehensive review: Impact of oleogel application on food texture and sensory properties. *Food Science & Nutrition*, 12(6), 3849-3862. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4110>
8. Faridah, M. R., Hairi, A. N. A., Yusoff, M. M., Rozzamri, A., Ibadullah, W. Z. W., & Ismail-Fitry, M. R. (2025). Comparison of the physicochemical properties of palm-based shortenings of various melting temperatures and animal fats. *Food Chemistry: X*, 28, 102583. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102583>
9. Lapčíková, B., Lapčík, L., Valenta, T., & Kučerová, T. (2022). Functional and quality profile evaluation of butters, spreadable fats, and shortenings available from Czech market. *Foods*, 11(21), 3437. <https://doi.org/10.3390/foods11213437>
10. Flores-García, C. L., Medina-Herrera, N., Rodríguez-Romero, B. A., Martínez-Ávila, G. C. G., Rojas, R., & Meza-Carranco, Z. (2023). Impact of Fat Replacement by Using Organic-Candelilla-Wax-Based

- Oleogels on the Physicochemical and Sensorial Properties of a Model Cookie. *Gels*, 9(8), 636. <https://doi.org/10.3390/gels9080636>
11. Norma Mexicana NMX-F-101-SCFI-2012 Alimentos – Aceites y Grasas Vegetales o Animales – Determinación de Ácidos Grasos Libres – Método de Prueba (Cancela a la NMX-F-101-SCFI-2006). Secretaría de Economía. Disponible en línea: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-f-101-scfi-2012.pdf>
 12. Aranda-Ledesma, N. E., González-Hernández, M. D., Rojas, R., Paz-González, A. D., Rivera, G., Luna-Sosa, B., & Martínez-Ávila, G. C. (2022). Essential oil and polyphenolic compounds of *Flourensia cernua* leaves: chemical profiling and functional properties. *Agronomy*, 12(10), 2274. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102274>
 13. Ropciuc, S., Dranca, F., Oroian, M. A., Leahu, A., Codină, G. G., & Prisacaru, A. E. (2023). Structuring of Cold Pressed Oils: Evaluation of the Physicochemical Characteristics and Microstructure of White Beeswax Oleogels. *Gels*, 9(3), 216. <https://doi.org/10.3390/gels9030216>
 14. Qu, K., Ma, J., Zhang, H., & Li, X. (2024). Characterization of construction and physical properties of composite oleogel based on single low molecular weight wax and polymer ethyl cellulose. *LWT*, 192, 115722. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115722>
 15. Chai, X., Zhang, Y., Shi, Y., & Liu, Y. (2022). Crystallization and structural properties of oleogel-based margarine. *Molecules*, 27(24), 8952. <https://doi.org/10.3390/molecules27248952>
 16. Liu, Y., Zhou, W., Gao, H., Chen, M., Li, R., Dai, Y., & Li, J. (2024b). Temperature-responsive palm oil-based-oleogels for encapsulation of D-limonene: effect of fat crystallisation and melting point. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(4), 2535-2546. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16991>
 17. Godswill, A. C., Amagwula, I. O., Igwe, V. S., & Gonzaga, A. I. (2018). Effects of repeated deep frying on refractive index and peroxide value of selected vegetable oils. <http://hdl.handle.net/20.500.12306/1285>
 18. FAO/OMS. Informe de la 14ª reunión del comité del CODEX sobre grasas y aceites. *Com. Del CODEX* 1993, 1, 1–123.
 19. Kamali, E., Sahari, M. A., Barzegar, M., & Ahmadi Gavlighi, H. (2019). Novel oleogel formulation based on amaranth oil: Physicochemical characterization. *Food science & nutrition*, 7(6), 1986-1996. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1018>.
 20. Szymańska, I., Żbikowska, A., Kowalska, M., & Golec, K. (2021). Application of oleogel and conventional fats for ultrasound-assisted obtaining of vegan creams. *Journal of Oleo Science*, 70(10), 1495-1507. <https://doi.org/10.5650/jos.ess21126>
 21. Tavernier, I., Doan, C. D., Van de Walle, D., Danthine, S., Rimaux, T., & Dewettinck, K. (2017). Sequential crystallization of high and low melting waxes to improve oil structuring in wax-based oleogels. *RSC advances*, 7(20), 12113-12125. [10.1039/C6RA27650D](https://doi.org/10.1039/C6RA27650D)
 22. Kim, S. H., Jo, Y. J., Lee, S. H., & Park, S. H. (2024). Development of

- oleogel-based Fat Replacer and its application in Pan Bread making. *Foods*, 13(11), 1678. <https://doi.org/10.3390/foods13111678>
23. Kozłowska, M., Zbikowska, A., Marciniak-Lukasiak, K., & Kowalska, M. (2019). Herbal extracts incorporated into shortbread cookies: Impact on color and fat quality of the cookies. *Biomolecules*, 9(12), 858. <https://doi.org/10.3390/biom9120858>
 24. Pradhan, A., Anis, A., Alam, M. A., Al-Zahrani, S. M., Jarzebski, M., & Pal, K. (2023). Effect of soy wax/rice bran oil oleogel replacement on the properties of whole wheat cookie dough and cookies. *Foods*, 12(19), 3650. <https://doi.org/10.3390/foods12193650>
 25. Walendziak, W., Douglas, T. E., & Kozłowska, J. (2025). Physicochemical Properties of Freeze-Dried Bigel-Based Materials Composed of Sodium Alginate/Whey Protein Isolate Hydrogel and Ethylcellulose/Sunflower Oil Oleogel. *Biomacromolecules*, 26(4), 2344-2355. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.4c01677>
 26. NOM-247-SSA1. Productos y Servicios. Cereales y sus Productos. Cereales, Harinas de Cereales, Sémolas o Semolinas. Alimentos a Base de: Cereales, Semillas Comestibles, de Harinas, Sémolas o Semolinas o sus Mezclas. Productos de Panificación. Disposiciones y Especificaciones Sanitarias y Nutrimientales. Métodos de prueba. Disponible en línea: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5100356&fecha=27/07/2009#gsc.tab=0
 27. Onacik-Gür, S., & Zbikowska, A. (2020). Effect of high-oleic rapeseed oil oleogels on the quality of short-dough biscuits and fat migration. *Journal of food science and technology*, 57(5), 1609-1618. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04193-8>
 28. Noonim, P., Rajasekaran, B., & Venkatachalam, K. (2022). Structural characterization and peroxidation stability of palm oil-based oleogel made with different concentrations of carnauba wax and processed with ultrasonication. *Gels*, 8(12), 763. <https://doi.org/10.3390/gels8120763>
 29. Pang, M., Shi, Z., Lei, Z., Ge, Y., Jiang, S., & Cao, L. J. G. Y. A. (2020). Structure and thermal properties of beeswax-based oleogels with different types of vegetable oil. *Grasas Y Aceites*, 71(4), e380-e380. <https://doi.org/10.3989/gya.0806192>