



Ingeniantes®

Año 11, No.2, Vol. 2

Revista de Investigación . Instituto Tecnológico Superior de Misantla

CII | CONGRESO
INTERNACIONAL
DE INGENIERÍAS

Crea con

latindex

ISSN 2395-9452



Edición Especial

Ingeniantes

Año 11 / No. 2 / Vol. 2

Información Legal

Ingeniantes, Año 11, No. 2, Vol 2. - diciembre 2024 - julio 2025, es una publicación semestral editada y publicada por el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, teléfono 01 (235) 323 60 18, página web citt.itsm.edu.mx. Editor responsable: Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2015-062512501200-203, ISSN 2395-9452, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología del ITSM, Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, fecha de última modificación, 30 de noviembre de 2024.

Actualmente indexada en la base de datos del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal LATINDEX, con número de registro 22843.

Se autoriza cualquier reproducción parcial de los contenidos o imágenes de la publicación siempre y cuando sea sin fines de lucro y para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente dando los créditos a los autores del artículo.

El contenido de los artículos publicados es responsabilidad de los autores y no representa el punto de vista del editor de la Revista Ingeniantes.

Cuerpo Editorial

Editor General
Instituto Tecnológico Superior de Misantla
Editor
Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas
Coeditor
Lic. Erik Balderas González

Administración

MII. Mayra Lizeth Méndez Oloarte

Propiedad Intelectual

Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología
Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas

Sistemas

Administrador de Sistemas
M.S.C. Fernando Alberto Hernández Guevara
Webmaster
L.I. Ana Marcela Gutiérrez Romero

Distribución

Publicación electrónica disponible en
citt.itsm.edu.mx/ingeniantes
Correo electrónico:
revista.ingeniantes@itsm.edu.mx
<https://www.latindex.org/latindex/ficha/22843>

Directorio

M.G.E. Jorge Alberto Lara Gómez

Director General, ITSM, Veracruz, México

Mtro. Arturo Olguin Hernández

Director Académico, ITSM, Veracruz, México

Lic. Julio Cesar Rosas Cruz

Director de Planeación y Vinculación, ITSM, Veracruz, México

Dr. Luis Alfonso Landero Hernández

Subdirector Académico, ITSM, Veracruz, México

Lic. Adriana López Trujillo

Subdirectora de Planeación, ITSM, Veracruz, México

Dra. María Cristina López Méndez

Subdirectora de Posgrado e Investigación, ITSM, Veracruz, México

M.C.E. Lidia Herrera Domínguez

Subdirectora de Vinculación, ITSM, Veracruz, México

L.A.E. Laura Eugenia Hernández Pérez

Subdirectora de Servicios Administrativos, ITSM, Veracruz, México

Comité de Revisión

Dr. Luis Eduardo Velázquez Contreras, US	SNII	Dra. María Victoria Carreras Cruz, UP
Dr. Luis Alberto Morales Rosales, UMSNH	SNII	Dr. Alfredo Alberto Morales Tapia, UV
Dr. Jesús P. Xamán Villaseñor, CENIDET	SNII	Dr. Ramón Álvarez López, UDG
Dr. Abel García Barrientos, UASLP	SNII	Dr. Gustavo Martínez Castellanos, ITSM
Dr. David Lara Alabazares, ITSM	SNII	Dr. Arturo Cabrera Hernández, ITSM
Dr. Gregorio Fernández Lambert, ITSM	SNII	Dr. Saúl Santiago Cruz, ITSM
Dra. Susana López Cuenca, ITSDZ	SNII	Dr. Joel Pozos Osorio, HUB2i
Dr. Javier Esquer Peralta, UNISON	SNII	Dra. Ana Lilia Sosa y Durán, ITSM
Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT	SNII	Dr. Guillermo Alfredo Arrijoja Carrera, UX
Dr. Eduardo Mael Sánchez Coronado, ITCV	SNII	Dr. Modesto Raygosa Bello, ITO
Dr. Jesús Antonio Álvarez Cedillo, IPN	SNII	Dr. Luis Alberto Nava Ordoñez, UPAEP
Dr. Roberto Ángel Meléndez Armenta, ITSM	SNII	Dr. Irahan Otoniel José Guzmán, ITSM
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez, CENIDET	SNII	Dr. Humberto Raymundo González Moreno, ITSM
Dr. José Jasson Flores Prieto, CENIDET	SNII	Dra. María Guadalupe Montes de Oca, ITSM
Dr. Adolfo Preciado Quiroz, ITSDZ	SNII	M.C. Clovis Nchikou, ITNL
Dr. José Luis Marín Muñiz, CV	SNII	M.I. Fernando Jurado Pérez, ITESI
Dr. Sergio Fabian Ruiz Paz, UNPA	SNII	M.I.I. Aarón Montiel Rosales, ITSPR
Dr. Julio César Chacón Hernández, UAT	SNII	M.I.I. Nayeli Montalvo Romero, ITSPR
Dr. Eddy Sánchez de la Cruz, ITSM	SNII	M.I.I. Gema del Carmen Jiménez Gómez, ITSAV
Dra. María Cristina López Méndez, ITSM	SNII	M.I.I. Mario Pérez Acosta, ITSM
Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo, ITSM	SNII	M.I.I. Leonardo Martínez Lara, ITSAV
Dr. José de Jesús Ibarra Montalvo, ITSDZ	SNII	M.S.C. Arnulfo Gamaliel Hernández González, ITSM
Dr. Andrés Blanco Ortega, CENIDET	SNII	M.I.M. Jorge Roa Díaz, ITSM
Dr. Juan Carlos González Hernández, ITM	SNII	M.C. Vladimir Zagoya Juarez, ITSM
Dr. Heriberto Esteban Benito, ITSNA	SNII	M.G.C. Eduardo Gutierrez Almaraz, ITSM
Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV	SNII	M.I.I. Giovanni Luna Chontal, ITSM
Dr. Sergio Aurelio Zamora Castro, UV	SNII	M.A. Luz del Carmen Muñoz Palacios, UTCV
Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, CENIDET	SNII	M.C. Joel Maurilio Morales García, ITSM
Dr. Daniel Martínez Navarrete, ITSAV	SNII	
Dra. Laura Celina Ruelas Monjardín, UV	SNII	
Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV	SNII	
Dr. Sergio Fabian Ruiz Paz, UNPA	SNII	
Dr. Arturo Pacheco Espejel, IPN	SNII	
Dr. Cuauhtémoc Guerrero Dávalos, UMSNH	SNII	
Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT	SNII	
Dr. José Pastor Rodríguez Jarquín, ITO	SNII	
Dr. Luis Enrique García Santamaría, ITSM	SNII	
Dr. Alan Rico Barragán, ITSM	SNII	
Dra. Alicia Martínez Rebollar, CENIDET	SNII	
Dr. Luis Mejía Macario, ITSM	SNII	

Comité de Revisión del CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍAS ITSM

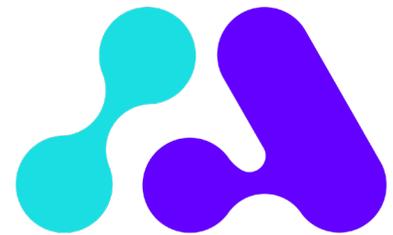
Dra. María Elena Hernández Hernández, TECNM / SMT
Dra. Silvia Sosol Sanchez, TecNM - Campus Huatusco
Dra. María del Refugio Castañeda, TecNM - ITBOCA
Dra. Julia Patricia Melo Morín, ITSP
Dr. Pablo Julián López González, ITSM
Dr. Miguel Ángel López Ramírez, ITSMA
Dra. Yasmin Soto Leyva, ITSH
Dr. Marcos Jesús Villaseñor Aguilar, ITESI
Dra. Violeta Jiménez Zárate, ITSP
Dr. Miguel Anguiano Sanchez, ITSI
Dr. Francisco Javier Mejía Ochoa, TECNM / ITSZ
Dr. Mario Luis Chew Hernández, TESC
Dra. Lidilia Cruz Rivero, TENMT
Dr. Luis Ernesto Irigoyen Arroyo, TECNM / SMT

M.I.S. Carmen Jeannette Sampayo Rodríguez, ITSH
M.E. Alejandro del Rey Torres Rodríguez, ITSM
M.C. Galdino Martínez Flores, ITSM
M.C. Guadalupe Rodríguez Martínez, ITSM
M.C.C. Nelly Beatriz Santoyo Rivera, ITSI
M.I.I. Carlos Angel Vicente Rodriguez, ITSM
M.C. Arturo Santos Gómez, TECNM / SMT
M.I.A. Edgar Jesús Cruz Solís, ITSH
M.T. Esther Mariela Arzate Escamilla, TecNM - ITSCH
ING. Héctor Rivero Vera, TESC IZCALLI



CONGRESO
INTERNACIONAL
DE INGENIERÍAS

Crea con



El Congreso Internacional de Ingenierías es un espacio multidisciplinario anual del Instituto Tecnológico Superior de Misantla, cuyo objetivo principal es compartir resultados de investigaciones científicas realizadas por estudiantes y académicos investigadores de los programas de ingeniería pertenecientes al Tecnológico Nacional de México, Centros de investigación e Instituciones de Educación Superior del país.

Las áreas de interés de esta edición están principalmente relacionadas con planeación estratégica, modelos de comercialización, análisis y simulación numérica, identificación de parámetros, estudios comparativos, fotogrametría, metaverso etc. Así mismo, todos los trabajos están dirigidos a especialistas en las distintas áreas de interés.

Los trabajos aceptados provienen de investigaciones experimentales, descriptivas, análisis o inferencias.

Ingeniantes



03



10



14



23



29



40

Contenido

Planeación Estratégica para Mejorar Eficiencia y Competitividad en una PYME Tomatera en Guasave, Sinaloa _____ 03
 Juan Héctor Alzate Espinoza, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Guasave

Análisis de canales digitales en una empresa retail para la aplicación de la responsabilidad social empresarial _____ 10
 Rosa Carmina Cardona Hondall; Nora Hilda González Durán; Javier Guzmán Obando; Juan Carlos Guzmán García, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Modelo de Comercialización de miel de abeja Meliponini en entorno de Economía Sostenible en Misantla, Veracruz _____ 14
 Lizbetty Díaz León, Saúl Santiago Cruz, Jarivanny Arlen Domínguez Montoya, Jorge Duran Martínez, Eber León Ramírez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Misantla

Elaboración de barras cilíndricas tomando como base desechos plásticos (PET), para el desarrollo de actividades didácticas _____ 23
 Axel Ab Shalom Fernández Cordero; Daniel Enrique Hernández Cortés, Alejandro Cecilio Jiménez Tejeda, Tecnológico Nacional de México / ITS de Teziutlán; Nayeli Montalvo Romero, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Aarón Montiel Rosales, Tecnológico Nacional de México / ITS de Teziutlán

Análisis multiespectral de imágenes satelitales para monitoreo de contaminantes en agua en el norte de Veracruz y sur de Tamaulipas _____ 29
 Edwin Daniel Méndez Cruz; Gabriel Grosskelwing Núñez; Saúl Santiago Cruz; Claudia Itzel Vázquez Moreno, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Misantla; Miguel Ángel López Ramírez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre

Análisis y simulación numérica del embutido de lámina de un acero inoxidable _____ 40
 Pedro de Jesús García Zugasti; Enrique Alejandro Vázquez Hernández; Juan Gabriel Sandoval Granja; Erick David Ríos Ayala; Gerardo García Liñán, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Luis Potosí

Ingeniantes



48



55



65



71



76



82

Identificación de parámetros de desempeño en las conexiones serie y paralelo con celdas solares _____ 48

Mario Espinosa Tlaxcaltecatl, Marco Antonio Alonso Pérez, Jacob Javier Vasquez Sanjuan, Juan Antonio Arizaga Silva, Carlos Muñiz Montero, Universidad Politécnica de Puebla

Software de Control para Brazo Manipulador empleado en la recolección de la cereza del café _____ 55

Alfredo Carrasco Aráoz; Mario Andrés Paredes Valverde; Luis Manuel García Martínez; Binisa Noemi Rivas Carrasco, Instituto Tecnológico de Teziutlan

Estudio del Comportamiento Térmico de Ecobaldosas usando el Método de Ganancias Térmicas a Través de Paredes _____ 65

Rogelio Arroyo Cruz, Ana Roselyn Pérez Méndez, Niñzi Balbuena Amador, Ana Isabel Campos Molina, María de Lourdes Díaz Chiñas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fotogrametría, alternativa para la evaluación de biomasa en humedales construidos _____ 71

Zayda Yamileth Ruiz Ramírez; Sandra Guadalupe García Aburto; Luis Carlos Sandoval Herazo, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Separador de polipropileno modificados con CaTiSiO_5 para baterías de iones de litio ___ 76

Balter Trujillo Navarrete; Mariela Mirza Ruiz Ramírez, Tecnológico Nacional de México\ IT de Tijuana; Jassiel Rolando Rodríguez Barrera, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

Desarrollo del Metaverso de la Escuela Superior de Huejutla: Estudio sobre desafíos y oportunidades en su implementación _____ 82

Jonathan Martínez Flores; Christian Hernández Hernández; Jesús Jaime Hernández Hernández; Jorge Hernández Camacho, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo / Escuela Superior de Huejutla



Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Planeación Estratégica para Mejorar Eficiencia y Competitividad en una PYME Tomatera en Guasave, Sinaloa



Colaboración

Juan Héctor Alzate Espinoza, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Guasave

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 07 de octubre de 2024

RESUMEN: Este estudio examina la planeación estratégica en una PYME tomatera en Guasave, Sinaloa, con el objetivo de evaluar las prácticas actuales y comprender su impacto en la eficiencia operativa y la competitividad. A través de un enfoque mixto, que incluye una encuesta estructurada y observación participante, se analizaron diferentes etapas del proceso de planificación, encontrando variaciones en la formalidad y sistematización que afectan la capacidad de la empresa para adaptarse a las demandas del mercado. Se utilizaron herramientas como el análisis VOPLES y PESTEL para identificar barreras internas y factores externos que influyen en la competitividad. Los datos fueron analizados mediante pruebas estadísticas, incluyendo la prueba *t* de Student y correlaciones de Pearson, lo que permitió obtener resultados cuantitativos que complementaron el análisis cualitativo. Este estudio ofrece una descripción detallada de las prácticas actuales y sus implicaciones en la resiliencia económica y sostenibilidad futura.

PALABRAS CLAVE: Competitividad, eficiencia operativa, planeación estratégica.

ABSTRACT: This study examines strategic planning in a tomato SME in Guasave, Sinaloa, with the objective of evaluating current practices and understanding their impact on operational efficiency and competitiveness. Through a mixed-method approach, including a structured survey and participant observation, different stages of the planning process were analyzed, revealing variations in formality and systematization that affect the company's ability to adapt to market demands. Tools such as the VOPLES and PESTEL analyses were used to identify internal barriers and external factors influencing competitiveness. The data were analyzed using statistical tests, including the Student's *t*-test and Pearson correlations, which provided quantitative results that complemented the qualitative analysis. This study offers a detailed description of the current practices and their implications for the company's economic resilience and future sustainability.

KEYWORDS: competitiveness, operational efficiency, Strategic planning.

INTRODUCCIÓN

En el contexto competitivo actual, las pequeñas y medianas empresas (PYMEs) del sector agrícola enfrentan diversos desafíos que pueden comprometer su sostenibilidad y crecimiento, particularmente en economías emergentes como la de México. La planeación estratégica se ha identificado como un factor crucial para mejorar la eficiencia operativa y la competitividad de estas empresas [1]. En el sector agrícola, donde las fluctuaciones del mercado y los cambios en las regulaciones son constantes, la implementación de estrategias adecuadas puede marcar la diferencia entre el éxito y el fracaso [2]. Sin embargo, la falta de formalización y sistematización en los procesos de planeación estratégica sigue siendo una barrera significativa para muchas PYMEs, limitando su capacidad de respuesta a las demandas del entorno [3].

Diversos estudios han demostrado que las empresas que adoptan enfoques estructurados en su planificación estratégica logran optimizar mejor sus recursos y mejorar su rendimiento operativo [4]. Específicamente, en el sector agrícola mexicano, la adopción de herramientas analíticas como el análisis PESTEL y el enfoque VOPLES ha permitido identificar no solo las barreras internas, sino también los factores externos que influyen en la competitividad de las PYMEs [5]. Estas herramientas proporcionan un marco para la toma de decisiones estratégicas, abordando tanto los aspectos internos de la gestión como las influencias externas que pueden afectar la rentabilidad de la empresa [6].

Este estudio se centra en una PYME dedicada a la producción de tomate en Guasave, Sinaloa, con el objetivo de evaluar sus prácticas de planeación estratégica y proponer mejoras que fortalezcan su competitividad en el sector agroindustrial. La relevancia de esta investigación radica en la necesidad de comprender cómo las PYMEs agrícolas pueden adaptarse a un entorno en constante cambio, particularmente frente a la creciente presión por implementar prácticas sostenibles y enfrentar los desafíos impuestos por las fluctuaciones en los precios de los insumos agrícolas [7]. Además, el uso de metodologías cuantitativas y cualitativas, como las correlaciones de Pearson y las pruebas t de Student, proporciona una visión integral de los procesos estratégicos y su impacto en la eficiencia operativa [8].

MATERIAL Y MÉTODOS

Este estudio se llevó a cabo en una PYME tomatera ubicada en Guasave, Sinaloa, entre enero y junio de 2024. Los datos obtenidos provienen directamente de la empresa a través de documentos internos y la interacción con personal clave. La población de la empresa consta de 50 empleados, de los cuales se seleccionó una muestra de 10 individuos, pertenecientes a los niveles gerenciales y mandos medios, mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia. La metodología empleada sigue un enfoque mixto, combinando técnicas cualitativas y cuantitativas, con el objetivo de obtener una visión integral de la planeación estratégica y su impacto en la eficiencia operativa y la competitividad de la empresa.

La observación participante, llevada a cabo mediante visitas programadas a la empresa, permitió analizar el comportamiento del personal en sus actividades productivas, considerando el liderazgo, la cultura organizacional y el ambiente laboral. Para este análisis, se utilizaron herramientas cualitativas como el análisis VOPLES (Ventajas, Oportunidades, Problemas, Limitaciones, Expectativas y Soluciones), adaptado para identificar y categorizar las barreras internas y las oportunidades de mejora en los procesos operativos de la empresa. A través de este análisis, se identificaron limitaciones en la formalización de ciertos procedimientos clave, lo que afectaba la capacidad de la empresa para monitorear el rendimiento operativo de manera eficiente.

Asimismo, se empleó el análisis PESTEL (Político, Económico, Social, Tecnológico, Ecológico y Legal) para evaluar los factores externos que influyen en la competitividad de la PYME. Este análisis permitió comprender cómo las fluctuaciones en los precios del mercado, las regulaciones agrícolas locales y los avances tecnológicos impactaban directamente en la toma de decisiones estratégicas. Por ejemplo, se identificaron desafíos relacionados con las políticas gubernamentales agrícolas y la creciente demanda de prácticas sostenibles en la producción de tomate, lo que subraya la necesidad de que la empresa adapte su planeación estratégica a estas presiones externas.

Se complementó esta observación con una encuesta estructurada aplicada a los 10 individuos seleccionados de la muestra. La encuesta, medida en una escala de Likert de 5 puntos, evaluó las percepciones de los empleados sobre la eficiencia operativa y la planeación estratégica. Los datos cuantitativos fueron analizados utilizando estadística descriptiva, obteniendo frecuencias, medias y desviaciones estándar, así como correlaciones de Pearson para evaluar la relación entre las prácticas estratégicas y el rendimiento operativo. Se realizó una prueba t de Student para contrastar la hipótesis de que una planeación estratégica adecuada mejoraría significativamente la eficiencia operativa y la competitividad de la empresa. Los resultados fueron considerados estadísticamente significativos con un valor $p < 0.05$.

Todos los datos recolectados fueron expresados en unidades del Sistema Internacional de Unidades (SIU), asegurando la precisión en las mediciones, y se utilizó Microsoft Excel para el análisis cualitativo de los datos obtenidos de la observación participante, y Minitab para el análisis estadístico de los datos cuantitativos.

RESULTADOS

El análisis de los datos obtenidos permitió identificar barreras internas, oportunidades de mejora en los procesos operativos y factores externos que influyen en la competitividad de la PYME tomatera. A través del análisis cualitativo VOPLES, se destacaron varios problemas organizacionales, entre los cuales la falta de formalización de procesos clave, la resistencia al cambio entre los mandos medios y la comunicación deficiente entre áreas fueron los más críticos. Estas barreras afectan significativamente la eficiencia operativa, reduciendo la capacidad de la empresa para optimizar sus recursos y reaccionar de manera ágil a las condiciones cambiantes del mercado.

La falta de formalización de procesos clave, identificada como la barrera más recurrente, impide la creación de estándares operativos consistentes y dificulta la medición del rendimiento de las actividades diarias. Sin procedimientos claros, las tareas quedan sujetas a la interpretación individual de los empleados, lo que ge-

nera variabilidad en los resultados y aumenta el margen de error. Además, esta falta de estructura dificulta la implementación de mejoras continuas, lo que reduce la capacidad de la empresa para adaptarse a nuevas tecnologías o prácticas que podrían mejorar su competitividad. La ausencia de formalización afecta no solo la ejecución diaria de las tareas, sino también la capacidad de la empresa para alinearse estratégicamente con las demandas del mercado.

Otra barrera significativa es la resistencia al cambio entre los mandos medios y la comunicación deficiente entre áreas. La resistencia al cambio afecta la implementación de nuevas estrategias o tecnologías, lo que crea una cultura organizacional estancada y poco receptiva a mejoras. Al mismo tiempo, la falta de una comunicación clara entre departamentos genera malentendidos y cuellos de botella en los procesos, lo que impacta negativamente la coordinación y la toma de decisiones en toda la organización. Estas barreras dificultan la capacidad de la empresa para adoptar enfoques estratégicos que optimicen la eficiencia operativa y fortalezcan su competitividad. La Tabla 1 detalla estas barreras y su frecuencia, mientras que la Figura 1 ofrece una representación visual de las mismas.

Tabla 1. Barreras Internas Identificadas a través del Análisis VOPLES

Categoría	Frecuencia
Falta de formalización de procesos clave	6
Resistencia al cambio	4
Comunicación deficiente entre áreas	5
Falta de capacitación técnica	3
Ausencia de indicadores claros de rendimiento	2

Fuente: Elaboración propia.

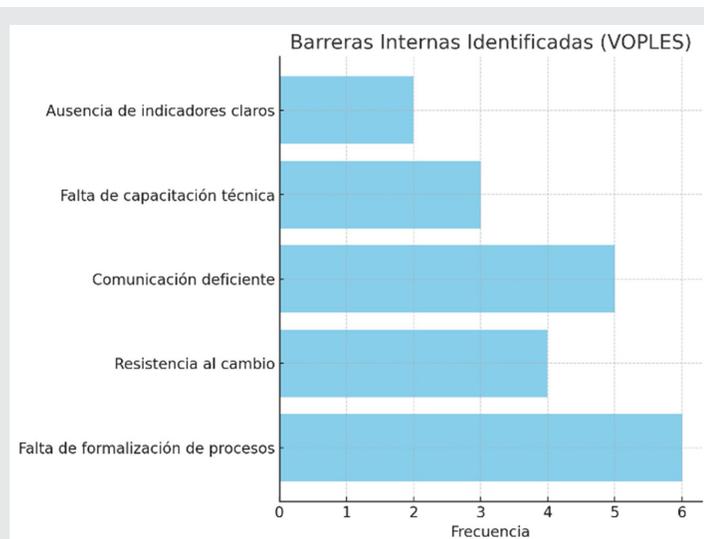


Figura 1. Barreras Internas Identificadas (VOPLES)

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 1, la falta de formalización de procesos clave y la comunicación deficiente entre áreas destacan como las barreras más relevantes dentro de la organización. La falta de formalización se refiere a la carencia de procedimientos estandarizados, lo cual genera inconsistencias en la manera en que se realizan las tareas diarias, dejando espacio a la interpretación personal de cada empleado. Esto no solo afecta la uniformidad en la ejecución de las actividades, sino que también limita la capacidad de la empresa para medir de manera precisa su rendimiento operativo. Sin un seguimiento adecuado, se vuelve difícil identificar áreas específicas que requieren mejoras, lo que retrasa la implementación de prácticas de optimización continua que podrían aumentar la eficiencia general de la organización. Además, la falta de procesos formales impide que la empresa se alinee con normas y estándares de calidad reconocidos, lo que limita su competitividad a largo plazo.

La comunicación deficiente entre departamentos amplifica estos problemas al generar una fragmentación organizacional que afecta la coordinación de actividades clave. Cuando no existen canales de comunicación efectivos, es más probable que se generen malentendidos entre las áreas, lo que a su vez conduce a una desconexión en los objetivos estratégicos. Esto crea silos de información, donde los departamentos operan de manera aislada, sin compartir datos críticos o colaborar de forma efectiva. La consecuencia directa de esta falta de coordinación es el aumento de errores operativos, tales como la duplicación de esfuerzos, retrasos en los tiempos de respuesta y decisiones mal informadas. En el entorno competitivo actual, donde la agilidad y la capacidad de respuesta rápida son factores clave, esta falta de comunicación afecta seriamente la capacidad de la empresa para adaptarse a las demandas del mercado o reaccionar ante cambios en las condiciones externas, como nuevas regulaciones o fluctuaciones en los precios.

En conjunto, estas barreras —la falta de formalización de procesos y la comunicación deficiente— tienen un impacto significativo y multifacético en la eficiencia operativa de la empresa y su capacidad para competir en el mercado. La falta de formalización, al no contar con procedimientos claramente definidos, genera inconsistencias en la ejecución de las actividades diarias, lo que provoca una variabilidad innecesaria en los resultados. Esto afecta tanto la calidad del trabajo como la eficiencia con la que se ejecutan las tareas, ya que los empleados no tienen una guía clara sobre los pasos que deben seguir, lo que aumenta el margen de error y reduce la predictibilidad en los resultados operativos. Este escenario, además, dificulta el monitoreo de desempeño, dado que la falta de estandarización imposibilita la aplicación de métricas precisas para evaluar el rendimiento, lo que a su vez retrasa la toma de decisiones fundamentadas en datos.

La comunicación deficiente entre áreas agrava aún más la situación. Los departamentos operan de manera fragmentada, lo que genera silos de información y crea barreras que impiden el flujo adecuado de datos críticos que son necesarios para la coordinación de actividades. Esto no solo provoca malentendidos y retrasos en los procesos, sino que también afecta la integración de los esfuerzos estratégicos, reduciendo la efectividad de las decisiones organizacionales. Sin una comunicación fluida, la empresa enfrenta mayores desafíos a la hora de implementar estrategias de mejora continua, ya que cualquier cambio o innovación requiere una colaboración interdepartamental efectiva. La falta de interacción y alineación entre áreas también dificulta la respuesta rápida a los problemas operativos, lo que incrementa los tiempos de resolución de fallos, ocasionando mayores costos y pérdidas de eficiencia.

La combinación de estas barreras no solo compromete la operación diaria de la empresa, sino que también afecta su capacidad para adaptarse y crecer de manera sostenible. La implementación de innovaciones tecnológicas o metodologías de mejora, como Lean Manufacturing o Six Sigma, que requieren una base sólida de procesos estandarizados y una buena comunicación entre áreas, se vuelve casi imposible en este entorno. La vulnerabilidad operativa que surge de estas debilidades internas expone a la empresa a un mayor riesgo de fallos sistémicos que pueden tener repercusiones serias en su capacidad de competir en un mercado cada vez más dinámico y globalizado. En sectores como el agrícola, donde la eficiencia operativa y la flexibilidad ante los cambios en la oferta y la demanda son cruciales, estas barreras no solo reducen la competitividad, sino que también ponen en peligro la estabilidad económica de la empresa, afectando su viabilidad a largo plazo.

Por lo tanto, la incapacidad de la empresa para resolver estas barreras internas no solo disminuye su productividad y su capacidad de respuesta ante los cambios del mercado, sino que también restringe su potencial de crecimiento. A largo plazo, la falta de una estructura sólida y una comunicación fluida puede derivar en un aumento de los costos operativos, la pérdida de oportunidades comerciales y, finalmente, en una reducción significativa de la competitividad frente a otras empresas del sector que sí logran implementar mejoras continuas. Este escenario obliga a la empresa a repensar sus estrategias de gestión interna, priorizando la creación de procedimientos formales y una cultura de comunicación que promueva la colaboración y la transparencia entre las diferentes áreas, si desea asegurar su crecimiento sostenible y su permanencia en el mercado.

En la Figura 2, se observa que los empleados consideran el liderazgo como el factor más influyente en la

competitividad, seguido por la planeación estratégica en la mejora de la eficiencia. Estos resultados reflejan una percepción general de que la implementación de estrategias de planeación adecuadas podría mejorar significativamente la competitividad de la empresa.

Tabla 2. Resultados de la Encuesta de Percepción sobre la Planeación Estratégica y Eficiencia Operativa.

Pregunta	Media	Desviación Estándar
La planeación estratégica mejora la eficiencia	4.2	0.6
La formalización de procesos es clave para el éxito	3.9	0.7
El liderazgo influye en la competitividad	4.4	0.5
Las políticas externas impactan la toma de decisiones	4.1	0.8

Fuente: Elaboración propia.

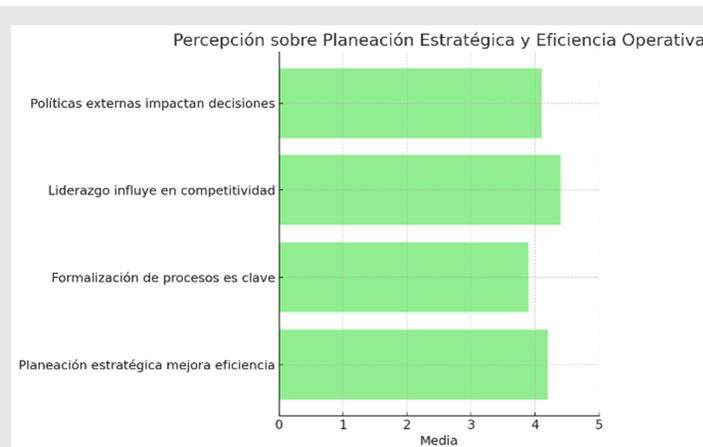


Figura 2. Percepción Sobre Planeación Estratégica Y Eficiencia Operativa.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis cuantitativo mostró una correlación significativa entre la planeación estratégica y la eficiencia operativa, con un coeficiente de Pearson de 0.75 ($p < 0.05$), lo que indica una relación positiva moderada. Esto sugiere que una mejora en la formalización de procesos estratégicos impacta directamente en el rendimiento operativo de la empresa. Estos resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Correlación entre Planeación Estratégica y Eficiencia Operativa.

Variable	Coefficiente de Pearson (r)	Significación (p-value)
Planeación Estratégica vs. Eficiencia Operativa	0.75	0.03

Fuente: Elaboración propia.

Además, la prueba *t* de Student confirmó una diferencia significativa en la eficiencia operativa antes y después de la implementación de estrategias de planeación. Los resultados, con un *t*-valor de 2.89 y un *p*-value de 0.02, destacan que una planificación adecuada mejora significativamente la eficiencia operativa, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Prueba *t* de Student: Impacto de la Planeación Estratégica en la Eficiencia Operativa.

Variable	t-valor	p-value
Planeación Estratégica vs. Eficiencia	2.89	0.02

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el análisis PESTEL reveló que la competitividad de la PYME tomatera está significativamente influenciada por una combinación de factores externos, especialmente las fluctuaciones en los precios de los insumos agrícolas, como los fertilizantes, pesticidas y semillas. Estos productos han experimentado variaciones de precios debido a factores globales como la inestabilidad en la cadena de suministro y el aumento de la demanda de productos sostenibles, lo que ha generado una presión económica considerable sobre las pequeñas empresas. Adicionalmente, las regulaciones locales que impulsan el uso de prácticas agrícolas sostenibles, como la reducción de emisiones y la gestión adecuada del agua, están obligando a las empresas a adoptar cambios importantes en sus operaciones.

El 70% de los encuestados dentro de la empresa identificó que, aunque estas normativas representan un desafío, la adopción de tecnologías avanzadas, como el riego de precisión y la agricultura de conservación, es vista como una solución viable para enfrentar estos cambios. La implementación de estas tecnologías no solo facilita el cumplimiento de las regulaciones ambientales, sino que también mejora la eficiencia operativa, lo que puede ayudar a mitigar los impactos financieros a largo plazo.

En la Figura 3, se presenta un gráfico de radar que muestra cómo los distintos factores externos evaluados en el análisis PESTEL afectan la competitividad de la empresa. El gráfico resalta la importancia de las presiones tecnológicas y ecológicas, que están interrelacionadas con los factores regulatorios. En particular, se observa que la adopción de tecnologías es crucial para abordar tanto las demandas ecológicas como los requisitos legales, lo que permite a la empresa mantenerse competitiva y adaptable en un entorno que cambia rápidamente.

La empresa se rige por valores éticos establecidos, conocidos por el personal, lo cual se refleja en la satisfacción de los clientes y el crecimiento de la organización.

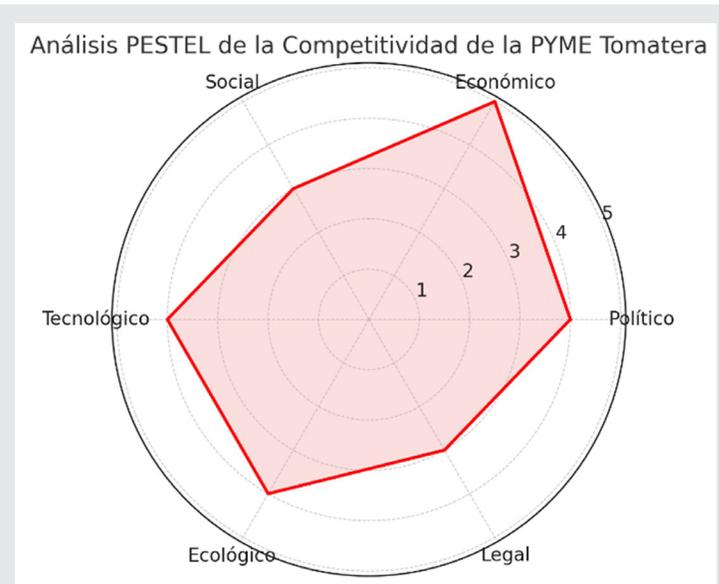


Figura 3. Análisis PESTEL de la Competitividad de la PYME Tomatera.

Fuente: Elaboración propia.

Este enfoque mixto de análisis cualitativo y cuantitativo permitió identificar barreras internas y proponer estrategias que podrían mejorar tanto la eficiencia operativa como la competitividad de la empresa.

CONCLUSIONES

El estudio sobre la planeación estratégica en la PYME tomatera de Guasave, Sinaloa, ha revelado una serie de barreras internas que limitan la competitividad y la eficiencia operativa de la empresa. La principal barrera identificada es la falta de formalización en los procesos estratégicos, lo que afecta negativamente la capacidad de la empresa para adaptarse a las demandas cambiantes del mercado y para optimizar sus operaciones diarias. Aunque la empresa sigue algunas etapas de planificación, se observan inconsistencias en la aplicación sistemática de estas prácticas, lo que genera deficiencias operativas.

Los empleados señalaron, a través de la encuesta estructurada, que la eficiencia operativa de la empresa se percibe como moderada, pero con áreas críticas que requieren atención inmediata, particularmente en la falta de procedimientos formalizados. Además, la observación participante confirmó que la empresa carece de un sistema de monitoreo efectivo para evaluar el rendimiento en tiempo real, lo que impide una toma de decisiones basada en datos precisos y oportunos.

El análisis VOPLES permitió identificar oportunidades importantes para mejorar la competitividad de la empresa, incluyendo la posibilidad de fortalecer la cadena de suministro mediante alianzas locales y la adopción de tecnologías avanzadas para el monitoreo de los procesos productivos. También se identificaron expectativas claras por parte del personal y de la gerencia en

cuanto a la necesidad de implementar una estrategia formalizada que permita a la empresa ser más competitiva en el mercado agrícola.

El análisis PESTEL demostró que la empresa enfrenta desafíos externos significativos, entre ellos la volatilidad de los precios de los insumos agrícolas y las regulaciones locales en torno a las prácticas agrícolas. Estos factores externos tienen un impacto directo en la competitividad de la empresa y requieren que se adopte un enfoque dinámico en la planificación estratégica, uno que pueda anticipar y responder adecuadamente a las presiones del entorno, como las demandas de sostenibilidad.

Desde el punto de vista cuantitativo, la correlación positiva entre la formalización de los procesos estratégicos y la competitividad de la empresa ($r = 0.75$, $p < 0.05$) indica que una planeación más estructurada podría mejorar significativamente el rendimiento operativo. Los resultados obtenidos mediante la prueba t de Student mostraron que una mejor planeación estratégica está relacionada directamente con una mayor eficiencia operativa, lo que refuerza la necesidad de que la empresa invierta en la formalización de sus procesos.

Para mejorar continuamente y adaptarse a los desafíos identificados, es recomendable la implementación de un sistema de gestión de calidad basado en normas ISO que permita estructurar los procesos de planificación y monitoreo. Adicionalmente, la capacitación del personal en técnicas de gestión estratégica contribuiría a un proceso de toma de decisiones más ágil y basado en datos. Asimismo, la adopción de tecnologías de monitoreo en tiempo real mejoraría la capacidad de la empresa para reaccionar rápidamente ante cambios en el mercado y optimizaría sus procesos operativos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico Superior de Guasave por su invaluable apoyo y contribución al desarrollo de esta investigación. Agradezco especialmente a los directivos, docentes y colaboradores de la institución, cuyo compromiso con la excelencia académica y la investigación permitió que este estudio se llevara a cabo con éxito. Su respaldo ha sido fundamental para avanzar en el conocimiento y la innovación en el ámbito de la planeación financiera y competitividad en el sector agroindustrial.

BIBLIOGRAFÍA

[1] J. Rodríguez y A. Pérez, "La planificación estratégica en el sector agrícola," **Journal of Agricultural Planning**, vol. 29, no. 2, pp. 34-45, 2021.

[2] M. García *et al.*, "Optimización de recursos en PYMEs agrícolas," **Revista de Economía Agrícola**, vol. 45, no. 1, pp. 88-105, 2019.

[3] S. Hernández y J. Martínez, "Planeación estratégica en pequeñas empresas agrícolas," **International Journal of Agricultural Management**, vol. 18, no. 4, pp. 123-135, 2020.

[4] J. Lee, J. Ni, D. Djurdjanovic, H. Qiu, y H. Liao, "Intelligent prognostics tools and e-maintenance," **Computers in Industry**, vol. 57, no. 6, pp. 476-489, 2020.

[5] A. López *et al.*, "El impacto de la sostenibilidad en la competitividad agrícola en México," **Revista Mexicana de Agricultura**, vol. 54, no. 1, pp. 47-59, 2020.

[6] I. P. S. Ahuja y J. S. Khamba, "Total productive maintenance: literature review and directions," **International Journal of Quality & Reliability Management**, vol. 25, no. 7, pp. 709-756, 2020.

[7] T. Wireman, **Total Productive Maintenance**, New York, NY, USA: Industrial Press Inc., 2020.

[8] A. H. C. Tsang, "Strategic dimensions of maintenance management," **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, vol. 8, no. 1, pp. 7-39, 2021.





Economía,
administración
y turismo

Ingeniantes

Análisis de canales digitales en una empresa retail para la aplicación de la responsabilidad social empresarial



Colaboración

Rosa Carmina Cardona Hondall; Nora Hilda González Durán; Javier Guzmán Obando; Juan Carlos Guzmán García, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Fecha de recepción: 17 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2024

RESUMEN: El presente trabajo analiza la Responsabilidad Social Empresarial como una parte importante en una empresa retail de la zona sur del estado de Tamaulipas. Se realizó un estudio a los canales digitales, esto se trabajó con una etnografía digital y una entrevista al Community Manager.

Los resultados sirvieron como base para la propuesta de las sugerencias en la implementación de campañas de Responsabilidad Social para que pueda mejorar su posicionamiento y que tanto clientes internos como externos vean a la organización confiable y que esto le ayudará en su productividad.

La Responsabilidad Social Empresarial (RSE) es relevante en las empresas y parte importante que se relaciona con la Imagen Corporativa. La etnografía se presenta como un método interdisciplinario y es generadora de datos que se observan y dan el resultado de darle un mayor seguimiento en especial a la página institucional de la tienda, ya que solamente se inclina a lo comercial.

PALABRAS CLAVE: Canales digitales, empresa retail, etnografía digital, imagen corporativa, responsabilidad social empresarial.

ABSTRACT: This research analyzes the Corporate Social Responsibility as an important part in a retail company of the southern area of the state of Tamaulipas. A study is carried out on digital channels, this was worked with a digital ethnography and an interview with the Community Manager.

The results suggest for implementing Social Responsibility campaigns so that you can improve your positioning and that both internal and external customers see the organization as reliable and this will help you in your productivity.

Corporate Social Responsibility (CSR) is relevant in companies and an important part that relates to the Corporate Image. Ethnography is presented as an interdisciplinary method and it generates data that can be observed and which results in a greater follow-up, especially to the institutional page of the store, since it only tends towards the commercial.

KEYWORDS: Corporate image, Corporate social responsibility, digital channels, digital ethnography, retail company.

INTRODUCCIÓN

La Responsabilidad Social Empresarial (RSE) se ha estudiado desde diferentes perspectivas siendo parte relevante en las empresas [1]; tal es el caso en la zona sur de Tamaulipas que contó con pilares como Grupo Tampico y Grupo Continental, que en su momento trabajaron la RSE, buscando el crear valor social, ambiental y económico.

Actualmente las empresas de diversos sectores se inclinan por buscar la mejora continua y ser parte de la creación de buenas prácticas conscientes y sostenibles; además, es un antecedente importante relacionado con la Imagen Corporativa, que hace referencia sobre la intención del comportamiento del consumidor [2], buscando generar fidelidad y confianza en los clientes, como sucede en la Zona Sur del Estado de Tamaulipas, que se cuenta con varias tiendas retail nacionales e internacionales, por ejemplo: HEB, Wall Mart, Soriana, Arteli, Chedraui, por mencionar algunas.

Asimismo, se debe tener de referencia el desempeñar acciones de RSE que mejoren la Imagen Corporativa de un sector [3]. Algunas ideas pueden ser más sustentables, generando impactos positivos en los que se beneficie a la sociedad, al medio ambiente y también a la misma organización.

Según [3], una organización se preocupa más allá de las ganancias, identificando lo que una sociedad ocupa en su entorno. Sobre todo, al implementar apoyos en los que beneficia a la sociedad, pero a su vez es de utilidad para mejorar su imagen.

La RSE es una herramienta que aumenta la competitividad en una organización [4]; esta, debe satisfacer todo lo que necesiten tanto los clientes, los proveedores, los trabajadores y la misma comunidad. Esta última se percatará de las actividades positivas que genere la organización misma que en un tiempo determinado reflejarán ser más competitiva. Además, la RSE ayuda a la fidelidad y que exista una mejor relación con los trabajadores de la organización.

La etnografía se profundiza al poder aplicarse de manera epistemológica y metodológica. En [5], se afirma que “es una realidad que se construye con la vivencia de sus actores”.

Por lo anterior, para el desarrollo del estudio, la etnografía digital fue fundamental en este análisis. Debido a que [6], la etnografía digital es un método que continúa con prácticas sociales de disciplinas como la comunicación, antropología y ciencias de la computación.

Además, encontraron que se puede trabajar de manera onlife, esto quiere decir que en la dinámica de las redes sociales digitales se trabaja en una interacción que puede ser en línea y fuera de línea.

La etnografía digital se presenta como un método interdisciplinario que se presenta dinámico conforme a la práctica y a la generación de datos observados.

Es importante tomar en cuenta que, aunque sus raíces sean de la etnografía clásica, tiene características específicas para un análisis de objetos de estudio que se encuentran en la parte onlife [6].

MATERIAL Y MÉTODOS

Metodología

Con respecto a lo anteriormente explicado, se compartió el análisis en la Figura 1 donde existió una recopilación de opiniones sobre las prácticas de RSE las cuales tienen un grado de importancia en las organizaciones y los consumidores quienes consideran que es importante la relación con los clientes como primer lugar y posteriormente los derechos humanos.

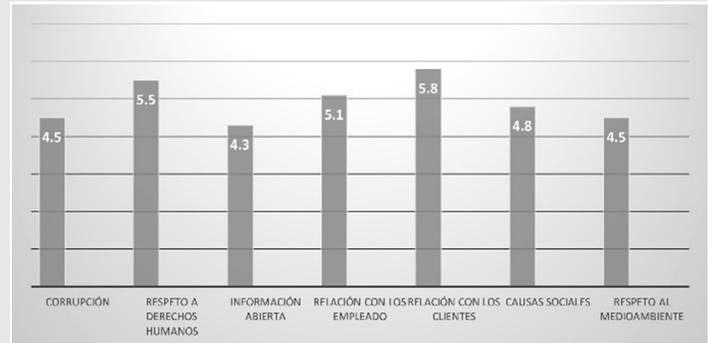


Figura 1. Valoración de las empresas en relación a la RSE.

Fuente: Elaboración Lara Manjarrez, I. A., & Sánchez Gutiérrez, J. (2020) con base en Observatorio de la RSC 2010.

Para este trabajo se realizó un análisis de canales digitales en una empresa retail en la zona sur de Tamaulipas para la identificación de interacciones y prácticas en la RSE.

Dentro de la Metodología se dio a la tarea de trabajar una etnografía digital en la cual será importante entender que “la etnografía nos ofrece la promesa de poder acercarnos a la comprensión de cómo las personas interpretan el mundo que las rodea o cómo organizan sus vidas” [7].

Además, se escogió a la etnografía digital por ser un método inmersivo que permite obtener un retrato multifacético de la realidad seleccionada [7].

A su vez, de acuerdo con el tipo de investigación, el enfoque del estudio se trabajó con un método cualitativo entrevistando al Community Manager de la tienda para la interacción de esta en este tipo de prácticas.

Dentro de este análisis se compartió la Figura 2 con el análisis de Facebook de esta tienda retail.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Primera Etapa	Fecha de las Acciones en red	Acciones de red	Me gusta	Reacciones	Comentarios	Interacciones	Compartir publicación	Construcción de imágenes, Colores institucionales.	Contenido o capturas	Visualización	Comunicación organizacional (información para público externo, promociones y folletos digitales)	Responsabilidad social empresarial (Actividades)
1- Facebook	10 de Marzo	14	463	1	2	0	10	17	0	0	0	15
	11 de Marzo	10	436	2	2	0	0	10	0	0	0	10
	12 de Marzo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13 de Marzo	9	576	0	44	0	0	9	0	0	0	9
	14 de Marzo	10	634	1	4	0	16	9	0	0	0	10
	15 de Marzo	11	534	1	7	0	8	11	0	0	0	11
	16 de Marzo	4	535	0	7	0	15	4	0	0	0	4
	17 de Marzo	15	467	0	5	0	2	15	0	0	0	15
	18 de Marzo	13	489	1	4	0	10	13	0	0	0	13
	19 de Marzo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20 de Marzo	4	354	0	1	0	0	4	0	0	0	4
	21 de Marzo	4	532	0	6	0	14	4	0	0	0	4
	22 de Marzo	14	500	0	1	0	11	14	0	0	0	14
	23 de Marzo	9	552	0	8	0	15	9	0	0	0	9
	24 de Marzo	8	400	0	0	0	0	8	0	0	0	8
	25 de Marzo	14	445	2	2	0	11	14	0	0	0	14

Figura 2. Analisis de red social.

Elaboración propia.

RESULTADOS

Se comparte el análisis de una matriz donde se revisan los canales digitales en un periodo de tiempo para ver las prácticas en la RSE ya que es importante darle difusión.

Dentro del trabajo realizado a la página institucional y a la red social en este caso Facebook, se considera un buen uso en la parte de la comunicación organizacional, sin embargo, en la parte de dar a conocer actividades como empresa socialmente responsable, se vieron nulas las publicaciones; estas van de la mano con las visualizaciones, interacciones de los usuarios.

En lo que respecta a su página institucional, se revisa a diario y se observa que tiene iconos para enlazarte a sus redes sociales, compras en línea, datos como términos y condiciones, preguntas frecuentes, quejas y sugerencias, facturación, proveedores, historia de la tienda, facturación, correo electrónico.

Pero no se vio alguna cápsula o nota informativa, más que lo usual de sus productos.

En la entrevista con el Community Manager, dentro de los aspectos que se trataron fueron la dinámica de su manejo de promociones y la comunicación que tiene con sus clientes al darle retroalimentación a los comentarios en las redes sociales. Se le sugirió el uso de cápsulas informativas, videos, imágenes sobre las actividades como una empresa socialmente responsable.

CONCLUSIONES

A manera de conclusión, se puede decir que la RSE, es pilar no solamente para la productividad o posicionamiento de una empresa, también para ser aplicada como una herramienta que genera beneficios a la sociedad, idea que comparten diferentes autores anteriormente referenciados.

En el caso de la tienda retail de la Zona Sur, deberá comenzar a pensar en la RSE y tomarla en cuenta como una inversión para su organización que será de gran beneficio para su público interno y externo.

Además, existe una oportunidad para darle un seguimiento y estar en una mejora continua.

Esta cadena en la zona sur del Estado de Tamaulipas se pueda alinear a los puntos importantes que se consideran para que exista una buena interacción y prácticas que beneficien su construcción de imagen corporativa.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Echeverría-Ríos, O. M., Abrego-Almazán, D., & Medina-Quintero, J. M. (2018). *La responsabilidad social empresarial en la imagen de marca afectiva y reputación*. *Innovar*, 28(69), 133-147.

<https://doi.org/10.15446/innovar.v28n69.71703>.

[2] Cha, J. B., & Jo, M. N. (2019). *The effect of the corporate social responsibility of franchise coffee shops on corporate image and behavioral intention*. *Sustainability*, 11(23), 6849.

[3] Hinojosa-López, J. I., Ayup González, J., & Cogco-Calderón, A. R. (2020). *Imagen corporativa y satisfacción laboral en potenciales empleados del sector bancario*. *Investigación administrativa*, 49(125).

[4] Lara Manjarrez, I. A., & Sánchez Gutiérrez, J. (2020). *Responsabilidad social empresarial para la competitividad de las organizaciones en México*. *Mercados Y Negocios*, (43), 97-118.

<https://doi.org/10.32870/myn.v0i43.754>.

[5] Montes de Oca Barrera, L. B. (2015). *Entre activistas, funcionarios e industriales: Aplicación de la etnografía-enfocada y política-en escenarios de gobernanza*. *Nueva antropología*, 28(83), 25-46. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-06362015000200003&lng=es&tlng=es.

[6] Barajas, K. B., & Carreño, N. P. (2019). *Desafíos de la etnografía digital en el trabajo de campo online*. *Virtualis*, 10(18), 134-151.

[7] Hine, C. (2011). *Etnografía virtual*. Editorial uoc.





Economía,
administración
y turismo

Ingeniantes

Modelo de Comercialización de miel de abeja Meliponini en entorno de Economía Sustentable en Misantla, Veracruz

RESUMEN: En la Región Sierra de Misantla, cerca de 144 familias conservacionistas en la actualidad se dedican al desarrollo de la meliponicultura (cría de abejas nativas) como una alternativa para generar ingresos adicionales a los producidos por la miel de *Apis melífera* y el cultivo de café, la cual se ve segada por la ausencia de un modelo de negocio que formalice los procesos de producción y comercialización de la miel y sus derivados. El objetivo de este trabajo es diseñar un modelo de negocio para la producción y comercialización de miel de abeja sin aguijón en Misantla. Como resultado se obtuvo la plantilla de modelo de negocio para la producción y comercialización de miel de abejas sin aguijón en la región, basado en la herramienta Business Canvas, donde se desglosan los resultados por cada una de las variables que componen el modelo. Por tanto, se observa que en un entorno de economía sustentable la producción y comercialización de miel de abejas Meliponini ofrece una serie de beneficios tanto para el medio ambiente como para las comunidades locales. En primer lugar, contribuyen a la polinización de los cultivos como el café y el maíz que se encuentran en sembradío de los productores. En segundo lugar, desde una perspectiva económica, fuente de ingresos complementaria sostenible para comunidades rurales, especialmente en regiones donde estas abejas son nativas contribuyendo al desarrollo económico de la Región Sierra de Misantla.

PALABRAS CLAVE: meliponicultura, modelos de negocio, miel de abeja sin aguijón Meliponini.



Colaboración

Lizbetty Díaz León, Saúl Santiago Cruz, Jarianny Arlen Domínguez Montoya, Jorge Duran Martínez, Eber León Ramírez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Misantla

Fecha de recepción: 02 de octubre de 2024

Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2024

ABSTRACT: In the Sierra de Misantla region, around 144 conservationist families are currently engaged in the development of meliponiculture (native bee breeding) as an alternative to generate additional income to that produced by *Apis melífera* honey and coffee cultivation, which is hampered by the absence of a business model that formalizes the processes of production and marketing of honey and its derivatives. The objective of this work is to design a business model for the production and marketing of stingless bee honey in Misantla. The result was a business model template for the production and marketing of stingless bee honey in the region, based on the Business Canvas tool, where the results are broken down by each of the variables that make up the model. Therefore, it is observed that in a sustainable economic environment, the production and marketing of Meliponini bee honey offers a series of benefits for both the environment and local communities. First, they contribute to the pollination of crops such as coffee and corn that are planted by producers. Secondly, from an economic perspective, they are a sustainable complementary source of income for rural communities, especially in regions where these bees are native, contributing to the economic development of the Sierra de Misantla Region.

KEYWORDS: meliponiculture, business models, stingless bee honey Meliponini.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la población de polinizadores –en especial las abejas– ha disminuido de manera preocupante, debido principalmente a prácticas agrícolas intensivas, cambios en el uso de la tierra, plaguicidas (incluidos los insecticidas neonicotinoides), especies exóticas invasoras, enfermedades, plagas y el cambio climático (ONU, 2023).

Estas abejas nativas anidan tanto en cavidades disponibles, como en espacios abiertos, haciéndolas vulnerables a la caza indiscriminada de la miel. El método que emplean para extraer la miel de los recipientes de almacenamiento, es incorrecto, debido a que se pierde una cantidad considerable de polen donde contiene parte de la cría, conduciendo a la destrucción del nido y el árbol. En consecuencia, se hace necesario emprender esfuerzos para su conservación mediante un buen manejo de ellas. En varios estados del sureste de México (como Guerrero, Puebla, Chiapas, Veracruz y Quintana Roo), se está utilizando este concepto para la conservación de las abejas a través de la promoción de la meliponicultura (manejo de las abejas sin aguijón) según (Marie Vandame, 2019).

La meliponicultura en México es una actividad practicada a muy pequeña escala por productores aislados y de forma artesanal al no contar con apoyo suficiente del gobierno. La actividad fue abandonada por muchos años debido a diferentes factores como: 1. La sustitución de las abejas sin aguijón por *Apis Melífera*, 2. la pérdida del conocimiento tradicional, 3. las deficiencias en el manejo de plagas, las sequías y huracanes y 4. los impactos derivados de la agricultura y ganadería (Ujjwal , Kundu, Bisui, & Karmakar b, 2021) son los principales problemas que enfrenta esta incipiente industria.

Los meliponicultores de la región necesitan incorporar tecnologías y buenas prácticas para mejorar su producción y comercialización. Para ello, entre los principales problemas que enfrentan son: falta de experiencia en la administración, producción, comercialización y mercadeo de productos que le generen ingresos derivados de la meliponicultura; poca capacitación acerca de la actividad económica que realizan, así como la ausencia de una herramienta conceptual que permita formalizar y potenciar la producción y comercialización de los productos derivados de la meliponicultura (Osterwalder, 2004). Estos productos por ser muy selectos pueden agregar valor e incorporarse a segmentos de mercado diferentes de acuerdo a sus presentaciones, incrementando con esto sus utilidades.

Por lo expuesto anteriormente, el proyecto pretende integrar a las familias de meliponicultores mediante el diseño de un modelo de negocio quedando demostrado que resulta técnico-económicamente factible la producción y comercialización de miel virgen de las abejas meliponas en Misantla, Veracruz como actividad complementaria de los meliponicultores de la región.

Por tanto, se plantea como objetivo general de la investigación: diseñar un modelo de negocios para la producción y comercialización de miel virgen en un entorno de economía sustentable en la Región Sierra de Misantla, Veracruz.

MATERIAL Y MÉTODOS

La investigación fue ejecutada en la Región Sierra de Misantla con la asistencia de 144 familias meliponicultoras que se dedican a la actividad económica meliponicultura (cría de abejas nativas). Se realizó un análisis de manera independiente y conjunta de las variables que integran un modelo de negocio, a través de un estudio descriptivo de las características del proceso de producción y comercialización de la miel virgen de las abejas meliponas en la región de Misantla, lo que permitió establecer un tipo de investigación descriptiva con enfoque cuantitativo, apoyado en la metodología propuesta por (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

La investigación se fundamentó en utilizar la recolección de datos mediante la revisión literaria y de campo con visitas realizadas a los meliponicultores con el objetivo de recopilar información acerca del manejo y las técnicas de producción que emplean por medio de encuestas. En la Figura 1 se muestra la metodología a seguir para el desarrollo de la investigación.

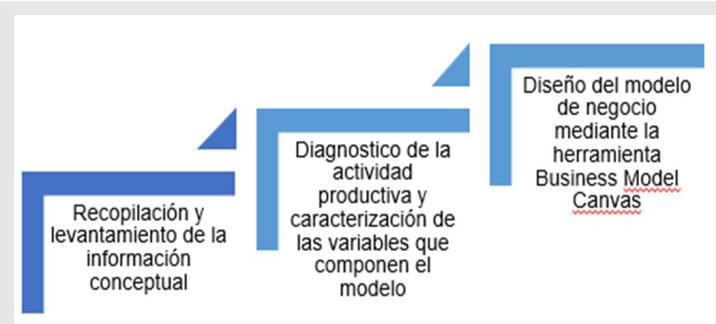


Figura 1. Etapas de la metodología para el desarrollo de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

Etapa 1: Recopilación y levantamiento de la información conceptual

El desarrollo de la etapa se realizó mediante la revisión de 43 referencias bibliográficas comprendidas entre los años 1999-2023 destacando los últimos cinco años relacionadas con el análisis de contexto, la meliponicultura, tipos de colmenas artesanales y tecnificadas, tipos de meliponarios, definiciones de modelo de negocio dada por diferentes autores, los enfoques, así como los tipos de modelos de negocio. Además, se enfatizó en modelos de negocios implementados en la actividad económica de meliponicultura. Para ello, se consultaron 11 tesis de investigación de diferentes universidades tanto nacionales como internacionales, 6 libros, 20 artículos científicos de revistas como: Springer Science Business Media New York, Acta Zoológica Mexicana, Food Control, Dialnet, Zookeys, Interciencia, Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias SciElo, British Food Journal; Trends in Food Science and Technology, Sociobiology An international journal on social insects.; además de 1 informe emitido por la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos naturales (SEMARNAT) y 10

visitas a sitios web de artículos periodísticos del Diario de Xalapa con el objetivo de recabar información del contexto regional.

Etapa 2: Diagnóstico de la actividad productiva y caracterización de las variables que componen el modelo

En la segunda etapa se realizó un diagnóstico de la actividad meliponicultura efectuada por las familias meliponicultoras de la región de Misantla en cuanto a la producción y comercialización de la miel Melipona. La recogida de la información se realizó mediante el instrumento de recolección de información (encuesta) a los productores de la región. La encuesta se estructura con 38 preguntas abiertas y cerradas de opción múltiple que deben responder los informantes. Con temas relacionados con información general de los meliponarios, sistema productivo (etapas de producción, compra de insumos, procesamiento, venta o comercialización, disposición de residuos). Para la validación del instrumento se empleó el método de Delphi, donde se definieron como expertos a 2 productores con 5 años de experiencia en la actividad y que poseen una gran cantidad de colmenas, así como 2 productores que comienzan a desarrollarla pero que cuentan con técnicas de manejo tecnificadas. El cálculo de la muestra se realizó de forma probabilística con un índice de confiabilidad del 95%, una probabilidad de éxito del 50%, un tamaño de población de 144 productores y un límite aceptable de error muestral de 10%, determinando un tamaño de muestra de 58 encuestados.



Figura 2. Modelo Business Model Canvas.
Fuente: Elaboración propia.

Etapa 3: Diseño del modelo de negocio mediante la herramienta Business Model Canvas

Con la información recopilada de la etapa anterior, se diseña el Modelo de Negocio utilizando la herramienta Business Canvas compuesta por nueve segmentos (Fi-

gura 2). Esta herramienta se aplica a negocios en funcionamiento permitiendo visualizar de manera precisa los elementos del modelo, ayudando a identificar oportunidades y desafíos que puedan enfrentar, así como facilitando la toma de decisiones en beneficio de las familias de meliponicultores de la región de Misantla. Como resultado se obtendrá la plantilla de modelo de negocio desarrollado para la producción y comercialización de la miel de abejas meliponas en la región.

RESULTADOS

Como resultado de la encuesta aplicada los años de experiencia en la actividad oscilan de 1 a 5 años, en la Figura 3 se muestra que el 40% de los encuestados cuentan con 2 años, el 26% con 3 años, el 15% con 4 años, el 10% con 5 años y el 9% con 1 año, lo que indica que gran parte de los meliponicultores se encuentran iniciando en la misma.

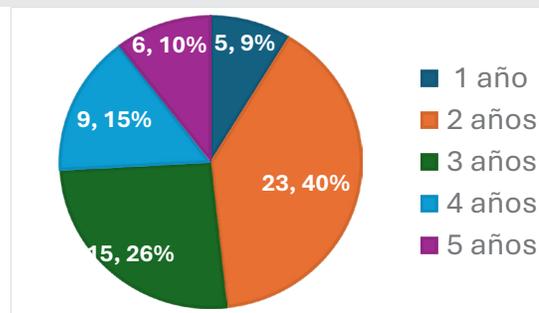


Figura 3. Años de experiencia en el desarrollo de la actividad de meliponicultura.

Fuente: Elaboración propia.

El lugar donde tienen ubicados sus colmenas el 60% alega que se encuentran en los traspacios de las casas y el 40% en meliponarios construidos con las condiciones mínimas necesarias para su protección. La Figura 4 expone que el rango de la cantidad de colmenas que poseen va de 1 hasta 50 colmenas donde el 35% declara que tienen de 1 a 10, el 33% de 11 a 20, el 12% de 21 a 30; así como el 10% de 31 a 40 y de 40 a 50 colmenas respectivamente. Por tanto, la mayor parte de los encuestados son pequeños meliponicultores.

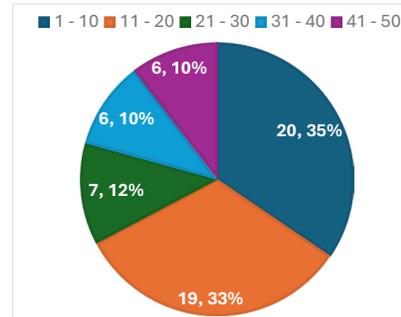


Figura 4. Cantidad de colmenas que poseen los meliponicultores encuestados

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las cajas racionales de colmenas empleadas se aprecia en la Figura 5 que el 69 % de los encuestado manejan la caja racional rustica dígase hobones (troncos) y/o tinajas de barro u otros materiales y el 31 % emplean la caja racional tecnicada, lo que demuestra que la actividad es predominantemente artesanal. El uso de este tipo de caja racional hace que en el momento de la cosecha la miel se contamine con polen, cera u otros residuos perdiendo calidad e inocuidad.



Figura 7. Caja racional tecnicada vertical.
Fuente: Elaboración propia.

Las cajas racionales tecnicadas vertical se encuentran en el mercado a precios desde \$250.00 hasta \$450.00 pesos MXM, donde el 33% y el 27 % de los encuestados declararon que la han adquirido a un precio de \$ 350.00 y \$400.00 MX respectivamente (Figura 8). El principal proveedor de estas cajas racionales lo constituyen los carpinteros de la región.

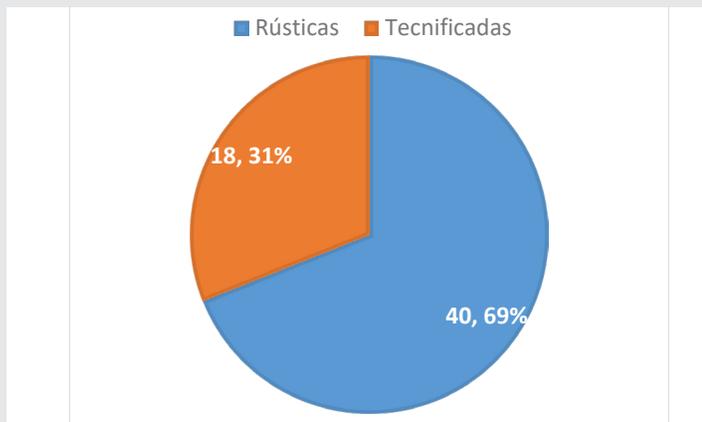


Figura 5. Tipo de caja racional para colmenas de abejas meliponas que emplean los meliponicultores.
Fuente: Elaboración propia.

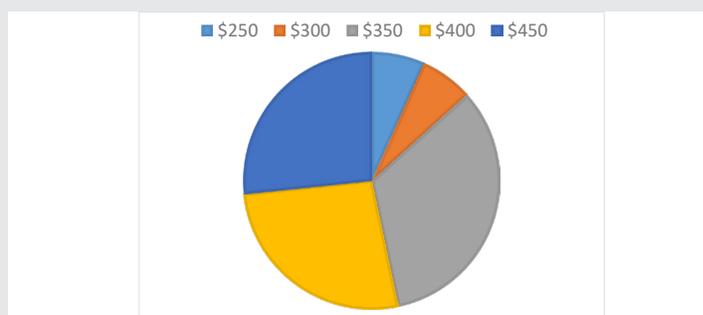


Figura 8. Precio de las cajas racional tecnicada.
Fuente: Elaboración propia.

Del porcentaje de encuestados que alegan emplear la caja racional tecnicada, el 72 % de ellos utilizan es el modelo horizontal como se muestra en la Figura 6, repitiéndose el mismo comportamiento que con las cajas racionales rusticas en el momento de la cosecha, debido a que el nido y los potes de miel se encuentran unidos dentro de la misma caja, pues no presenta divisiones internas que permita separar el nido de la mielera o los potes donde almacenan la miel.



Figura 6. Caja racional tecnicada horizontal.
Fuente: Elaboración propia.

Mientras que el 38% está comenzando a emplear la caja racional tecnicada vertical que se compone de dos cubos de 22x22x22 cm donde una división es el nido y la otra la melaría, además de la tapa como se muestra en la Figura 7. La madera utilizada para su fabricación es cedro.

La producción comienza con las fuentes de obtención del pie de cría o colmenas que pueden ser mediante: donación, extracción o trasiego, compra, división o trampeo. El 38% de los meliponicultores comenzaron la actividad con colmenas que obtuvieron mediante el trampeo, el 24% por compra, el 14 % por donación y/o trasiego como se muestra en la Figura 9.

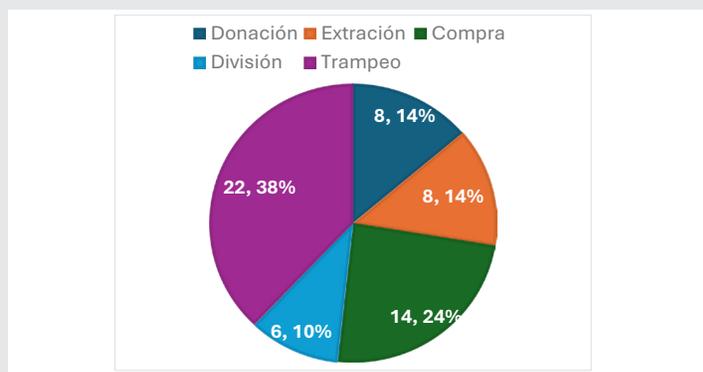


Figura 9. Fuentes de obtención del pie de cría o colmenas.
Fuente: Elaboración propia.

El 71% de los encuestados citaron que la producción promedio de miel anual por colmena es de 500 ml, lo

que indica que la producción de miel de estas abejas es bajo no llega al litro por colmena, pero sus propiedades medicinales curativas la hacen alcanzar un valor significativo en el mercado. En cuanto a la especie de abeja sin aguijón más empleada en la producción el 71% de los encuestados declaro la *Scaptotrigona mexicana* coincidiendo así con estudios realizados anteriormente sobre la distribución de las especies de abeja sin aguijón en el estado de Veracruz, constituyendo la especie que más predomina debido a las condiciones climáticas favorables que se desarrollan en la Región Sierra de Misantla.

El tipo de envase empleado para envasar la miel para su comercialización el 66% declaro que utilizan botellas de plásticos y el 34 % botellas de vidrio de 250, 500, 750 y 1000 mililitros (ml) respectivamente. Los meliponicultores mencionan que además de la miel, obtienen otros productos de sus colmenas, pero en menor proporción como: polen, propóleo, cera, material vivo (núcleos, paquetes de abejas y colmenas), productos alimenticios (paletas y caramelos de miel, etc.), productos cosméticos (jabón, cremas, shampoo, etc.) y productos medicinales (jarabes, extractos, etc.).

Con respecto a su comercialización el principal mercado es la ciudad de Misantla en tiendas de alimentos y farmacias botánicas, su comunidad (lugar donde viven) mientras que en lugares como Xalapa, Martínez de la Torre y Puebla poseen como potenciales clientes a pequeñas empresas de alimentos y bebidas, así como farmacias comprometidas con la sostenibilidad.

En cuanto a la promoción de la miel, el 43% alega que no la promociona dado que no ve la necesidad de hacerlo debido al desconocimiento de herramientas de marketing, el 31% lo hace mediante anuncios en la plataforma de Facebook en grupos de compra-venta de productos en el mercado informal y el 26% lo promocionan mediante WhatsApp en grupos de venta de productos.

El precio de un litro de miel Melipona en el mercado puede llegar alcanzar hasta los \$1500 pesos MXM debido a sus propiedades fisicoquímicas medicinales y cicatrizante que la hacen alcanzar tan alto valor. La Figura 10 muestra que el 16% y 17% de los encuestados cita que venden el litro de miel dentro del rango de \$800-\$900 pesos MXM en el mercado y que incluso algunos han llegado a vender el litro de miel al precio de \$1350 pesos MXM.

El principal competidor son los productores de la miel de la abeja *Apis Melífera* esto se debe a la diferencia de precio que existe entre ambas, lo que la hace más competitiva en el mercado. Otro competidor fuerte lo constituyen los competidores desleales o cazadores indiscriminados en su habitat. Y por último la competencia que existe entre los mismos meliponicultores

para ver quien domina el mercado, de ahí se deriva la variedad de precios en que puedes encontrar 1 litro de miel virgen.

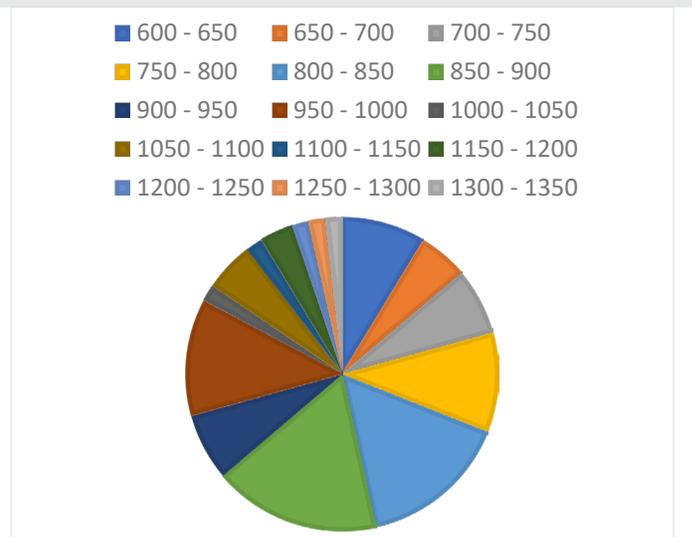


Figura 10. Precio de 1 litro de miel Melipona en el mercado de la Región Sierra de Misantla.

Fuente: Elaboración propia.

Derivado de los resultados obtenidos de la aplicación del instrumento de recolección de datos (encuesta) se efectuó la Matriz FODA (ANEXO A) donde se determinaron las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas que presentan para fomentar su negocio y poder posicionarse en el mercado.

Procedente del análisis realizado se obtuvo la plantilla de modelo de negocio para la producción y comercialización de miel de abejas sin aguijón en la Región Sierra de Misantla, Veracruz, basado en la herramienta Business Canvas como se muestra en la Figura 11:

ALIADOS CLAVE Apicultores locales y comunidades indígenas. Organizaciones de conservación ambiental. Proveedores de envases ecológicos y materiales de empaque. Instituciones educativas para programas de concienciación.	ACTIVIDADES CLAVE Cuidado y mantenimiento de las colmenas. Recolección y procesamiento de la miel. Promoción y marketing de los productos. RECURSOS CLAVE Colmenas de abejas Meliponini. Instalaciones de procesamiento de miel. Equipo de apicultores con conocimiento de sostenibilidad.	PROPUESTA DE VALOR Miel de las abejas Meliponini 100% virgen, natural y sostenible. Proceso de producción respetuoso con el medio ambiente. Contribución a la conservación de las abejas y a la biodiversidad. Sabor auténtico y diferenciado.	RELACION CON CLIENTES Atención personalizada y educativa sobre la importancia de las abejas Meliponini. Creación de una comunidad en línea para compartir información y experiencias. CANALES DE DISTRIBUCION Tiendas físicas especializadas en productos sustentables. Plataformas de comercio electrónico. Ferias y mercados locales.	SEGMENTO DE CLIENTES Consumidores conscientes con el medio ambiente. Amantes de productos orgánicos y naturales. Tiendas especializadas en productos orgánicos. Empresas de alimentos y bebidas comprometidas con la sostenibilidad.
ESTRUCTURA DE COSTOS Costos de producción de la miel. Gastos de marketing y publicidad. Costos de distribución y logística. Investigación y desarrollo.		FLUJOS DE INGRESOS Venta de miel de abeja Meliponini en diferentes presentaciones. Productos complementarios como propóleo y cera de abejas. Talleres y eventos educativos sobre apicultura sustentable.	 Plataformas de comercio electrónico.	

Figura 11. Plantilla de Business Model Canvas Meliponicultura.

Fuente: Elaboración propia.

1. Segmentos de Clientes:

- Consumidores locales conscientes del medio ambiente.
- Farmacias amantes de productos orgánicos y naturales.

- Tiendas locales especializadas en productos sustentables.
 - Empresas de alimentos y bebidas comprometidas con la sostenibilidad.
- 2. Propuesta de Valor:**
- Miel de abejas Meliponini 100% natural y sostenible.
 - Proceso de producción respetuoso con el medio ambiente.
 - Contribución a la conservación de las abejas y la biodiversidad.
 - Miel con propiedades físico químicas medicinales.
 - Sabor auténtico y diferenciado.
- 3. Canales de Distribución:**
- Tiendas físicas especializadas en productos sustentables.
 - Plataformas de comercio electrónico.
 - Distribuidores locales comprometidos con la sostenibilidad.
 - Ferias y mercados orgánicos.
- 4. Relaciones con los Clientes:**
- Atención personalizada y educativa sobre la importancia de las abejas Meliponini.
 - Comunicación transparente sobre el proceso de producción sustentable.
 - Creación de una comunidad en línea para compartir información y experiencias.
- 5. Fuentes de Ingresos:**
- Venta de miel de abejas Meliponini en diferentes presentaciones.
 - Productos complementarios como propóleo y cera de abejas.
 - Talleres y eventos educativos sobre apicultura sustentable.
- 6. Recursos Clave:**
- Colmenas de abejas Meliponini.
 - Instalaciones de procesamiento de miel (meliponarios).
 - Equipo de apicultores con conocimientos en sostenibilidad.
 - Capital para investigación y desarrollo.
 - Red de distribución establecida.
- 7. Actividades Clave:**
- Cuidado y mantenimiento de las colmenas.
 - Recolección y procesamiento de la miel.
 - Promoción y marketing de los productos.
 - Investigación continua para mejorar la sostenibilidad y calidad del producto.
- 8. Alianzas Clave:**
- Apicultores locales y comunidades indígenas.
 - Organizaciones de conservación ambiental.
 - Proveedores de envases ecológicos y materiales de empaque.
 - Instituciones educativas para programas de concienciación.
- 9. Estructura de Costos:**
- Costos de producción de la miel.
 - Gastos de marketing y publicidad.
 - Costos de distribución y logística.
 - Investigación y desarrollo.

Este modelo Canvas proporciona una visión general de los aspectos clave para desarrollar un negocio de producción y comercialización de miel de abejas Meliponini en un entorno de economía sustentable.

CONCLUSIONES

La producción y comercialización de miel de abejas Meliponini en un entorno de economía sustentable ofrece una serie de beneficios tanto para el medio ambiente como para las comunidades locales. En primer lugar, contribuyen a la polinización de los cultivos como el café y el maíz que se encuentren en sembradíos de los productores, favoreciendo al mantenimiento de la biodiversidad y la reproducción de plantas. En segundo lugar, en su manejo y cuidado son menos invasivos que el de las abejas melíferas comunes, lo que puede reducir el impacto negativo en los ecosistemas. En tercer lugar, desde una perspectiva económica, la producción y comercialización de miel de abejas Meliponini puede representar una fuente de ingresos complementaria sostenible para comunidades rurales, especialmente en regiones donde estas abejas son nativas contribuyendo al desarrollo económico de la Región Sierra de Misantla. En cuarto lugar, promueve prácticas de manejo respetuosas con el medio ambiente que fomentan la conservación de las abejas en su habitat.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Adame, D. (2022). *Instalación y manejo de meliponarios para la especie Melipona Beecheii, en el estado de Yucatán, México. Tesis. CDMX.*

[2] Álvarez Carranza, S. M. (2023). *Modelo de negocio para generar oportunidades y potenciar la producción y comercialización de miel de abeja de la Asociación de Apicultores de San Martín-Bajo Caliente, Puntarenas. Heredia. Costa Rica: Universidad Nacional.*

[3] Arnold, N., Zepeda, R., Vásquez Dávila, M., & Aldasoro Maya, M. (2018). *Las abejas sin aguijón y su cultivo en Oaxaca, México: con catálogo de especies. Chiapas: El Colegio de la Frontera Sur.*

[4] Ayala, Ricardo. (1999). *Ayala: Abejas sin aguijón de México.*

[5] Ayala, R., & González, V. H. (2013). *Mexican Stingless Bees (Hymenoptera: Apidae): Diversity, Distribution, and Indigenous Knowledge. Springer Science Business Media New York.*

[6] Baena-Díaz, F., Chévez, E., & Porter-Bolland, L. (2023). *¿Qué sabemos de las abejas sin aguijón (Hymenoptera: Apidae Meliponini) en México?: Diversidad, Ecología y polinización. Acta Zoológica Mexicana (nueva serie), 17.*

[7] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación*

ción (6ta ed.). Ciudad de México: Mc. GRAW-HILL / Interamericana Editores, S.A. de C.V.

[8] Marie Vandame, D. B. (2019). *Bases ecológicas y sociales para la conservación y el manejo de las abejas sin aguijón en Oaxaca, México**. Ciudad de México: El Colegio de la Frontera Sur, SCLC.

[9] Mercado, P. A. (2019). *Diseño de un modelo de negocio para la producción y comercialización de miel de abeja "Tetragonisca Angustula" para la Asociación de Apicultores Conservacionista de la Sierra Nevada de Santa Marta*. Barranquilla: Universidad del Norte.

[10] ONU. (19 de mayo de 2023). *Dependemos de la supervivencia de las abejas*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas.

[11] Osterwalder, Alexander; Pigneur, Yves. (2010). *Business Model Generation: A handbook for visionaries, game changers and challengers*. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

[12] Quezada-Euán, J. J., Mayo-Itzá, G., & González-Aceretoc, J. A. (2015). *La meliponicultura en México: problemas y perspectivas de desarrollo*. Taylor & Francis, 37-41.

[13] Real-Luna, N., Rivera-Hernández, J. E., Alcántara-Salinas, G., Rojas-Malavasi, G., Morales-Vargas, A. P., & Pérez-Sato, J. A. (2022). *Las abejas sin aguijón (Tribu Meliponini) en los agroecosistemas de América Latina*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 331-344.

[14] Román, D. (2021). *Comparación de colmenas cuadráticas y octagonales en la conservación de especie y la producción de miel*. Tesis. Moyobamba, Peru.

[15] Rosso Londoño, J. M., & Nates-Parra, G. (2023). *Meliponicultura: una actividad generadora de ingresos y servicios ambientales*. LEISA Revista de Agroecología.

[16] Sánchez López, E. (2017). *Plan de negocios sostenible para la comercialización de miel de Melipona por un grupo de cooperativas de producción agropecuaria y artesanal de Tulum, Quintana Roo, México*. Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza Escuela de Posgrado.

[17] Sánchez, M. (25 de mayo de 2023). *Urge cuidar a las abejas sin aguijón que viven en Veracruz*. *Diario de Xalapa*.

[18] SEMARNAT. (2023). *La meliponicultura en México: un acercamiento a las prácticas tradicionales y a las perspectivas de su manejo contemporáneo*. Ciudad de México: Semarnat.

[19] Schmidt, S. (2022). *Para resolver el problema de la diversidad de la miel de abejas brasileñas*. *Pesquisa FAPESP*.

[20] Sommeijer, M. J. (2021). *Apicultura con abejas sin aguijón: un nuevo tipo de colmena*. Taylor & Francis.

[21] Ujjwal, L., Kundu, A., Bisui, S., & Karmakar b, P. (2021). *Impacto del manejo de colonias de abejas sin aguijón y abejas melíferas occidentales*. ELSEVIER.

[22] Vásquez-García, A., Sangerman-Jarquín, D., & Schwentesius Rindermann, R. (2022). *Caracterización de especies de abejas nativas y su relación biocultural en la Mixteca oaxaqueña*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*.

[23] Veit, D; Clemons, E; Benlian, A; Buxmann, P; Hess, T; Kundisch, D; Leimeister, JM; Loos, P; Spann, M;. (2014). *Business Models. An Information Systems Research Agenda*. *Business & Information Systems Engineering - Research Notes*, 45-53.

[24] Wikström, K., Artto, K., Kujala, J., & Söderlund, J. (2010). *Business models in project business*. *International Journal of Project Management*, ELSEVIER, ScienceDirect.

[25] Zuñiga Barbosa, D. A. (2020). *Estudio de factibilidad para la creación de empresa Meliponario Diezubar Salonica Riofrio*. Zarzal: Universidad del Valle.



ANEXO A Matriz FODA.

No.		FORTALEZAS
1		Las propiedades fisicoquímicas medicinales que posee la miel.
2		La variedad de productos variados que se pueden obtener de la colmena. independientemente de la miel.
3		Contribución de las abejas a la polinización de los cultivos agrícolas.
4		La actividad meliponicultura se encuentra como una incipiente industria con visión de fortalecimiento en el futuro como nicho de mercado.
5		El bajo impacto ambiental, la meliponicultura no emite gases de efecto invernadero.
6		Requiere poca mano de obra para su manejo.
		DEBILIDADES
1		El tipo de caja racional que emplean para el manejo de estas abejas, donde la mayor parte de los encuestados utilizan la caja rustica.
2		La efectividad del trapeo.
3		La pérdida de calidad e inocuidad de la miel durante la cosecha.
4		Después del proceso de trasiego las colmenas obtenidas pueden debilitarse o perderse por completo.
5		Insuficiente apoyo del gobierno para contribuir al desarrollo y tecnificación de la actividad.
6		El proceso de extracción de la miel es artesanal.
7		Falta de capacitación en cuanto al manejo de las abejas y de estrategias de marketing.
8		El mercado no se encuentra definido y segmentado correctamente con el objetivo de introducir o potencial el producto.
9		Llegada de las abejas Apis Melíferas durante el proceso de la cosecha.
10		Elevado precio de las cajas racionales verticales tecnificadas en el mercado.
		AMENAZAS
1		El robo de las colmenas cuando se está realizando el trapeo.
2		El cambio climático el cual está provocando el aumento de diversos impactos que afectan a las abejas (incremento de las temperaturas, los fenómenos naturales extremos, escasas e irregulares lluvias, expansión de las patologías que las dañan)
3		Poca floración en los meses de diciembre y enero.
4		El uso de plaguicidas por los agricultores en la producción agrícola.
5		La deforestación indiscriminada de los bosques contribuyendo a la desaparición de la flora y el polen que necesitan para alimentarse.
6		La falta de una regulación específica por parte del gobierno que respalde la actividad de meliponicultura.
		OPORTUNIDADES
1		El interés de mercados internacionales por la miel de las abejas nativas.
2		El incremento del interés del gobierno por la tecnificación de la actividad meliponicultura en la región.
3		La posibilidad de expansión del mercado.

Fuente: Elaboración propia.



Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Elaboración de barras cilíndricas tomando como base desechos plásticos (PET), para el desarrollo de actividades didácticas

RESUMEN: El tereftalato de polietileno (PET), un plástico conocido por su durabilidad y resistencia, está encontrando nuevas y sostenibles aplicaciones en la industria gracias a su reciclaje. En lugar de recurrir a materiales costosos como el aluminio o el acero, las barras cilíndricas fabricadas con PET reciclado están emergiendo como una solución económica y ecológica. Este enfoque no solo ofrece una alternativa accesible para instituciones educativas como el CETis 111 Vicente Guerrero, donde los estudiantes de mecánica industrial pueden beneficiarse de estas piezas recicladas, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental. El proceso de fabricación de estas barras comienza con la recolección y trituración de botellas PET usadas, que se convierten en pequeños fragmentos llamados "flakes". Estos flakes se funden y se transforman en barras cilíndricas mediante extrusión, un método que asegura productos uniformes y de calidad. Una vez enfriadas y procesadas, las barras de PET reciclado están listas para su uso industrial. Además de reducir costos, el PET reciclado juega un papel crucial en la reducción de residuos plásticos, ayudando a mitigar el impacto ambiental de la producción de plásticos vírgenes. Sin embargo, en México, la contaminación por PET sigue siendo un problema significativo, con residuos plásticos que afectan tanto la estética como la salud pública en comunidades cercanas a escuelas y áreas residenciales. El reciclaje de PET puede ser una solución parcial a esta problemática, pero es necesario adoptar un enfoque integral que incluya educación sobre reciclaje, mejora de la infraestructura de gestión de residuos y políticas más estrictas para enfrentar de manera efectiva la contaminación por PET.

En resumen, la utilización de PET reciclado para fabricar barras cilíndricas no solo es una práctica beneficiosa para la industria y el medio ambiente, sino que también destaca la necesidad de estrategias más amplias para gestionar la contaminación por plásticos en nuestras comunidades.

PALABRAS CLAVE: Sustentabilidad, Sostenibilidad, Reciclaje, Capacitación, Reaprovechamiento.



Colaboración

Axel Ab Shalom Fernández Cordero; Daniel Enrique Hernández Cortés, Alejandro Cecilio Jiménez Tejeda, Tecnológico Nacional de México / ITS de Teziutlán; Nayeli Montalvo Romero, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Aarón Montiel Rosales, Tecnológico Nacional de México / ITS de Teziutlán

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 10 de octubre de 2024

ABSTRACT: Polyethylene Terephthalate (PET), a plastic known for its durability and resistance, is finding new sustainable industrial applications through recycling. Instead of relying on costly materials like aluminum or steel, cylindrical bars made from recycled PET are emerging as an economical and eco-friendly solution. This approach not only provides an accessible option for educational institutions like CETis 111 Vicente Guerrero, where industrial mechanics students can benefit from these recycled parts but also contributes to environmental sustainability. The manufacturing process begins with collecting and shredding used PET bottles, which are turned into small fragments known as "flakes". These flakes are then melted and extruded into cylindrical bars, ensuring uniform and high-quality products. Once cooled and processed, the recycled PET bars are ready for industrial use. In addition to reducing costs, recycled PET plays a crucial role in reducing plastic waste, helping mitigate the environmental impact of producing virgin plastics. However, PET pollution remains a significant issue in Mexico, with plastic waste affecting aesthetics and public health in communities near schools and residential areas. Recycling PET can be a partial solution to this problem, but a comprehensive approach is needed, including recycling education, improved waste management infrastructure, and stricter policies to effectively tackle PET pollution.

In summary, using recycled PET to manufacture cylindrical bars is not only a beneficial practice for industry and the environment but also highlights the need for broader strategies to manage plastic pollution in our communities.

KEYWORDS: Sustainability, Recycling, Training, Reuse.

INTRODUCCIÓN

El tereftalato de polietileno (PET) es un plástico de gran versatilidad y resistencia, ampliamente utilizado en diversas industrias para la fabricación de envases, textiles y componentes industriales [1]. Este material, conocido por su durabilidad y propiedades físicas, ha ganado popularidad en aplicaciones que van desde botellas de bebidas hasta ropa deportiva y componentes automotrices. Sin embargo, su uso generalizado ha desencadenado un grave desafío en la gestión de residuos, dado que el PET es uno de los plásticos más difíciles de degradar en el medio ambiente [2].

En México, la crisis de residuos plásticos es especialmente aguda. Según datos de la Encuesta Nacional de Uso de Tiempo y Actividades (ENDUTIH), el país produce alrededor de 4.3 millones de toneladas de residuos plásticos cada año. A pesar de los esfuerzos por mejorar las tasas de reciclaje, solo el 7% de estos residuos se reciclan efectivamente, dejando una gran cantidad de plástico en vertederos y en el medio ambiente [3]. Esta situación se ve agravada por la falta de infraestructura adecuada para el reciclaje y la falta de conciencia pública sobre la importancia de la separación y el reciclaje de residuos [4].

La acumulación de PET en zonas residenciales y escolares ha generado preocupaciones adicionales. La presencia de botellas y envases de PET en espacios públicos como calles, parques y áreas cercanas a escuelas no solo afecta la estética urbana, sino que también presenta riesgos significativos para la salud. Un estudio de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) revela que cerca del 30% de los residuos plásticos en estas áreas están compuestos por PET, lo que contribuye a una creciente preocupación por la contaminación y la seguridad sanitaria [5]. El PET, al descomponerse, puede liberar microplásticos que afectan la calidad del suelo y del agua, y potencialmente pueden ser ingeridos por los seres humanos, especialmente por los niños que son más susceptibles a estos contaminantes [6].

El reciclaje del PET se presenta como una solución crítica para mitigar estos problemas. Reciclar botellas usadas y otros productos de PET no solo ayuda a reducir la acumulación de residuos plásticos, sino que también ofrece una vía para promover una economía circular más sostenible. Al convertir los residuos de PET en nuevos productos, se minimiza la necesidad de producir plástico virgen, lo que a su vez reduce el consumo de recursos naturales y las emisiones de gases de efecto invernadero [7]. Además, el reciclaje del PET puede contribuir a la creación de empleos, y al desarrollo de nuevas tecnologías [8].

Este artículo se centrará en cómo el reciclaje de PET puede ser una herramienta clave para mejorar el entorno en las comunidades escolares y los beneficios am-

biales asociados con esta práctica. Exploraremos las técnicas actuales de reciclaje de PET, los retos que enfrenta el sector y las oportunidades para fomentar una mayor participación de la comunidad en la gestión de residuos. Con una mayor comprensión y compromiso con el reciclaje del PET, es posible avanzar hacia un futuro más limpio y sostenible.

MATERIAL Y MÉTODOS

Debido al contexto de la problemática, el enfoque empleado se desglosa en Fases. La Figura 1, presenta dichas fases; así como el diseño del proceso para la fabricación de las barras cilíndricas a partir del desecho de PET.

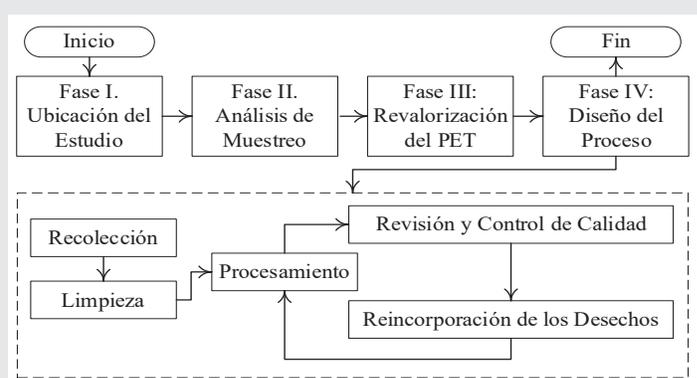


Figura 1. Metodología.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la implementación de la metodología se detallan en esta sección.

Fase I: Ubicación del Estudio

La investigación se lleva a cabo en Tuxpan, Veracruz-México; enfocándose en el CETis 111 Vicente Guerrero y las zonas residenciales y públicas a su alrededor. Esto abarca las colonias La Calzada y La Mata, La Barra, así como otras áreas públicas cercanas. La finalidad es convertir el PET reciclado obtenido en estas zonas en barras cilíndricas, contribuyendo así a la reducción de residuos plásticos y promoviendo prácticas de economía circular en la región.

Fase II: Análisis de Muestreo

En relación con la contaminación por desechos sólidos en la comunidad de Tuxpan, se realizó un estudio sobre las botellas de PET en el CETis 111 Vicente Guerrero; a 30 estudiantes se les pidió contar visualmente las botellas de PET que encontrarán en su camino de casa a la escuela y de regreso. El análisis de estos datos reveló lo siguiente:

- El número promedio de botellas observadas por los estudiantes fue 250.17 botellas, con una desviación estándar de 10.46 botellas, lo que indica una dispersión moderada en los datos.
- El rango observado varió entre un mínimo de 230 botellas y un máximo de 270 botellas.

- La mediana, o valor central, fue de 250, lo que sugiere que la mitad de los estudiantes observó 250 botellas o menos.
- Los cuartiles mostraron que el 25.00% de los estudiantes observó hasta 240 botellas y el 75.00% observó hasta 260 botellas.

La Figura 2, presenta los estadísticos descriptivos de los datos analizados por la visualización del comportamiento de las botellas. El análisis y tratamiento de los datos se realizó en Minitab 19 en su versión de prueba, como software estadístico. Mientras, que en análisis de la prueba t-student para una muestra, se presenta en la Tabla 1 y en la Tabla 2.

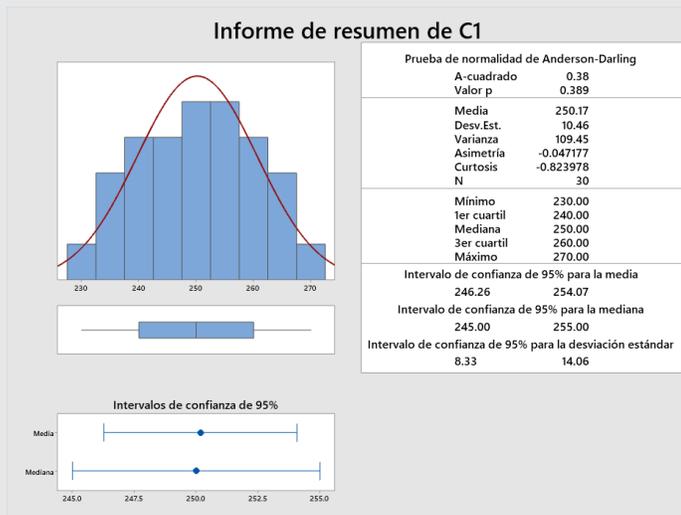


Figura 2. Comportamiento del PET generado.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Análisis estadístico.

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
30	250.17	10.46	1.91	(246.26, 254.07)

μ : media de C1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Prueba de hipótesis.

Hipótesis nula	$H_0: \mu = 250$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu \neq 250$
Valor T	Valor p
0.09	0.931

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3, presenta el histograma de los datos analizados. La Figura 4, muestra el comportamiento de los valores individuales.

Además, con el objetivo de identificar de la forma más precisa del impacto de las botellas en el plantel, se les solicitó a los estudiantes recolectarlas físicamente en un solo día. Los estudiantes, lograron juntar 200 botellas en esa jornada.

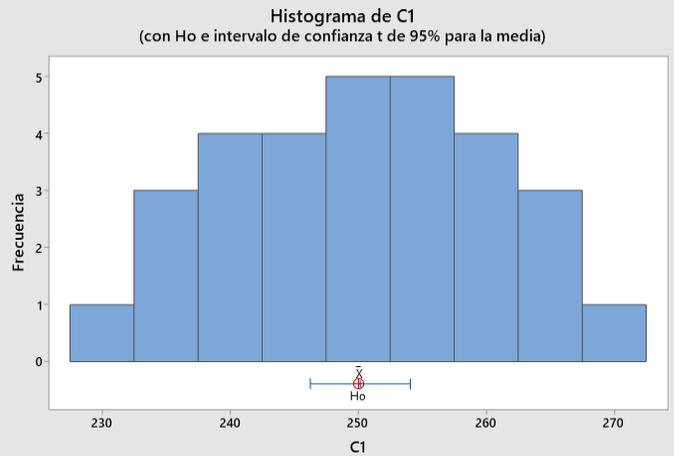


Figura 3. Histograma de los datos.
Fuente: Elaboración propia.

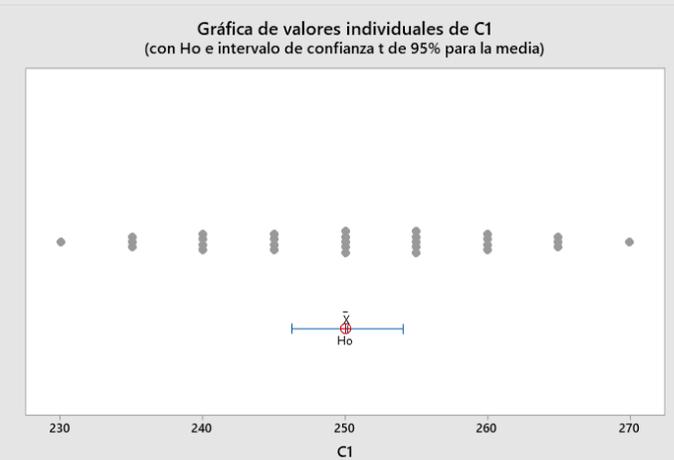


Figura 4. Comportamiento de los valores individuales.
Fuente: Elaboración propia.

Si esa cantidad se recolectó en un solo día, se estima que en un mes podrían acumularse aproximadamente 5,000 botellas; lo cual resulta alarmante. Aumentar el área de muestreo incrementaría esta cifra de forma exponencial, lo que indica un problema potencialmente mayor si estas botellas llegan a lugares como cuerpos de agua, afectando gravemente el ecosistema circundante (ver Figura 5).

Fase III. Revalorización del PET

Las botellas de PET se recolectan en las calles, parques, colonias vecinas y áreas públicas próximas al CETis 111. Así mismo, se obtiene PET reciclado de centros locales de reciclaje y plantas de procesamiento en Tuxpan; este PET ha pasado por un procesamiento previo, lo que puede influir en sus características. El PET recolectado, es la materia prima para del proceso de producción [9].

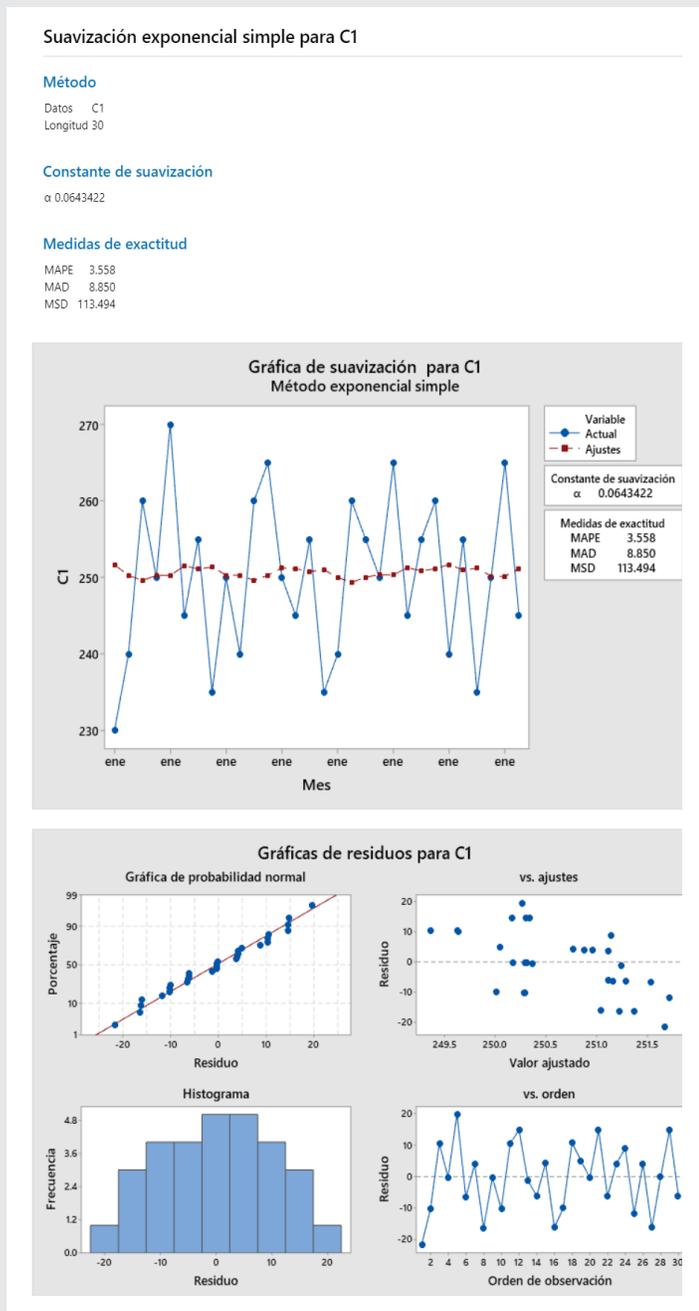


Figura 5. Comportamiento de la generación de PET.
 Fuente: Elaboración propia.

Fase IV. Diseño del Proceso

Partiendo de las necesidades identificadas, el diseño conceptual del proceso que permita recuperar el PET generado y ser empleado en prácticas académicas, y así capacitar a los estudiantes, se considera:

a) Recolección

Mediante contenedores se recolectan desechos en forma de PET. Se realiza la recolección de envases y botellas de PET en calles, parques, áreas públicas y en las colonias adyacentes al CETis 111. Posteriormente, los envases se clasifican según su color y tipo, eliminando etiquetas y tapas para asegurar la pureza del material.

Finalmente, mediante bolsas se transporte el PET recolectado a las instalaciones de procesamiento. Para este proceso se emplean herramientas básicas para la recolección y clasificación inicial del PET, tales como contenedores y bolsas de polipropileno de alta densidad.

b) Limpieza

Los envases recolectados, se lavan con agua y detergente para eliminar contaminantes, y luego se secan completamente. En este proceso se emplean contenedores, detergentes y utensilios de limpieza.

c) Procesamiento

Una trituradora, se utiliza para descomponer el PET en fragmentos pequeños, conocidos como flakes, facilitando su manejo y procesamiento posterior –los fragmentos triturados se tamizan para asegurar su uniformidad y eliminar materiales no deseados–. Posteriormente se emplea una extrusora para fundir el PET mediante energía térmica, a alta temperatura y extruirlo a través de una boquilla cilíndrica para formar barras cilíndricas continuas [2], se aplica calor necesario para el proceso de fusión del PET en la extrusora, donde se alcanzan temperaturas entre 240°C y 270°C para convertir el PET en una masa uniforme [10]. Así mismo, el enfriamiento de las barras cilíndricas extruidas se realiza mediante un baño de agua o enfriamiento por aire para solidificarse. Finalmente, se emplea una sierra de corte o máquina automatizada para cortar las barras a la longitud requerida una vez que se han enfriado y solidificado.

d) Revisión y Control de Calidad

Se examina mediante inspección visual las barras para detectar posibles defectos como burbujas o deformaciones. Posteriormente, se realizan pruebas de resistencia y durabilidad para asegurar que las barras cumplen con los estándares de calidad.

e) Reincorporación de los Desechos

Los residuos generados durante el proceso se gestionan adecuadamente al ser reincorporados al mismo proceso, con el objetivo de reciclarlos nuevamente para minimizar el impacto ambiental.

Durante todas las etapas del proceso de producción, se implementan medias de higiene y seguridad que brindan la protección personal necesaria para evitar enfermedades y/o accidentes.

DISCUSIÓN

En los últimos años, los plásticos han mostrado un auge mundial en su uso y consumo, pero una baja tasa de utilización en el proceso de recuperación, así como se menciona en [11]. En relación a este estudio la propuesta del diseño, se considera viable al estimarse tener un margen significativo de materia prima a partir del desecho plástico para elaboración de barras cilíndricas

para maquinado en torno de maquinado convencional. A nivel económico, también puede ser rentable, concordando con lo citado por [12], al utilizarse producto reciclado con un eficiente proceso de limpieza. Ahora bien, se coincide con [13], en que los residuos de PET limpios y recolectados adecuadamente pueden ser una materia prima ideal para fines industriales.

Se sigue trabajando en el diseño adecuado para mantener un proceso eficiente. También se plantea que cumpla con los estatutos de economía circular y genere una cadena de valor con la recolección y el máximo aprovechamiento de tal producto que, impacta negativamente a los ecosistemas, si no es controlado de la forma adecuada. El logro del modelo de economía circular sobre el plástico es posible, coincidiendo con lo citado por [14].

CONCLUSIONES

La transformación de PET reciclado en barras cilíndricas, como se detalla en esta investigación, representa una importante innovación en el manejo de residuos plásticos y una valiosa contribución hacia una economía circular sostenible. Al recoger y procesar PET de diversas fuentes en Tuxpan, Veracruz-México, en este estudio se propone un método eficiente para convertir residuos plásticos en productos útiles, reduciendo así la cantidad de desechos que terminan en vertederos y el medio ambiente.

El proceso no solo ofrece una solución efectiva para la reutilización del PET, sino que también tiene el potencial de beneficiar a múltiples sectores. Desde la construcción hasta la educación y la industria, las barras cilíndricas producidas tienen aplicaciones amplias que pueden impulsar la sostenibilidad y apoyar iniciativas ecológicas locales.

Además, este enfoque subraya la importancia de la colaboración comunitaria en la recolección de materiales reciclables y el compromiso con prácticas ambientales responsables. La implementación de esta metodología no solo ayuda a gestionar mejor los residuos plásticos, sino que también promueve una mayor conciencia sobre el impacto de nuestras acciones diarias en el medio ambiente.

En última instancia, el éxito de este proyecto demuestra que, con innovación, dedicación y un enfoque en la sostenibilidad, es posible transformar problemas ambientales en oportunidades valiosas, avanzando hacia un futuro más limpio y eficiente.

AGRADECIMIENTOS

Se otorga una distinción relevante al Centro de Estudios Tecnológicos industrial y de servicios número 111 "Vicente Guerrero", por facilitar la obtención de las muestras y trabajar en conjunto con los estudiantes del mismo plantel; y al Tecnológico Nacional de México Campus Teziutlán.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. A. Harper, *Handbook of Plastics Technologies*. McGraw-Hill Education, 2006.
- [2] Y. Jiang, C. Liu, and H. Yang, "Mechanical properties and thermal behavior of PET," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 135, no. 16, pp. 46434, 2018.
- [3] L. Shen, E. Worrell, and M. Patel, "Life cycle assessment of PET recycling and its impact on the environment," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 168, p. 105232, 2021.
- [4] J. Hopewell, R. Dvorak, and E. Kosior, "Plastics recycling: challenges and opportunities," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1526, pp. 2115-2126, 2009.
- [5] J. Sánchez et al., "Estudio sobre la composición de residuos plásticos en zonas residenciales y escolares," *Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*, 2023.
- [6] F. Rey, M. Martínez, and J. Ramírez, "Recycling of PET: Impact on quality and sustainability," *Journal of Cleaner Production*, vol. 203, pp. 622-631, 2018.
- [7] K. Williams, *Plastics Recycling and Sustainability*. Springer, 2020.
- [8] R. Kumar and R. Prakash, *Advances in Plastic Processing Technology*. Springer, 2019.
- [9] A. Pizzi, *Wood Adhesives*. CRC Press, 2017.
- [10] M. Zhou and S. Zhang, "Extrusion of PET: Process and performance," *Polymer Engineering & Science*, vol. 60, no. 6, pp. 1229-1236, 2020.
- [11] Y. Zhang, F. Tian, C. Liu, X. Liu, Y. He, and Z. Wu, "Up-cycling of waste PET into high-performance and multifunctional materials," *J Clean Prod*, vol. 434, p. 140048, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.140048.
- [12] T. Muringayil Joseph et al., "Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, p. 100673, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.CSCEE.2024.100673.
- [13] Z. Jia, L. Gao, L. Qin, and J. Yin, "Chemical recycling of PET to value-added products," *RSC Sustainability*, vol. 1, no. 9, pp. 2135-2147, 2023, doi: 10.1039/D3SU00311F.
- [14] J. Yang et al., "Towards carbon neutrality: Sustainable recycling and upcycling strategies and mechanisms for polyethylene terephthalate via biotic/abiotic pathways," *Eco-Environment & Health*, vol. 3, no. 2, pp. 117-130, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.EEHL.2024.01.010.





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Análisis multiespectral de imágenes satelitales para monitoreo de contaminantes en agua en el norte de Veracruz y sur de Tamaulipas

RESUMEN: El presente trabajo examina la viabilidad de emplear imágenes satelitales multiespectrales, con el objetivo de analizar la detección de contaminantes en cuerpos de agua en contextos de conservación y medio ambiente.

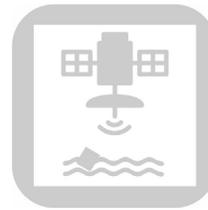
La evaluación de las aplicaciones de estas imágenes se realizó a través de diversos recursos académicos, como artículos científicos, tesis, libros y resúmenes de congresos. En este proceso, se identificaron diversas aplicaciones relacionadas con el análisis de cobertura terrestre y cuerpos de agua utilizando imágenes satelitales.

En las aplicaciones ambientales, se encontraron estudios con temáticas, como la cobertura forestal, la expansión urbana, índices de vegetación, cambios en la cobertura vegetal, deforestación, distribución espacial del agua, monitoreo de cuerpos de agua, dinámica de lagunas y parámetros de calidad del agua.

Se concluye que los principios físicos de la percepción remota para la obtención de metadatos proporcionan una base teórica sólida para comprender el funcionamiento de los sensores satelitales y la generación de información útil, como imágenes con una resolución aceptable y aplicables a estudios de amplias áreas territoriales.

Por tanto, es crucial comprender las ventajas de estas tecnologías para planificar investigaciones que utilicen esta información, con el propósito de contribuir a la protección y conservación de áreas afectadas tanto por factores naturales como antropogénicos (Veneros et al., 2020).

PALABRAS CLAVE: imágenes multiespectrales, Landsat 8, teledetección, calidad del agua.



Colaboración

Edwin Daniel Méndez Cruz; Gabriel Grosskelwing Núñez; Saúl Santiago Cruz; Claudia Itzel Vázquez Moreno, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Mianztlá; Miguel Ángel López Ramírez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2024

ABSTRACT: This paper examines the feasibility of using multispectral satellite images, with the aim of analyzing the detection of pollutants in water bodies in conservation and environmental contexts.

The evaluation of the applications of these images was carried out through various academic resources, such as scientific articles, theses, books and conference abstracts. In this process, several applications related to the analysis of land cover and water bodies using satellite images were identified.

In the environmental applications, studies were found with topics such as forest cover, urban expansion, vegetation indices, changes in vegetation cover, deforestation, spatial distribution of water, monitoring of water bodies, dynamics of lagoons and water quality parameters.

It is concluded that the physical principles of remote sensing for obtaining metadata provide a solid theoretical basis for understanding the operation of satellite sensors and the generation of useful information, such as images with an acceptable resolution, applicable to studies of large territorial areas.

Therefore, it is crucial to understand the advantages of these technologies in order to plan research using this information, with the purpose of contributing to the protection and conservation of areas affected by both natural and anthropogenic factors (Veneros et al., 2020).

KEYWORDS: multispectral imaging, Landsat 8, remote sensing, water quality.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos vitales para la vida en la Tierra, indispensable para los ecosistemas, la agricultura, la industria y el consumo humano. Sin embargo, la contaminación de cuerpos de agua, como ríos, lagos, acuíferos y océanos, ha emergido como una de las problemáticas ambientales más graves de nuestro tiempo. La presencia de contaminantes en el agua desde sustancias químicas tóxicas hasta residuos plásticos y patógenos afecta no solo la salud humana, sino también la biodiversidad y el equilibrio ecológico.

Hoy en día la toma de muestras de cuerpos de agua es una tarea fundamental para el monitoreo ambiental, la investigación científica y la gestión de los recursos hídricos. Este proceso está asociado con una serie de dificultades técnicas y costos elevados que deben ser considerados para llevar a cabo análisis efectivos y representativos.

La localización geográfica de los cuerpos de agua puede complicar significativamente la extracción de muestras. Los lagos, ríos y océanos de difícil acceso, especialmente aquellos situados en zonas remotas o de topografía accidentada, requieren equipos especializados, transporte adecuado, y, en algunos casos, personal capacitado para operar en entornos extremos. Todo esto incrementa los costos logísticos, no solo para el desplazamiento, sino también para el mantenimiento del equipo y la seguridad de los operadores. Para abordar esta problemática, es crucial preservar dichos ecosistemas como lo señala el autor Montiel González et al., (2017) ya que desempeñan un papel fundamental en la captura, conservación, purificación y reposición del agua.

El conocimiento generado a través de la tecnología satelital multiespectral ha transformado significativamente la forma en que se monitorea y se analiza la calidad del agua para continuar con la conservación de los ecosistemas y mejorar la calidad de vida humana, tal como lo indican los autores Montaña Roldan et al., (2023).

La revisión de diversos autores sobre el tema planteado es fundamental para el desarrollo de esta investigación, ya que permite comparar y analizar los procedimientos en el uso de bandas multiespectrales para la detección de contaminantes en agua, lo que da paso al desarrollo de la metodología planteada para la selección, tratamiento y obtención de los datos.

MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada se utilizaron alrededor de diez metodologías y aplicaciones correspondientes a marco teórico de referencia y estado del arte para el análisis de coberturas territoriales en especial cuerpos de agua empleando imágenes satelitales multiespectrales y algoritmos que permitieron el análisis ambiental de grandes áreas, entre los que

destacan cobertura boscosa, índices de coberturas pétreas, distribución espacial del agua, dinámica lagunar, parámetros de calidad del agua entre otros.

En el particular caso del estado del arte los autores se relacionan entre si debido a que en todos los casos analizados utilizan datos proporcionados por constelaciones donde se encuentran los denominados LANDSAT 8 y SENTINEL satélites con tecnología de punta cada uno dentro de su respectiva orbita, actualmente en funcionamiento y que coadyuvan a los SIG (Sistemas de Información Geográfica) y la Percepción Remota (teledetección) ambas disciplinas necesarias, fundamentales para los resultados de sus respectivos estudios.

En la Figura 1 muestra las etapas que se siguieron para el desarrollo del presente artículo de análisis.

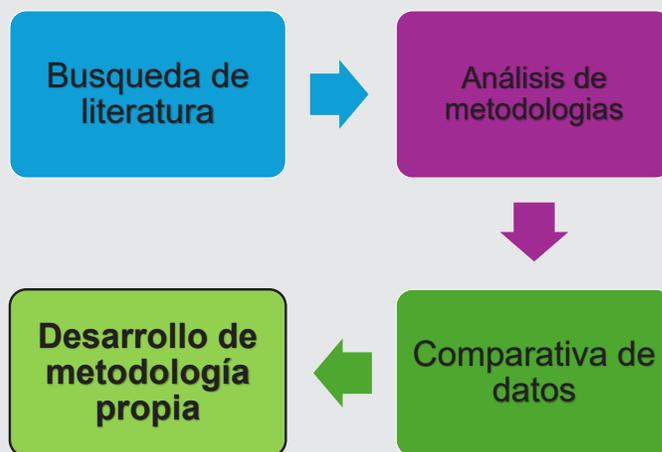


Figura 1. Metodología general de revisión de literatura. Fuente: Elaboración propia.

Fundamentos teóricos de teledetección

La teledetección es “La ciencia y el arte de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno mediante el análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno investigado (Lillesand et al., 2004).

La teledetección engloba un conjunto de técnicas que permiten adquirir información sobre un objeto específico en la superficie terrestre desde una gran distancia, superando las limitaciones de la visión humana.

Un sistema de teledetección incluye los siguientes elementos mostrados en la Figura 2: (Chuvieco, 2008).

- **Fuente de Energía:** Es originado de la radiación electromagnética que el sensor va a captar. Puede tratarse de una fuente pasiva como la luz solar o activa.
- **Cubierta terrestre:** Son los rasgos naturales o realizados por el hombre (vegetación, suelo, rocas, construcción, etc.) que refleja la señal hacia el sensor.

- **Sistema sensor:** Compuesto por el sensor propiamente dicho (cámaras, radar, etc.) y la plataforma que lo alberga (satélite, avión, globo).
- **Sistema de recepción-comercialización:** Es el que recibe la información del sistema sensor, la guarda en formato apropiado y la distribuye a los usuarios.
- **Interprete:** quien convierte los datos en información temática de interés (agricultura, forestal, geografía, catastro, medio ambiente, militar, etc.) mediante procedimientos digitales.
- **Usuario final:** Es el beneficiario final.

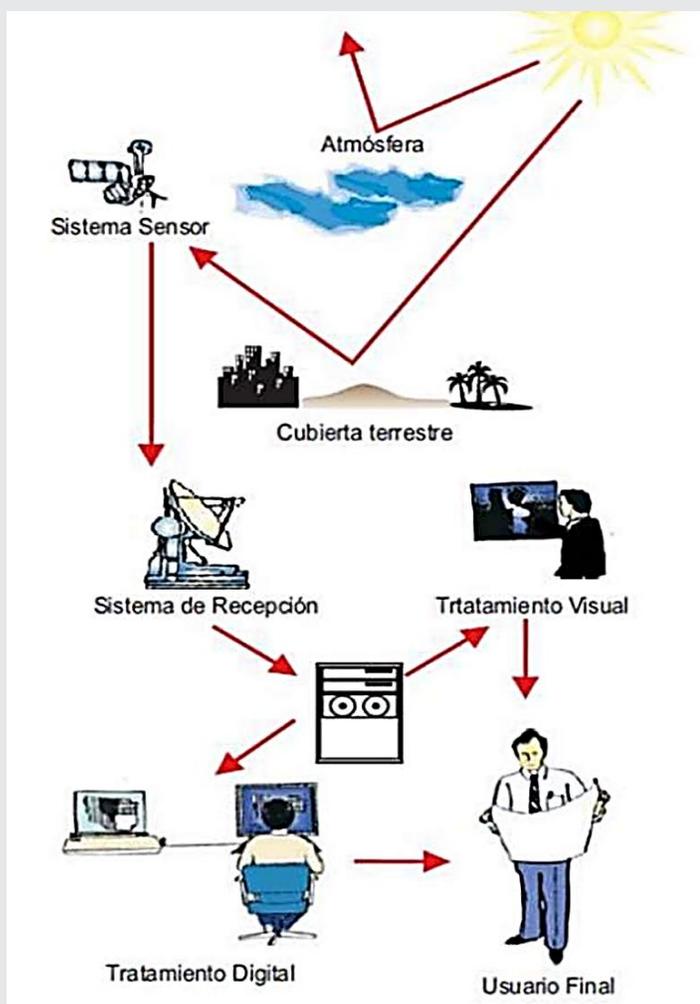


Figura 2. Los componentes de un sistema de Teledetección. Fuente: (Chuvienco, 2008).

Clasificación de sensores satelitales

Por lo general, la teledetección es la medición de la energía que se emanó de la superficie de la Tierra. Si la fuente de la energía medida es el sol, entonces se llama la teledetección pasiva, y el resultado de esta medición puede ser una imagen digital.

Si la energía medida no es emitida por el Sol, pero desde la plataforma de sensor, entonces se define como la teledetección activa, tales como sensores de radar que funcionan en el rango de microondas (Richards & Jia, 2006).

Sensores Satelitales: Pasivos

- Los sensores remotos pasivos miden energía radiante reflejada o emitida por el sistema Tierra-atmósfera o cambios en la gravedad de la Tierra (Figura 3).
- La energía radiante se convierte en cantidades bio-geofísicas como temperatura, precipitación y humedad del suelo.

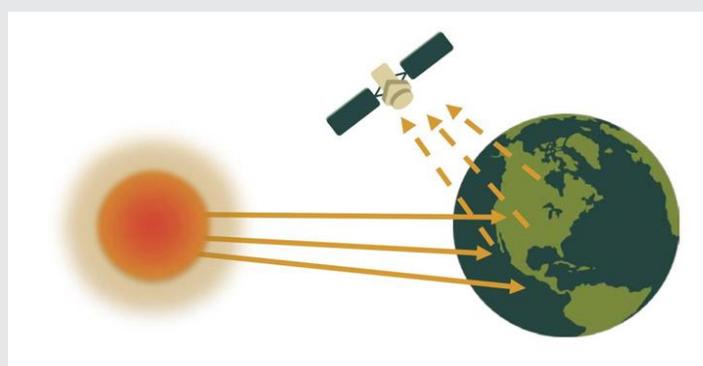


Figura 3. Sensores pasivos. Fuente: (NASA ARSET, 2023).

Sensores Satelitales: Activos

- Los sensores activos proporcionan su propia fuente de energía para la iluminación (Figura 4).
- La mayoría de los sensores activos opera en la región de las microondas en el espectro electromagnético, lo que permite penetrar la atmósfera bajo la mayoría de las condiciones y se pueden usar de día o de noche.
- Tienen una variedad de aplicaciones relacionadas con la meteorología y la observación de la superficie y atmósfera de la Tierra.

El espectro electromagnético

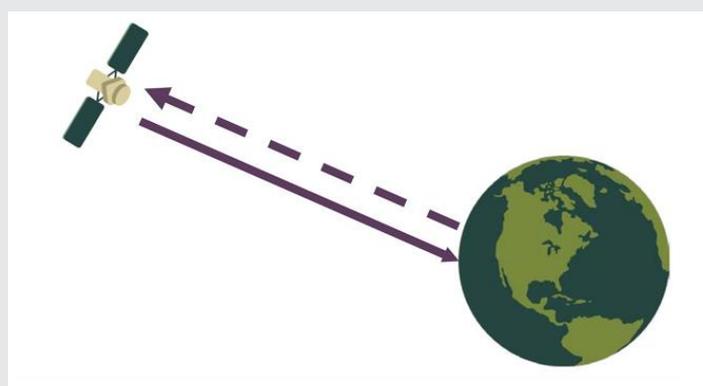


Figura 4. Sensores activos. Fuente: (NASA ARSET, 2023)

En la Figura 5 que antecede se representa el espectro electromagnético que es “el sistema que clasifica, de acuerdo con la longitud de onda, toda la energía (de corto cósmica a largo radio) que se mueve, armónicamente, a la velocidad constante de la luz”(NASA ARSET, 2023).

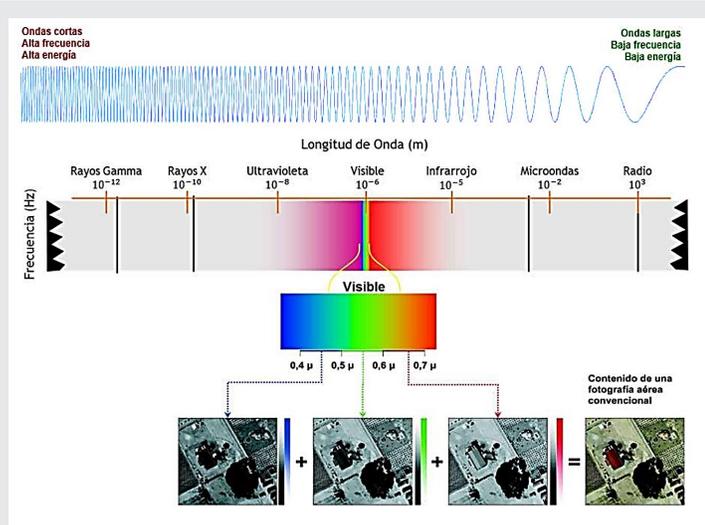


Figura 5 Espectro electromagnético.
Fuente: Bravo Morales, 2017; Pinilla, 2020

Regiones espectrales utilizadas para la observación remota de la tierra.

- **Espectro visible (0.4 - 0.7 μ m):** Rango de frecuencias del ojo humano. Máxima radiación solar. Subdividido en tres bandas: Rojo (0.6 - 0.7 μ m), Verde (0.5 - 0.6 μ m) y Azul (0.4 - 0.5 μ m).
- **Infrarrojo cercano (0.7 - 1.1 μ m):** Denominado IR fotográfico o reflejado. Energía solar que reflejan los cuerpos. Comportamiento similar al espectro visible.
- **Infrarrojo medio (1.1 - 8 μ m):** Se entremezclan radiación solar y emisión. La atmósfera afecta sensiblemente: aprovechado para medir concentraciones de vapor de agua, ozono, aerosoles...
- **Infrarrojo térmico (8 - 14 μ m):** Radiaciones emitidas por los propios cuerpos. Se puede determinar la Temperatura de un cuerpo (IR térmico). Se puede disponer de imágenes a cualquier hora del día.
- **Microondas (1mm-1m):** Interés creciente de la Teledetección en esta banda. Las perturbaciones atmosféricas son menores y es transparente a las nubes. Se suelen utilizar sensores activos.

En la tabla 1 se pueden clasificar las características del espectro electromagnético

Imágenes multiespectrales e hiperespectrales

El desarrollo de la tecnología espectroscópica en la década de 1980 llevó a la creación de dispositivos conocidos como hiperespectrales, que combinan capacidades de formación de imágenes con espectroscopia. Este término se originó en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA en California, EE. UU., donde se diseñó un instrumento hiperespectral llamado Espectrómetro de Imágenes Aéreas/Infrarrojas en el Aire (AVIRIS por sus siglas en inglés). Las imágenes hiperespectrales son capturadas por sensores espectrales (activos y pasivos) que miden la reflectancia, permitiendo obtener firmas espectrales más detalladas y continuas que requieren funciones continuas y derivables.

Estas imágenes permiten detectar sutiles diferencias y características en la superficie, especialmente en lo que respecta a la vegetación, cuerpos de agua, el suelo y las rocas. La principal diferencia entre una imagen multiespectral y una hiperespectral radica en el número y ancho de las bandas disponibles (Ibarrola Ulzurrun et al., 2017).

Tabla 1: Características de la región espectral.

Región Espectral (bandas)	Longitud de onda (λ)	Características
Rayos Gamma	< 0,03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se usa en teledetección
Rayos X	0,03 - 30 nm	Radiación completamente absorbida por la atmósfera. No se usa en teledetección
Ultravioleta	0,03 - 04 μ m	La radiación con $\lambda < 0,3 \mu$ m es completamente absorbida por la capa de ozono
Visible (azul, verde y rojo)	0,4 - 0,7 μ m	Se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N).
Infrarrojo Próximo	0,7 - 1,3 μ m	Discrimina masas vegetales y concentraciones de humedad.
Infrarrojo Medio	1,3 - 8 μ m	Estimación del contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
Infrarrojo Térmico	8 - 14 μ m	Detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubierta terrestre.
Micro-Ondas	0,1 - 100 cm	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia.
Ondas de Radio	> 100 cm	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Usadas en telecomunicaciones

Fuente: (Bravo Morales, 2017).

Por su parte las imágenes multiespectrales analizadas en el presente estudio se obtienen de los satélites en órbita ya mencionados que permiten medir la reflectancia de hasta 11 bandas que llevan asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como el sensor sea capaz de detectar, en la Figura 6 se puede representar como las bandas son como capas apilables para obtener la multiespectral.

Satélites LANDSAT

La constelación de satélites LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satellites), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 satélites de los cuales sólo se encuentran activos el 5 y el 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Los satélites LANDSAT llevan a bordo diferentes instrumentos. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y

espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor y por último, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros. Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 a 11 bandas espectrales actualmente, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120m (Berdugo Muñoz & Reales López, 2016).

La investigación de cuerpos de agua se ha vuelto crucial, dado que el monitoreo del agua desempeña una función fundamental en la administración de los recursos hídricos.

Los autores Kamel et al., (2016) en Egipto aunque propiamente no se enfocaron en cuerpos de agua sin embargo utilizaron imágenes multispectrales obtenidas del satélite Landsat 7 para la búsqueda de zonas de formaciones rocosas de acuerdo a su pigmento natural derivado de la detección de los sensores del satélite, a su vez han utilizado combinaciones mediante colorimetría derivada de patrones rocosos mediante la combinación de bandas con la finalidad de localizar un valor de color específico para mapear cierto tipo de material pétreo.

Dentro de sus resultados se pueden apreciar que mediante las herramientas informáticas de los SIG combinaron con ratios las bandas 5/1, 3/2 y 7/2 mediante el procesamiento RGB respectivamente encuentran cierta colorimetría para identificar claramente el tipo de roca específico y de esa manera diferenciarlo en la imagen multispectral como lo muestra la Figura 7.

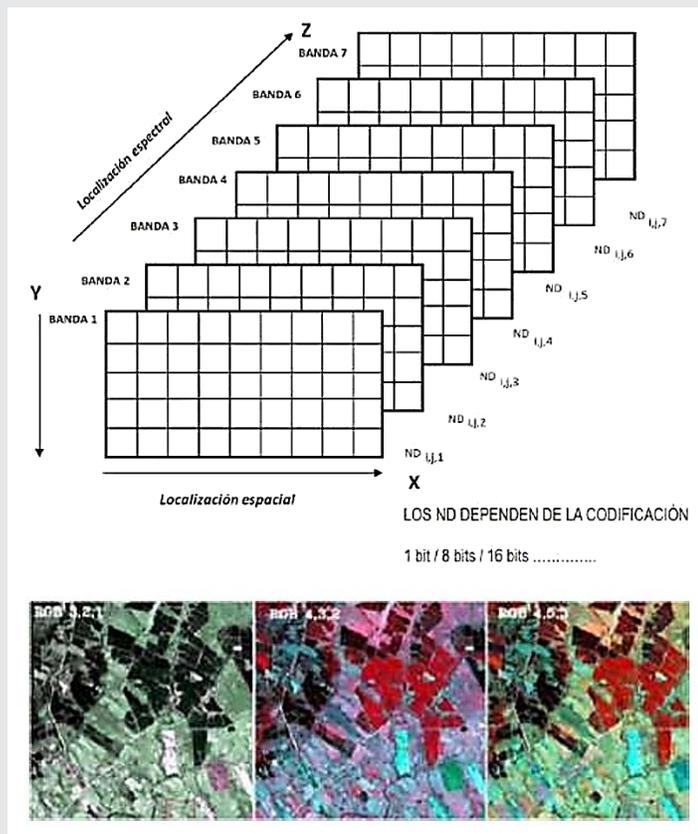


Figura 6. Estructura de imagen multispectral. Fuente: (Bravo Morales, 2017).

Uso y aplicación de imágenes satelitales en estudios territoriales

Los lagos, ríos y embalses, tanto de agua dulce como salada, ocupan solo una fracción mínima de la superficie terrestre, pero desempeñan un papel vital en los ecosistemas y en la vida humana. La distribución y los cambios en el agua tienen repercusiones significativas en aspectos económicos, ambientales y sociales (Feng et al., 2015) emplearon datos satelitales de alta resolución (Landsat) para estudiar los cuerpos de agua continentales en el año 2000, analizando índices multispectrales relacionados con el agua, la vegetación y las características del terreno.

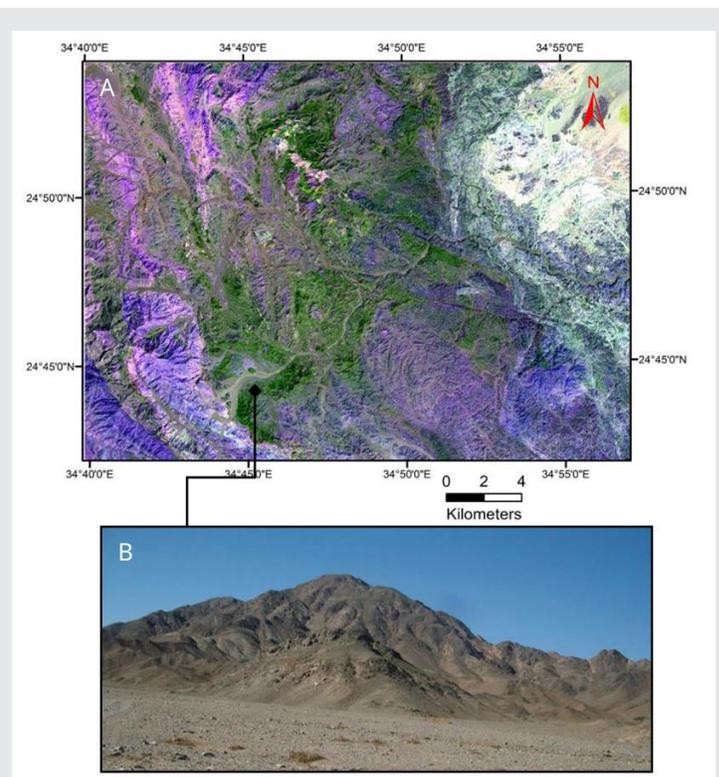


Figura 7. Imagen multispectral de resultados obtenidos. Fuente: (Kamel et al., 2016).

Se han realizado, también investigaciones como la de Beiranvand & Hashim, (2015) donde utilizaron imágenes satelitales landsat 8 para observar zonas de alteración hidrotermal en áreas de estudio de Irán como se puede apreciar en las imágenes dicha zona de estudio se compone de varios tipos de formaciones rocosas Eoceno, roca volcánica, roca granitoide sub-volcanica, etc.

Y lo que han hecho es buscar cuales pueden ser los anchos de banda del Landast 8 adecuados para ciertos minerales en específico, así como las combinaciones de estas bandas para materiales pétreos como, por ejemplo: Calcita, Alunita, muscovita, etc. Finalmente, en sus conclusiones determinan que los mejores anchos de banda que pueden utilizar son con las combinaciones en ratios de 4/2, 6/7 y 10 procesamiento RGB como lo muestra el siguiente mapa de la Figura 8

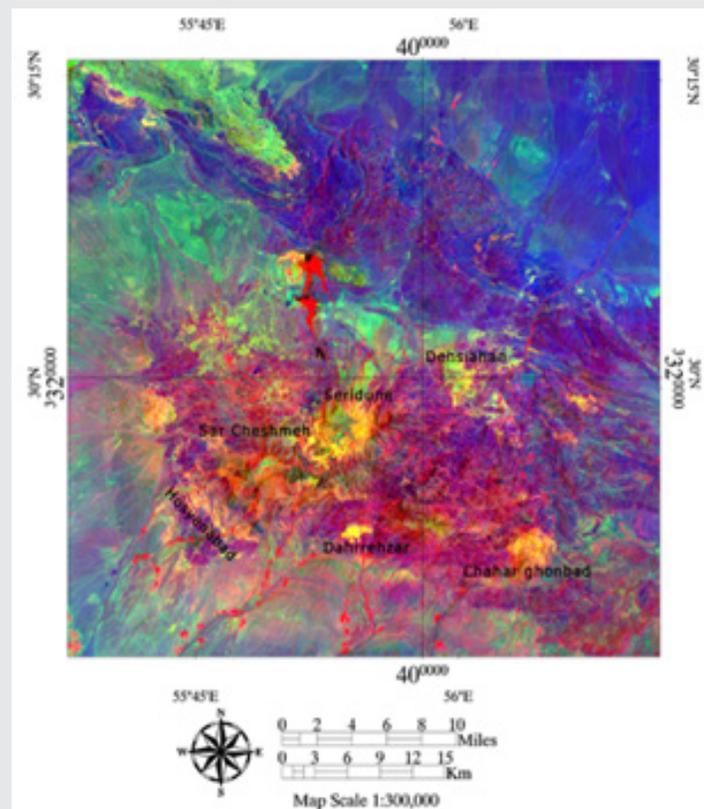


Figura 8. Imagen multispectral con ratios 4/2, 6/7 y 10. Fuente: (Beiranvand & Hashim, 2015).

En México Amado Alvarez et al., (2019), con el análisis de parámetros de contaminantes en agua como el OD, PH, Turbidez, etc. In situ, y mediante los datos y la información espectral de imágenes del satélite Landsat 5 se evaluaron 30 modelos de regresión lineal de los cuales, la turbidez obtuvo el mejor ajuste. Las regiones del espectro 0,52 - 0,6 μm y 0,63 - 0,69 μm , aportados por la variable predictora, se mostraron como los rangos de mayor correlación con los valores de turbidez. Como resultados se determinó que: mediante las bandas 2/3 pudieron obtener el modelo predictivo de la Turbidez mediante la información espectral, como aproximación más fiable de la estimación del estado del agua en los embalses estudiados.

La representación espacial de la turbidez difiere del resto de embalses, mostrando valores en los que se observa una mayor turbidez en la parte de entrada al embalse mostrado en la Figura 9.

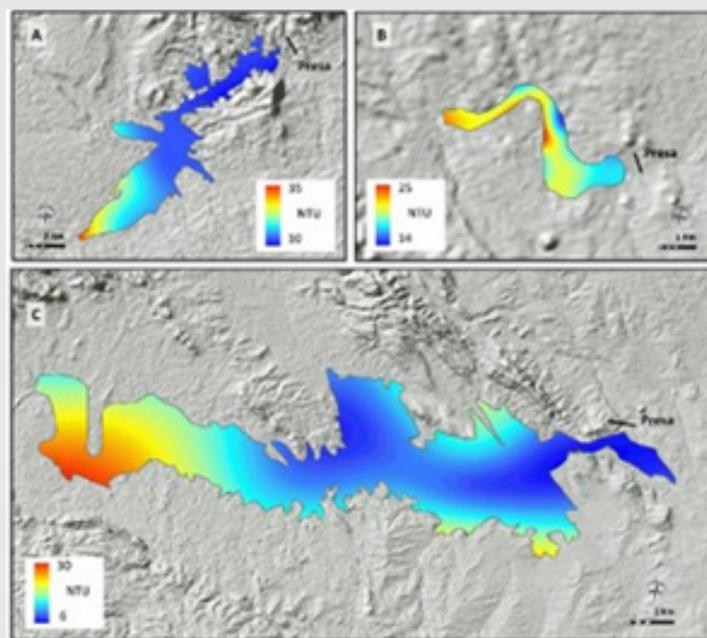


Figura 9. Análisis de distribución espacial de la turbidez del agua. Turbidez (NTU) del agua en los tres embalses obtenida del modelo predictivo del cociente de las bandas 2/3: A) Presa las Vírgenes; B) Lago Colina C) Presa Boquilla. Fuente: (Amado Alvarez et al., 2019).

En Chile, (Briceño et al., 2018) emplearon teledetección mediante imágenes satelitales del sensor OLI de Landsat 8 para investigar la distribución espacial y la evolución de los parámetros de calidad del agua en el lago Vichuquén durante el año 2016. Realizaron muestreos de campo, mediciones en el sitio, análisis de laboratorio y procesamiento de imágenes satelitales. Sus hallazgos revelaron la variabilidad espacial de los parámetros de calidad del agua, así como su conexión con el incremento de la eutrofización del lago, atribuible a factores estacionales y a diversos usos del suelo, como la reforestación con pino y eucalipto, actividades agrícolas y zonas urbanas adyacentes.

Por su parte en las costas del Perú (Rosales Malpartida & Apaza Mamani, 2022) analizaron la contaminación por el derrame de petróleo del buque de bandera italiana Mare Doricum, propiedad de Repsol.

El estudio tuvo por objetivo detectar el área del derrame utilizando el sensor multispectral Landsat 8. Para detectar con mayor precisión, se realizaron diversos preprocesamientos a la imagen satelital Landsat 8 como la conversión a reflectancia, normalización con el método Bandmax-min de la imagen de la zona afectada y finalmente se realizaron los métodos de análisis de componentes principales (ACP) y la Fracción de Mínimo Ruido (MNF por sus siglas en inglés). Todos los resultados fueron analizados mediante la programación del software libre R, dichos resultados experimentales indicaron claramente que el método MNF es el más adecuado para detectar el derrame de petróleo con

mayor precisión a través de imágenes multispectrales, los resultados obtenidos se muestran en la imagen 10 encerradas se visualizan las manchas de contaminación.

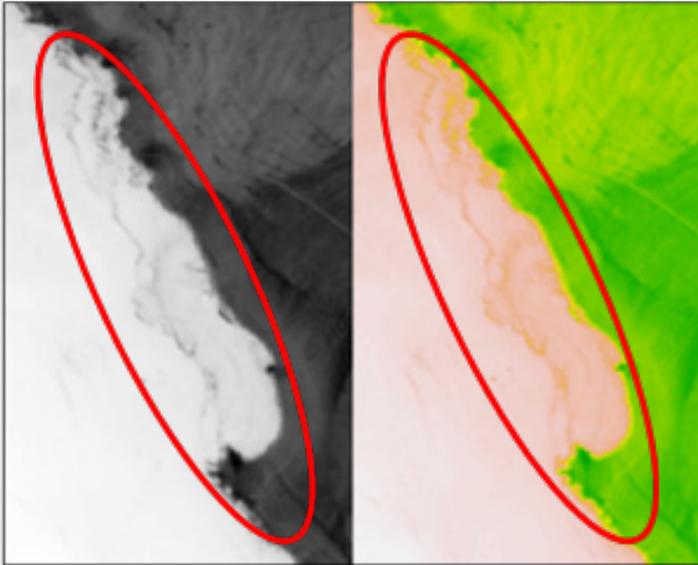


Figura 10. Imagen multispectral con la visualización del derrame de petróleo en R con el primer valor propio del método MNF: (a) con la función imagen y el parámetro col = gray((0:256)/256), (b) con la función imagen y el parámetro col=terrain.colors(100) (Rosales Malpartida & Apaza Mamani, 2022).

RESULTADOS

Obtención y procesamiento imágenes satelitales multispectrales

A partir del análisis bibliográfico llevado en el presente estudio, se identificaron las principales metodologías empleadas en el campo de la tecnología satelital para monitoreo de áreas específicas en su mayoría de índole ambiental. Este análisis permitió identificar los enfoques más comunes y las líneas de investigación actuales donde se emplean imágenes satelitales multispectrales para obtener información de manera remota. Se observó además que, existe un área de oportunidad dentro del campo de la teledetección ya que puede aplicarse a una infinidad de temas, casos de estudio y problemáticas similares en todo el planeta.

De esta manera, la construcción de una metodología propia fundamentada en el análisis bibliográfico no solo responde a las necesidades un caso de estudio específico, sino que también propone un marco de trabajo innovador a seguir que definitivamente será replicado y ajustado en estudios futuros.

La metodología que a continuación se presenta ejemplifica la obtención, tratamiento y análisis de datos espectrales satelitales mediante la Figura 11.



Figura 11. Metodología de procesamiento de imágenes multispectrales.

Fuente: Elaboración propia.

Paso 1:

Para la obtención de las imágenes se delimita la zona de estudio conocida como una formación de varios cuerpos de agua en el norte de Veracruz y sur de Tamaulipas, colindantes con la ciudad de Tampico la cual se determina en el servidor antes mencionado USGS como lo muestra la Figura 12.

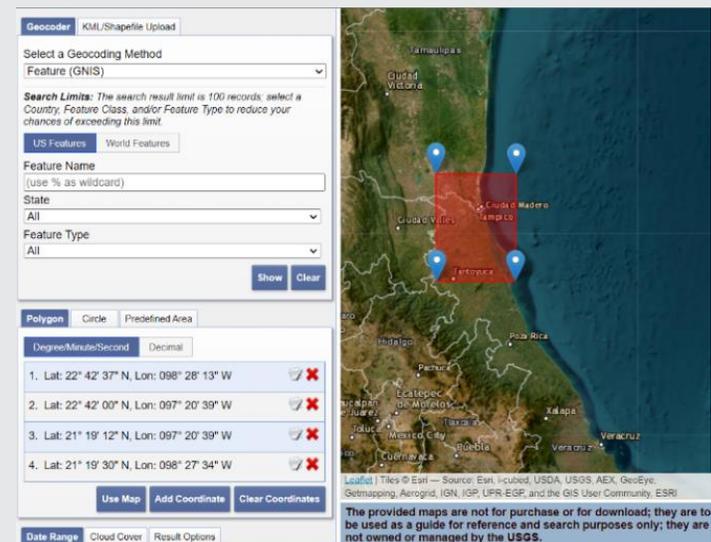


Figura 12. Imagen indicando la zona de estudio al norte de Veracruz y sur de Tamaulipas (USGS ESRI, 2024).

Del mismo modo se obtiene una descarga a partir del sector determinado para generar las imágenes espectrales individuales por número de banda teniendo en total 11 imágenes a utilizar, se observan las capas en la Figura 13.

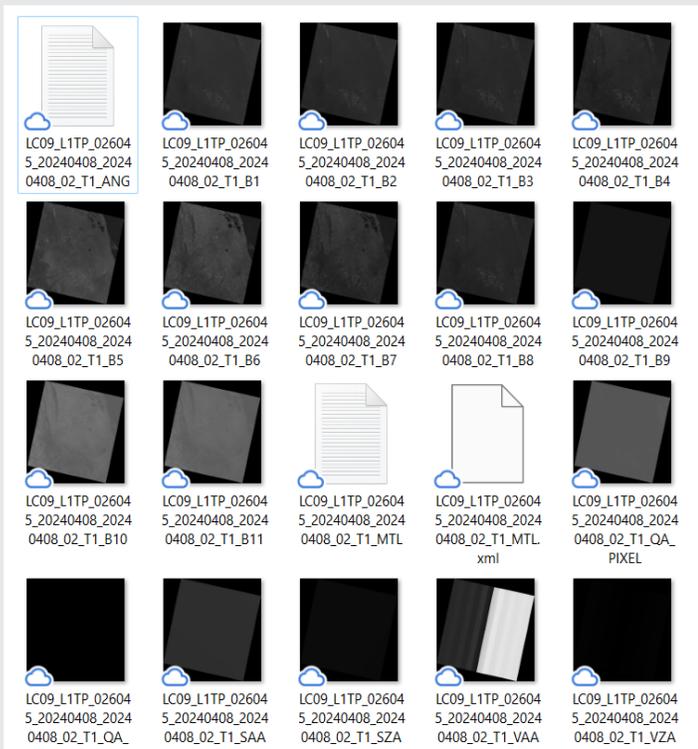


Figura 13. Carpeta con las imágenes espectrales por número de banda.

Fuente: Elaboración propia.

Paso 2:

Para el ingreso de los datos utilizaremos el software de uso libre QGIS el cual nos permitirá ingresar las imágenes espectrales que posteriormente se convertirán en multiespectrales.

Con ayuda del administrador de fuentes de datos de la interfaz gráfica del software ingresaremos las imágenes obtenidas en el paso 1, las cuales se ingresarán en orden de número de banda de la 1 a la 11 quedando de la siguiente manera se muestra en la Figura 14.

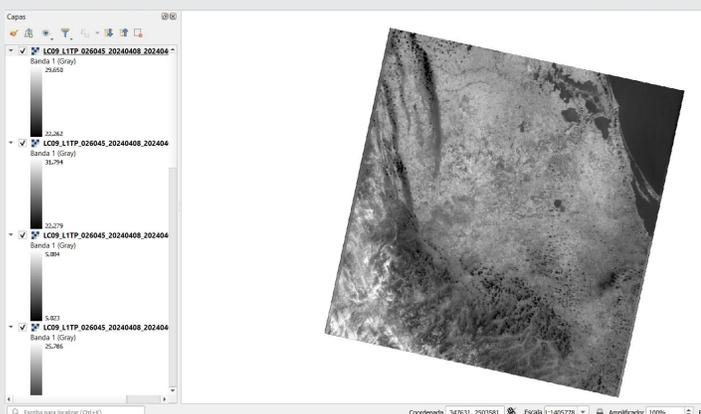


Figura 14. Inserción de las bandas en QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

Paso 3:

Para realizar la composición del ráster virtual mediante el procesamiento de las bandas nos dirigimos al menú ráster de la interfaz de usuario del software QGIS para posteriormente dentro de la opción parámetros añadiremos todas las bandas disponibles correspondientes a cada imagen que son 11 en total quedando como lo muestra la Figura 15.

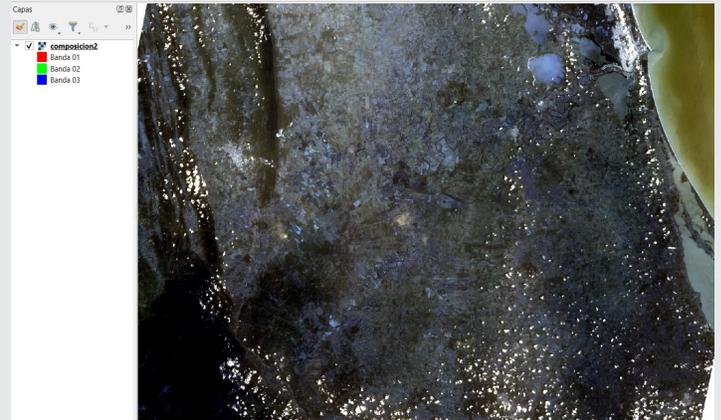


Figura 15. Visualización de la composición ráster en QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

Paso 4:

Con lo anterior podemos hacer combinaciones en las bandas espectrales, al resultado de esta acción se les denomina imágenes multiespectrales.

Para dicha acción se generan las que se deseen, en el particular estudio se tomaran tres combinaciones que nos sugiere la página oficial (USGS ESRI, 2024) primera, segunda y tercera combinación se aprecia en las Figuras 16, 17 y 18 respectivamente.

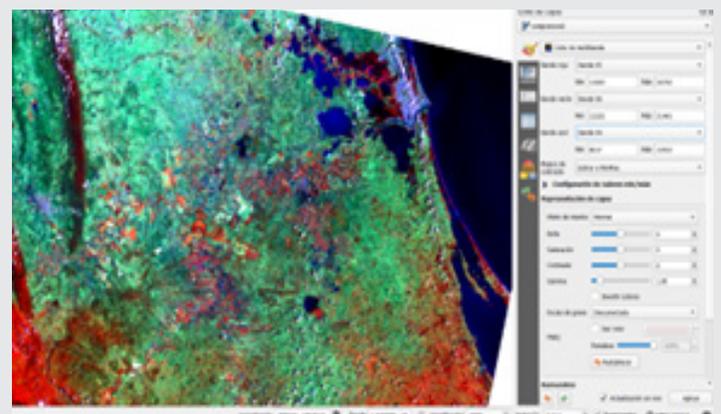


Figura 16. Bandas 5/6/4 valores multiespectrales de suelo y agua QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

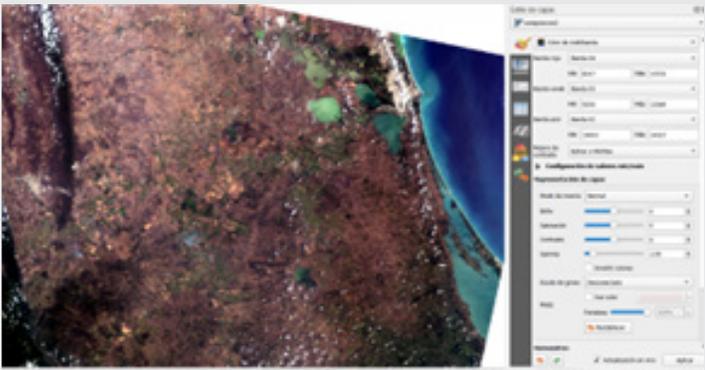


Figura 17. Bandas 4/3/2 valores multispectrales de color natural QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

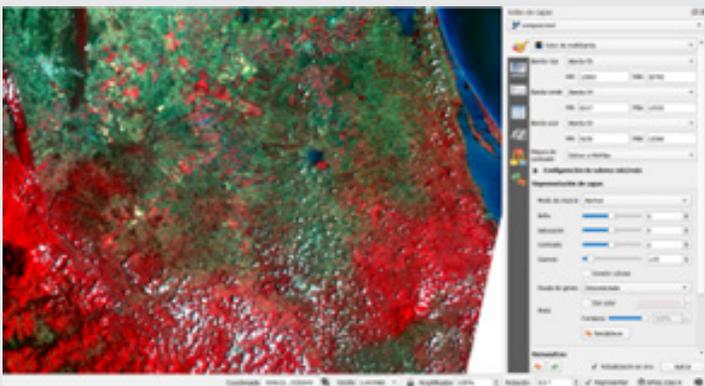


Figura 18. Bandas 5/4/3 valores multispectrales de infrarrojo y vegetación en QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El análisis bibliográfico realizado sobre la detección de contaminantes mediante el uso de imágenes satelitales multispectrales ha demostrado el potencial de la teledetección como una herramienta eficaz para monitorear y gestionar problemas ambientales a gran escala. Los estudios revisados destacan que las imágenes satelitales ofrecen una visión global y continua, permitiendo la identificación de patrones de contaminación en cuerpos de agua, suelo, cobertura vegetal, entre otros, con un nivel de detalle cada vez mayor gracias a los avances tecnológicos. Esto ha mejorado significativamente la precisión en la detección de sustancias contaminantes como metales pesados, sedimentos en suspensión, químicos peligrosos, entre otros.

Sin embargo, la revisión también ha revelado limitaciones en la aplicabilidad de la teledetección en ciertos escenarios. Las variaciones en las condiciones atmosféricas, la complejidad de algunos ecosistemas y las interferencias de factores como la vegetación o la nubosidad pueden afectar la precisión de los datos obtenidos. A pesar de los avances tecnológicos, existe una necesidad de desarrollar metodologías más robustas que combinen datos multispectrales con otros enfoques complementarios, como modelos predictivos o

datos in situ, para reducir los márgenes de error y mejorar la interpretación de los resultados.

En conclusión, la teledetección con imágenes satelitales multispectrales ofrece un camino prometedor para la detección de contaminantes, pero se requiere más investigación para optimizar su uso en diversas condiciones ambientales y geográficas. La integración de nuevas tecnologías y enfoques híbridos podría aumentar la precisión y utilidad de esta herramienta en la gestión ambiental. A medida que continúan los avances en la tecnología satelital y el análisis de datos, se espera que el monitoreo de contaminantes mediante teledetección juegue un papel cada vez más central en las estrategias globales para la protección del medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

Amado Alvarez, J., Pérez Cutillas, P., Alatorre Cejudo, L. C., Ramírez Valle, O., Segovia Ortega, E. F., & Alarcon Cabañero, J. J. (2019). Análisis multispectral para la estimación de la turbidez como indicador de la calidad del agua en embalses del estado de Chihuahua, México. *Revista Geográfica de América Central*.

Beiranvand, A., & Hashim, M. (2015). Mapeo de alteración hidrotermal a partir de datos de Landsat-8, Sar Distrito minero de cobre de Cheshmeh, sureste islámico República de Irán. *Revista de La Universidad de Ciencias de Taibah*, 9, 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.jtusc.2014.11.008>.

Berdugo Muñoz, A., & Reales López, G. (2016). Análisis multispectral de imágenes satelitales para evaluar variaciones espacio temporales en la calidad del agua del embalse el Guájaro, Atlántico.

Bravo Morales, N. F. (2017). Teledetección Espacial LANDSAT, SENTINEL-2, ASTER L1T y MODIS. *In Geomática ambiental (Vol. 1)*. https://sites.google.com/view/geomatica-ambiental-srl/%0Ahttps://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf.

Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., & Ramos, S. (2018). Determinación de calidad de agua en el Lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, año 2016, Chile. *Revista de Teledetección*, 67-78.

Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental, la observación de la tierra desde el espacio*.

Feng, J., Saurabh Channan, S., & Townshend, J. (2015). Conjunto de datos globales de masas de agua continentales de alta resolución (30 m) para el año 2000: primeros resultados de un algoritmo

de clasificación topográfica y espectral. *International Journal of Digital Earth*, 30 m. <https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1026420>.

Ibarrola Ulzurrun, E., Gonzalo Martín, C., Marcello Ruiz, J., García Pedrero, Á., & Rodríguez Esparragón, D. (2017). Fusión de imágenes multiespectrales de alta resolución en ecosistemas costeros terrestres vulnerables. *Sensors*, 1–23. <https://doi.org/10.3390/s17020228>.

Kamel, M., Youssef, S., Hassan, M., & Bagash, F. (2016). Utilización de datos de ETM+ Landsat en el mapeo geológico del área de wadi Ghadir-Gabal Zabara , desierto central oriental , Egipto. *La Revista Egipcia de Teledetección y Espacio Ciencias*, 343–360. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.06.003>.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation*.

Montaño Roldan, V. L., Gonzales Vega, A. A., Ortiz Calcedo, P. L., & Álava Vélez, C. E. (2023). Cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en Perú. In *Engineering & Technology Studies* (Vol. 3, pp. 34–42).

Montiel González, I., Martínez Santiago, S., López Santos, A., & García Herrera, G. (2017). Impacto del cambio climático en la agricultura de secano de Aguascalientes, México para un futuro cercano (2015-2039). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 16(1), 1–13. <https://doi.org/10.5154/r.rchsa.2017.01.001>.

NASA ARSET. (2023). *Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota)* (p. 39). https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-03/Fundamentals_of_RS_Span.pdf.

Pinilla, C. (2020). *Teledetección: teoría y aplicaciones*. *Teledetección: Teoría y Aplicaciones*, May, 1–224. https://www.researchgate.net/publication/341727281_teledeteccion_teor%C3%ADa_y_aplicaciones_carlos_pinilla.

Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote sensing digital image analysis: An introduction*. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, February, 1–439. <https://doi.org/10.1007/3-540-29711-1>.

Rosales Malpartida, J. Y., & Apaza Mamani, H. A. (2022). Análisis de imágenes satelitales Landsat 8 por componentes principales y MNF para la detección de zonas del derrame de petróleo Repsol en la Costa Peruana. *Tecno Humanismo Revista Científica*, March. <https://doi.org/10.53673/data.v2i2.78>.

USGS ESRI. (2024). *Servicio Geológico de Estados Unidos*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, 38, 100–103. <https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v38n4/0718-3429-idesia-38-04-99.pdf>.





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Análisis y simulación numérica del embutido de lámina de un acero inoxidable



Colaboración

Pedro de Jesús García Zugasti; Enrique Alejandro Vázquez Hernández; Juan Gabriel Sandoval Granja; Erick David Ríos Ayala; Gerardo García Liñán, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Luis Potosí

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 11 de octubre de 2024

RESUMEN: En este trabajo se presenta el análisis y simulación numérica del proceso de embutido de lámina metálica, con la finalidad de conocer los parámetros importantes del proceso que influyen en su capacidad para ser formado. Se seleccionó como material de la lámina un acero inoxidable de uso frecuente en la fabricación de componentes industriales.

El análisis y la simulación numérica del proceso de embutido de una parte cilíndrica permitió conocer el grado de concordancia entre los resultados de la simulación virtual y las expresiones y recomendaciones teóricas que se reportan en la literatura especializada. Los parámetros observados fueron la influencia del uso del planchador, y el claro entre punzón y matriz sobre la altura de embutido de la parte. Los resultados mostraron que la menor diferencia, entre la altura teórica de embutido y la calculada por simulación, fue la obtenida sin el uso del planchador mientras que la mayor diferencia fue con el uso de este elemento.

PALABRAS CLAVE: embutido, lámina metálica, simulación numérica, método del elemento finito (MEF).

ABSTRACT: This work presents the analysis and numerical simulation of the sheet metal deep drawing process, with the purpose to know the process parameters influence in the formability of the sheet metal. A stainless steel, frequently used in the manufacture of industrial components, was selected as the sheet metal material.

The analysis and numerical simulation of the deep drawing process of a cylindrical part, allowed to know the degree of agreement between the results of the virtual simulation and those, based on theoretical expressions and recommendations, reported in the specialized literature. The metal forming process parameters observed, were the use of a blankholder, and the clearance between punch and die, in the deep drawing height of the part.

The results showed that the smallest difference, between the theoretical deep drawing height and that calculated by computer simulation, was that obtained without the use of the blankholder, while the greatest difference was with the use of this element.

KEYWORDS: Deep drawing, sheet metal, numerical analysis and simulation, finite element method.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento en la demanda de productos industriales mediante los procesos de conformado de lámina metálica se percibe notoriamente en años recientes. Como consecuencia la demanda de Herramientales para la fabrica-

ción de productos metalmeccánicos, en particular de troqueles para el corte y conformado de lámina es una constante en la Industria Automotriz Mexicana [1]. El desarrollo de nuevos aceros con propiedades mejoradas para estas aplicaciones ha permitido solventar las limitaciones y problemas de fabricación. Un problema que se presenta comúnmente, en las áreas de fabricación, es la selección del material de la lámina, que tenga la capacidad para ser formado plásticamente en formas geométricas no regulares o complejas. Para dar respuesta se cuenta con herramientas de análisis y simulación numérica, mediante programas de computadora basados en el Método del Elemento Finito (MEF), que permiten reproducir virtualmente los procesos de conformado de lámina metálica, reduciendo los tiempos de diseño y fabricación de nuevos productos o cambios a los ya existentes.

El proceso de embutido de lámina permite obtener partes o componentes industriales con formas geométricas tipo caja o huecas. Su uso es cada vez más frecuente en la producción de enseres domésticos (por ejemplo, tarjas para cocina, componentes de estufas, etc.), equipos de industria pesada, los equipos médicos, equipos mecánicos, componentes de hardware, los componentes de los motores de combustión interna [2].

El incremento notable de partes o componentes para la industria automotriz en México impacta en una creciente demanda de acero inoxidable para diversas aplicaciones. Los fabricantes de automóviles incorporan en sus vehículos características que redundan en mejorar: la eficiencia de combustible y reducción de emisiones. Los aceros inoxidables poseen una alta relación resistencia-peso por lo cual destaca en las preferencias del sector. Otras propiedades destacadas son: su resistencia a la corrosión lo cual prolonga la vida útil de los vehículos, específicamente para aplicaciones en climas tropicales húmedos o calores extremos y secos como en nuestro país. El acero inoxidable ayuda a reducir los costos por mantenimiento y a prolongar la vida útil de los vehículos. Los datos estadísticos reportan un incremento en los próximos años del mercado de acero inoxidable en México, debido al interés por su uso entre los fabricantes de automóviles en nuestro país [3].

En este trabajo se describe el procedimiento para determinar la capacidad de embutido de un acero inoxidable, mediante el análisis y simulación virtual de la operación de formado de lámina de una parte cilíndrica del acero antes mencionado (ver Figura 1). Los parámetros del proceso observados fueron: la influencia de la fuerza de la placa de sujeción o planchador y el claro entre punzón y matriz del dado, sobre la altura de embutido de la parte.

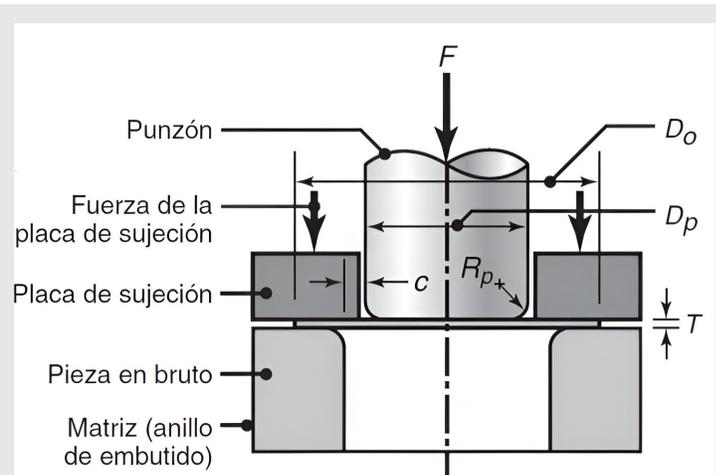


Figura 1. Proceso de embutido y sus parámetros. F =fuerza del punzón, D_o =Diámetro de la silueta a embutir, D_p =Diámetro del punzón, T =espesor de la lámina, R_p =radio del punzón, R_d =radio de la matriz, C =claro entre punzón y matriz. En este trabajo: $D_o=D_b$ y $T=t$.

Fuente: [4].

Los resultados obtenidos se han contrastado con los cálculos analíticos reportados en la literatura especializada y los cuales deben complementarse con los resultados de pruebas en campo para verificar su exactitud.

Marco teórico

Aunque existen trabajos desarrollados acerca del uso de la simulación numérica aplicada a los procesos de conformado de lámina, específicamente el embutido de lámina de partes cilíndricas y no cilíndricas, con aceros de bajo carbono, en estos se analiza la altura permisible de una parte rectangular doblemente embutida [5], la altura permisible de embutido de partes rectangulares de acero al carbono [6] o la determinación de la fuerza permisible de embutido mediante expresiones analíticas de partes cilíndricas y rectangulares de acero de bajo carbono [7], existe poca información relativa al análisis del embutido de partes con material de la lámina de acero inoxidable.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material

El material de la lámina utilizado para la parte cilíndrica a embutir es acero inoxidable cuyas propiedades mecánicas se encuentran en la Tabla 1.

Metodología

Primeramente, se seleccionó un tamaño estándar de la parte cilíndrica a embutir, para posteriormente calcular los parámetros del proceso, para llevar a cabo la operación de embutido, a partir de diámetro de la parte. Como paso siguiente se determinó la altura permisible de embutido de la parte cilíndrica considerando tres casos específicos de interés para este estudio:

- Operación de embutido con el uso de planchador.
- Sin el uso de planchador,
- Reducción del claro entre punzón y matriz.

El último paso consistió en la preparación del programa de simulación numérica para realizar virtualmente la operación de embutido, obtener resultados para los casos de estudios mencionados antes y compararlos con los resultados teóricos.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del Acero Inoxidable.

Módulo Elástico	193 GPa
Relación de Poisson	0.31
Resistencia última a la tensión (TS)	515MPa
Resistencia a la Cedencia	210MPa
Módulo Tangente	1800MPa

Fuente: Elaboración propia.

El método empleado para llevar a cabo la simulación del proceso de formado plástico de la lámina por embutido cilíndrico, con el uso del programa comercial de computadora ANSYS, es dinámico explícito, debido a la dependencia del tiempo de las operaciones de formado.

Para realizar la simulación es necesario contar con la geometría de los componentes del herramental de embutido: el punzón, el planchador y la lámina metálica, estos elementos se presentan virtualmente en la Figura 2.

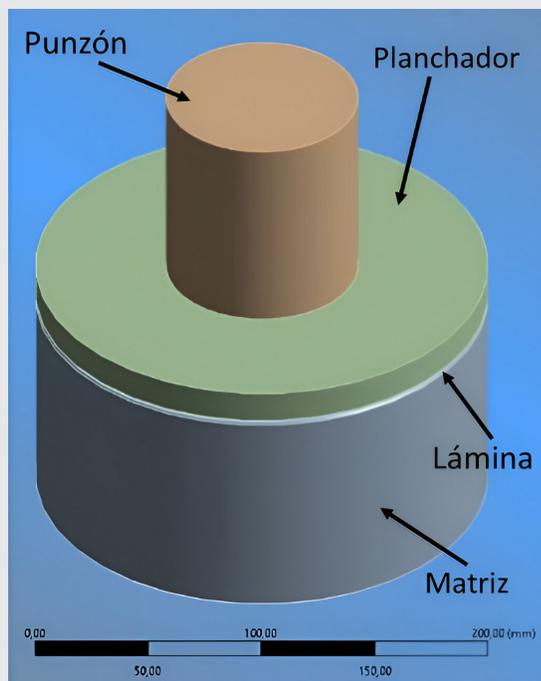


Figura 2. Herramental y lámina a embutir.

Fuente: Elaboración propia.

El diámetro de la lámina o silueta a embutir se establece en $Db=200\text{mm}$, a partir de este se obtienen los parámetros de la parte cilíndrica a embutir: h =altura, d =diámetro, t =espesor y R =radio de la parte, los cuales se muestran en la Figura 3.

Cálculo de parámetros para la operación de embutido

La severidad del embutido se mide mediante la reducción r , que involucra el diámetro de la silueta a embutir " Db " y el diámetro del punzón " Dp ", se expresa como:

$$r = \frac{Db - Dp}{Db} \quad \text{Ec. (1)}$$

Se emplea un valor de la reducción $r=0.45$ para asegurar un embutido libre de defectos [8]. Resolviendo la ec. 1 para obtener el diámetro del punzón este es $Dp=110\text{mm}$.

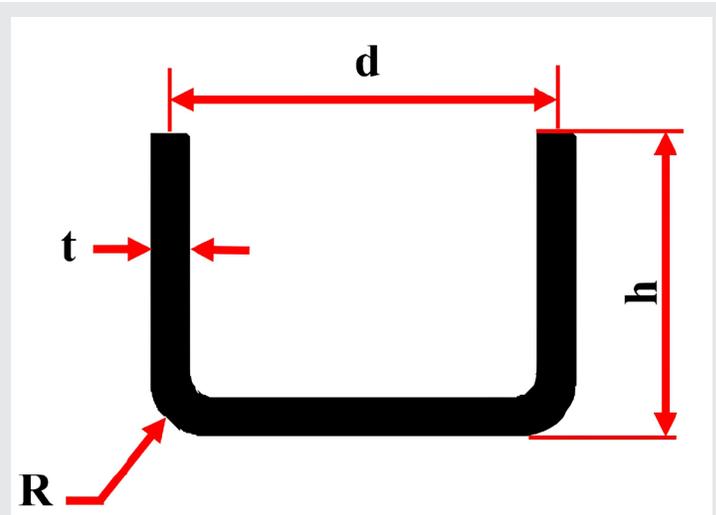


Figura 3. Geometría de la parte cilíndrica a embutir: d =diámetro, t =espesor, h =altura y R =radio de la parte.

Fuente: Elaboración propia.

Debe cumplirse también, para un embutido eficiente, que el cociente entre el espesor de la lámina y el diámetro de la silueta a embutir sea mayor al 1%, por lo tanto, el espesor comercial correspondiente de la lámina es de 2.65 mm (calibre 12).

La altura teórica de la parte a embutir se obtiene mediante la expresión:

$$h = \frac{Db^2 - d^2}{4 \cdot d} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde $d=112.65\text{ mm}$ es el diámetro medio de la parte a embutir y se calcula sumando el espesor de la lámina al diámetro del punzón Dp . Por lo tanto, la altura teórica resultante de la ec. 2 es de $h=60.61\text{mm}$. Esta altura se emplea ahora en el cálculo del radio de la parte embutida $R=15.15\text{ mm}$, la cual se obtuvo mediante la expresión:

$$R = \frac{1}{4} h \quad \text{ec. (3)}$$

La altura teórica de la parte a embutir considerando el radio R es de $h_{real}=75.6\text{mm}$ usando la expresión:

$$h_{real} = \frac{Db^2 - d^2}{4d} + Rp \quad \text{ec. (4)}$$

Para verificar la altura teórica obtenida, se empleó la Tabla 2, la cual muestra el rango de valores recomen-

dables para las relaciones d/Db y h/d , específicas para una lámina de acero inoxidable, para este estudio $h/d=0.67$ valor dentro del rango establecido.

Tabla 2. Rango de valores para las relaciones geométricas de una parte cilíndrica embutida de acero inoxidable.

Material	Primera pasada	
	$\frac{d}{D} = u$	$\frac{h}{d}$
Acero Inoxidable	0.50 ÷ 0.55	0.57 ÷ 0.75

Fuente: [9]

Los radios de las aristas del punzón $R_p=6$ mm y la matriz $R_m=12.17$ mm de embutido (ver Figura 4) fueron obtenidos de manera siguiente:

Radio de la matriz:

$$R_d = 0.8\sqrt{(D_b - d)t} \quad \text{ec. (5)}$$

Radio del Punzón mediante la condición:

$$t \leq R_p \leq 3t$$

El claro entre el punzón y la matriz o separación entre el punzón y la cavidad de embutición (matriz) debe tener un valor entre 1.1 y 1.4 veces el espesor de la lámina, para este caso se tomó el valor de 1.1 y un valor del claro de $C=3$ mm.

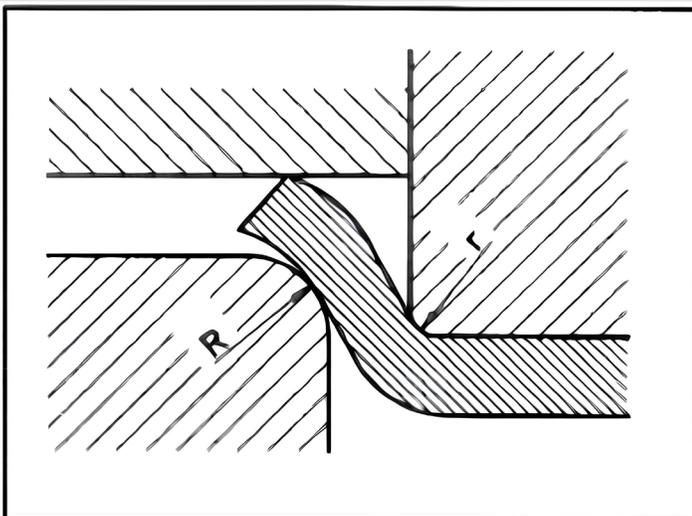


Figura 4. Radio del punzón $R_p=r$ y radio de la matriz $R_d=R$ del herramental de embutir.

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de embutición óptima depende del material de la lámina, esta velocidad permite el tiempo necesario para pasar al estado plástico sin que se produzcan roturas o adelgazamientos sensibles en su espesor. La velocidad para el acero inoxidable recomendable [10] se establece en este trabajo en 200 mm/s.

El coeficiente de fricción entre el herramental de embutido y la lámina de acero inoxidable recomendable para este último material debe estar entre el rango de valores de 0.213 y 0.891, en este trabajo se tomó un valor de 0.47. Considerando una lubricación con aceite mineral [10].

La fuerza de punzonado o embutido se calcula usando la expresión:

$$F_{m\acute{a}x} = \pi D_p t (TS) \left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) \quad \text{Ec. (6)}$$

El valor de esta fuerza empleando los parámetros involucrados establecidos antes, es de: $F_{m\acute{a}x}=527$ kN. La fuerza de sujeción o del planchador es, aproximadamente, una tercera parte de la fuerza de embutido, lo cual resulta $F_s=175.7$ kN.

Haciendo uso del método del elemento finito, se realiza una simulación del proceso de embutición mediante el software ANSYS Workbench con el subprograma LS DYNA (Análisis dinámico explícito) [11-13]. Lo anterior debido a que el proceso de embutición es un problema altamente no lineal en el que se produce un impacto entre el punzón y la lámina metálica debido a que el punzón se desplaza hacia abajo con determinada velocidad ejerciendo una fuerza sobre dicha lámina.

RESULTADOS

La simulación fué realizada con la fuerza calculada para el planchador de $F_s=175.7$ kN, esta fuerza asegura un embutido libre de arrugas en el reborde de la lámina, posteriormente se lleva a cabo la simulación sin el uso de un planchador, para observar la formación arrugas. Finalmente se modificó el claro entre punzón y matriz.

Los cambios en las condiciones y parámetros de la operación de embutido de la lámina metálica tienen la finalidad de verificar las expresiones y recomendaciones obtenidas de la literatura especializada y/o determinar el porcentaje de error que existe entre la teoría y los resultados del análisis y simulación numérica.

Preparación del Modelo de Elemento Finito

La geometría del herramental para realizar la operación de embutido cilíndrico que consta de un punzón, un planchador y la matriz se modelan como cuerpos sólidos de acero estructural.

Las propiedades mecánicas del material de la lámina a embutir corresponden al acero inoxidable con comportamiento no lineal.

Las condiciones de frontera que se establecieron fueron las siguientes:

- La matriz se considera rígida y como un soporte fijo.
- El desplazamiento del punzón es de 15 mm en el sentido del eje Y negativo y está restringido en las direcciones X y Z.

c. El punzón es rígido y sobre este se aplica una fuerza de $F_{m\acute{a}x}=527\text{kN}$ de forma tabular, es decir, que al tiempo cero esta fuerza es igual a cero, y cuando el recorrido del punzón llega a la tercera parte del recorrido final se aplica dicha fuerza, basado en recomendaciones de la teoría especializada.

d. La velocidad del punzón, durante la operación de embutido, es de $v= -200\text{ m/s}$ está aplicada en la dirección Y negativa.

e. El tiempo fue seleccionado bajo la premisa de la velocidad anterior de 0.0004 segundos.

f. En las superficies de contacto entre la lámina y el planchador se ha establecido un coeficiente de fricción dinámico de 0.05; mientras que en la superficie de contacto entre la lámina y la matriz se estableció un coeficiente de fricción dinámico de 0.08. Tomando en cuenta que estas superficies se encuentran lubricadas como se indican en los apartados anteriores.

Los resultados de la simulación se muestran a continuación tomando en cuenta los cambios en las condiciones de embutición antes mencionados.

Caso 1. La embutición con planchador empleando los parámetros teóricos antes establecidos.

En la Figura 5 se muestra los valores máximos y mínimos resultantes de la deformación en la dirección del eje de simetría de la parte embutida. La deformación total es de 86.0879 mm y corresponde al valor de la altura de embutido.

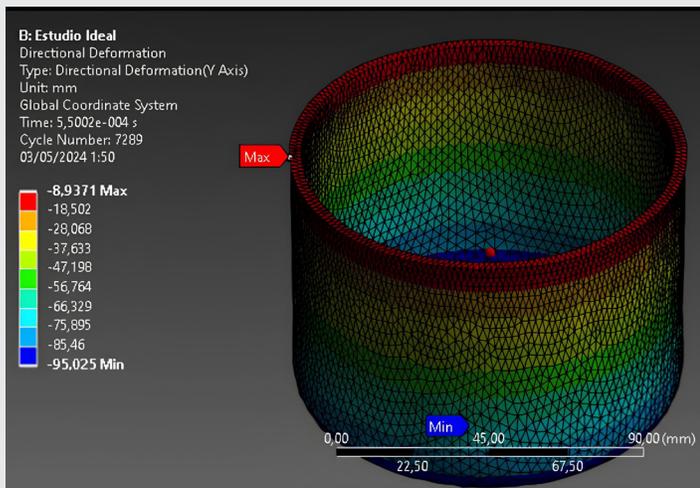


Figura 5. Deformación en la dirección del eje Y (eje de simetría de la parte) resultante de la simulación numérica.

Fuente: Elaboración propia.

Caso 2. La embutición sin planchador manteniendo las mismas condiciones del caso 1

Para este estudio en particular, se realiza el mismo procedimiento junto con las condiciones requeridas para el estudio del caso 1, exceptuando las relacionadas con interacción entre la lámina y el planchador. Parámetros como la fuerza, velocidad, coeficientes de fricción y dimensiones se mantienen iguales.

En la Figura 6 muestra los valores máximos y mínimos resultante de la deformación en la dirección del eje de simetría de la parte embutida. La deformación total es de 85.501 mm y corresponde al valor de la altura de embutido.

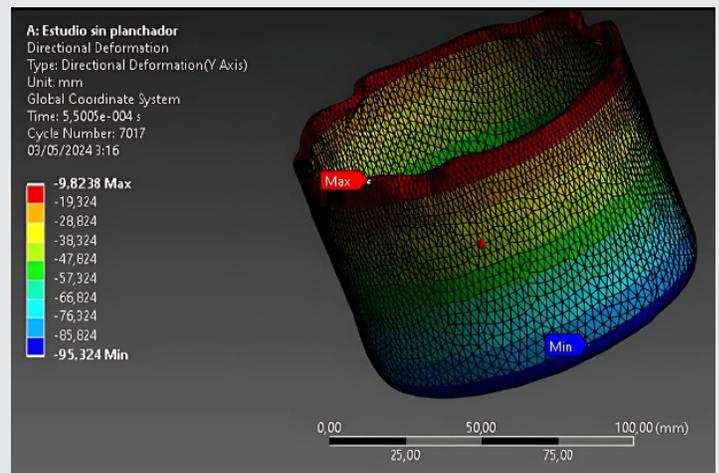


Figura 6. Deformación en la dirección del eje Y (eje de simetría de la parte) resultante de la simulación numérica para el caso 2.

Fuente: Elaboración propia.

Caso 3. La embutición con reducción del claro entre punzón y matriz

En este modelado se consideró reducir el claro que establece los métodos teóricos. Lo que se pretende con esta reducción es ver qué tan crítico es el comportamiento de la lámina con este cambio. En este caso se redujo el claro a la misma dimensión que el espesor de la lámina, es decir, 2.65 mm. Los parámetros como la fuerza, velocidad, coeficientes de fricción y dimensiones se mantienen iguales.

En la Figura 7 muestra los valores máximos y mínimos resultante de la deformación en la dirección del eje de simetría de la parte embutida. La deformación total es de 88.82 mm correspondiente al valor de la altura de embutido.

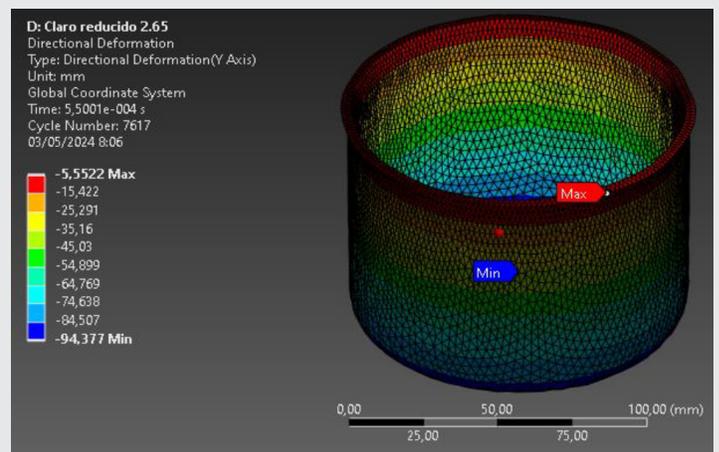


Figura 7. Deformación en la dirección del eje Y (eje de simetría de la parte) resultante de la simulación numérica para el caso 3.

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 3 contiene una comparativa entre los valores resultantes de los distintos casos de simulación.

Tabla 3. Resultados de la simulación para la altura de embutido.

Caso :	1	2	3
Altura de embutido mm	86.0879	85.501	88.82
Diferencia valor teórico	10.4879	9.901	13.22
Porcentaje de diferencia.	12.2%	11.6%	14.9%

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El análisis y la simulación numérica permite conocer el comportamiento del proceso de embutido de lámina metálica en etapas tempranas de diseño y la fabricación de componentes industriales.

En este trabajo ha sido posible comparar, los parámetros del proceso de embutido de una parte cilíndrica obtenidos de cálculos analíticos, empleando las expresiones y recomendaciones de la literatura especializada, con los resultados empleando el análisis y simulación numérica, con el programa ANSYS y el subprograma LS-DYNA, basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF).

La diferencia 12.2% entre la altura de embutido calculada analítica y numéricamente para el caso 1, se encuentra dentro de un rango tolerable, relacionado con el cálculo de los parámetros del proceso involucrados, mediante expresiones analíticas generales, que difieren en sus resultados, dependiendo del material de la lámina y los parámetros seleccionados para un caso particular, por lo que se espera una diferencia respecto al de la simulación o al valor real.

Respecto al caso 2, la diferencia de 11.6% es debido a que la ausencia de la fuerza del planchador, permite el fácil ingreso de la lámina hacia la cavidad que forma la matriz de embutido. Esta situación causa un menor estimamiento de la lámina que forma la pared del recipiente cilíndrico embutido y por lo tanto un menor valor de la altura de embutido resultante.

Finalmente, en el caso 3 la diferencia obtenida es del 14.9% y se debe a que la lámina no fluye libremente al no tener holgura para su desplazamiento adecuado. La lámina que forma la pared de la parte embutida está sujeta a una mayor fuerza de tensión al ingresar a la cavidad de la matriz, por esta razón la altura de la parte cilíndrica embutida es la mayor de los tres casos considerados.

En general se concluye que el análisis y simulación numérica permite conocer el grado de desviación entre

los resultados analíticos y los de la simulación numérica, lo que permite establecer una confiabilidad aceptable de las herramientas de análisis y simulación numérica para su uso en las etapas de diseño y fabricación de nuevos productos o actualización de los ya existentes.

Como trabajo futuro se propone la comparativa entre los resultados obtenidos en este estudio y los de la experimentación en campo mediante el diseño de un dado de embutir y el uso de una prensa de tipo hidráulico que permita reproducir la operación usando los parámetros del proceso utilizados para los casos de estudio del presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, por el apoyo recibido para la realización del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

[1] *Mex. Industry*, p. 25, junio de 2023.

[2] *Layana Company*. (12 de agosto de 2023). *Embutición profunda del metal*. <https://www.layana.com/es/technology/metal-drawing>.

[3] *EMR a Claight Enterprise*. (10 de febrero de 2024). *Análisis del Mercado de Acero Inoxidable en México*. <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-acero-inoxidable-en-mexico>.

[4] *S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología*, 7a ed. Pearson, 2014.

[5] *Cerino-Zapata, A., García-Zugasti, P. D. J., Medellín-Castillo, H. I., de Lange, D. F.*, "Análisis del Doble Embutido Rectangular Usando MEF", *Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 22 al 24 de Septiembre 2010, Monterrey, Nuevo León, México*, 2010.

[6] *Medellín-Castillo, H. I., García-Zugasti, P. D. J., de Lange, D. F., & Colorado-Alonso, F. J.* *Analysis of the allowable deep drawing height of rectangular steel parts*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, 2013, pp. 371-380.

[7] *A. Rivas, H. I. Medellín, D. F. de Lange, and P. de J. García-Zugasti*, "Performance evaluation of analytical expressions for cylindrical and rectangular deep drawing force estimation," *J. Manuf. Process.*, vol. 36, no. September 2017, pp. 340-350, 2018.

[8] *P. Groover, M. Fundamentos de manufactura moderna*. 3ª. ed. Vol. 1. McGraw-Hill Interamericana. 2007.

[9] M. Rossi. *Estampado en frío de la chapa: estampas, matrices, punzones, prensas y máquinas*. 9a ed. Vol. 1. Dossat, S.A. 1979.

[10] Pedrosa Astudillo, A. A., & Sánchez Alvarracín, C. M. *Análisis matemático del conformado en el proceso de embutición cilíndrica de una sola fase, para evaluar el comportamiento mecánico de una chapa bimetálica*. Master's thesis. 2018.

[11] Ansys Notas Ingeniería. (19 de junio de 2018). [Vídeo en línea]. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=KhnWbcTy3i8>

[12] Ansys Inc. *What is Explicit Dynamics?* (27 de julio de 2022,). [Vídeo en línea]. Recuperado 6 de mayo de 2024. Disponible en <https://www.ansys.com/blog/what-is-explicit-dynamics>.

[13] Expertfea. com. *WEBINAR 4: ANSYS Workbench Explicit Dynamics FEA of a high speed stamping* (6 de julio de 2014,). [Vídeo en línea]. Disponible en YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=B-59B5bJAco>.





Tierra,
Medio Ambiente
y Energía

Ingeniantes

Identificación de parámetros de desempeño en las conexiones serie y paralelo con celdas solares



Colaboración

Mario Espinosa Tlaxcaltecatl, Marco Antonio Alonso Pérez, Jacob Javier Vasquez Sanjuan, Juan Antonio Arizaga Silva, Carlos Muñiz Montero, Universidad Politécnica de Puebla

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 07 de octubre de 2024

RESUMEN: El trabajo reporta la valoración de los parámetros de desempeño obtenidas al implementar las conexiones serie y paralelo con celdas solares comerciales. Las estimaciones de los parámetros se obtienen usando curvas IV (corriente-voltaje), obtenidas al usar un equipo de medición y alimentación eléctrica basado en un electrómetro. Así mismo, el sistema de iluminación de luz blanca es empleado en un ambiente aislado donde se asegura la uniformidad de la mancha de iluminación. Las diversas formas de conexión de celdas son empleadas para obtener una mayor amplitud resultante de corriente y/o voltaje del sistema fotovoltaico, pero igual de importante es determinar su relación con la eficiencia de conversión de potencia, como el principal parámetro de desempeño. Los resultados muestran que la eficiencia de conversión de potencia es mayor un 2.14% en la conexión en serie en comparación con la conexión en paralela.

PALABRAS CLAVE: caracterización eléctrica, respuesta corriente-voltaje, medición de corriente, configuración serie, configuración paralela.

ABSTRACT: The work reports assessing the performance parameters obtained when implementing series and parallel connections with commercial solar cells. Parameter estimates are obtained using IV (current-voltage) curves, obtained by using electrical power and measurement equipment based on an electrometer. Likewise, the white light lighting system is used in an isolated environment where the uniformity of the lighting spot is ensured. The various forms of cell connection are used to obtain a greater resulting amplitude of current or voltage of the photovoltaic system, but equally important is determining its relationship with the power conversion efficiency, as the main performance parameter. The results show that the power conversion efficiency is 2.14% higher in the series connection compared to the parallel connection.

KEYWORDS: electrical characterization, current-voltage response, current measurement, series configuration, parallel configuration.

INTRODUCCIÓN

Los dispositivos fotovoltaicos son utilizados con un crecimiento acelerado en los últimos años, según datos de la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, 2023), se estima en su reporte del 2023 que las fuentes renovables presenten un crecimiento de 30%, liderada por la energía fotovoltaica. De las cuales se pueden identificar dos casos, los dispositivos individuales con baja potencia, los comúnmente llamados como celdas solares y los paneles solares. Los dispositivos de baja potencia están limitados en su aplica-

ción, para alimentación de dispositivos domésticos o en sistemas modernos de recarga de pequeñas baterías (Mulyono et al., 2018)(Serdiuk et al., 2024)(Juep Chicaiza, Christian Alexander; Romero Bedón, 2024). La limitación está definida por los requerimientos de potencia eléctrica que requieren los dispositivos de carga, los cuales presentan variantes de corrientes y voltajes diversos. Para hacer viable el uso de estos dispositivos es necesario definir la relación entre las características eléctricas y de desempeño (Cardet, 2022)(Al- Ezzi & Ansari, 2022) de los dispositivos comerciales, en su forma individual y en sus formas de conexión serie y paralela. Este análisis ha sido atendido en el caso de celdas solares por (Toure et al., 2022) y con paneles solares (Mengounou Mengata et al., 2022). El trabajo se enfoca en determinar esta relación usando celdas solares. Primero, cumpliendo las condiciones estables del espacio de iluminación y controlando la excitación eléctrica a las celdas solares con una interfaz automatizada. Después, obteniendo las mediciones de corriente, para finalmente, analizar los parámetros de desempeño usando los resultados numéricos. La caracterización realizada en este trabajo contribuye con información sobre el desempeño particular de las conexiones serie y paralela. Al momento de utilizar alguna de estas conexiones, es necesario, considerar los requerimientos de potencia, ya sea, con incremento de la corriente en la conexión paralela o incrementando el voltaje en la conexión en serie. Así, como considerar el desempeño de la conexión seleccionada, con importancia significativa, en la eficiencia de conversión de potencia, ya que este parámetro define el porcentaje final de potencia resultante.

MATERIAL Y MÉTODOS

Materiales

Se utilizan celdas solares comerciales con patente USA NO.:29/158.337 de 10 x 8.5 cm de área total, con voltaje nominal de 1.5 V. La iluminación como en trabajos similares (Mengounou Mengata et al., 2022) (Mathews et al., 2019) (Venkateswararao et al., 2020) es proporcionada por una lámpara de luz blanca con una irradiancia máxima de 1040 W/m^2 , la luz es conducida por un ducto hueco con forma de prisma rectangular de 150 x 10 x 12 cm, que permite aislar la iluminación externa y es caracterizada con un medidor solar marca ANAHEIM SCIENTIFIC H115. La fuente de voltaje y el medidor de corriente está integrado en un electrómetro marca Keithley 6517B. Para el arreglo de celdas solares se utiliza un dispositivo configurable que permite la conexión de las tres celdas solares en formas diversas.

Método de caracterización

La Figura 1 muestra las etapas en el proceso para determinar los parámetros de desempeño, usando las curvas I-V en las conexiones serie y paralela en celdas solares.

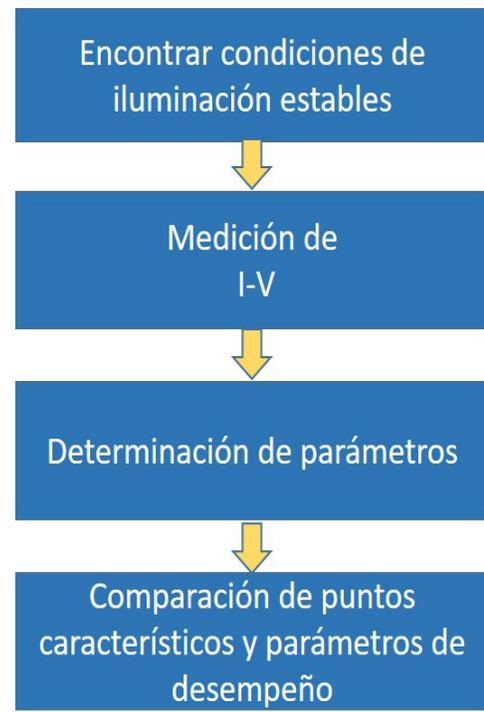


Figura 1. Proceso de caracterización de celdas solares individuales y en conexión.

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar las mediciones en condiciones de laboratorio, la iluminación es proporcionada por una lámpara de luz blanca. Inicialmente, se observa la presencia de un patrón de iluminación irregular, caracterizado por picos y espacios de baja intensidad de iluminación. Por lo tanto, se implementa un arreglo experimental para mejorar la homogeneidad del perfil de iluminación. Se propone confinar el haz en un ducto hueco de forma rectangular, esto disminuye la intensidad de radiación en la salida del ducto, lo cual asociamos a un proceso de absorción en las paredes, pero mejora la uniformidad del haz. Y mediante un proceso heurístico se buscó la homogeneidad del haz y la longitud del ducto, encontrando una distancia adecuada de 150 cm. El perfil de iluminación es escaneado a través de un medidor solar, con una irradiancia promedio a cada celda solar de 1.23 W/m^2 , esto presenta una potencia óptica de 1.57 mW al considerar el área efectiva de cada celda solar.

Sistema de caracterización

El arreglo experimental mostrado en la Figura 2, está integrado por una fuente de luz blanca a la izquierda, esta iluminación es confinada y conducida hasta las celdas solares por una estructura aislada a temperatura ambiente, que además uniforma la intensidad de radiación en el área de iluminación. Las celdas solares se conectan a un electrómetro, el cual es configurado para excitar las celdas solares con su fuente de voltaje y medir la corriente obtenida.

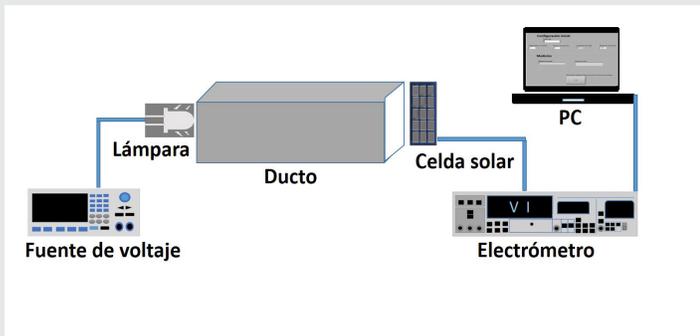


Figura 2. Diagrama esquemático de la configuración del sistema de caracterización.

Fuente: Elaboración propia.

La configuración del electrómetro utiliza comunicación serie RS232 con una computadora, que controla los rangos de voltaje aplicados a las celdas, usando el programa de automatización Labview. En el panel frontal, se elige el voltaje máximo que puede proporcionar la fuente de voltaje del electrómetro. Este parámetro debe garantizar que la respuesta del dispositivo excitado no sobrepase la capacidad de medición de corriente del electrómetro de 10A a 21 mA, y del voltaje de 1uV a 210V (Keithley, 2016) en nuestro experimento, las celdas solares individuales deben ser excitadas con un voltaje no mayor a 0.7 V. Con este voltaje máximo la corriente resultante depende de la intensidad de iluminación. Al contar con niveles de irradiancia menores a 2 W/m², se mide una corriente no mayor a 2 mA. Sin embargo, para proteger al electrómetro de corrientes mayores se elige una escala de medición de 20 mA, que es la mayor escala del instrumento.

Estimación de parámetros de desempeño en celdas solares

Los parámetros de desempeño de dispositivos fotovoltaicos son comúnmente estimados usando los puntos característicos: voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de corto circuito (I_{sc}), voltaje de potencia máxima ($V_{P_{max}}$), corriente de potencia máxima ($I_{P_{max}}$) y punto de potencia máxima (P_{max}), ubicados en la curva IV, ver Figura 3.

La corriente de corto circuito está ubicada en el punto de intersección de la curva IV con el eje de corriente, el voltaje de circuito abierto está ubicado en el punto de intersección de la curva con el eje de voltaje. Para el caso del voltaje de potencia máxima, está asociado al punto de máxima potencia (Tourre et al., 2022), calculado al trazar la curva PV (Potencia Voltaje). Esta curva se obtiene al multiplicar el voltaje y la corriente de la curva IV. Después se identifica la corriente de potencia máxima asociada a este voltaje de potencia máxima.

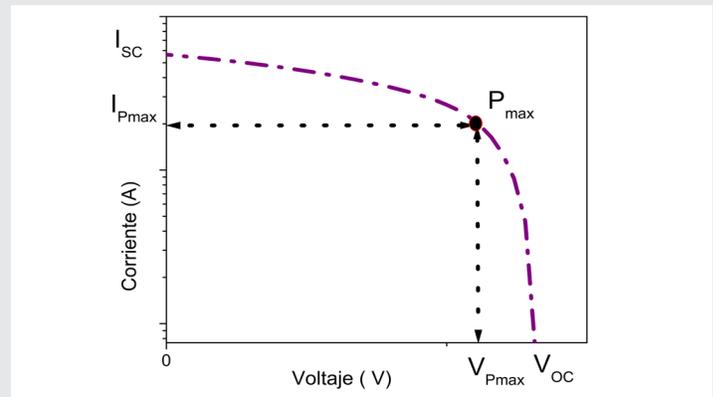


Figura 3. Curva IV de un dispositivo fotovoltaico.

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros de desempeño determinados en este trabajo es el factor de llenado (FF, por sus siglas en inglés) y la eficiencia de conversión de potencia η . El primero, determina la relación del área bajo la curva del rectángulo formado por el voltaje y corriente de máxima potencia, con respecto al área bajo la curva del rectángulo que forma el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito, Ecuación (1). El segundo parámetro determina la razón de transformación de la potencia eléctrica resultante con respecto a la potencia óptica incidente, sin considerar las pérdidas asociadas a la reflexión de la iluminación, Ecuación (2).

$$FF = \frac{V_{P_{max}} I_{P_{max}}}{V_{oc} I_{sc}} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\eta = \frac{V_{P_{max}} I_{P_{max}}}{Irr A} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde, Irr es la irradiancia en W/m² y A es el área de incidencia en m².

RESULTADOS

En la primera parte se determinan las condiciones de operación de las celdas solares con iluminación solar, se mide la respuesta de la celda solar con una iluminación de 856 W/m², la celda presenta un área de incidencia de 1.28X10⁻³ m², esto indica una potencia óptica captada de 1.09 W. La respuesta eléctrica obtenida es 1.72 V y una corriente de 128 mA, bajo estas condiciones se estima una eficiencia instantánea de conversión de potencia de 20.19% usando la ecuación (2).

Después, en condiciones de laboratorio se obtienen las curvas IV.

La Figura 4 muestra las curvas IV experimentales de las tres celdas solares. Donde, el comportamiento de la celda solar 1 presenta un comportamiento más cercano al proceso de rectificación ideal, en cambio las otras celdas solares muestran un comportamiento semejante entre ellas, pero alejado de lo ideal y más

cercano a un comportamiento resistivo, lo cual favorece a bajos parámetros de desempeño.

comportamiento de las dos celdas con características más resistivas.

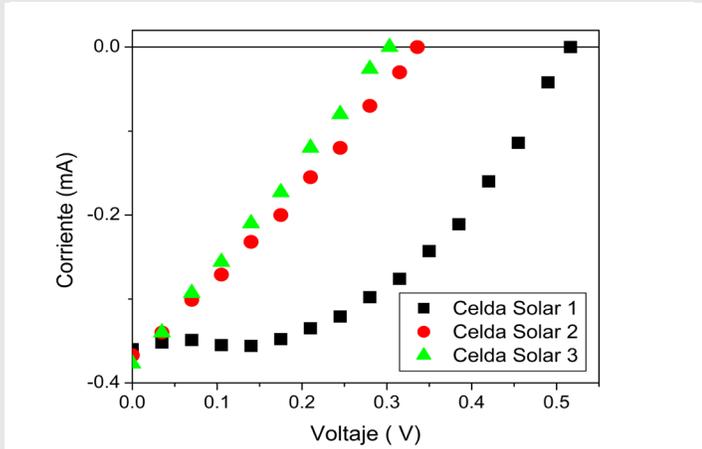


Figura 4. Curva IV de las tres celdas solares, usando una potencia óptica 1.57mW.
Fuente: Elaboración propia.

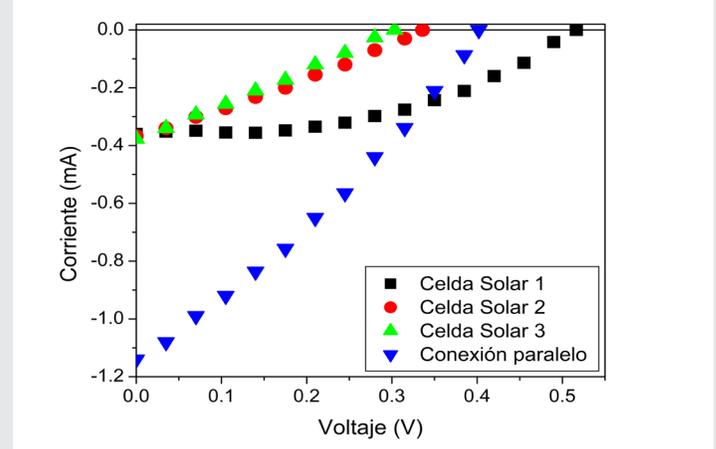


Figura 5. Curva IV de las tres celdas solares individuales y la curva IV obtenida al conectar todas en paralelo.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 1 muestra los puntos característicos de las curvas IV de cada celda solar, así como los parámetros de desempeño estimados. Es importante considerar que la amplitud de los puntos característicos son reducidos al compararlos con los obtenidos en la caracterización solar debido a la baja intensidad de iluminación en laboratorio.

Tabla 1. Puntos característicos y parámetros de desempeño de las tres celdas solares en forma individual.

CS	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	V _{Pmax} (V)	I _{Pmax} (mA)	FF	η (%)
CS1	0.51	0.36	0.31	0.27	0.45	5.33
CS2	0.33	0.36	0.17	0.20	0.28	2.16
CS3	0.30	0.37	0.17	0.17	0.26	1.84

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 muestra las curvas IV experimentales de las tres celdas solares comparadas con la curva IV resultante al conectar en paralelo todas las celdas solares.

La amplitud de la I_{sc} en la curva IV de la conexión en paralelo es 1.14 mA. Este valor es 0.03 mA mayor a la suma de las I_{sc} individuales de cada celda solar, este resultado es el esperado al considerar que en conexión en paralelo donde cada corriente contribuye a la corriente total. Pero en el caso de la amplitud del Voc de la conexión en paralelo es 0.4 V, ubicado aproximadamente en el valor medio de los extremos de los valores Voc individuales. La forma de la curva IV de la conexión en paralelo presenta una forma resistiva, que refleja la influencia en forma predominante del

La Figura 6 muestra las curvas IV experimentales de las tres celdas solares comparadas con la curva IV resultante al conectar en serie todas las celdas solares.

La amplitud del Voc en la curva IV de la conexión en serie es 1.22 V. Este valor es 0.07 V mayor a la suma de los Voc individuales de cada celda solar.

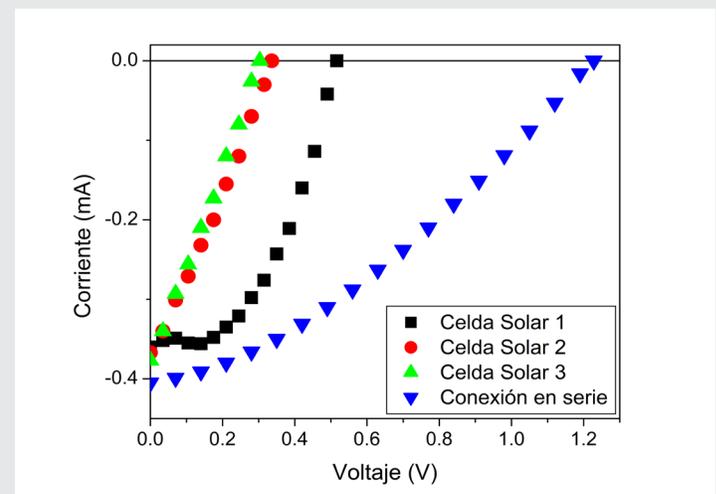


Figura 6. Curva IV de las tres celdas solares individuales y la curva IV obtenida al conectar todas en serie.
Fuente: Elaboración propia.

Este resultado es el esperado al considerar que en conexión en serie cada voltaje contribuye al voltaje total. Pero en el caso de la amplitud del I_{sc} es 0.4 mA, ubicado aproximadamente 10% mayor al promedio de los valores I_{sc} individuales. La forma de la curva IV de la conexión en serie presenta una forma combinada, que refleja una influencia mayor en el intervalo de voltaje de 0 a 0.2 V de la celda solar 1, que presenta

las mejores características rectificadoras, lo que se ve reflejado en mejores parámetros de desempeño. Aunque, a mayores valores de voltaje pierde esta deseable característica rectificadora.

Para comparación de los parámetros eléctricos y de desempeño de las formas de conexión en serie y en paralelo de las tres celdas solares, se utilizan las curvas PV (Potencia-Voltaje), ver Figura 7.

La potencia máxima de la conexión en paralelo es 0.13 mW y de la conexión en serie es 0.16 mW. En este sentido, la conexión en serie presenta una amplitud 0.03 mW mayor que la conexión en paralelo.

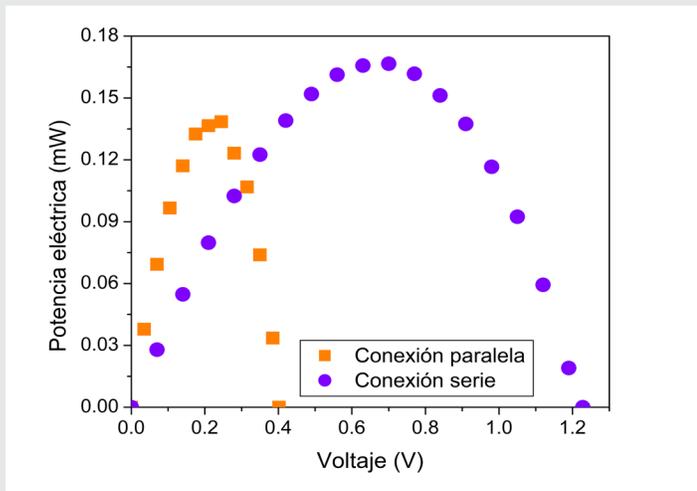


Figura 7. Curva PV de la conexión serie y paralelo.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2 muestra los puntos característicos y parámetros de desempeño de las curvas PV de las conexiones paralela y serie.

Tabla 2. Puntos característicos y parámetros de desempeño de las conexiones paralela y serie de las 3 celdas solares.

Con.	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	V _{Pmax} (V)	I _{Pmax} (mA)	FF	η (%)
Paralela	0.40	1.14	0.24	0.56	0.29	8.56
Serie	1.22	0.40	0.70	0.24	0.34	10.7

Fuente: Elaboración propia.

Independientemente de los requerimientos de la carga, la conexión en serie contribuye con mayor voltaje y la conexión en paralelo con mayor corriente. En términos de potencia máxima la conexión en serie es ligeramente mayor. Donde existe una clara mejoría es en términos de la eficiencia de conversión de potencia, donde la conexión en serie tiene un 2.14 % mayor con respecto a la conexión paralela.

Al comparar estos resultados con otros autores, las líneas de investigación contrastan en forma parcial,

como en el caso del análisis realizado por (Toure et al., 2022), donde se define que la conexión paralela presenta menores pérdidas, pero en el caso de iluminación parcial de iluminación, en nuestro caso es relevante que la iluminación sea uniforme sobre las celdas solares. Otros grupos de investigación presentan resultados con enfoques limitados y aplicados, como (Serdiuk et al., 2024) donde realizan análisis de las conexiones desde las condiciones de potencia requeridas sin considerar el análisis de eficiencia. En este sentido, este trabajo es innovador por su perfil de análisis de baja potencia (condiciones de uso en interiores) y su análisis de eficiencia.

CONCLUSIONES

La determinación de los parámetros de desempeño de celdas solares con baja iluminación es un requerimiento para aplicaciones en espacios internos. En este sentido, es valiosa la información obtenida de estos parámetros y en particular la eficiencia de conversión de potencia en las comunes configuraciones serie y paralelo. Las cuales se emplean para incrementar corriente y voltaje dependiendo de la carga que se desea alimentar. La importancia de seleccionar correctamente la conexión no solo permite cumplir con las condiciones básicas de operatividad de alimentación en sistemas eléctricos, también es importante definir las ventajas de usar la conexión en serie por la eficiencia alcanzada, si se tiene la oportunidad de usar su contraparte en paralelo desde la fase de diseño. Esta valoración permite conocer las implicaciones de incrementar uno de los parámetros eléctricos al implementar algunas de las dos configuraciones analizadas y las consecuencias en los parámetros de desempeño, buscando equilibrar el desempeño del sistema de alimentación. Esta investigación requirió de equipo especializado, con condiciones experimentales controladas y un conocimiento de diversos programas e interfaces de comunicación, lo que contribuye al desarrollo profesional de recursos humanos a través del estudio metodológico de una aplicación planteada, que es el uso de celdas solares en aplicaciones compartidas de comunicación y alimentación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica de Puebla, por su apoyo al brindar el espacio de trabajo para el proceso de caracterización de celdas solares.

BIBLIOGRAFÍA

AIEzzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). *Photovoltaic Solar Cells: A Review. Applied System Innovation, 5(4), 1-17.* <https://doi.org/10.3390/asi5040067>.

Cardet, P. H. pdf. (2022). *Técnicas avanzadas de caracterización de materiales semiconductores y de celdas solares de película delgada. Instituto de Física del Litoral.*

International Energy Agency. (2023). *World Energy Outlook 2023 | Enhanced Reader*. <https://www.iea.org/news/the-energy-world-is-set-to-change-significantly-by-2030-based-on-today-s-policy-settings-alone>.

Juep Chicaiza, Christian Alexander; Romero Bedón, F. R. (2024). *Análisis comparativo en aplicaciones de carga de batería utilizando motores stirling versus celdas solares*. *Dom. Cien.*, 10, 104-119.

Keithley. (2016). *Model 6517B Reference Manual*. In Keithley Instruments Inc. (Issue June).

Mathews, I., Kantareddy, S. N., Buonassisi, T., & Peters, I. M. (2019). *Technology and Market Perspective for Indoor Photovoltaic Cells*. *Joule*, 3(6), 1415-1426. <https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2019.03.026>.

Mengounou Mengata, G., Ngoffe Perabi, S., Ndi, F. E., & Wiysahnyuy, Y. S. (2022). *Characterization of solar photovoltaic modules powered by artificial light for use as a source for smart sensors*. *Energy Reports*, 8, 12105-12116. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.056>.

Mulyono, A. E., Mustika, T., Sulaikan, H. P., & Kartini, E. (2018). *Development of battery performance data acquisition system for monitoring battery performance inside solar cell system*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 432(1).

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/432/1/012057>. Serdiuk, T., Serchenko, M., Radkevych, A., Serdiuk, S., & Skalko, V. (2024). *Modernization of the power supply system applying solar cells and batteries*. *MATEC Web of Conferences*, 390, 01001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202439001001>

Toure, C. S., Sow, P. L. T., Dia, F., & Mbodji, S. (2022). *Experimental Analysis to Extract the Maximum Output of Serial and Parallel PV Module ConFigurations under Partial Shadow Conditions: A Case Study for Bambey, Senegal*.

Energy and Power Engineering, 14(07), 233-247. <https://doi.org/10.4236/epe.2022.147013>.

Venkateswararao, A., Ho, J. K. W., So, S. K., Liu, S. W., & Wong, K. T. (2020). *Device characteristics and material developments of indoor photovoltaic devices*. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 139, 100517. <https://doi.org/10.1016/J.MSER.2019.100517>.





Ciencias *de la* Computación

Ingeniantes

Software de Control para Brazo Manipulador empleado en la recolección de la cereza del café

RESUMEN: En el escrito se presenta el desarrollo de una propuesta de diseño de un algoritmo de control para un brazo manipulador que tendrá como tarea realizar la cosecha de los granos de café que se encuentren en condiciones de ser cosechados. La problemática se detectó en la zona cafetalera que se encuentra en la región de influencia del municipio de Teziutlán. El trabajo consiste en el desarrollo de un algoritmo computacional, el cual permite el reconocimiento a través de una red neuronal de los granos de café que se encuentren en condiciones de ser recolectados, así como realicé el cálculo de los ángulos que han de adoptar los actuadores que conforman el tren motriz del sistema mecánico. Para lograr esto es necesario el desarrollo y entrenamiento de una red neuronal de las de nominadas convolucionales que permita distinguir entre los frutos, los granos que se encuentran en maduración y las cerezas del café, de igual forma el programa tendrá la capacidad de determinar la distancia a la que se encuentra el fruto, para esta sección de código se toma de base el reconocimiento de patrones ArUco y mediante esta se logra determinar la citada distancia; finalmente con la información recabada se calculan los ángulos que deberán asumir las partes móviles. La relevancia del trabajo radica en impacto con los cafecultores de la región que debido a que el cultivo de café a dejado de ser atractivo debido a los altos costos de producción, por lo que se planea el desarrollo del proyecto esperando que al implementarse se logre abatir los costos y que los sembradíos se vean incrementados beneficiando económicamente a los productores y personas relacionadas con el cultivo de café

PALABRAS CLAVE: Redes neuronales convolucionales, marcadores ArUco, Brazo manipulador, Cosecha de café.



Colaboración

Alfredo Carrasco Aráoz; Mario Andrés Paredes Valverde; Luis Manuel García Martínez; Binisa Noemi Rivas Carrasco, Instituto Tecnológico de Teziutlan

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 11 de octubre de 2024

ABSTRACT: The paper presents the development of a design proposal for a control algorithm for a manipulator arm that will have the task of harvesting coffee beans that are ready to be harvested. The problem was detected in the coffee-growing area located in the region of influence of the municipality of Teziutlán. The work consists of the development of a computational algorithm, which allows the recognition through a neural network of the coffee beans that are ready to be harvested, as well as the calculation of the angles that the actuators must adopt. that make up the drive train of the mechanical system. To achieve this, it is necessary to develop and train a convolutional neural network that allows us to distinguish between fruits, ripening beans and coffee cherries. In the same way, the program will have the ability to determine the distance where the fruit is located, for this section of code the ArUco pattern recognition is used as a basis and through this it is possible to determine the aforementioned distance; Finally, with the information collected, the angles that the moving parts must assume are calculated. The relevance of the work lies in its impact on coffee growers in the region, since coffee cultivation is no longer attractive due to the high production costs, so the development of the project is planned, hoping that when implemented it will be able to reduce costs and that crops are increased, economically benefiting producers and people related to coffee cultivation.

KEYWORDS: Convolutional Neural Networks, ArUco Markers, Robotic Arm, Coffee Harvesting.

INTRODUCCIÓN

México heredero de una gran tradición en el cultivo de café, lo ha llevado a posicionarse en los primeros lugares a nivel mundial en la producción del aromático grano donde se sitúan países como Brasil, Colombia, Vietnam por citar algunos. En México la producción anual alcanzada en los últimos años es de alrededor de 3600,000 sacos de café (60 Kg por saco) por año, esta cantidad en años anteriores fue superada, la principal razón que mermo la producción de exportación fue que el precio del grano cayó, lo que lo vuelve poco atractivo su cultivo a los productores [1] [2].

En la República Mexicana estados como Veracruz, Oaxaca, Chiapas, Guerrero y Puebla lideran en el cultivo del café. Particularmente el estado de Puebla, ocupa el tercer lugar en la producción de semillas de café, donde destaca la Sierra Nororiental, como una de las zonas de mayor relevancia en el cultivo ya que contribuye con más de 18,500 toneladas del citado grano, las cuales, son exportadas a diversas latitudes, debido a su calidad, misma que cumple con los estándares impuestos por el mercado internacional [3].

En el año de 2019 la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) anuncio que los municipios que cuentan con la mayor producción de café en la sierra nororiental pertenecen a zona de influencia en la región de Teziutlán donde pertenecen: Hueyapan, Hueytamalco, Teziutlán Tlatlauquitepec, Venustiano Carranza y Zacapoaxtla, quienes tienen un aporte importante con más de 10,000 toneladas anuales [4] [5].

El estado de Puebla contribuye de manera importante en la producción de café en la república mexicana ya que cuenta con 70, 438.4 hectáreas en donde se cultivan y se recolectan 128,995.35 toneladas del grano aromático, con las que alcanza el tercer lugar en la producción nacional y el cuarto en superficie cultivable. [4].

Con los datos del Sistema Nacional de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (SIAP) [4] la producción anual de café en el estado de Puebla alcanzó un valor comercial de 889.4 millones de pesos esta misma dependencia indica que son 54 municipios quienes forman el padrón de productores del aromático, de los cuales Cuetzalan del Progreso, Hueyapan, Hueytamalco, Teziutlán, Tlatlauquitepec y Zacapoaxtla, forman la zona de influencia en la región de Teziutlán; de igual forma al ser un municipio que se encuentra en colindancia con el estado de Veracruz se tiene acceso a otros cafetales cercanos como lo es, el cafetalero Xanát Café, que se encuentra ubicado en la comunidad Las Truchas, municipio de Altotonga, en el estado de Veracruz.

La región de Teziutlán se encuentra situada en la sierra nororiental del Estado de Puebla, el clima cálido y húmedo característico de bosque mesófilo [6], la orografía predominante de estos bosques es agreste e irregular al contar con terrenos con esta singularidad muchos cafetales se encuentran plantados en altitudes comprendidas entre los 800 y 2400 metros sobre el nivel medio del mar, poblaciones como Teziutlán, Cuetzalan y Xicotepec son idóneas para el cultivo del café llamado de altura el cual cumple con la calidad para ser un producto de exportación.

En entrevista con el señor Aquilino Santillán López propietario del cafetalero Xanát Café donde se realizará el proyecto; la entrevista fue realizada para co-

nocer las actividades y forma de cultivo del café, en ella comento que la recolección del grano en las condiciones climáticas donde se encuentran los cafetales (lluvioso y húmedo) en ocasiones se tornan peligrosas las actividades de la recolección de del furto del café acarreado con esto que los recolectores puedan sufrir lesiones de consideración [7].

Para dar solución a la problemática se propone realizar un dron recolector el cual tenga la capacidad de realizar la recolección de los granos de café que se encuentran en condiciones de ser cosechados. Para lograr este objetivo es preciso dividir el proyecto en dos partes la primera el diseño de la aeronave de recolección que tendrá la tarea de llevar los granos de café hacia un punto de acopio y la segunda en la que cae el interés de este trabajo, que consiste en el diseño de un brazo manipulador que pueda retirar los granos de la planta sin causar daño a los que aún no tengan que ser cosechados, así como el software de control de este.

Por lo tanto, el presente trabajo presenta los resultados del diseño del algoritmo de control que se utilizará para guiar al brazo manipulador para que realice la tarea de recolección de la cereza de café (como se le llama comúnmente en el argot de los cafeticultores), en este punto se aborda la metodología empleada para la identificación del fruto que se encuentre en condiciones de ser recolectado así como la extracción de las coordenadas donde se encuentra el grano de café, para que posteriormente se genere la trayectoria que guiará al manipulador.

Para lograr el cometido de la identificación y clasificación de las imágenes captadas por la cámara se hace uso de algoritmos utilizados por la visión artificial la cual se apoya en las redes neuronales artificiales en este caso se emplearán las denominadas redes neuronales convolucionales mismas que han demostrado tener mayor eficacia en los clasificadores utilizados en el reconocimiento de patrones, así como en la segmentación de imágenes [8] [9] [10] [11] [12] [13].

Finalmente es menester mencionar que el empleo de los drones en la agricultura a últimas fechas se han convertido en una herramienta de uso común en la agricultura en tareas tan diversas como: agricultura de precisión donde recolectan datos que permiten tomar decisiones sobre el rumbo de la cosecha; la dispersión de agroquímicos y en la inspección del estado de las plantas [14] [15] [16] [17]

MATERIAL Y MÉTODOS

La propuesta consiste en desarrollar una aeronave no tripulada, que de manera autónoma realice la recolección del grano para su beneficio, para llevar a cabo esta tarea, se deberá dotar al dron con un brazo manipulador pensado en emular el movimiento del brazo

humano, así como un actuador que permita desprender la cereza de café de forma adecuada para evitar daños permanentes en la planta de café.

Tras tres iteraciones se llegó a un prototipo que cumpliera con los criterios de diseño que se establecieron con antelación, con base en lo siguiente:

- Existen 2 eslabones que integran el brazo manipulador, el eslabón primero "Hombro" tiene 90° de libertad de movimiento en "Y" y el eslabón "Brazo" tiene 180° de movimiento en "Y", este segundo es el que va a recibir al actuador final que recolectará los frutos.
- Se diseñó la base teniendo en cuenta el equilibrio con respecto del centro de gravedad del robot, lo cual permitió que el brazo se mantenga en su posición equilibrada durante su ejecución.
- La cámara se ubica en la parte superior del hombro del brazo dejando totalmente libre al brazo manipulador.
- El peso del manipulador es menor que al propuesto de 800 gramos propuesto como límite, siendo un factor importante al tomar en cuenta debido a la máxima carga útil con la que cuenta el dron.

La Tabla 1 muestra la ponderación establecida para los parámetros de selección, el dispositivo debería de cumplir con: una funcionalidad que le permitiera cumplir con la tarea para la cual sería diseñado, el peso es otro factor importante a tener en cuenta ya que el brazo deberá de ir adosado a una maquina voladora y como es sabido cuanto mayor sea el peso a levantar el consumo energético se incrementa, de igual forma es importante tener un mecanismo confiable para que el porcentaje de falla sea el menor posible, finalmente el tamaño y la forma son considerados para lograr una propuesta acorde al tamaño de la máquina que lo transportará.

Tabla 1. Ponderación establecida para la selección de la iteración de diseño.

Característica	Ponderación
Funcionalidad - 30%	27 %
Peso - 30 %	30 %
Confiabilidad - 20 %	17 %
Forma - 10 %	10 %
Tamaño - 10 %	10 %

Fuente: Elaboración propia 2024.

Al realizar la suma de las ponderaciones de los criterios de diseño se obtiene el 94 % porcentaje que permite concluir que el mecanismo diseñado tendrá un desempeño adecuado.

El diseño se caracteriza por tener los motores que le dan la movilidad concentrados en la parte superior lo más cerca del centro de masa del dron en lo que se interpretaría como el hombro del brazo Figura 1.

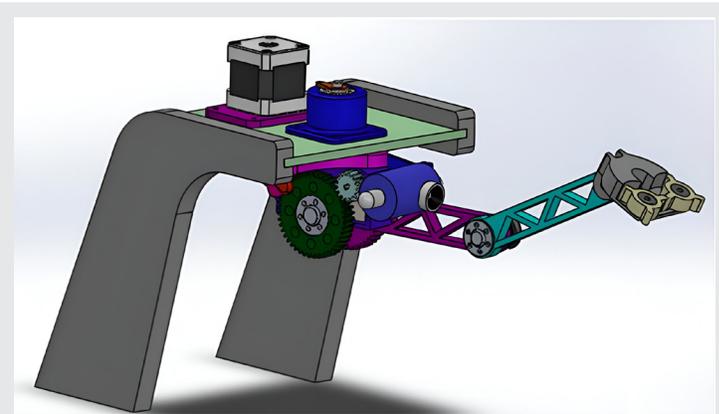


Figura 1. Iteración final del diseño del brazo manipulador, la imagen muestra el brazo montado en una base que ocupa el lugar del dron donde se montará.

Fuente: Elaboración propia 2024.

De igual forma se muestra que el brazo se montará en una base provisional para realizar pruebas, para simular el movimiento del dron sobre el eje vertical se aprovisionó con un motor que brindará la movilidad necesaria, la Figura 2 muestra la construcción del prototipo funcional a escala el cual fue construido con materia PLA utilizando técnicas de manufactura aditiva.



Figura 2. Ensamble de las partes del brazo en la base de pruebas.

Fuente: Elaboración propia 2024.

Para poder generar el software de control que guiará al sistema, es menester fijar un punto de partida para el diseño del algoritmo de control como primer punto es necesario mencionar que el proyecto debido a su complejidad se divide en dos partes para su desarrollo: I primera control del brazo manipulador, segunda, control de vuelo en este trabajo se presentan los resultados de la primera parte del proyecto.

A partir del empleo de técnicas de visión artificial se realiza el control de las articulaciones del brazo mecánico, ya que han demostrado que su aplicación industrial, tanto que hoy en día es una de las herramientas más utilizadas para el control de la calidad [18].

Como se mencionó el sistema emplea la visión artificial como base para el reconocimiento de los frutos esto se realiza propiamente dicho mediante el empleo de algoritmos de clasificación fundamentados en las redes neuronales ya sean densas o convolucionales ya que estas son ampliamente utilizadas en la segmentación y clasificación de imágenes [19] [20] [21] [22] [23] [24].

Antes de pasar a la descripción de la solución es necesario mencionar los principales requerimientos que definen el programa de cómputo:

- La interfaz tendrá dos formas de trabajo la forma manual y la forma autónoma.
- El sistema podrá determinar las coordenadas donde se encuentre el fruto en la pantalla.
- El software podrá determinar la distancia entre la cereza y el brazo manipulador.
- El algoritmo determinara los ángulos de los elementos que forman el brazo manipulador.

Para el análisis de la imagen se emplea la librería de Open CV versión 4.10.0.84 compatible con la versión 3.12 de Python, así como para el diseño del modelo se utiliza la librería Tensor Flow y el entrenamiento se hizo utilizando el proyecto Google Colaborativo que permite el entrenamiento en la nube utilizando los recursos de Google.

Dentro de las actividades desarrolladas en la ejecución del proyecto una de la destacadas es la conformación del conjunto de datos (data set) necesarios para el entrenamiento del modelo convolucional que servirá de base para el clasificador, por el que decanta debido a que por su estructura ofrece mejores resultados en tareas de clasificación; para lograr conjuntar las imágenes necesarias se realizó una visita al cafetalero Xanat y a otros dos cafetaleros (cuyos nombres se reservan a petición de los dueños de los cafetales) como resultado se obtuvieron alrededor de 700 imágenes Figura 3 las cuales fueron limpiadas, etiquetadas, separadas en tres clases y finalmente divididas en tres grupos: imágenes de entrenamiento, imágenes de validación e imágenes de prueba.

El paso siguiente es diseñar el modelo de la red neuronal convolucional a utilizar para este caso se propone una red compuesta por dos capas convolucionales y dos capas densas.



Figura 3. Imagen de los granos de café en su estado nativo
Fuente: Elaboración propia.

Antes de proceder con el entrenamiento es necesario normalizar las imágenes, así como incrementar el número de las mismas con la herramienta de "preprocessing" la cual viene incluida en la librería de Keras, en la Figura 4 se muestra el fragmento de código que se empleó.

En el código mostrado muestra cómo se normalizan los píxeles de la imagen a valores comprendidos entre 0 y 1, al dividirlos entre 255 que es el valor máximo que puede tener un pixel, y de igual manera se reescalan las imágenes, para que tengan el tamaño del tensor de entrada de la red.

```
#preparamos las imagenes imagenes de entrenamiento
entrenamiento_datagen = tf.keras.preprocessing.image.ImageDataGenerator(
    rescale=1. / 255,
    shear_range=0.2,
    zoom_range=0.2,
    horizontal_flip=True)

test_datagen = tf.keras.preprocessing.image.ImageDataGenerator(rescale=1. / 255)

entrenamiento_generador = entrenamiento_datagen.flow_from_directory(
    data_entrenamiento,
    target_size=(altura, longitud),
    batch_size=batch_size,
    class_mode='categorical')

validacion_generador = test_datagen.flow_from_directory(
    data_validacion,
    target_size=(altura, longitud),
    batch_size=batch_size,
    class_mode='categorical')
```

Figura 4. Segmento de código utilizado para preparar las imágenes para el entrenamiento del clasificador.
Fuente: Elaboración propia.

Antes de describir las características de la red neuronal que se utilizará es necesario mencionar la secuencia que llevara la información durante su procesamiento: como primer paso se captura la imagen por la cámara, la imagen introduce a la red neuronal del tipo convolucional la cual fungirá como clasificador, tras salir del clasificador si el fruto no es apto

para la cosecha la información se guarda en un archivo separado por comas; si el fruto se encuentra maduro se determina la distancia del fruto con respecto a la cámara y la posición del fruto en la imagen, con las coordenadas de la posición se calculan los ángulos que han de guardar los elementos que conforman el brazo manipulador las ordenes se mandan a los actuadores mediante el uso de comunicación serial la Figura 5 muestra el diagrama de flujo del algoritmo de control.

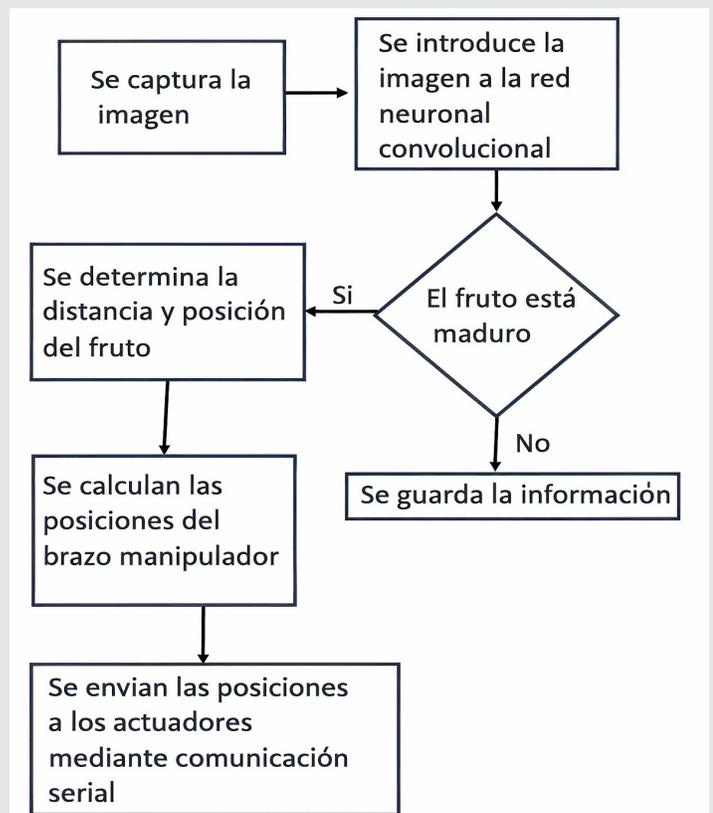


Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo de control del brazo manipulador.
Fuente: Elaboración propia 2024.

La topología utilizada para la red que dará origen al clasificador Figura 6 como se mencionó consta de dos capas convolucionales, la primera cuenta con 32 filtros y la segunda con 64 filtros; en las dos se utiliza la técnica del “maxpooling” con un factor de 2 lo que indica una reducción de la información, para mejorar el entrenamiento se propone un “Dropout” de 0.5 es decir se des habilitan la mitad de las neuronas aleatoriamente, las capas densas están formadas por una capa “Flaten” de entrada seguida de una formada por 256 neuronas con la función de activación “relu”, finalizando con una capa densa de 3 neuronas que corresponden a las tres clases de salida del clasificador esta capa utiliza la función de activación “softmax” que ha de mostrado ser más eficiente en las tareas de clasificación, cabe mencionar que este proceso se realizó utilizando los recursos de Google colaborativo.

```

'''creamos el modelo convolucional conformado por dos capas de filtros
la primera con 32 y la segunda con 64,'''
modeloCNN = tf.keras.models.Sequential([
    tf.keras.layers.Conv2D(32, (3,3), activation='relu',
        input_shape=(150, 150, 3)),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(2, 2),

    tf.keras.layers.Conv2D(64, (3,3), activation='relu'),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(2, 2),

    tf.keras.layers.Dropout(0.5),
    tf.keras.layers.Flatten(),
    tf.keras.layers.Dense(256, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(3, activation='softmax')
])
  
```

Figura 6. Segmento de código utilizado para configurar la topología de la red neuronal.
Fuente: Elaboración propia 2024.

Para el entrenamiento del modelo se utilizó dentro del entorno de Google Colaborativo un entorno T4 GPU que permite el procesamiento en paralelo lo que reduce el tiempo de entrenamiento, ya que al programarse 100 décadas con 300 pasos por década la demora en el entrenamiento de más de 8 horas y con esta técnica se redujo a algo más de dos horas; tras la cual se consiguió una red con una efectividad del 99% en el entrenamiento.

Logrando tener una red que pueda clasificar el estado de madurez del fruto del café, el siguiente paso fue programar un algoritmo que entregara las coordenadas de los granos que se cosecharan, para esto se usaron técnicas de visión artificial como: segmentación de imagen, localización de contornos por citar algunas. La Figura 7 muestra los datos de localización de los granos maduros dentro de un cumulo de frutos verdes, en la imagen se muestra las coordenadas de las cerezas que se encuentran en condición de ser cosechadas.

Para realizar las pruebas se utilizaron imágenes que fueron capturadas cámara en mano en los terrenos de cultivo de café, y se efectuaron bajo un ambiente controlado dentro de las instalaciones donde se está construyendo el prototipo; ya que aún no se cuenta con el dron para realizar pruebas de campo.



Figura 7. Resultados del reconocimiento de los frutos por medio de la red neuronal y la localización de los mismos en la imagen.
Fuente: Elaboración propia 2024.

RESULTADOS

Una vez terminada la programación se desarrolla una interfaz de usuario cabe aclarar que el sistema propiamente no requiere de una ya que al ser montado el programa en una computadora de una sola tarjeta en una aeronave dotada de autonomía no la precisa así que esta se desarrolló solo para realizar las pruebas.

La Figura 8 muestra los resultados del entrenamiento y validación de la red utilizada para la clasificación de los frutos esta muestra como la exactitud (accuracy) mejora con el paso de las épocas en particular se puede observar que en la época 43 alcanza el máximo (99.99%) en el entrenamiento alcanza una exactitud del 84% en la validación, esta métrica se obtiene como ya es sabido realizando la razón entre el número de predicciones acertadas y el número de predicciones totales.

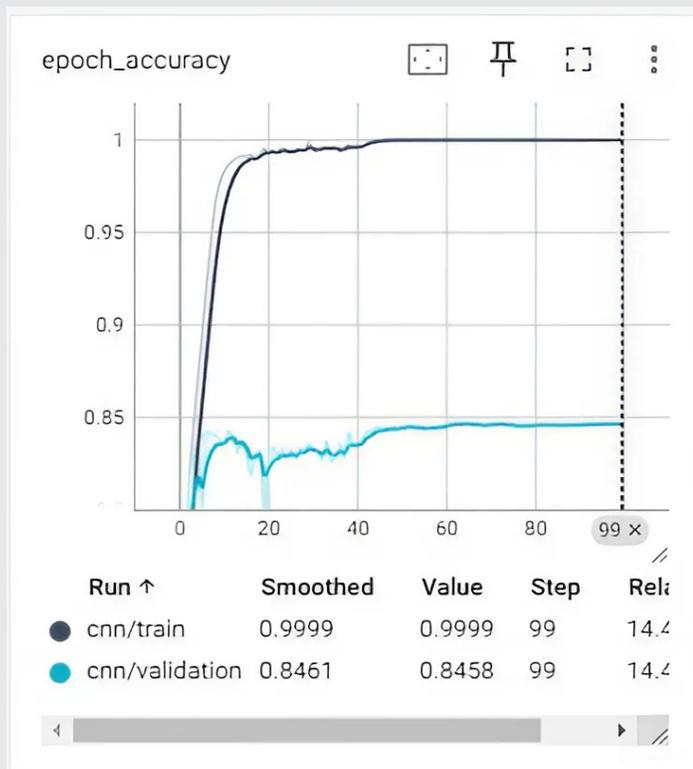


Figura 8. Desarrollo de la exactitud durante el entrenamiento del modelo.

Fuente: Elaboración propia 2024.

De igual forma la Figura 9 muestra como la pérdida disminuye durante el entrenamiento.

En la Figura 10 se muestra como la red es capaz de identificar a los frutos que se encuentran en condiciones de ser recolectados (en color rojo) así como sus coordenadas en los segmentos en los que se dividió la imagen; el grano de café tiene en el segmento 4 las coordenadas (414, 270) mientras que en el segmento 6 cuenta con el par ordenado (436, 281) es preciso indicar que las coordenadas se toman con respecto al origen de la imagen en el extremo supe-

rior izquierdo y están dadas en píxeles. Las coordenadas mostradas corresponden a la máxima superficie encontrada de color área de contorno localizado esto permitirá jerarquizar los contornos localizados y a partir de esta información tomar la decisión de cuan grano recolectar ya que como se puede notar los granos tienden a crecer en racimo como lo muestra la Figura 11 de igual forma se aprecia que en el segmento 4.

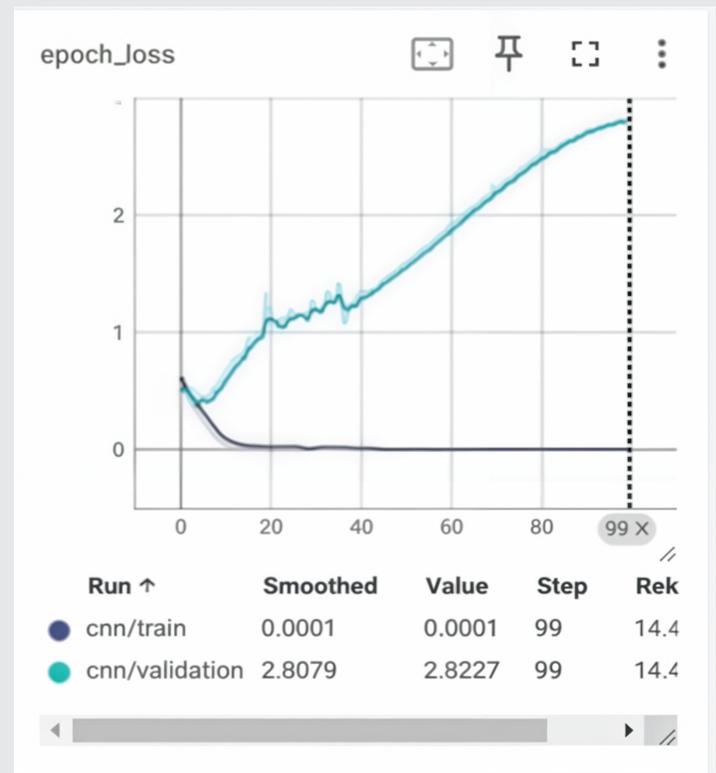


Figura 9. Decremento de la pérdida durante el entrenamiento del modelo.

Fuente: Elaboración propia 2024.

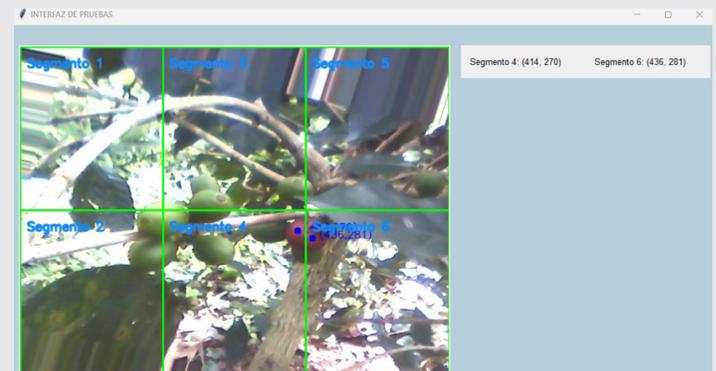


Figura 10. Muestra los frutos maduros y sus respectivas coordenadas en la imagen.

Fuente: Elaboración propia 2024.

Con esta información se decide que la cereza antes mencionada es la primera en ser recolectada por el manipulador. Al ser retirado el fruto seleccionado se realiza nuevamente la revisión de los tamaños de las áreas para elegir al siguiente grano a ser cosechado.



Figura 11. Muestra las coordenadas de las áreas de color de mayor tamaño en el segmento (segmento 4).
Fuente: Elaboración propia 2024.

Tras obtener las coordenadas y el área del contorno mayor se procede a determinar la distancia a la que se encuentran los frutos con respecto al brazo manipulador, para esto se agrega al programa un algoritmo que permite estimar dicha posición, el que se basa en la detección de patrones ArUco [25] [26], con esta técnica es posible tener un patrón y así compara el área que ocupe un grano a la distancia correspondiente esto se logra gracias a una regresión que se calculó a partir de una serie de áreas y distancias que se tabularon para obtener la correlación que permite su cálculo:

$$Dc = 464.787A_{max}^2 - 0.418 \quad Ec(1)$$

Donde:

Dc = Distancia de la cereza

A_{max} = Área máxima.

La Figura 12 muestra la distancia del fruto a la cámara, así como el grano que se encuentra en condiciones de ser cosechado.

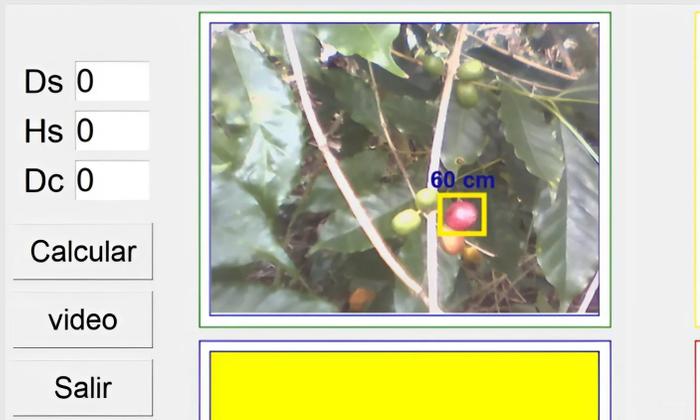


Figura 12. Muestra el grano para ser cosechado y la distancia a la que se encuentra de la cámara que se utilizó para las pruebas .
Fuente: Elaboración propia 2024.

Con las coordenadas y la distancia obtenidas y mediante un planteamiento trigonométrico se llega las

ecuaciones que permiten calcular los ángulos correspondientes de las articulaciones del brazo manipulador:

$$\delta = \pi rad + \theta - \varphi \quad Ec(2)$$

$$\alpha = \pi - 2\varphi \quad Ec(3)$$

Donde:

δ = Ángulo de la articulación del hombro.

α = Ángulo de la articulación del codo.

φ = Ángulo formado entre el punto de origen y el punto A.

θ = Ángulo formado por la horizontal y la hipotenusa b.

La Figura 13 muestra los triángulos imaginarios que se plantearon para el análisis trigonométrico que permitió determinar los ángulos a los que deberán moverse los actuadores para lograr llevar al actuador a la posición final para que realice la colecta de la cereza.

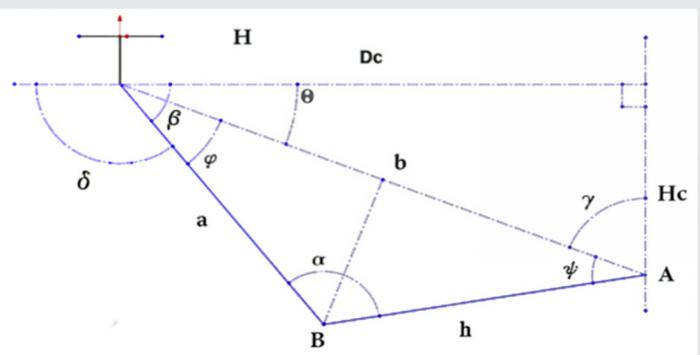


Figura 13. Muestra los elementos del brazo robótico (a, h) y los triángulos imaginarios utilizados para determinar los ángulos para la posición del manipulador.
Fuente: Elaboración propia 2024.

Finalmente, la Figura 14 muestra la interfaz de salida donde puede apreciarse la imagen de entrada, y el brazo manipulador alcanzando la posición calculada, la parte inferior muestra los ángulos calculados que definen la posición del sistema, de igual forma muestra las distancias medidas para el cálculo antes descrito.

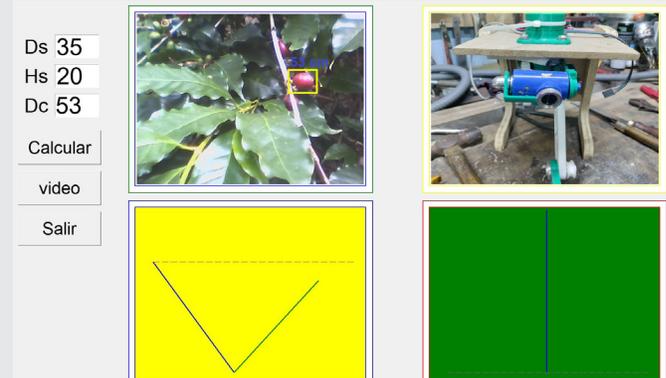


Figura 14. Interfaz diseñada para observar el funcionamiento del sistema (Fuente: Elaboración propia 2024).
Fuente: Elaboración propia 2024.

En la actualidad como ya se mencionó los drones en el campo de cultivo, cada día, son mas vistos realizando tareas agrícolas sobre todo en la llamada agricultura de precisión donde recaban información sobre el estado que guardan las cosechas [17], en la literatura consultada hasta el momento se hace referencia al proyecto denominado FEROX financiado por la comunidad europea el que consiste en ayudar a los recolectores a mejorar la eficacia en la recolección, los drones recaban datos con los cuales generan modelos 3D de las áreas de recolección para optimizar las tareas de colecta [27]. Finalmente, en la comparativa con otros trabajos que tengan relación con el presentado se tiene el proyecto desarrollado por el Tecnológico Nacional de México, en su campus del Instituto Tecnológico Superior de Guasave Sinaloa quienes desarrollaron un dron para la polinización del cultivo de fresa ya que este cultivo se enfrenta a la falta de polinizadores naturales a consecuencia de los cambios del entorno que se han venido suscitando por el cambio climático [28]. Si bien a la fecha de la redacción no se encontró un dron dedicado a la cosecha de frutos si se observó que la aplicación de la tecnología de máquinas voladoras a tareas agrícolas es cada día mayor.

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del proyecto quedó de manifiesto que el empleo de una red neuronal convolucional cumple efectivamente con la tarea de clasificación, de igual forma el empleo de la técnica de reconocimiento de patrones ArUco permite alcanzar los objetivos de poder determinar la distancia de la cereza del café con la cámara.

Esta tarea es de suma importancia que se desarrolle de manera adecuada ya que de ella depende la proximidad de la aeronave, que portará el manipulador y que al tener errores llevaría al colapso de todo el sistema.

Al concluir el desarrollo de prototipo e integrarlo al dron se espera favorecer a los cafecultores de la región de influencia del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán y así contribuir a la tecnificación del agro que es uno de los ejes del plan de desarrollo del estado de Puebla, de igual forma se espera que la contribución haga más rentable el cultivo del citado aromático al reducir los costos de producción lo que favorezca en el incremento de las áreas de cultivo.

De manera concluyente se puede afirmar que los objetivos planteados para el reconocimiento de los granos de café y la generación de los ángulos de control del brazo se alcanzaron dejando entrever la viabilidad del proyecto.

Trabajo futuro

Como trabajo futuro se tiene planeado el desarrollo de un dron que tenga la capacidad de portar al brazo mecánico más una carga de granos de café, aunado a

esto la máquina gozará de autonomía para controlar el vuelo y reconocer el área de cosecha.

Finalmente se trabajará en paralelo con en el diseño del actuador final que será el encargado de retirar el fruto de la planta, tarea que debe realizarse de la forma adecuada para no causar daño a la planta.

BIBLIOGRAFÍA

[1] G. Leguizamón Sotero, M. L. Salgado Siclan y M. Rubí Arriaga, «Aspectos sociodemográficos, económicos, agronómicos y culturales de los cafecultores del municipio de Sultepec, Estado de México, México,» *Acta Agrícola y Pecuaria*, n° 9, pp. 1-13, 2023.

[2] C. R. Rivera Rojo, «Competitividad del café mexicano en el comercio internacional: un análisis comparativo con Brasil, Colombia y Perú (2000 – 2019),» *CIELO*, vol. XXXVII, n° 94, pp. 181-199, 2022.

[3] Statista, 2021. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/600243/ranking-de-los-principales-productores-de-cafe-a-nivel-mundial/>. [Último acceso: 18 julio 2024].

[4] M. G. de , «SAGARPA,» [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/puebla/articulos/puebla-alcanza-el-3er-lugar-a-nivel-nacional-del-valor-de-produccion-de-cafe?idiom=es>. [Último acceso: 12 junio 2024].

[5] «Cursos Baristas Café,» 5 enero 2022. [En línea]. Available: <https://cursosbaristas.com.mx/blog/cafe-de-puebla>. [Último acceso: 15 julio 2024].

[6] C. Robles A. y R. Medina I, «EL bosque mesófilo de la montaña y el cultivo del café en el municipio de Xilotepec, Puebla, México,» 8 Enero 2004. [En línea]. Available: <https://elemntos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000009262.pdf>. [Último acceso: 15 8 2024].

[7] A. Santillán López, Interviewee, *El cultivo de café en la región de Teziutlán*. [Entrevista]. 25 11 2023.

[8] A. Voulodinos, N. Doulamis, A. Doulamis y E. Protopapadakis, «Deep Learning for Computer Vision: A Brief Review,» *Intell, Neuroscientia*, vol. 2018, pp. 1-13, 2018.

[9] S. Grusrein, O. Fuentes y E. Freudenthal, «Knowledge Transfer in Deep Convolutional Neural Nets,» *Int. J. Artif Intell Tools*, vol. 10, n° 3, p. 555, 2008.

[10] S. Loos, G. Irving, C. Szegedy y C. Kaliszyk, «Deep Network Guided Proof Search,» *Deep Network Guided Prof Search*, vol. 10, n° 46, pp. 85-105, 2008.

- [11] C. Alessandro, «Deep learning techniques applied in computer visio,» *Universita degli Studi di Padova*, 2017.
- [12] A. Krizhevsky, I. Sutskever y G. E. Himton, «ImageNet Classification whith Deep Convolutional Neural Networks,» *Adv Neural Inf. Process Syst*, pp. 1-9, 2012.
- [13] P. Constante, O. Chang y I. Pruna, «Artificial Vision Techniques for Strawberry`s industrial Clas-sification,» *I.E.E.E Lat. Am Trans*, vol. 14, n° 6, pp. 2576-2581, 2016.
- [14] R. Rios Hernández , «Uso de los Drones o Ve-hículos Aéreos no Tripulados en la Agricultura de Precisión,» *REVISTA INGENIERÍA AGRÍCOLA*, vol. 11, n° 4, pp. 75-84, 2021.
- [15] J. E. Bayona y E. Arboleda, «Identificar el uso y funcionamiento de la tecnología de drones en el sector agropecuario de la sabana de Bogotá.,» *Biblioteca Digital Minerva*, p. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10882/12832>, 2023.
- [16] R. D. Moreira Ramos. “Desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes agrícolas obtenidas por drones para la detección de plantas faltantes en cultivos de maíz,” *B.S. Thesis.* , 2022. [Online]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13229>
- [17] L. L. López Moreono, «Uso de drones como tecnología moderna para una agricultura eficiente,» *Universidad Técnica de Babahoyo, Babahoyo*, 2024.
- [18] C. D. Ortega, F. E. Moyano, C. G. R. Sbrunera y T. J. G. Tejerina, «Técnicas de Implementación de Visión,» de *XVI Concurso de Trabajos Estudiantiles (EST) - JAIIO 42 (2013)*, Rio de la Plata Argentina, 2013., 2013.
- [19] A. Voulodinos, N. Doulamis, A. Doulamis y E. Protopapadakis, «Deep Learning for Computer Vision: A Brief Review,» *Comput. Intell. Neurosci*, vol. 2018, pp. 1-13, 2018.
- [20] S. Gutstein, O. Gutstein y E. Freudenthal, «Knowledge Transfer in Deep Convolutional Neural Nets,» *Int.J. Artif. Intell. Tools*, vol. 10, n° 3, p. 555, 2008.
- [21] S. Loos, G. Irving, C. Szegedy y C. Kaliszyk, «Deep Network,» *Guided Proof Search*, vol. 46, pp. 85-105, 2017.
- [22] A. C., «Deep learning techniques applied in computer vision,» *Univesità degli Studi di Padova*, 2017.
- [23] A. Krizhevsky, I. Sutskever y G. E. Hinton, «ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks,» *Adv. Neural Inf. Process. Syst*, pp. 1-9, 2012.
- [24] P. Constante, O. Chang y I. E. E. Pruna, «Artificial Vision Techniques for Strawberry's Industrial Classification,» *IEEE Lat. Am Trans*, vol. 14, n° 6, pp. 2576-2581, 2016.
- [25] B. A. y K. S., «Feature matching and ArUco markers application in mobile eye tracking studies,» *2018 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, Poznan, Poland, pp. 255-260, 2018.
- [26] K. E. L, P. W. E y M. R. A, «Vision-Based Spacecraft Relative Pose Estimation in Variable Lighting Conditions,» de *2022 IEEE Aerospace Conference (AERO)*, Big Sky, MT, USA., Massachusetts, 2022.
- [27] L. M. Olmos, «Tecnología Hortícola,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.tecnologiahorticola.com/drones-autonomos-para-mejorar-la-cosecha-de-frutos-silvestres/>. [Último acceso: 10 octubre 2024].
- [28] C. E. Beltran Burboa, G. Pollorena Lopez y A. Graciano Obeso, «Efecto del vuelo de un dron sobre la polinización de cultivo de fresa en casa sombra como alternativa a la ausencia de polinizadores naturales,» *Revista Interdisciplinaria De Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*, vol. año 9, n° 1, pp. 1-10, 2023.





Mecánica
de
Materiales

Ingeniantes

Estudio del Comportamiento Térmico de Ecobaldosas usando el Método de Ganancias Térmicas a Través de Paredes

RESUMEN: Las ecobaldosas son un material sustentable diseñado para disminuir la transferencia de calor en viviendas, actuando como aislante térmico y presentando múltiples aplicaciones. El sobrecalentamiento en viviendas y espacios laborales genera ambientes incómodos, incrementando el uso de sistemas de refrigeración y, con ello, los costos de energía. Además, la exposición a altas temperaturas afecta la salud y el desempeño de los trabajadores. Para enfrentar este problema, se desarrollaron ecobaldosas térmicas a base de poliestireno expandido y cascarón de huevo, ofreciendo una solución innovadora mediante el uso de materiales reciclados.

La metodología empleada para evaluar el rendimiento de las ecobaldosas se basó en la norma NMX-C-460-ONNCCE-2009 e incluyó el cálculo de densidad aparente (2.548 g/cm^3), conductividad térmica y determinación de espesor. También se realizaron pruebas de absorción de humedad, obteniendo un porcentaje de absorción del 4% en 24 horas, y se calculó la resistencia térmica del material. Estas pruebas fueron clave para determinar el comportamiento térmico de las ecobaldosas en techos de viviendas. Los resultados revelaron una reducción del flujo de calor entre el 39.16% y el 27.51%, evidenciando su efectividad como aislante térmico. Este estudio demuestra el potencial de las ecobaldosas como una solución sostenible y eficiente para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental en edificaciones.

PALABRAS CLAVE: aislante térmico, transferencia de calor, innovadora.



Colaboración

Rogelio Arroyo Cruz, Ana Roselyn Pérez Méndez, Nitnzi Balbuena Amador, Ana Isabel Campos Molina, María de Lourdes Díaz Chiñas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 18 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 09 de octubre de 2024

ABSTRACT: Ecobaldosas are a sustainable material designed to reduce heat transfer in homes, acting as a thermal insulator and presenting multiple applications. Overheating in homes and work spaces generates uncomfortable environments, increasing the use of refrigeration systems and, with it, energy costs. In addition, exposure to high temperatures affects the health and performance of workers. To address this problem, eco-thermal tiles based on expanded polystyrene and eggshells were developed, offering an innovative solution through the use of recycled materials.

The methodology used to evaluate the performance of the ecobaldosas was based on the NMX-C-460-ONNCCE-2009 standard and included the calculation of bulk density (2.548 g/cm^3), thermal conductivity and thickness determination. Moisture absorption tests were also performed, obtaining an absorption percentage of 4% in 24 hours, and the thermal resistance of the material was calculated. These tests were key to determine the thermal performance of ecobaldosas in residential roofs. The results revealed a reduction of heat flow between 39.16% and 27.51%, evidencing its effectiveness as a thermal insulator. This study demonstrates the potential of ecobaldosas as a sustainable and efficient solution to improve energy efficiency and reduce the environmental impact in buildings.

KEYWORDS: thermal insulation, heat transfer, innovative.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y aplicación de materiales aislantes térmicos ha cobrado gran importancia en las últimas décadas, especialmente en el contexto de la sostenibilidad energética y la mitigación de los efectos del cambio climático. La necesidad de contar con materiales que posean baja conductividad térmica

ha crecido debido al incremento de las olas de calor, fenómeno que ha mostrado un repunte significativo en 2024. Este tipo de materiales son fundamentales en la eficiencia energética de viviendas y en entornos industriales donde se requiere controlar las temperaturas, tanto para mejorar el confort como para reducir el consumo energético asociado a sistemas de enfriamiento [1].

En particular, los aislantes térmicos con propiedades físicas y químicas que permiten una baja conductividad se están consolidando como las mejores opciones para sustituir materiales tradicionales, especialmente en aplicaciones a temperaturas inferiores a 300°C. Estos materiales destacan no solo por su efectividad térmica, sino también por su costo accesible, lo que los hace especialmente adecuados para su implementación en microempresas que enfrentan condiciones de calor constantes. La capacidad de estos materiales para ser producidos a menor costo sin comprometer su rendimiento térmico es clave para su adopción masiva, especialmente en industrias pequeñas y medianas que buscan reducir costos operativos mientras mantienen un ambiente laboral seguro y confortable [2][3].

En los últimos años, las olas de calor han incrementado significativamente, como resultado directo del calentamiento global [3]. Este fenómeno es una consecuencia inevitable del aumento de gases de efecto invernadero, que actúan como un cristal en un invernadero, atrapando el calor en la atmósfera y evitando que escape. Aunque muchos de estos gases se generan naturalmente, las actividades humanas han provocado un incremento notable en sus concentraciones en la atmósfera [4]. Este aumento en la temperatura global ha intensificado el uso de dispositivos de climatización en viviendas, lo que ha llevado a un incremento en el consumo de energía eléctrica. Por ello, es fundamental encontrar soluciones que mitiguen este problema, y las ecobaldosas, debido a sus propiedades aislantes térmicas, podrían ser una opción viable.

Con el objetivo de comprobar la capacidad de las ecobaldosas para reducir el calor, se ha diseñado un análisis térmico. Este estudio contempla una simulación que toma como referencia la temperatura exterior máxima registrada este año, permitiendo evaluar si las ecobaldosas son capaces de inhibir eficazmente la transferencia de calor hacia el interior de una vivienda. Los resultados obtenidos se compararán con los de otros productos del mercado, ofreciendo una perspectiva sobre su potencial como solución innovadora para el ahorro energético [5].

La Ecobaldosas Térmica, MX/a/2018/015948

Y MX/a/2024/010202, compuesta primordialmente con cascarón de huevo que, junto con poliestireno expandido y un solvente, [6] [7], logran propiedades altamente aislantes, logrando mitigar el calor hasta un 86%.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología utilizada para la evaluación térmica de las ecobaldosas sigue los lineamientos establecidos en la NMX-C-460-ONNCCE-2009 [8], y se desarrolló conforme a los siguientes pasos:

1. Determinación del campo de aplicación: Se definieron los escenarios de uso, centrados en su instalación como aislante térmico en techos de viviendas, considerando las condiciones climáticas de zonas específicas. Usando la conductividad del mortero cemento/arena con densidad de 2000 kg/m³ es de 0.630 W/m • K, valor que será utilizado para realizar este análisis.
2. Determinación de la densidad aparente: De acuerdo con la norma ISO 1045, se evaluó la densidad aparente de las ecobaldosas con dimensiones de 15 cm x 15 cm x 1 cm. El cálculo de la densidad aparente, necesario para entender las propiedades físicas del material, se realizó midiendo su masa y volumen, teniendo como resultado 2.548 grs/cm³.
3. Determinación de la conductividad térmica: Se aplicó el método de la placa caliente, siguiendo los estándares proporcionados por el CENAM (Centro Nacional de Metrología), para medir con precisión la capacidad del material de conducir calor. Este procedimiento es esencial para determinar la eficacia del material como aislante térmico, esta baldosa posee 0.232 W/(m²•K) [10].
4. Prueba de absorción de humedad: Basada en la ISO 1045 [9], esta prueba se diseñó para medir la capacidad del material de absorber humedad, factor clave para evaluar su durabilidad y comportamiento en diferentes condiciones ambientales. Teniendo una absorción en 24 horas de 100% de permeabilidad y 4% de porcentaje de humedad.
5. Determinación de variables para simulación: Se definieron las variables correspondientes para la simulación térmica de las ecobaldosas instaladas en techos de viviendas de la ciudad de Misantla. Para esta simulación, se empleó el software SolidWorks 2022, modelando el comportamiento térmico bajo las condiciones ambientales locales, lo que permitió analizar la efectividad del material en la reducción del calor.

Esta metodología, sustentada en normas internacionales, permitió realizar una caracterización integral del material, evaluando tanto sus propiedades físicas y comportamiento térmico.

El techo que se analizará tendrá unas dimensiones de 3 x 3 metros con un espesor de 10 cm. La temperatura exterior que se utilizó para este análisis fue la temperatura más alta que se ha presentado en este año 2024 a la fecha, la cual es de 41 °C. [11] Se supondrá que el interior del recinto va a estar a 25 °C.

Por otro lado, la velocidad promedio del viento en este mismo año es de 3.99 mph [12] por lo que el factor de convección por aire en movimiento en el exterior del techo será de 16.47 W/m²•K y para aire tranquilo en el interior del recinto este factor se tomará como 9.37 W/m²•K. [13].

Variable 1. Análisis sin recubrimiento

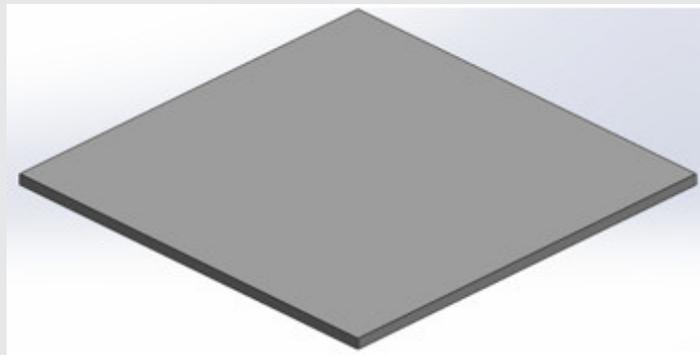


Figura 1. Losa de estudio cemento/arena con 10 cm de espesor.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se puede apreciar que la temperatura que alcanza la losa con la velocidad del viento utilizada para el análisis es de 37.87 °C, lo que quiere decir que el material utilizado no opone mucha resistencia al paso del calor, mientras que al interior la temperatura llega a los 30.09 °C.

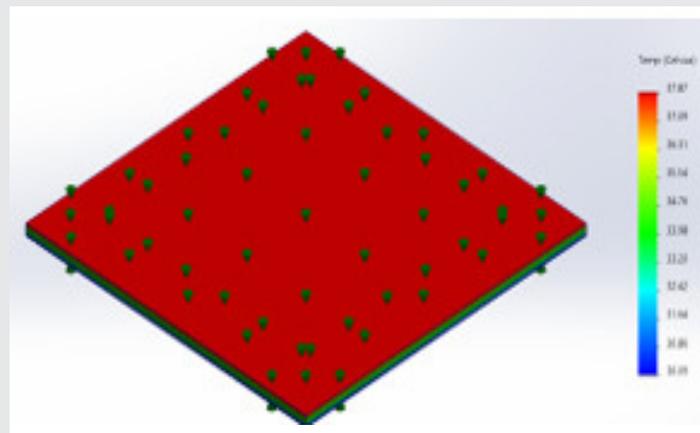


Figura 2. Variación de la temperatura a través de losa de 10 cm de espesor.
Fuente: Elaboración propia

Con las condiciones vistas en la Figura 2, en la Figura 3 se puede observar que el calor que pasa a través de la losa es de 441.49 W.

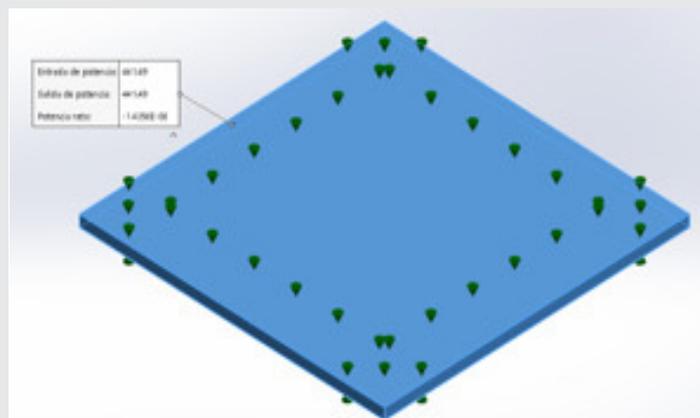


Figura 3. Paso de calor a través de losa de 10 cm de espesor.
Fuente: Elaboración propia

Variable 2. Análisis con recubrimiento de ecobaldosas de 1 cm de espesor y separación de aire de 40 cm

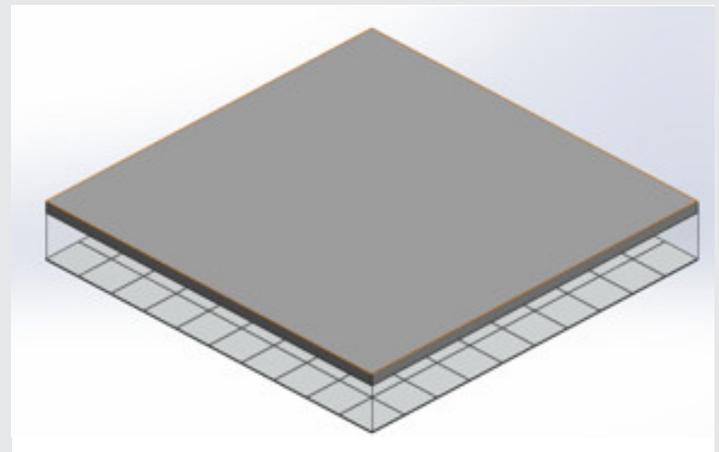


Figura 4. Losa de estudio cemento/arena con 10 cm de espesor, separación de aire de 40 cm y recubrimiento de ecobaldosas de 30 x 30 cm con espesor de 1 cm.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Arreglo de pared compuesta a analizar.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Imagen 6, la losa alcanza una mayor temperatura en el exterior que la que se alcanzó en el análisis de la variable 1, en este caso de 40.79 °C, lo que indica que, si existe una mayor resistencia al paso de calor, y esto se puede confirmar con la temperatura alcanzada en la parte interna del falso plafón elaborado de ecobaldosas, la cual es de 24.82 °C.

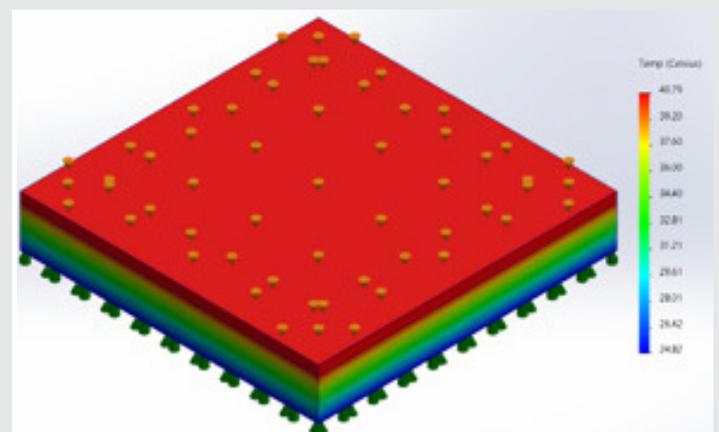


Figura 6. Variación de la temperatura a través de la pared compuesta.
Fuente: Elaboración propia.

En este caso, basándonos en los datos obtenidos en la Figura 7 se puede confirmar que el paso de calor a través de la losa es aproximadamente 15 veces menor que el obtenido en el primer análisis sin recubrimiento, es decir 28.382 W.

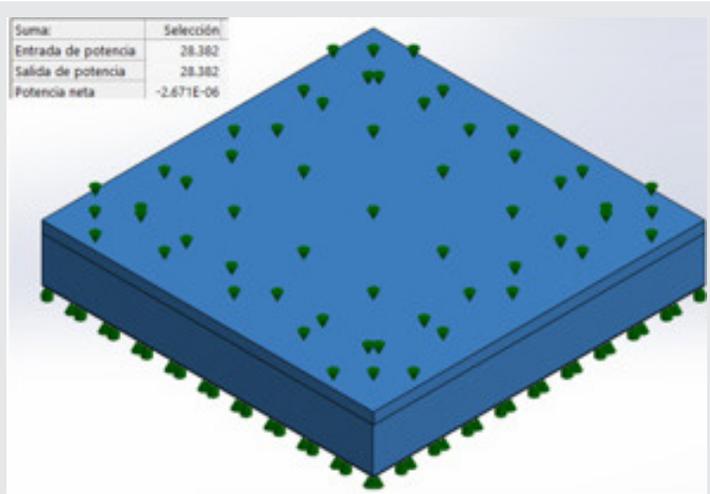


Figura 7. Paso de calor a través de la pared compuesta.
Fuente: Elaboración propia.

Variable 3. Análisis con recubrimiento de ecobaldosas de 1 cm de espesor

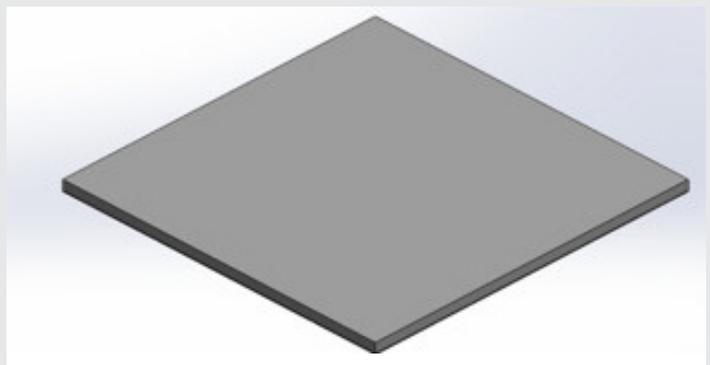


Figura 8. Losa de estudio cemento/arena con 10 cm de espesor y recubrimiento de ecobaldosas de 30 x 30 cm con espesor de 1 cm.
Fuente: Elaboración propia.

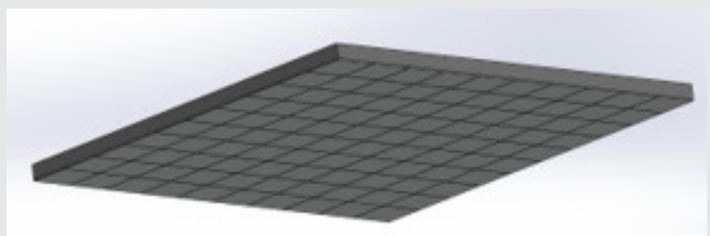


Figura 9. Arreglo de pared compuesta a analizar.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 10, la losa alcanza una temperatura en el exterior de 38.47 °C, lo que indica que, si existe una resistencia por parte de la losa al paso del calor, y esto se puede confirmar con la temperatura alcanzada en la parte interna del arreglo elaborado de ecobaldosas, la cual es de 27.89 °C.

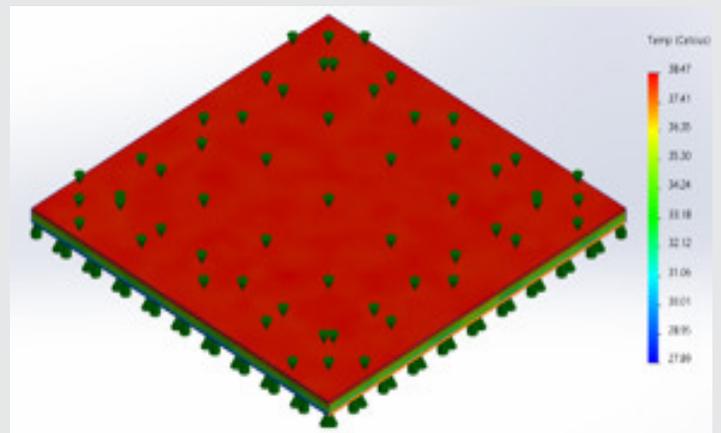


Figura 10. Variación de la temperatura a través de la pared compuesta.
Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 11 el paso de calor a través de la pared compuesta es de 333.94 W, es decir, 107.55 W menos que el obtenido con el análisis de la variable 1, sin embargo, es mayor al obtenido con el análisis de la variante 2.

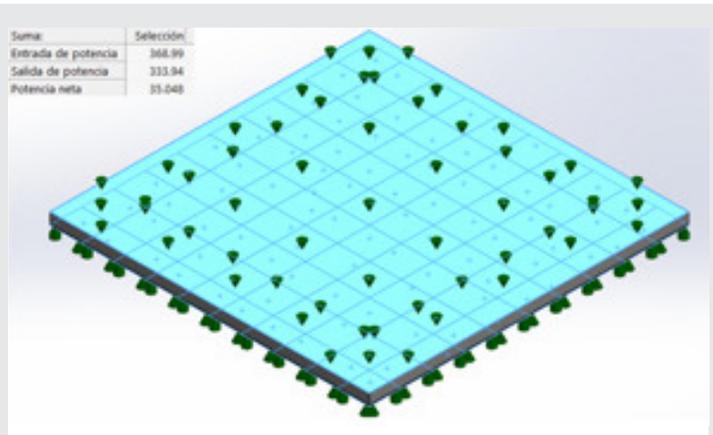


Figura 11. Paso de calor a través de la pared compuesta.
Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Al término de los análisis obtenidos con las tres variables se puede observar que los mejores resultados obtenidos son los de la variable dos con una separación de aire entre la losa (disminución de 39.16%) y el arreglo de ecobaldosas, sin embargo, si por cuestiones de espacio no se puede realizar una separación de aire, también con lo observado en la variable tres (disminución de 27.51%), se puede ver que si existe una considerable reducción en cuanto al paso de calor se refiere, por lo que si queda demostrado que el nuevo material del cual están hechas las ecobaldosas puede servir como aislante térmico en viviendas logrando con ello una mejora energética que impacta de manera positiva en el bolsillo de los habitantes de las mismas.

Tabla 1. Escenarios propuestos para simulación.

	Variable 1	Variable 2	Variable 3
Temperatura exterior en °C	37.87	40.79	38.47
Temperatura interior en °C	30.09	24.82	27.89
Calor que pasa a través de la losa en Watts	441.49	28.382	333.94

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio demuestran que las ecobaldosas presentan una alta eficiencia como aislante térmico, al reducir significativamente tanto la temperatura interior de los espacios como el flujo de calor a través de los techos. Los datos obtenidos revelan una disminución de la temperatura interior de entre 20.55% y 39.15% en comparación con la temperatura exterior, lo que evidencia su capacidad de moderar el sobrecalentamiento en viviendas.

En particular, el análisis de tres escenarios específicos mostró que, con una temperatura exterior de 37.87°C, la temperatura interior se redujo a 30.09°C, logrando una disminución del 20.55%, mientras que el calor que atravesó la losa fue de 441.49 Watts. En el segundo escenario, con una temperatura exterior más elevada de 40.79°C, la temperatura interior fue de 24.82°C, lo que representa una reducción del 39.15%, y una notable disminución del flujo de calor a solo 28.382 Watts. Finalmente, en el tercer escenario, con una temperatura exterior de 38.47°C, se registró una temperatura interior de 27.89°C, lo que equivale a una reducción del 27.52%, y un flujo de calor de 333.94 Watts.

Estos resultados sugieren que las ecobaldosas no solo son una solución efectiva para reducir la transferencia de calor en techos de viviendas, sino que también pueden contribuir significativamente a la mejora de la eficiencia energética. Al disminuir la necesidad de sistemas de refrigeración, su implementación no solo ayuda a reducir los costos energéticos, sino que también tiene un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental. Esto convierte a las ecobaldosas en una opción viable para la protección térmica en edificaciones, especialmente en regiones expuestas a altas temperaturas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al COVEICYDET y al tecnológico Nacional de México la contribución para el desarrollo de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

[[1] X. Zhang, Y. Li, y L. Wang, "Thermal insulation materials: Trends and innovations in energy-efficient building applications," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 348-356, 2024.

[2] M. J. García, A. Fernández, y C. Ruiz, "Low-conductivity materials for thermal insula-

tion: A review of recent advances," *Journal of Sustainable Materials*, vol. 15, no. 4, pp. 101-110, 2023.

[3] A. Martínez, J. Gómez, y R. Torres, "Thermal insulation solutions for micro and small enterprises: A cost-effective approach," *Industrial Energy Efficiency Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 45-52, 2024.

[4] M. J. García, A. Fernández, y C. Ruiz, "Low-conductivity materials for thermal insulation: A review of recent advances," *Journal of Sustainable Materials*, vol. 15, no. 4, pp. 101-110, 2023.

[5] A. Martínez, J. Gómez, y R. Torres, "Thermal insulation solutions for micro and small enterprises: A cost-effective approach," *Industrial Energy Efficiency Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 45-52, 2024.4o.

[6] A. Pérez Méndez, "Ecobaldosas Térmica", México, MX/a/2018/015948, 23, Agosto, 2024.

[7] A. Pérez Méndez, "Ecobaldosas Térmica", México, MX/a/2024/010202, 29, Agosto, 2024.

[8] *Industria de la construcción – materiales aislantes térmicos – determinación de propiedades físicas y conductividad térmica*, NMX-C-460-ONNCCE-2009, México, 2009.

[9] *Plastics Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity*, ISO 22007-1:2024, May, 2024.

[10] L. Cortes y E. Méndez Lango, "Medición de la Conductividad Térmica de Materiales Aislantes en CENAM", Centro Nacional de Metrología, 2007.

[11] QUADRATIN, "Elevará la temperatura hasta los 41 grados la onda de calor," 2024. <https://quintanaroo.quadratin.com.mx/elevara-la-temperatura-hasta-los-41-grados-la-onda-de-calor/>.

[12] "Tiempo de Windows", Accessed: Junio 20, 2024 [Online.].

[13] R. Dossat, *Principios de refrigeración*, México, D.F: Continental, 2004.





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Fotogrametría, alternativa para la evaluación de biomasa en humedales construidos

RESUMEN: La creciente preocupación por el medio ambiente ha llevado al desarrollo de humedales construidos como una solución sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas imitan los procesos naturales mediante plantas y microorganismos, mejorando la calidad del agua. Monitorear la biomasa vegetal es crucial para optimizar su funcionamiento, ya que influye en la capacidad del humedal para eliminar contaminantes. La fotogrametría se presenta como una alternativa prometedora para la evaluación de la biomasa en humedales construidos, sistemas diseñados para tratar aguas residuales de manera natural. Este trabajo es una revisión bibliográfica cuyo objetivo es analizar el potencial de la fotogrametría en la estimación de biomasa, considerando su precisión, eficiencia y ventajas frente a otros métodos tradicionales. Para la realización de la investigación, se consultaron bases de datos como Scopus, Web of Science y Google Scholar, seleccionando estudios entre los años 2010 y 2024. Los criterios de inclusión se centraron en investigaciones que abordaron la estimación de biomasa mediante fotogrametría, y se utilizaron las palabras clave: "fotogrametría", "biomasa vegetal", "tratamiento de aguas residuales" y "humedales construidos".

Los resultados indican que la fotogrametría ofrece importantes ventajas en cuanto a costo, tiempo y accesibilidad, además de generar modelos 3D detallados que permiten una evaluación más precisa de la biomasa.

PALABRAS CLAVE: Fotogrametría, biomasa vegetal, tratamiento de agua residual, humedales construidos y evaluación de biomasa.



Colaboración

Zayda Yamileth Ruiz Ramírez; Sandra Guadalupe García Aburto; Luis Carlos Sandoval Herazo, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 13 de octubre de 2024

ABSTRACT: Growing environmental concerns have led to the development of constructed wetlands as a sustainable solution for wastewater treatment. These systems mimic natural processes through plants and microorganisms, improving water quality. Monitoring plant biomass is crucial for optimizing their performance, as it influences the wetland's capacity to remove contaminants. Photogrammetry emerges as a promising alternative for biomass assessment in constructed wetlands, systems designed to naturally treat wastewater. This work is a literature review aimed at analyzing the potential of photogrammetry in biomass estimation, considering its accuracy, efficiency, and advantages compared to other traditional methods. For the research, databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar were consulted, selecting studies from 2010 to 2024. The inclusion criteria focused on research that addressed biomass estimation using photogrammetry, and the keywords used were: "photogrammetry," "plant biomass," "wastewater treatment," and "constructed wetlands."

The results indicate that photogrammetry offers significant advantages in terms of cost, time, and accessibility, while also generating detailed 3D models that allow for more precise biomass evaluation.

KEYWORDS: Photogrammetry, plant biomass, wastewater treatment, constructed wetlands, and biomass assessment.

INTRODUCCIÓN

El creciente interés por soluciones sostenibles en la gestión del agua ha impulsado el desarrollo de humedales artificiales, sistemas que imitan los procesos naturales para depurar aguas residuales mediante plantas y microorganismos. Estos ecosistemas artificiales se han consolidado como una herramienta eficaz para mejorar la calidad del agua y mitigar la contaminación. Sin embargo, para maximizar su eficiencia, es fundamental monitorear el crecimiento de la biomasa vegetal, ya que esto influye directamente en la capacidad del humedal para eliminar contaminación.

La fotogrametría ha surgido como una técnica innovadora para realizar este monitoreo de manera precisa y no invasiva [1]. Mediante la captura de imágenes desde diferentes ángulos y el uso de software especializado, es posible generar modelos tridimensionales detallados que permitan medir la biomasa sin necesidad de alterar el entorno [2]. Esta tecnología ofrece varias ventajas frente a los métodos tradicionales, como una mayor precisión, rapidez en el análisis y la capacidad de cubrir grandes áreas en poco tiempo.

El objetivo de este estudio es explorar cómo la fotogrametría está revolucionando la medición de la biomasa en humedales construidos, destacando sus beneficios para el monitoreo eficiente de estos sistemas y su potencial para mejorar la gestión del agua y el tratamiento de residuos [3].

MATERIAL Y MÉTODOS

Esta investigación es de tipo cualitativa, basada en una revisión de artículos científicos que abordan la aplicación de la fotogrametría en la medición de biomasa vegetal en humedales construidos. Se ha utilizado una base de datos con publicaciones de la última década, complementada con investigaciones de décadas anteriores para proporcionar una visión más completa, especialmente en lo que respecta a los fundamentos teóricos de la fotogrametría. La revisión incluyó artículos, capítulos de libros, libros y tesis, tanto en inglés como en español.

Durante el proceso de revisión bibliográfica para la elaboración del estado del arte, se realizó una búsqueda exhaustiva de literatura científica sobre la aplicación de la fotogrametría en el monitoreo de humedales construidos. Esta búsqueda se llevó a cabo en bases de datos académicas y científicas de renombre, como Google Scholar y ScienceDirect, para asegurar la relevancia y exhaustividad de los resultados.

El criterio de búsqueda está basado en el uso de palabras clave que reflejen tanto el tema general como los aspectos específicos de la investigación, para esto se usó una combinación de palabras claves principales: Fotogrametría, biomasa, humedales construidos, evaluación de biomasa y monitoreo ambiental [3]. Así mismo el empleo de palabras clave secundarias: Modelo 3D de biomasa, sensores remotos, estimación de biomasa no destructiva, tecnología de drones en humedales e innovaciones en fotogrametría aplicada.

Con el fin de tener una combinación más extensa se emplearon los operadores booleanos AND, OR y NOT para refinar la búsqueda.

Para la selección de información se aplicó criterios de inclusión y exclusión los cuales fueron los siguientes: Inclusión: Publicaciones entre 2010 y 2024, para asegurar la relevancia tecnológica actual, artículos que describan la implementación de fotogrametría en la estimación de

biomasa, estudios en humedales construidos u otros ecosistemas acuáticos, aplicables al contexto de humedales artificiales, estudios que comparen la fotogrametría con otros métodos de estimación de biomasa (por ejemplo, métodos destructivos y no destructivos).

Se excluyen artículos que no presenten datos empíricos (por ejemplo, artículos de opinión o puramente teóricos), estudios en ecosistemas completamente distintos, como bosques o praderas, a menos que la metodología sea directamente transferible, publicaciones anteriores al año 2000 (salvo que se trate de revisiones históricas o fundamentales).

Finalmente, un resumen de la revisión bibliográfica discutiendo las principales ventajas de la fotogrametría como método de evaluación de biomasa en humedales construidos, sus limitaciones actuales y las posibles desventajas del método.

RESULTADOS

La creciente inquietud por el medio ambiente y la búsqueda de alternativas sostenibles para la gestión del agua y el tratamiento de desechos han motivado el avance de los humedales construidos. Estos sistemas son diseñados para imitar los procesos naturales de depuración del agua, utilizando plantas y microorganismos para eliminar contaminantes [1]. Para optimizar su funcionamiento, es crucial realizar un monitoreo constante de la biomasa vegetal, ya que su crecimiento influye directamente en la capacidad del sistema para filtrar y procesar las aguas residuales.

Una de las herramientas más innovadoras para realizar estas mediciones de manera precisa y eficiente es la fotogrametría [1], una técnica que utiliza imágenes para crear modelos tridimensionales detallados. Este artículo explora cómo la fotogrametría está revolucionando la medición de biomasa en humedales construidos [4].



Figura 1 Humedal construido para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con BTEX y MTBE del Instituto Tecnológico Superior de Misantla.

La fotogrametría es una técnica que permite la medición y análisis de objetos y espacios a través de fotografías. A partir de múltiples imágenes capturadas desde diferentes ángulos [3], un software especializado puede generar modelos tridimensionales precisos. Estas imágenes pueden ser tomadas desde drones, cámaras aéreas o incluso a nivel del suelo, dependiendo de la escala y los detalles requeridos [5].

En el contexto de la medición de biomasa, la fotogrametría permite cuantificar el volumen y la estructura de la vegetación en los humedales de manera no invasiva, sin necesidad de cortar plantas o alterar el entorno.

Importancia de la medición de biomasa en humedales construidos

La biomasa vegetal en los humedales construidos juega un papel clave en el funcionamiento de estos ecosistemas. Las plantas actúan como filtros naturales, ayudando a eliminar contaminantes y a mantener la calidad del agua. Un crecimiento excesivo de biomasa puede generar problemas, como la obstrucción del flujo de agua o la disminución del oxígeno disponible, mientras que una biomasa insuficiente puede reducir la eficacia del sistema [6].

Por esta razón, es fundamental monitorear la biomasa regularmente para mantener un equilibrio óptimo. Métodos tradicionales, como la recolección y pesaje de plantas, pueden ser invasivos y consumir mucho tiempo [3]. Aquí es donde la fotogrametría ofrece una solución más eficiente.

Ventajas de la fotogrametría en la medición de biomasa

El uso de fotogrametría para evaluar la biomasa en humedales construidos presenta varias ventajas en comparación con los métodos convencionales:

1. No invasiva: No es necesario alterar el ecosistema o cortar plantas para obtener datos precisos.
2. Alta precisión: Los modelos tridimensionales generados a partir de imágenes pueden ofrecer una representación detallada de la vegetación, permitiendo estimaciones precisas del volumen de biomasa [7].
3. Rapidez en el análisis: En lugar de realizar mediciones manuales, las imágenes pueden ser capturadas en poco tiempo y procesadas automáticamente por software, lo que acelera el monitoreo.
4. Cobertura de grandes áreas: Con el uso de drones, es posible cubrir extensas superficies de humedales en poco tiempo, obteniendo una visión completa y detallada del estado de la vegetación.
5. Historial temporal: Al capturar imágenes en diferentes momentos, se puede generar un historial del creci-

miento de la biomasa, permitiendo identificar patrones estacionales o detectar problemas a largo plazo [8].

Proceso de medición de biomasa mediante fotogrametría

El proceso de medición de biomasa en humedales construidos a través de fotogrametría puede resumirse en los siguientes pasos [9]:

1. Captura de imágenes: Se toman imágenes de la vegetación desde diferentes ángulos, ya sea mediante drones o cámaras situadas en puntos estratégicos del humedal.
2. Generación del modelo 3D: Un software especializado combina las imágenes para crear un modelo tridimensional de la vegetación. Este modelo representa el volumen de la biomasa de manera precisa.
3. Cálculo del volumen: A partir del modelo 3D, se calculan parámetros como la altura, densidad y volumen de la vegetación. Estos datos se correlacionan con la cantidad de biomasa presente.
4. Análisis y monitoreo: Los datos obtenidos se utilizan para analizar el estado del humedal, hacer ajustes en la gestión de este y planificar futuras intervenciones.

Aplicaciones en otros campos

La fotogrametría es una técnica que permite la medición y análisis de objetos y espacios a través de fotografías. A partir de múltiples imágenes capturadas desde diferentes ángulos [3], un software especializado puede generar modelos tridimensionales precisos como lo es. Estas imágenes pueden ser tomadas desde drones, cámaras aéreas o incluso a nivel del suelo, dependiendo de la escala y los detalles requeridos [5]. Las Figuras 1 y 2 fueron tomadas con una cámara Mapiir Survey 3W°, Cámara Multiespectral de Lente Ancho y posteriormente fueron procesadas en Pix4D para su respectivo análisis.

Algunas de sus principales aplicaciones son: topografía y cartografía: para la creación de mapas, generación de modelos de terreno y medición de áreas y superficies; Arquitectura y conservación del patrimonio: Documentación y recreación de edificios históricos o estructuras y creación de modelos 3D para la restauración de monumentos o sitios arqueológicos; Agricultura: mapeo de campos para el monitoreo de cultivos, evaluación de la salud de las plantas y planificación de riego; Control y monitoreo ambiental: Análisis de cambios en la cobertura terrestre y estudio de áreas afectadas por desastres naturales.

Retos y limitaciones de la fotogrametría

Aunque la fotogrametría es una herramienta poderosa, no está exenta de desafíos. Algunos factores que pueden influir en la precisión de los resultados incluyen las condiciones climáticas, la calidad de las cámaras utilizadas y la complejidad del entorno vegetal [9].



Figura 2 Densidad vegetativa de los humedales construidos es un factor en la precisión de la fotogrametría.

La presencia de agua y la reflectancia de la luz en los humedales también puede complicar la captura de imágenes nítidas.

A pesar de estas limitaciones, la fotogrametría sigue siendo una de las mejores opciones para el monitoreo de biomasa en humedales construidos, gracias a su capacidad para ofrecer resultados precisos y su adaptabilidad a diferentes escalas.

CONCLUSIONES

El uso de la fotogrametría para la medición de biomasa en humedales construidos representa un avance significativo en el campo del monitoreo ambiental. Esta técnica no solo permite obtener datos precisos de manera rápida y eficiente, sino que también ayuda a garantizar el equilibrio ecológico y la sostenibilidad de estos sistemas [5]. A medida que la tecnología continúa avanzando, es probable que veamos una mayor integración de la fotogrametría y otras herramientas digitales en la gestión de ecosistemas construidos y naturales.

Este enfoque, no invasivo y altamente preciso, tiene el potencial de transformar la forma en que gestionamos y optimizamos los humedales construidos, contribuyendo a un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

DISCUSIÓN

A pesar de estos esfuerzos, esta revisión encontró una disponibilidad limitada de estudios centrados específicamente en la fotogrametría aplicada a la medición de biomasa en humedales en los últimos seis años. Esto podría deberse a varias razones. En primer lugar, la investigación en humedales construidos ha experimentado una diversificación temática significativa, lo que puede haber desplazado el enfoque hacia otras áreas más emergentes. En segundo lugar, la rápida evolución de las tecnologías de monitoreo podría haber generado un interés creciente en técnicas alternati-

vas. Sin embargo, la fotogrametría sigue siendo una herramienta poderosa y eficiente para la medición no invasiva de biomasa [3], lo que la convierte en una opción prometedora para la gestión sostenible de humedales construidos.

AGRADECIMIENTOS

Los dos primeros autores agradecen al CONAHCyT por las becas de estudios #918005 y #341486 otorgadas respectivamente en los periodos agosto 2023 a octubre 25 y de agosto 2023 a octubre 2027, para realizar los estudios de Maestría en Ingeniería Industrial y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en el ITS de Misantla.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Maltese, A., De Luca, L. (2016) *Photogrammetry for environmental monitoring and vegetation analysis.* *Journal of Environmental Science and Engineering.*

[2] Verhoeven, G. (2011). "Taking computer vision aloft - archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan." *Computers and Geosciences*, 37(12), 1281-1292.

[3] Xu, X., Tian, G., & Li, Y. (2020). "Application of photogrammetry and UAV-based technology in wetland monitoring." *Remote Sensing*, 12(5), 778.

[4] Bastviken, D., et al. (2021). "Biomass estimation using photogrammetry in constructed wetlands: a non-invasive approach." *Wetlands Ecology and Management*, 29(2), 193-205.

[5] Borges, M. A., Costa, P. M., & Novack, T. (2024). "Monitoring artificial wetlands using UAV-based multispectral photogrammetry: Insights for biomass estimation." *Ecological Indicators*, 140, 110091.

[6] Kim, Y., Lee, S. H., & Koo, H. Y. (2022). "Advances in UAV-based photogrammetry for environmental monitoring: Biomass estimation in coastal wetlands." *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100642.

[7] Nevalainen, O., Honkavaara, E., Tuominen, S., Viljanen, N., Hakala, T., & Näsi, R. (2021). "UAV-based photogrammetric point clouds in the estimation of biomass in wetlands." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 171, 83-99.

[8] Stratoulis, D., & Nascetti, A. (2020). "A review of remote sensing for wetland monitoring: Recent trends and future directions." *Remote Sensing*, 12(8), 1250.

[9] Steele, B. L., & Finlayson, C. M. (2023). "Quantifying aboveground biomass in wetland systems using drone photogrammetry and spectral data." *Wetlands Ecology and Management*, 31(2), 221-235.



Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Separador de polipropileno modificado con CaTiSiO_5 para baterías de iones de litio



Colaboración

Balter Trujillo Navarrete; Mariela Mirza Ruiz Ramírez, Tecnológico Nacional de México\ IT de Tijuana; Jassiel Rolando Rodríguez Barrera, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 07 de octubre de 2024

RESUMEN: En el presente trabajo de investigación, se sintetizó titanato de calcio (CaTiSiO_5) vía ruta cerámica, seguido de un proceso de molienda mecánica. Se aplicó un diseño de experimento considerando el número de ciclos y la secuencia de esferas. El material procesado se caracterizó microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos-X (DRX). Conjuntamente, se realizó la caracterización electroquímica de los catalizadores por capacitancia (Cdl). Separadores de polipropileno (PP) fueron modificados con CaTiSiO_5 para su uso en batería de iones de litio, mejorando su comportamiento térmico y aumentando la eficiencia.

PALABRAS CLAVE: Titanita (CaTiSiO_5), energía renovable, separador de polipropileno, baterías de iones de litio, molino de bola.

ABSTRACT: In the present research work, calcium titanate (CaTiSiO_5) was synthesized via a ceramic route, followed by a mechanical milling process. An experimental design was applied considering the number of cycles and the sequence of spheres. The processed material was characterized by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). In addition, electrochemical characterization of the catalysts was performed using capacitance (Cdl). Polypropylene separators (PP) were modified with CaTiSiO_5 for use in lithium-ion batteries, improving their thermal behavior and increasing efficiency.

KEYWORDS: Titanite (CaTiSiO_5), renewable energy, polypropylene separator, lithium-ion batteries, ball mill.

INTRODUCCIÓN

La titanita (CaTiSiO_5) cerámica también conocida como esfeno, pertenece a la familia de los nesosilicatos. [1] Su estructura cristalina contiene cadenas de octaedros de TiO_6 conectadas por tetraedros de SiO_4 coordinados con iones Ca_{2+} intersticiales. El cerámico pasa de la fase monoclinica $\text{P}2_{1/c}$ a la monoclinica $\text{A}2/a$ (i. e., C_2/c) a temperatura mayor de 500 K. [2], [3] El CaTiSiO_5 tiene excelentes propiedades, p. ej., estabilidad química y térmica, además, el material es un excelente material anfitrión. Esto es debido a su capacidad para incorporar elementos químicos de alto peso molecular en su red

crystalina, por lo que se ha utilizado en la disposición de residuos radiactivos de muy baja actividad de vida larga (p. ej., U^{238} , U^{235} y Th^{232}) materiales luminiscentes y pigmentos. [1], [4].

Un área de gran interés entre los científicos es el desarrollo de sistemas de almacenamiento y conversión de energía. Donde $CaTiSiO_5$ debido a sus propiedades particulares puede ser de utilidad para almacenamiento, p. ej., las baterías de ion litio (LIBs). Las cuales están compuestas de cuatro componentes: (1) ánodo (p. ej., grafito), (2) cátodo ($LiCoO_2$), (3) separador (p. ej., polietileno (PE), polipropileno (PP) y laminado PE/PP) y (4) un electrolito no acuoso. [5], [6] Particularmente, el separador es una membrana polimérica porosa intercalada entre el cátodo y ánodo que evita el contacto físico y eléctrico, y permite la transferencia de iones durante los procesos de carga y descarga. [7].

Las características requeridas de los separadores son la porosidad, el tamaño de los poros, la resistencia mecánica y la estabilidad térmica, las cuales influyen en el transporte de iones, la vida útil, el rendimiento y la seguridad de las baterías [8], [9].

Los separadores comerciales de PP son rentables, sin embargo, sufren de baja estabilidad térmica a temperaturas elevadas, [9], lo que puede provocar cortocircuitos, sobrecalentamiento y falla de la batería, [7], [10], [11], [12]. Diversas estrategias han sido propuestas, e. g., Roh et al. (2022) diseñaron una reticulación química entre partículas cerámicas y aglutinantes poliméricos para minimizar el espesor de la capa de revestimiento cerámico manteniendo al mismo tiempo su estabilidad térmica, [13] y Hao et al. (2020) modificaron la superficie usando polidopamina, mejorando el comportamiento térmico del separador de PP. [14] Por último, Li et al. (2018) reportaron una mejora de la estabilidad térmica (165 °C) para LIBs usando multicapa de polipropileno/polietileno (PP/PE) mediante coextrusión multicapa. [15] Sin embargo, no se ha investigado el uso de nanomateriales cerámicos depositados en el diseño de separadores de membrana. En el presente trabajo de investigación, se reporta la síntesis de $CaTiSiO_5$ y el procesamiento por molienda mecánica; y la evaluación en LIBs como separador modificado de PP.

MATERIAL Y MÉTODOS

Todos los reactivos se utilizaron tal como se recibieron, sin purificación adicional, y fueron adquiridos de Sigma-Aldrich: óxido de silicio (SiO_2 , 99.9%), dióxido de titanio (fase anatasa, TiO_2 , 99.8%), etanol (CH_3CH_2OH , 95%), metanol (CH_3OH , 99%), sulfato de sodio (Na_2SO_4 , 98%), ácido clorhídrico (HCl, 37%), soluciones de Nafion® 117 (5%), N-metil-2-pirrolidona (NMP, 98%) y solución de hexafluorofosfato de litio ($LiPF_6$). El carbonato de calcio ($CaCO_3$, 99%) y el ferricianuro de potasio ($K_3Fe(CN)_6$, 100%) fueron suministrados por Productos Químicos Monterrey y J.T. BakerTM, respectivamente.

El recubrimiento de fluoruro de polivinilideno (PVDF), el separador de polipropileno (PP, espesor de 25 μm), el fosfato de hierro y litio ($LiFePO_4$), la lámina de litio (espesor 0.6 mm, 99.9 %) y el polvo de negro de carbono estructurado (Super P® Li).

La síntesis de $CaTiSiO_5$ se realizó utilizando la ruta cerámica. SiO_2 , $CaCO_3$ y TiO_2 se disolvieron en etanol a una temperatura de 25 °C con agitación magnética constante por ¼ h. La mezcla se secó por 24 h a 80 °C en un horno de convección. La pasta resultante $TiO_2-SiO_2-CaO_3$ se pulverizó, transfiriéndose a un crisol y colocándolo en un horno de mufla a 1,300 °C por 4 h. Posteriormente, el polvo sintetizado se sometió a un proceso de molienda utilizando un molino de bolas con esferas de zirconio (8 mm, 10 mm y 11,5 mm) y el número de ciclos de ½ h (1, 2 y 3) a 1,200 rpm.

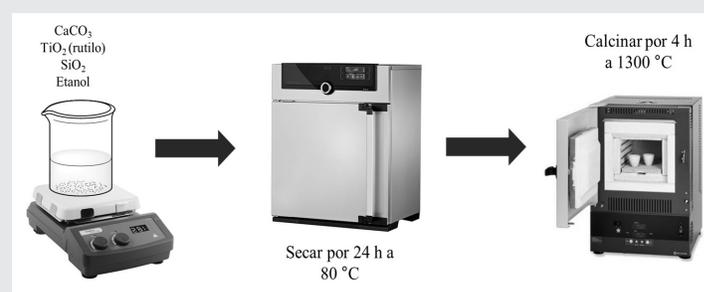


Figura 1. Metodología de síntesis de $CaTiSiO_5$.
Fuente: Elaboración propia.

Caracterización fisicoquímica: La forma se estudió utilizando un microscopio electrónico de barrido (Tescan®, Vega) en microscopía electrónica de barrido (SEM) operado en modo alta resolución a 15 kV. La fase cristalina y el tamaño promedio de los cristales se analizaron utilizando un difractómetro de rayos-X (Bruker®, D8 Advance da Vinci). Las intensidades de pico se recopilaron desde 10.0 hasta 90.0 de 2θ (°) con un tamaño de paso de 0.01.

Caracterización electroquímica: Los experimentos electroquímicos se realizaron en un potenciostato/galvanostato (Biologic, VMP-300). La celda electrolítica consta de tres electrodos: (1) carbono vítreo como electrodo de trabajo con un área activa de 0.07 cm^2 , (2) espiral de platino como contraelectrodo y (3) un electrodo de referencia $Ag/AgCl$ (3M KCl). La superficie expuesta se modificó utilizando una tinta catalítica preparada a partir de polvos de $CaTiSiO_5$, dispersada en una solución de Nafion®/metanol (0.009:1 v/v). La capacitancia electroquímica de doble capa (Cdl) se midió en una solución electrolítica de Na_2SO_4 1.0 M. El potencial de ventana varió desde -0.2 hasta 0.6 V vs. $Ag/AgCl$, variando la velocidad de barrido de 1 a 100 mVs^{-1} .

Evaluación en LIBs: Los polvos de $CaTiSiO_5$ sintetizados se evaluaron como separadores de PP modificados en una batería de botón de iones de litio CR 2032. Estos materiales molidos se usaron en una tinta catalítica,

preparada usando un aglutinante y NMP (8:1:1 p/p/p) como recubrimiento del electrodo. La tinta preparada se depositó usando el método de recubrimiento doctor Blade sobre separadores de PP. El espesor de la capa de recubrimiento fue $\approx 15 \mu\text{m}$. Se usó una lámina de litio como material del ánodo, y se usaron aglutinantes LiFePO_4 , Super P $^\circ$ Li y PVDF (8:1:1 p/p/p) como materiales del cátodo.

Todas las baterías de botón de litio CR 2032 se ensamblaron en una caja de guantes con argón. Inmediatamente, la evaluación de la batería se estudió mediante ciclos de carga-descarga galvanostática. Posteriormente, se estudió el comportamiento térmico de los separadores utilizando un analizador termogravimétrico (TGA, TA Instrument $^\circ$, Q500). Se adquirieron mediciones de TGA isotérmicas desde 15 hasta 600 $^\circ\text{C}$ con N_2 como gas portador en un flujo de aire de 40 mL/min con un paso de 20 $^\circ\text{C}/\text{min}$.

RESULTADOS

Análisis SEM: La técnica SEM se utilizó para observar la forma de los materiales sintetizados. La titanita de referencia (S0) consistió en aglomerados de forma irregular y fuertemente sinterizados, como se muestra en la Figura 2a. El diámetro de partícula (D) fue superior a los 5.0 μm (muestra $n > 100$). Los materiales modificados (Figura 2b) por la molienda presentaron un tamaño menor a 1.0 μm (excepto S1), como se muestra en la Tabla 1. La Figura 2b muestra la desfragmentación de las partículas tratadas en el molino de bolas.

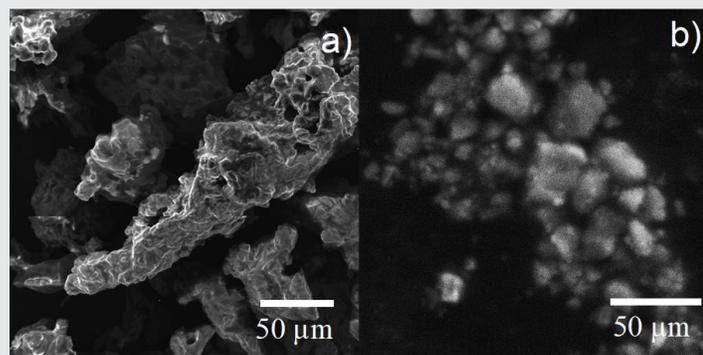


Figura 2. Micrografías de CaTiSiO_5 : (a) sin molienda (S0) y (b) material ilustrativo resultado de la molienda (S1-S5). Fuente: Elaboración propia.

Identificación de fase: La indexación de fase de los difractogramas se realizó usando la base de datos PDF+5 2025 de la International Centre for Diffraction Data (JCPDS). La indexación (Figura 3) confirmó la presencia de CaTiSiO_5 con grupo espacial C_2/c (Tarjeta ICSD No. 159342) y traza de TiO_2 en fase anatasa (Tarjeta No. JCPDS 00-21-1272). Los resultados sugieren que el CaTiSiO_5 sintetizado tiene menor impureza aquellos reportados en la literatura. [16] El tamaño de cristalito (D_{vol}) fue además calculado usando la ecuación de Scherrer. En la Tabla 1, se puede observar el decremento de D_{vol} para los materiales modificados.

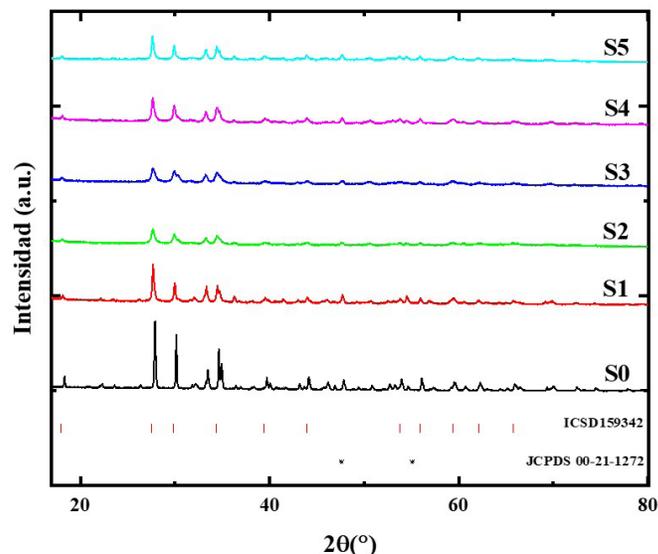


Figura 3. Patrón de difracción de rayos-X de CaTiSiO_5 . Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica y electroquímica de CaTiSiO_5 .

	D (μm)	D_{vol} (nm)	C_{dl} (mFcm^{-2})	Residuo (%)	E_{LIB} (%)
S0	8.0	38.3	1.0	76.11	99.1
S1	3.2	36.1	1.1	54.39	98.5
S2	0.4	22.6	1.5	59.15	98.5
S3	0.6	19.7	1.3	55.97	96.6
S4	0.5	30.6	1.4	58.61	99.8
S5	0.6	30.9	1.5	54.0	95.4

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de capacitancia: se midió la capacitancia electroquímica de doble capa (C_{dl}) para comparar las áreas superficiales electroquímicas de los materiales. La mitad de la diferencia entre las corrientes anódica y catódica ($[i_a - i_c]/2$) en el potencial del núcleo se grafica como una función de la velocidad de barrido. (Figura 4). La pendiente corresponde a C_{dl} que representa el área superficial electroquímica. En la Tabla 1, se enlistan los valores de los materiales procesados, todos los materiales procesados tienen un valor mayor que el del carbono vítreo.

Estabilidad dimensional: La Figura 5 muestra la prueba de estabilidad térmica. Los separadores PP comienzan a encogerse a 125 $^\circ\text{C}$, fundiéndose a 175 $^\circ\text{C}$ y descomponiéndose a 275 $^\circ\text{C}$. En contraste, los separadores PP CaTiSiO_5 tuvieron un comportamiento térmico mejorado, siendo S4 el material que mostró el menor cambio a 275 $^\circ\text{C}$. Un hallazgo interesante, ya que el uso de CaTiSiO_5 en el separador evito el encogimiento dimensional, el cual afecta la distancia entre los electrodos y la porosidad del separador, lo que puede resultar en cortocircuitos, calentamiento excesivo y fallas de la batería. [7]

dor, no interfiere de forma significativa la transferencia de carga de electrones entre la superficie del electrodo y la solución, mejorando la misma.

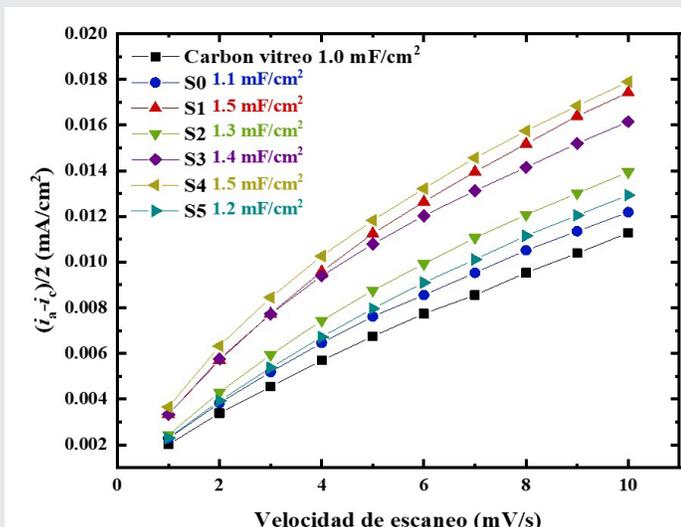


Figura 4. Patrón de difracción de rayos-X de CaTiSiO5 Fuente: Elaboración propia.

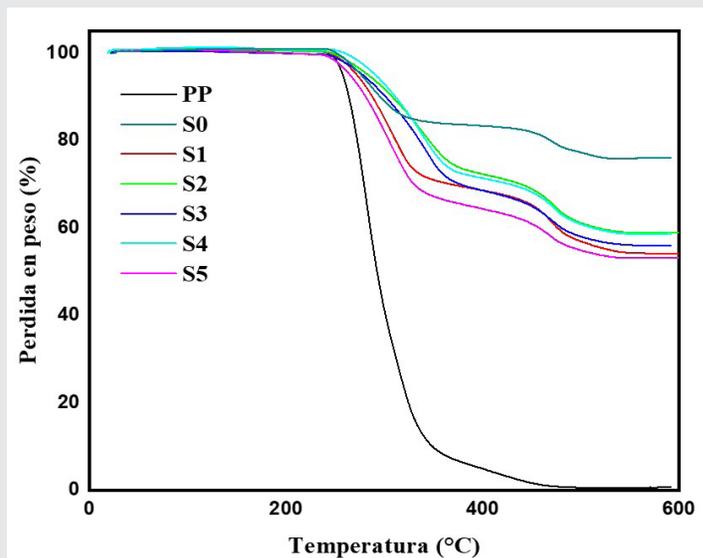


Figura 6. Termogramas de separadores modificados. Fuente: Elaboración propia.

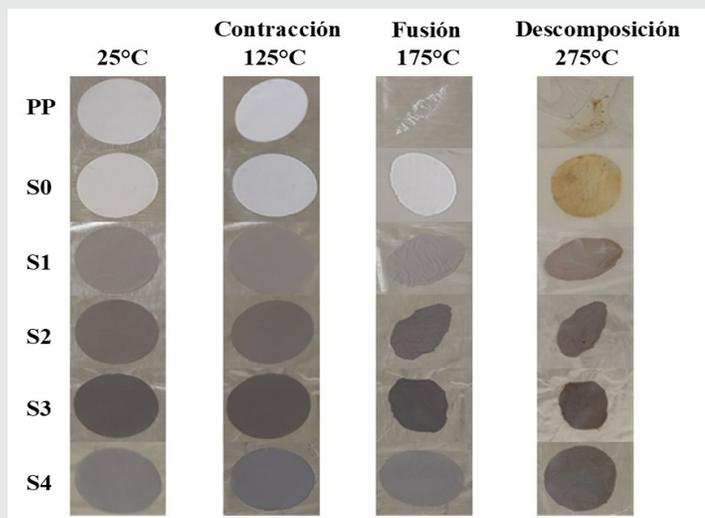


Figura 5. Fotografías de evaluación de resistencia al calor. Fuente: Elaboración propia.

Análisis TGA: La Figura 6 muestra los termogramas, donde la primera caída $\approx 250^\circ\text{C}$ está relacionada con el separador PP. Se puede observar que los separadores PP CaTiSiO5 mostraron una mejora en su comportamiento térmico donde el residuo entre el separador estándar y el revestido fue $\approx 50\%$ (Tabla 1). Otro hallazgo que se destaca de los resultados informados, la descomposición térmica de los materiales del separador puede producir gases inflamables y compuestos tóxicos, los cuales pueden provocar fallas de la batería. [7], [15]

Evaluación de LIBs: La eficiencia de la batería de ion litio (ELIB) calculados en la prueba de carga y descarga, se enlista en la Tabla 1. El valor para el separador PP fue de $\approx 96\%$, en contraste, los separadores PP CaTiSiO5 mostraron un incremento mayor al 3.0%. Este hallazgo es tranquilizador ya que sugiere que la capa de CaTiSiO5 colocada por doctor Blade en el separa-

En resumen, estos resultados muestran que los separadores PP modificados con nanopartículas cerámicas de CaTiSiO5, pueden ser una opción a los separadores de PP simples o multicapa PP/PE, imposibilitando la descomposición térmica de los materiales del separador en un rango mayor de temperatura. Por lo tanto, es posible que se pueda disminuir las fallas de la batería debido a los gases inflamables y compuestos tóxicos producidos, garantizando la seguridad y el rendimiento a largo plazo de LIBs.

CONCLUSIONES

El estudio describe los efectos de la molienda sobre las propiedades fisicoquímicas y electroquímicas de CaTiSiO5. Se redujo exitosamente el tamaño de partículas y nanocristales, mejorando la tasa de transferencia de electrones y la capacitancia. Conjuntamente, la estabilidad térmica mayor del separador PP con el revestimiento de CaTiSiO5 con respecto al separador de referencia. La titanita sintética modificada tiene un gran potencial para aplicaciones ambientales en materia de almacenamiento de energía.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento para realizar el proyecto No. 13765.22-P. Igualmente, al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías por la beca de posgrado No. 908766 de la estudiante de doctorado Mirza Mariela Ruiz Ramirez.

BIBLIOGRAFÍA

[1] J. Maletaskic et al., "Synthesis and characterization of monophase CaO-TiO2-SiO2 (sphene)

- based glass-ceramics,” *Sci. Sinter.*, vol. 52, no. 1, pp. 41–52, 2020, doi: 10.2298/SOS2001041M.
- [2] X. Peng, Z. Liu, Y. Gu, F. Zhang, and Y. Li, “Dielectric properties of (Al₃+Nb₅+) co-doped CaTi-SiO₅ ceramics at elevated temperature,” *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 132, pp. 83–88, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jpccs.2019.04.021.
- [3] S. Y. Vaselnia, M. K. Aminian, H. Motahari, and R. D. Banadaki, “A joint experimental and theoretical study on the structural, electronic and optical properties of malayaite and Chromium-doped malayaite structures as pigments,” *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 141, p. 109402, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jpccs.2020.109402.
- [4] Y. Sun et al., “Influence of radiation damage on the structure and chemical durability of titanites,” *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 164, p. 109165, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.apradiso.2020.109165.
- [5] G. M. Gladysz and K. K. Chawla, “Applications,” in *Voids in Materials*, Elsevier, 2021, pp. 231–279. doi: 10.1016/B978-0-12-819282-5.00010-7.
- [6] M. R. Zakaria, M. F. Omar, M. S. Zainol Abidin, H. Md Akil, and M. M. A. B. Abdullah, “Recent progress in the three-dimensional structure of graphene-carbon nanotubes hybrid and their supercapacitor and high-performance battery applications,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 154, p. 106756, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106756.
- [7] N. Lingappan, W. Lee, S. Passerini, and M. Pecht, “A comprehensive review of separator membranes in lithium-ion batteries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 187, p. 113726, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113726.
- [8] S. S. Zhang, “A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries,” *J. Power Sources*, vol. 164, no. 1, pp. 351–364, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.10.065.
- [9] D. M. D. Babiker et al., “Superior lithium battery separator with extraordinary electrochemical performance and thermal stability based on hybrid UHMWPE/SiO₂ nanocomposites via the scalable biaxial stretching process,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 211, p. 108658, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108658.
- [10] J. Shi et al., “Porous membrane with high curvature, three-dimensional heat-resistance skeleton: a new and practical separator candidate for high safety lithium ion battery,” *Sci. Rep.*, vol. 5, no. 1, p. 8255, Feb. 2015, doi: 10.1038/srep08255.
- [11] B. Mao, H. Chen, Z. Cui, T. Wu, and Q. Wang, “Failure mechanism of the lithium ion battery during nail penetration,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 122, pp. 1103–1115, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.036.
- [12] F. Dai and M. Cai, “Best practices in lithium battery cell preparation and evaluation,” *Commun. Mater.*, vol. 3, no. 1, p. 64, Sep. 2022, doi: 10.1038/s43246-022-00286-8.
- [13] Y. Roh et al., “Highly improved thermal stability of the ceramic coating layer on the polyethylene separator via chemical crosslinking between ceramic particles and polymeric binders,” *Chem. Eng. J.*, vol. 433, p. 134501, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.134501.
- [14] W. Hao et al., “Self-Polymerized Dopamine Nanoparticles Modified Separators for Improving Electrochemical Performance and Enhancing Mechanical Strength of Lithium-Ion Batteries,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 3, p. 648, Mar. 2020, doi: 10.3390/polym12030648.
- [15] Y. Li, H. Pu, and Y. Wei, “Polypropylene/polyethylene multilayer separators with enhanced thermal stability for lithium-ion battery via multilayer coextrusion,” *Electrochim. Acta*, vol. 264, pp. 140–149, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.electacta.2018.01.114.
- [16] S. Y. Vaselnia, M. Khajeh Aminian, and H. Motahari, “Fe-doped titanite pigment: Synthesis, DFT/TDDFT calculations by Lanczos and Bethe-Salpeter equation methods and comparison of computational and experimental color properties,” *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 138, p. 109244, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jpccs.2019.109244.





Ciencias
de la
Computación

Ingeniantes

Desarrollo del Metaverso de la Escuela Superior de Huejutla: Estudio sobre desafíos y oportunidades en su implementación



Colaboración

Jonathan Martínez Flores; Christian Hernández Hernández; Jesús Jaime Hernández Hernández; Jorge Hernández Camacho, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo / Escuela Superior de Huejutla

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2024

RESUMEN: Este trabajo presenta el desarrollo del prototipo del Metaverso de la ESH, un proyecto que busca recrear el campus de la Escuela Superior de Huejutla en un entorno virtual inmersivo e interactivo. Inicialmente, se modelaron los edificios y espacios en herramientas como Blender y Sweet Home 3D, con un enfoque de prototipo. Sin embargo, debido a limitaciones de personal y recursos, se cambió la idea de un prototipo independiente, migrando a plataformas externas. La metodología incluyó análisis de plataformas según sus características, pruebas de optimización de modelos 3D y análisis de compresión en formatos como FBX, DAE y OBJ. Los resultados dieron con la migración a plataformas externas como Spatial.io y Roblox; además, mostraron que FBX fue el formato más eficiente en términos de compresión y rendimiento. Con esta migración, el proyecto se adaptó para funcionar en múltiples dispositivos, superando limitaciones técnicas, pero sacrificando calidad visual. Se concluye que, a pesar de los desafíos, las plataformas externas ofrecen una solución viable para el desarrollo a corto plazo, con oportunidades de mejora en futuras iteraciones.

PALABRAS CLAVE: Metaverso, realidad virtual, plataforma, optimización, modelo 3D.

ABSTRACT: This paper presents the development of the ESH Metaverse prototype, a project that seeks to recreate the campus of the Huejutla Higher School in an immersive and interactive virtual environment. Initially, the buildings and spaces were modeled in tools such as Blender and Sweet Home 3D, with a prototype approach. However, due to staff and resource constraints, the idea of a standalone prototype was changed, migrating to external platforms. The methodology included platform analysis according to their characteristics, 3D model optimization tests, and compression analysis in formats such as FBX, DAE, and OBJ. The results led to the migration to external platforms such as Spatial.io and Roblox; moreover, they showed that FBX was the most efficient format in terms of compression and performance. With this migration, the project was adapted to work on multiple devices, overcoming technical limitations, but sacrificing visual quality. As a conclusion, despite the challenges, external platforms offer a viable solution for development in the short term, with opportunities for improvement in future iterations.

KEYWORDS: Metaverse, virtual reality, platform, optimization, 3D model.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento que han experimentado las Tecnologías de Información y Comunicación en los últimos años, sumado a una mayor portabilidad y disponibilidad, han permitido al público en general ser testigo de un nuevo abanico de posibilidades que permiten estas tecnologías, siendo adaptable a dispositivos más pequeños, tales como la Inteligencia Artificial, la Realidad Virtual, Realidad Aumentada, entre otras [1], [2], [3]. Tras estas, existe una que se ha vaticinado desde el crecimiento temprano de Internet, y que se ha fraguado lentamente en una carrera por su desarrollo, pues su alcance promete una experiencia unificadora que aumente la inmersión del usuario con el entorno digital: el metaverso [4], [5].

El metaverso, como concepto, refiere a entornos virtuales interconectados que van más allá de ser una simple versión ampliada

de un único mundo virtual [6], [7], [8]. Se trata de un espacio tridimensional inmersivo que mejora la interacción de los usuarios con otros usuarios y con su entorno, ya que converge la realidad virtual físicamente persistente, con la realidad física virtualmente mejorada [9]. Tiene aplicaciones en diversos ámbitos, como la educación, la salud, el entretenimiento, la publicidad y los negocios [10].

La implementación de las TICs en la educación en los últimos años, y especialmente tras la pandemia de COVID-19, han resultado benéficas para dinamizar los procesos de enseñanza-aprendizaje, prestándose para implementar tecnologías emergentes que puedan seguir por la misma senda [11]. Así pues, la implementación de un metaverso puede influir de manera positiva, ya que puede impulsar el rendimiento y la participación estudiantil [12], [13]; la inmersión que un metaverso es capaz de ofrecer es el principal atractivo que puede ser de utilidad para experiencias interactivas, participaciones desde cualquier parte del mundo, y aprendizaje personalizado [14], [15], [16], [17].

Dicho lo cual, la meta a alcanzar a largo plazo en el proyecto es la construcción de un metaverso de la Escuela Superior de Huejutla (ESH), donde no sólo los estudiantes de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) puedan conocer de manera virtual los otros campus de la institución, sino también sean capaces de acceder a experiencias interactivas según la temática deseada, aprovechando las ventajas de la virtualización y así puedan mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Este caso de estudio tiene como objetivo analizar los procesos, los desafíos técnicos y humanos, y las oportunidades emergentes en la creación de un metaverso educativo para la Escuela Superior de Huejutla. En particular, se explorarán las dificultades encontradas durante las etapas de diseño, construcción y optimización, así como las soluciones desarrolladas para superar dichas barreras.

MATERIAL Y MÉTODOS

En contexto, a continuación, se presentan los materiales y métodos alineados al trabajo de investigación, iniciando por: lugar de ejecución, que explica dónde se realiza este proyecto; los materiales y equipos utilizados, que presentan los equipos utilizados para el desarrollo junto con sus características; las metodologías de investigación, las cuales describen la forma en que fue recabada la información y evaluada para su consideración en la implementación del metaverso; las metodologías de desarrollo, que describen las pautas que por el momento se han seguido para la creación del prototipo; y posteriormente las adversidades que fueron encontradas tras el desarrollo.

Lugar de ejecución

El proyecto se desarrolló en el campus de Huejutla de Reyes de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ubicada en mismo estado, México. Las fases iniciales de diseño y desarrollo se realizaron de forma presencial, debido a la naturaleza del trabajo con entornos virtuales, e involucraron la participación de estudiantes, profesores y personal técnico de la institución.

Material y equipo

Para el desarrollo del metaverso académico, fueron utilizados equipos con las siguientes características, ver Tabla 1:

Tabla 1. Especificaciones de equipos para desarrollo.

Especificaciones	Equipo primario	Equipo secundario
Modelo	Lenovo AIO A540	Lenovo Think / AIO V50A-24Irb
Memoria RAM	8 GB DDR3 1600 MHz	16 GB DDR4 2666 MHz
CPU	Intel (R) Core (TM) i5-5257U 2.70 GHz	Intel (R) Core (TM) i7-10700T 2.0 GHz
Tarjeta gráfica	Intel (R) Iris (TM) Graphics 6100	Intel (R) UHD Graphics 630
Pantalla	Táctil IPS FHD 23.8"	IPS FHD 23.8"
Unidad de almacenamiento	1 TB HDD	512 GB SSD M.2
Tiempo de uso para el proyecto	1 año, 8 meses	8 meses

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Tabla 1, originalmente se trabajó con un único equipo para el desarrollo del metaverso; esto debido a que inicialmente el desarrollo del metaverso fue guiado por un solo estudiante. Tras haber culminado su tiempo de servicio, su proceso fue relevado por dos estudiantes, razón por la cual se ingresó el "Equipo secundario" y se trabajó en paralelo con ambos.

Se emplearon diversas plataformas para el modelado y diseño del entorno 3D, tales como: Blender (para el modelado de objetos tridimensionales), Sweet Home 3D (para la recreación arquitectónica preliminar de los espacios de la escuela) y Unity (para la integración de los objetos 3D en entornos inmersivos). El hardware utilizado incluyó ordenadores de gama media, ver Tabla 1.

Metodología de investigación

Se aplicó un enfoque mixto, el cual integra enfoques cualitativos y cuantitativos para una mayor comprensión del proyecto.

Para el enfoque cualitativo, se analizan los desafíos pedagógicos, técnicos y organizativos durante el desarrollo del metaverso. Estos incluyen la integración de los modelos en plataformas externas y la necesidad de optimización de los archivos para cumplir con las limitaciones de las plataformas. De momento, y tras el desarrollo aún no finalizado del metaverso, aún no se han evaluado estos desafíos [18].

Por otro lado, para el enfoque cuantitativo, se evaluaron aspectos como la reducción del tamaño de los modelos 3D, la capacidad de almacenamiento en distintas plataformas, y los costos asociados a los planes premium de las herramientas utilizadas. Estos datos permitieron evaluar la viabilidad y sostenibilidad del proyecto.

Metodología de desarrollo

Para la creación del "Metaverso de la ESH", se empleó una metodología híbrida, combinando elementos de enfoques ágiles y la metodología didáctica SACCE (Selección, Anticipación, Construcción, Consolidación y Evaluación). Este enfoque permitió gestionar el desarrollo del prototipo de manera eficiente, ajustando tanto los aspectos técnicos como educativos según las necesidades del proyecto.

- La metodología ágil se aplicó a lo largo del proceso de desarrollo para garantizar una rápida adaptación a los desafíos encontrados, permitiendo iteraciones rápidas y flexibles. Gracias a este enfoque, se pudo ajustar el diseño y optimización de los modelos 3D, así como su integración en plataformas, mientras se recogía la retroalimentación de usuarios y pruebas internas.
- Metodología SACCE: Esta permitió una correcta selección de las tecnologías, así como su construcción, pese a que la consolidación y la evaluación aún no estén efectuadas debido al estado del prototipo actual, se espera que tras su liberación pueda recabarse la información debidamente, analizando y recabando datos de evaluación estudiantil previos y posteriores a la interacción dentro del entorno. [19].

Desarrollo de prototipo independiente

Durante la fase inicial del desarrollo, se trabajó de manera independiente con ayuda de Sweet Home 3D para estructurar tanto en plano como en tres dimensiones, manteniendo la máxima fidelidad entre el edificio real y su versión digitalizada. De igual manera, y con el objeto resultante, se trabajó por medio de este a través de Blender, con el cual se

realizaron modificaciones y el anexo de materiales específicos. Finalmente, la integración del objeto modificado y guardado en el motor gráfico Unity 3D, ver Figura 1.

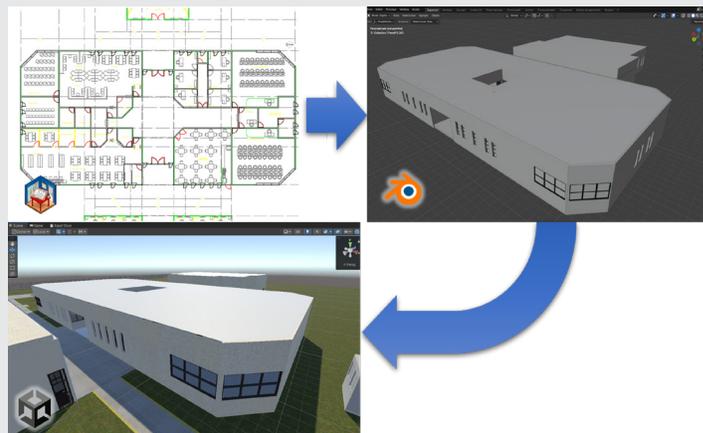


Figura 1. Proceso de modelado de edificio por medio de SweetHome3D, posteriormente con ayuda de Blender y su implementación en Unity 3D.

Fuente: Elaboración propia.

Además, y como una demostración inicial de lo que podría ofrecer este proyecto, se creó un prototipo interactivo de inmunología, donde los usuarios podrían explorar a través de un vaso sanguíneo y se les permita estudiar de una manera más intuitiva la estructura de las células presentes en la sangre, ver Figura 2.

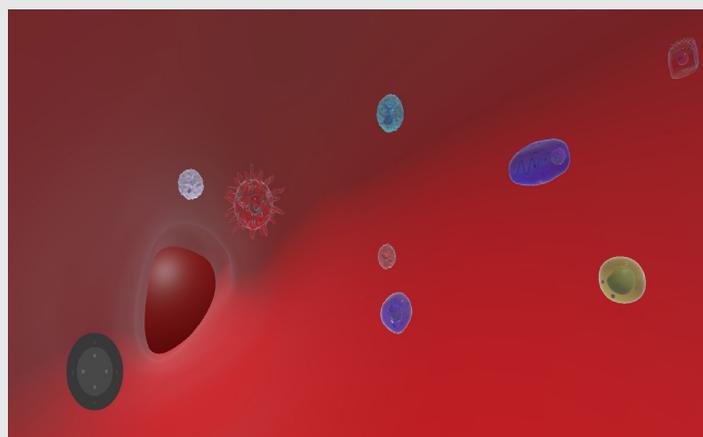


Figura 2. Captura de pantalla inicial del prototipo de aplicación interactiva de módulo de inmunología.

Fuente: Elaboración propia.

Esta etapa fue clave para establecer los primeros trazos del proyecto, al tener inicialmente un entorno que recreaba visualmente la infraestructura del campus y por separado una aplicación interactiva; además, esto permitió evaluar las capacidades necesarias para el metaverso. Al tratarse de un prototipo, la optimización no fue una prioridad, permitiendo una mayor libertad en el uso de recursos técnicos.

El mayor desafío de esta etapa fue la limitación en el equipo de trabajo. Durante el primer año, solo un estudiante participó en el proyecto como parte de su servicio social, lo que ralentizó el avance. Tras su término, dos estudiantes tomaron el relevo, continuando el desarrollo del prototipo. El prototipo resultante era un entorno rudimentario con funcionalidades básicas, pero proporcionaba una visión preliminar del futuro potencial del metaverso. Este prototipo, aunque funcional, era limitado en sus capacidades y mostraba la necesidad de reevaluar el enfoque de desarrollo, ver Figura 3.

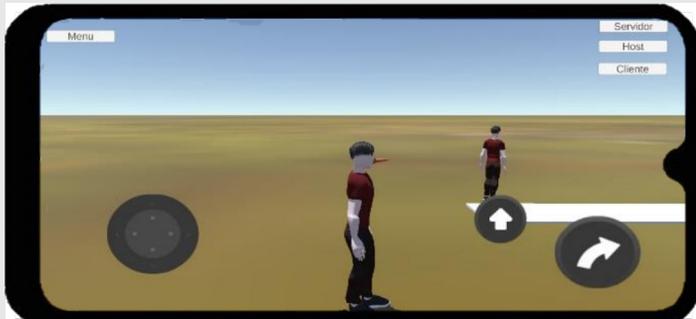


Figura 3. Captura de pantalla del prototipo desarrollado en Unity 3D.

Fuente: Elaboración propia.

De entre las características que hacen a un metaverso ser lo que es, que lo diferencian de sistemas virtuales convencionales, dígame un videojuego, y que además suponen oportunidades para el aprovechamiento del alumnado, son lo siguientes:

- **Alcance:** Es una red interconectada de entornos digitales compartidos donde los usuarios pueden interactuar en tiempo real, realizar diversas actividades y construir experiencias dentro de un ecosistema persistente.
- **Economía:** A menudo, incluye economías digitales donde los usuarios pueden poseer, intercambiar y vender activos virtuales, como bienes inmuebles, arte digital o tokens. La propiedad digital puede estar asegurada mediante tecnologías como blockchain.
- **Escalabilidad:** Está diseñado para soportar un gran número de usuarios simultáneos. Esto es importante para que el metaverso sea una experiencia social vibrante y para que pueda ser utilizado para eventos a gran escala, como conciertos o conferencias.
- **Interactividad:** Permite interacciones complejas entre múltiples usuarios en un entorno compartido. Estas interacciones van más allá de las sensoriales y visuales, involucrando aspectos económicos, sociales y culturales. Los usuarios pueden crear contenido, establecer negocios o asistir a eventos virtuales.
- **Naturaleza del entorno:** Ofrece un entorno compartido y abierto, donde los usuarios pueden

moverse entre diferentes espacios y experiencias sin necesidad de cambiar de plataforma [5], [10], [20].

Desarrollar desde cero un sistema tan denso, y que sea capaz de ofrecer estas virtudes sin recaer en un sistema de realidad virtual convencional como podría ser un videojuego, supone un desafío inmenso, especialmente cuando se trabaja con poco personal disponible, equipos de cómputo e infraestructura limitados. Fueron principalmente estas tres razones las que llenaron a reorientar la forma de desarrollo del proyecto, pasando de una construcción independiente y desde cero, a plataformas de metaverso ya consolidadas que facilitan la creación de experiencias virtuales, procediendo en una migración de los recursos ya existentes.

Replanteamiento del proyecto a plataformas externas

En internet, existen plataformas que por sus características pueden ser consideradas actualmente como metaversos funcionales, ya que poseen características como las anteriormente descritas. De entre los beneficios que estas pueden ofrecer a los creadores en contraste a un desarrollo creado desde cero, se encuentran los siguientes:

- **Reducción de costos:** Al utilizar plataformas ya existentes, los creadores pueden aprovechar una base tecnológica preestablecida, eliminando la necesidad de diseñar y programar funcionalidades esenciales como la gestión de usuarios, renderizado 3D en tiempo real, integración multiplataforma y sistemas de interacción.
- **Escalabilidad inmediata:** Permiten alojar múltiples usuarios simultáneamente, algo que sería difícil de lograr con un desarrollo propio, especialmente con equipos limitados. Esta escalabilidad es fundamental para un proyecto educativo, ya que permite la participación de múltiples estudiantes e incluso la posibilidad de colaboración entre diferentes instituciones sin preocupaciones por la infraestructura subyacente.
- **Compatibilidad multiplataforma:** Estas están optimizadas para ser compatibles con diversos dispositivos, asegurando una experiencia fluida sin importar la plataforma utilizada por los estudiantes. Esto facilita que los alumnos accedan al metaverso desde distintos dispositivos sin sufrir problemas de compatibilidad, mejorando la accesibilidad del proyecto.
- **Flexibilidad para actualizaciones:** Las plataformas consolidadas son inherentemente más flexibles y facilitan las actualizaciones y la iteración rápida de los entornos virtuales, lo que permitiría a los equipos de desarrollo adaptar y mejorar continuamente el metaverso sin incurrir en costos adicionales significativos o largos períodos de inactividad [6], [10], [21].

Considerando los anteriores factores, y con la decisión de migrar a sitios de terceros consolidados, se realizó un análisis comparativo de diversas plataformas de metaverso, considerando factores como compatibilidad multiplataforma, capacidad de almacenamiento / espacio y costos de mejora.

Dentro de los prospectos seleccionados para el análisis, se consideraron aquellos que podían permitir un traspaso de recursos flexible y que su ejecución no supusiera una carga de recursos a la hora de desplegarse en diversos dispositivos. Por esto, las plataformas seleccionadas para la comparativa son las presentes en la Tabla 2:

Tabla 2. Comparativa entre plataformas de metaverso.

Plataforma	Dispositivos Compatibles	Capacidad de Almacenamiento / Tamaño de Entorno (Plan Básico)	Gratuito o de Pago para desarrollo	Costo de Mejoras / Planes Premium
Spatial.io	<ul style="list-style-type: none"> ●PC con navegador web ●VR con Meta Quest ●Móvil 	100 MB, limitado en plan gratuito.	Gratuito con opciones de pago.	Desde \$10/mes
Decentraland	<ul style="list-style-type: none"> ●PC con navegador web y por aplicación local 	100 MB, basado en blockchain, depende del terreno.	Gratuito, con expansión por medio de criptomonedas.	Compra de "terrenos digitales" con criptomonedas
Somnium Space	<ul style="list-style-type: none"> ●PC por navegador web ●VR con SteamVR 	Basado en blockchain, depende del terreno (requiere compra).	Exclusivo con compra de NFTs	Compra de "terrenos digitales" con NFTs
VRChat	<ul style="list-style-type: none"> ●PC con Steam ●VR con Meta Quest y SteamVR ●Móvil (aún en fase beta) 	Menor a 200 MB, limitado por compatibilidad.	Gratuito con opciones de pago.	Desde \$9.99/mes
Second Life	<ul style="list-style-type: none"> ●PC con VR ●Móvil (aún en fase beta) 	No hay opciones en plan gratuito.	No hay opciones en plan gratuito	Desde \$5.50/mes
Roblox	<ul style="list-style-type: none"> ●PC ●Móvil ●Consolas 	2048 bloques en ejes X, Y, y Z.	Gratuito.	Gratuito.

Fuente: Elaboración propia.

Dado que una de las prioridades para seleccionar alguna de las plataformas investigadas es su disponibilidad entre diversos dispositivos, se tuvieron en mayor consideración unas plataformas en comparación a otras. Por ello, se eligieron para trabajar las plataformas Spatial.io y Roblox, ambas con capacidades para experiencias interactivas, para continuar con la fase de migración y reconstrucción. Esta fase, a pesar de haber aminorado la carga de desarrollo al contar con infraestructura capaz y elementos preprogramados dentro de estos, trajo nuevos desafíos; especialmente en términos de compatibilidad, optimización y almacenamiento.

En Spatial.io, se enfrentaron problemas de capacidad de almacenamiento y restricciones en la complejidad geométrica de los modelos 3D. Esto obligó a simplificar los modelos originales, tanto en su estructura como en la textura, para cumplir con los requisitos de la plataforma. Aunque Spatial.io ofrecía una integración fácil con Unity, las limitaciones en el manejo de objetos complejos y el poco espacio disponible en la nube dificultaron

el desarrollo de un entorno completamente funcional. Por otro lado, Roblox presentó otros retos, especialmente en términos de optimización para dispositivos móviles. Los modelos tuvieron que ser aún más simplificados para evitar sobrecargar el CPU de los dispositivos móviles; esto, debido a que los modelos requerían ser importados con una limitada cantidad de triángulos por archivo, lo cual implicó fragmentar los modelos en partes más pequeñas. Además, se encontraron incompatibilidades en la importación directa de modelos desde Blender, ya que, tanto el formato de archivo original como en sus derivados exportables (véase formato FBX u OBJ), requieren que estos no posean material o texturas incluídas además de revisión exhaustiva de los elementos existentes en cada objeto dentro de los modelos en Blender, lo que requirió ajustes adicionales en Roblox Studio.

Selección de formato adecuado para modelos 3D

Teniendo lo previamente mencionado en cuenta, se encontraron complicaciones en cuanto a la complejidad de los modelos, el formato en el que debían ser exportados y el peso que estos representaban a la hora de ser cargados en escena para las plataformas anteriormente mencionadas en la Tabla 2.

Para mitigar las complicaciones, y sabiendo que exportando los objetos en un formato compatible podría servir como paso inicial, se hizo un análisis de las optimizaciones que podían realizarse a los modelos y la relación directa con su compresión final, esto teniendo siempre en consideración perder la menor cantidad de detalle posible para que mantuviera fidelidad con la estructura y composición reales de la institución. Para esto, se tomaron como referencia 10 modelos diseñados para el metaverso, se registraron el tamaño inicial en su extensión ".blend", ya que en Blender es donde se editan los modelos y se ha usado como programa fuente de las versiones finales de los modelos, cabe mencionar que los materiales integrados en los modelos fueron retirados para una mejor interpretación. Estos mismos datos, se usaron posteriormente como marco de referencia para tasar la capacidad de compresión para cada formato compatible, resultando en los siguientes: FBX, DAE (collada), y OBJ.

A continuación se describen los ejemplos seleccionados y qué es lo que contienen: el primero, siendo una torre de radio de la institución; el segundo, un modelo minimalista de un libro abierto; el tercero, el logotipo 3D minimalista de la mascota del campus, es decir, una garza; el cuarto, unos modelos de vehículos; el quinto, el edificio de la radio escolar; el sexto, siendo la mitad posterior del módulo principal; el séptimo, siendo unas escaleras que dirigen al segundo piso de las instalaciones; el octavo, el auditorio institucional; el noveno, el edificio de bachillerato; y el décimo, la mitad anterior del módulo principal de la escuela, ver Tabla 3. Dicho lo cual, se registró el peso de los archivos respecto al

formato “.blend”, así como el número de vértices totales en cada modelo.

Tabla 3. Descripción de los modelos seleccionados para análisis.

Modelo	No. De vértices	Peso de archivo (KB)
Ej. 1 (torre de radio)	1160	1729
Ej. 2 (libro abierto)	1132	1023
Ej. 3 (logo de garza)	2458	1019
Ej. 4 (vehículos)	66638	3178
Ej. 5 (radio institucional)	16662	9785
Ej. 6 (mitad posterior de edificio principal)	47105	8119
Ej. 7 (escaleras)	5469	2660
Ej. 8 (auditorio)	39797	5779
Ej. 9 (edificio de bachillerato)	85590	13080
Ej. 10 (mitad anterior de edificio principal)	57459	7917

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 3, se han seleccionado modelos con diferentes pesos, y, sobre todo, diversos números de vértices por cada uno, esto para analizar la eficiencia al optimizar los modelos y el beneficio añadido con la exportación en el formato óptimo. Posteriormente, se analizó la capacidad de compresión según cada formato, obteniendo como resultado lo siguiente:

Tabla 4. Tasa de compresión por exportación según su formato.

Modelo	DAE	FBX	OBJ	Promedio por modelo
Ej. 1 (torre de radio)	80.45%	82.71%	-58.30%	34.95%
Ej. 2 (libro abierto)	77.71%	94.04%	88.95%	86.90%
Ej. 3 (logo de garza)	57.11%	85.87%	74.39%	72.46%
Ej. 4 (vehículos)	40.75%	30.59%	-108.40%	-12.36%
Ej. 5 (radio institucional)	17.50%	64.85%	78.63%	53.66%
Ej. 6 (mitad posterior de edificio principal)	0.33%	16.13%	69.76%	28.74%
Ej. 7 (escaleras)	48.42%	76.05%	87.07%	70.51%
Ej. 8 (auditorio)	-26.89%	26.13%	59.25%	19.50%
Ej. 9 (edificio de bachillerato)	-19.20%	3.52%	65.40%	16.57%
Ej. 10 (mitad anterior de edificio principal)	-6.85%	22.63%	70.40%	28.73%
Promedio por formato	36.92%	59.55%	36.42%	

Fuente: Elaboración propia.

Como puede apreciarse, existieron disonancias en algunos ejemplos, donde la compresión fue contraproducente con respecto a su exportación. Sin embargo, la mayoría de los resultados muestran que la exportación puede beneficiar considerablemente la reducción del peso del modelo final.

Dicho lo cual, queda despejar la duda de cuál es el formato más adecuado para su uso general, hecho para el cual serán analizados las tasas de compresión resultantes, ver Tabla 4, y contrastadas en un diagrama de cajas.

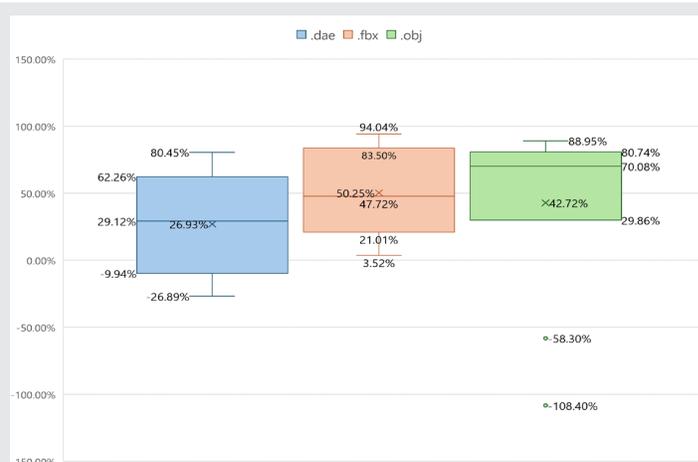


Figura 4. Cantidad de colmenas que poseen los meliponicultores encuestados.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 ilustra la distribución de las tasas de compresión de los formatos elegidos en comparación con los archivos originales en formato “.blend”. Muestra la mediana de cada distribución, rangos intercuartílicos, valores atípicos, como los encontrados en OBJ, y el rango de los bigotes según la muestra.

Aunado a esto, también se hizo un análisis de la relación entre la tasa de compresión y el número de vértices para los modelos, proporcionando contexto adicional para las diferencias observadas en la Figura 4.

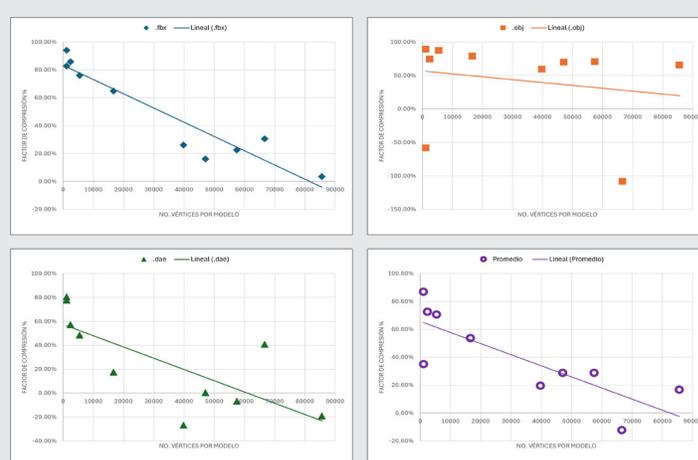


Figura 5. Gráficas de relación entre número de vértices y tasa de compresión junto con línea de tendencia, representando los formatos FBX, OBJ, DAE y el promediado general respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis conjunto de la Figura 4 y la Figura 5 revela patrones importantes sobre la eficiencia de compresión en los formatos en relación con la complejidad geométrica de los modelos 3D.

En la Figura 4, el formato FBX se destaca por su consistencia, con tasas de compresión relativamente estables y menos dispersión en comparación con los formatos DAE y OBJ. Esto es coherente con lo observado en la Figura 5, donde se ve una correlación negativa más clara entre el número de vértices y la tasa de compresión en FBX. A medida que la complejidad del modelo aumenta, la capacidad de compresión disminuye de forma predecible, lo que lo hace fiable para modelos complejos.

Por otro lado, el formato DAE presenta una mayor variabilidad en las tasas de compresión, reflejada tanto en el diagrama de cajas como en la gráfica de correlación. Si bien su capacidad de compresión es eficiente para modelos simples, su rendimiento disminuye notablemente con un mayor número de vértices.

El formato OBJ, aunque en algunos casos ofrece buenas tasas de compresión, es menos confiable. La dispersión significativa de los datos en ambas Figuras sugiere que su rendimiento es altamente dependiente de la geometría del modelo, con varios casos en los que la compresión resulta incluso en un aumento del tamaño del archivo.

Finalmente, la gráfica de promedios sugiere una tendencia general donde, a mayor complejidad geométrica, menor es la eficiencia de compresión en todos los formatos. Esto confirma la importancia de considerar la estructura del modelo al elegir el formato de exportación adecuado, con FBX siendo el más consistente, y DAE y OBJ como opciones menos predecibles dependiendo de la simplicidad del modelo.

RESULTADOS

En la fase inicial, se desarrolló un prototipo del campus virtual que incluía modelos tridimensionales de los edificios clave, aunado a esto, se diseñó un simulador interactivo de inmunología, véase Figura 6. Estos prototipos permitieron visualizar cómo podría evolucionar el proyecto en futuras etapas, aunque aún sin funcionalidades interactivas avanzadas.

A pesar de las limitaciones en cuanto a personal y recursos, los prototipos sentaron las bases del desarrollo, guiando la visión del proyecto, así como su alcance; aunado a esto, el avance iterativo reveló la necesidad de optimización para reducir la complejidad geométrica de los modelos.

La transición a plataformas de terceros arrojó resultados mixtos, destacándose tanto ventajas como limitaciones en cada una.

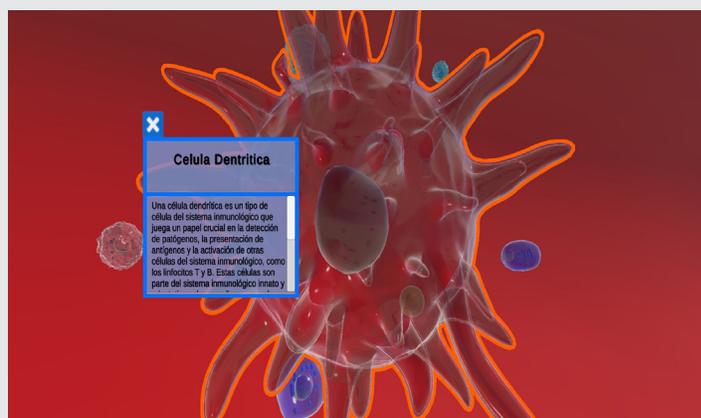


Figura 6. Captura de pantalla visualizando la estructura celular en prototipo de aplicación interactiva de módulo de inmunología.

Fuente: Elaboración propia.

En Spatial.io, la capacidad de almacenamiento limitada y las restricciones en la complejidad de los objetos llevaron a la necesidad de realizar optimizaciones significativas en los modelos 3D originales. Las pruebas mostraron que los modelos más complejos generaban problemas de rendimiento, lo que obligó a reducir la complejidad geométrica para garantizar un funcionamiento fluido.

Por otra parte, en Roblox, la simplificación de los modelos fue aún mayor, con el objetivo de garantizar la compatibilidad multiplataforma, especialmente en dispositivos móviles. Los resultados mostraron que, aunque la plataforma era flexible en términos de accesibilidad, los modelos importados desde Blender presentaban dificultades con las texturas y materiales, lo que resultaba en la necesidad de ajustes manuales dentro de Roblox Studio. A pesar de las complicaciones, sigue siendo un candidato apto para la creación del metaverso escolar.

Uno de los aspectos clave para el proceso de optimizado fue la identificación de los formatos de exportación de los modelos 3D más adecuados.

En particular, el formato FBX fue el más eficiente para modelos complejos, mientras que OBJ mostró inconsistencias, siendo más adecuado para modelos simples, pero menos predecible en modelos más grandes. La Figura 7 compara la relación entre el número de vértices de los modelos y la eficiencia de compresión promedio, mostrando que, independientemente del formato, existe una tendencia decreciente en la eficiencia conforme aumenta la complejidad geométrica.

Pese a lo antes mencionado, las plataformas lograron que el entorno digitalizado del campus pudiera integrarse, de modo que obtiene de estos las funcionalidades de comunicación, multijugador, multiplataforma y todas las disponibles para sus experiencias, simplificando significativamente el proceso de construcción, y así, poder proceder a la consolidación del entorno hacia el público, ver Figura 8.

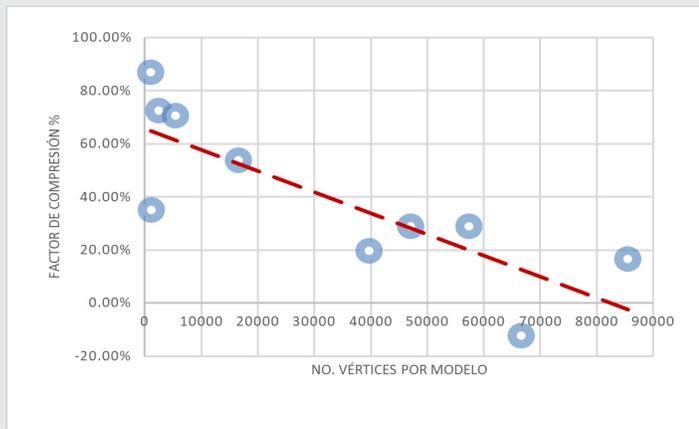


Figura 7. Gráfica de relación entre el número de vértices y la tasa de compresión promedio de todos los formatos.
Fuente: Elaboración propia.

rán ser abordadas en fases futuras para mejorar la calidad visual y funcional del metaverso. La optimización de modelos 3D y la selección del formato de exportación más adecuado son factores críticos para asegurar la viabilidad técnica y el rendimiento del proyecto en múltiples dispositivos.

Así mismo, y como se mostró con el prototipo de simulación de inmunología, véase la Figura 6, la misión a largo plazo es diseñar experiencias interactivas que ayuden a la comprensión del alumnado a través de dinámicas y exploración aprovechando las oportunidades que ofrecen los entornos de metaverso, ver Figura 9.

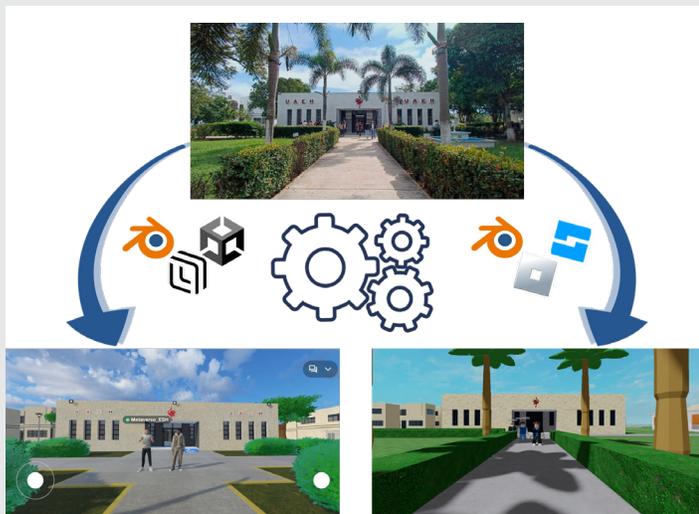


Figura 8. Esquema que representa la digitalización de la Escuela Superior de Huejutla a sus respectivas plataformas, mostrando del lado izquierdo el resultado en Spatial.io, mientras que a la derecha el obtenido en Roblox.
Fuente: Elaboración propia.

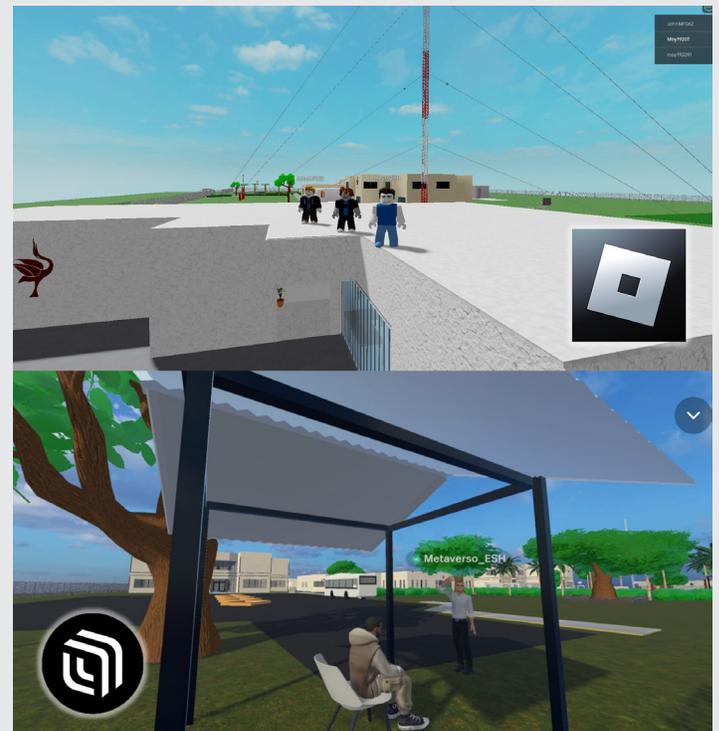


Figura 9. Capturas de pantalla de interacción dentro del entorno de la Escuela Superior de Huejutla en sus respectivas plataformas, del lado superior Roblox, mientras que del inferior Spatial.
Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo del entorno de la Escuela Superior de Huejutla en sus respectivas plataformas, han permitido que, aunque el entorno siga en constante construcción y actualización, pueda ser operable, explorable e interactivo a medida que se implementan más funciones con el paso del tiempo. Este proceso permite una mayor escalabilidad y disponibilidad para los usuarios, de modo que la carga de desarrollo pueda ser considerablemente menor, ver Figura 9.

CONCLUSIONES

En conjunto, los resultados obtenidos sugieren que el uso de plataformas externas es una solución viable a corto y mediano plazo, permitiendo a equipos pequeños avanzar en el desarrollo de proyectos complejos como el Metaverso de la Escuela Superior de Huejutla. Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones inherentes a estas plataformas, las cuales debe-

Finalmente, aunque el proyecto se encuentra en una fase temprana, los datos obtenidos proporcionan una base para futuras iteraciones y mejoras. La combinación de herramientas de modelado 3D y plataformas externas ofrece una ruta clara para avanzar, aunque se requerirá una mayor inversión en recursos y tiempo para superar las limitaciones técnicas actuales y llevar el metaverso a un estado más avanzado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Kayode, A. E., & Abidemi, T. K. (2024). Impacts of Information Communication Technology (ICT) on effective teaching and learning among undergraduate students in selected university. *Ponte International Journal of Sciences and Research*; Vol. 80, Issue 9. <https://doi.org/10.21506/j.pon->

te.2024.9.2. Consultado el 15 de septiembre de 2024.

[2] Makrakis, V. (2024). Teachers' resilience scale for sustainability enabled by ICT/Metaverse Learning Technologies: factorial structure, reliability, and validation. *Sustainability*, 16(17), 7679. <https://doi.org/10.3390/su16177679>. Consultado el 18 de septiembre de 2024.

[3] Haldorai, A., Murugan, S., & Ramu, A. (2020). Evolution, challenges, and application of intelligent ICT education: An overview. *Computer Applications in Engineering Education*. <https://doi.org/10.1002/cae.22217>. Consultado el 22 de septiembre de 2024.

[4] Meléndez, M., Jorquera, J. L., & Castillo J. (2024). Metaversos en educación: Una mirada desde la Literatura. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 32, 10. <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-33052024000100210>. Consultado el 21 de septiembre de 2024.

[5] Ng, D. T. K. (2022). What is the metaverse? Definitions, technologies and the community of inquiry. *Australasian Journal of Educational Technology*, 38(4), 190-205. <https://doi.org/10.14742/ajef.7945>. Consultado el 14 de septiembre de 2024.

[6] Muñoz, G. F. R., Zamora, Y. E. P., Chimbo, K. M. O., & Delgado, J. C. V. (2024). Transformación educativa: Explorando las TIC y el metaverso en la enseñanza de la educación superior. In *CID - Centro de Investigación y Desarrollo eBooks*. https://doi.org/10.37811/cli_w1017. Consultado el 20 de septiembre de 2024.

[7] Frydenberg, M., & Ohri, S. (2023). Designing a Metaverse for an Immersive Learning Experience. *9th International Conference on Higher Education Advances*. Editorial Universitat Politècnica de València. 1139-1146. <https://doi.org/10.4995/HEAd23.2023.16080>. Consultado el 12 de septiembre de 2024.

[8] Martins, D., Oliveira, L., & Amaro, A. C. (2022). From co-design to the construction of a metaverse for the promotion of cultural heritage and tourism: the case of Amiais. *Procedia Computer Science*, 204, 261-266. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.031>. Consultado el 17 de septiembre de 2024.

[9] Hanifi, A., Abdollahi, M., & Habibi, S. (2024). A Model for Implementing the Metaverse in Science Education in Lower Secondary Schools *International Journal of Education and Cognitive Sci-*

ces, 5(4), 83-92. <https://doi.org/10.61838/kman.ijecs.5.4.9>. Consultado el 16 de septiembre de 2024.

[10] Ball, M. (2022). *The Metaverse: What It Is, Where to Find it, and Who Will Build It* – MatthewBall.co. MatthewBall.co. <https://www.matthewball.co/all/themetaverse>. Consultado el 20 de septiembre de 2024.

[11] Kilag, O. K. T., Segarra, G. B., De Gracia, A. M. L., Del Socorro, A. S., Abendan, C. F. K., Camangyan, G. A., & Mahasol, E. T. (2023). ICT application in teaching and learning. *Science and Education*, 4(2), 854-865. <https://cyberleninka.ru/article/n/ict-application-in-teaching-and-learning>. Consultado el 23 de septiembre de 2024.

[12] Khalil, A., & Jumani, N. B. (2024). Feasibility of educational metaverse for immersive transformation of teacher education. *Journal of Arts & Social Sciences*, 11(1), 95-106. <https://doi.org/10.46662/jass.v11i1.456>. Consultado el 13 de septiembre de 2024.

[13] Damaševičius, R., & Sidekerskienė, T. (2024). Virtual Worlds for Learning in Metaverse: A Narrative Review. *Sustainability*, 16(5), 2032. <https://doi.org/10.3390/su16052032>. Consultado el 18 de septiembre de 2024.

[14] Çalışkan, G., & Maya, İ. (2024). Opinions and expectations of instructors on metaverse applications in higher education. *Journal of Educational Technology and Online Learning*, 7(2), 273-285. <https://doi.org/10.31681/jetol.1439812>. Consultado el 19 de septiembre de 2024.

[15] Rahman, H., Wahid, S. A., Ahmad, F., & Ali, N. (2024). Game-based learning in metaverse: Virtual chemistry classroom for chemical bonding for remote education. *Education and Information Technologies*. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12575-5>. Consultado el 14 de septiembre de 2024.

[16] Said, G. R. E. (2023). Metaverse-Based Learning Opportunities and Challenges: A Phenomenological Metaverse Human-Computer Interaction study. *Electronics*, 12(6), 1379. <https://doi.org/10.3390/electronics12061379>. Consultado el 11 de septiembre de 2024.

[17] Queen, G. Q. M., Alava, V. B., & Sarango, Y. L. (2023). Actualización educativa: Una revisión bibliográfica sobre las metodologías emergentes en el metaverso. *Podium*, (43), 73-92. <https://doi.org/10.31095/podium.2023.43.5>. Consultado el 22 de septiembre de 2024.

[18] Seidel, S., Berente, N., Nickerson, J., & Yepes, G. (2022). *Designing the metaverse*. 55th Hawaii International Conference on System Sciences. 6699-6708. <http://hdl.handle.net/10125/80151>. Consultado el 13 de septiembre de 2024.

[19] Rolando, A. C. E., & Alexandra, A. T. S. (2018). *Metodología didáctica basada en metaversos con relación a los estilos de aprendizaje en la educación secundaria*. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/29074?mode=full>. Consultado el 12 de septiembre de 2024.

[20] Acevedo Nieto, Javier. (2022). *Una introducción al metaverso: conceptualización y alcance de un nuevo universo online*. *adComunica. Revista Científica de Estrategias, Tendencias e Innovación en Comunicación*, n°24. Castellón de la Plana: Departamento de Ciencias de la Comunicación de la Universitat Jaume I, 41-56. <http://dx.doi.org/10.6035/adcomunica.6544>. Consultado el 16 de septiembre de 2024.

[21] Weinberger, M., & Gross, D. (2023). *A comparison of virtual worlds based on the metaverse maturity model*. *ITU J. Futur. Evol. Technol*, 4, 537-548. Consultado el 19 de septiembre de 2024.



CI | CONGRESO
INTERNACIONAL
DE INGENIERÍAS

Crea con

