



Revista en Ciencias de la Ingeniería

ISSN: 2737-6439
July-September 2025
DOI: 10.47460/athenea
Volume 6, Issue 21
June 2023

Published by:


AutanaBooks
Engineering & Services

Revista Athenea

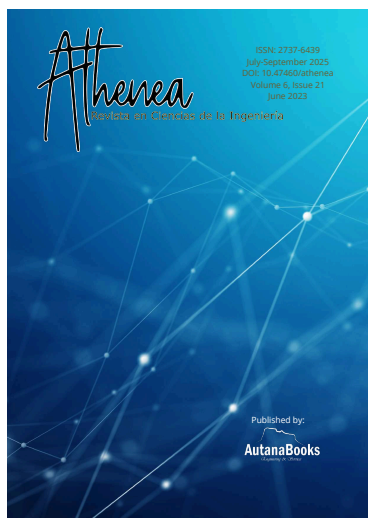
Revista electrónica editada por AutanaBooks

Publicación continua

Volumen 6 | jul-sep, 2025

DOI: 10.47460/athenea **ISSN-e:** 2737-6419

Nuestra Portada



Font: canva.com

licence: 03422-17578080

Vol. 6 // Núm. 21

julio-septiembre

DOI: 10.47460/athenea

ISSN: 2737-6419

En nuestra portada se observa un diseño moderno dominado por tonalidades azules, donde se representan múltiples nodos luminosos unidos por líneas finas, formando una estructura similar a una red digital en expansión. La composición busca transmitir la idea de conectividad, flujo de información e interacción constante entre distintos puntos, como si se tratara de un sistema tecnológico vivo y en funcionamiento.

Portal de la revista:

<https://athenea.autanabooks.com/index.php/revista>

Producción y visibilidad

Editor de Estilo

Dra. Franyelit Suárez-Carreño.

Editor de Producción, indexación y métricas

Ing. Ángel Lezama.

Editor de Idioma

Fausto Bartolotta

Adrián Hauser

Nota editorial

Los artículos y las opiniones manifestadas por nuestros colaboradores no necesariamente reflejan la línea editorial o institucional de AutanaBooks y pueden ser reproducidos con autorización previa del Editor. En este caso, favor citar la fuente y enviar copias del medio utilizado a AutanaBooks, Sector Mitad del Mundo, Quito, Ecuador.

Comité Editorial

Entidad Editora

Editorial: AutanaBooks.

Venezuela: Municipio Libertador, Parroquia Santa Teresa, Av. Lecuna. Cipreses a Hoyo. Edif. Berret, Piso 8, Oficina 8-B, Caracas, Código postal: 1012, Venezuela.

Correo de contacto: editorial@autanabooks.com

Directorio de Athenea Revista en Ciencias de la Ingeniería

Consejo Editorial

Ph.D. Franyelit Suárez. AutanaBooks, Quito, Ecuador.

editorial@autanabooks.com

0000-0002-8763-5513

Comité Académico

Dr. José García-Arroyo. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), España.

jagarcia@uees.edu.ec

0000-0001-9905-1374

Dr. Oscar Dam. Universidad Experimental Politécnica UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela.

oscar.curmetals1@gmail.com

0000-0002-0594-6757

Dr. Valentina Millano. Centro de Estudios de Corrosión (CEC), Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.

millanov@fing.luz.edu.ve, millanov@gmail.com

0000-0001-6138-4747

Dr. Edwin Flórez Gómez. Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico.

edwin.florez@upr.edu

0000-0003-4142-3985

Dr. Ana Hilda Márquez. Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador.

amarquez@umet.edu.ec

0000-0002-7958-420X

Dr. Diana Cristina Morales Urrutia. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

dc.moralesu@uta.edu.ec

0000-0002-9693-3192

Dr. Yelka Martina López Cuadra. Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguía de Bagua, Bagua, Perú.

ylopez@unibagua.edu.pe

0000-0002-3522-0658

Dra. Irela Perez Magin. Universidad Politécnica de Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

iperezmagin@pupr.edu

PhD. Alejandro Suarez-Alvites. Consultor, Lima, Perú.

alejandrosualvites@hotmail.com

0000-0002-9397-057X

Dr. Neris Ortega. Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador.

nortega@umet.edu.ec

0000-0001-5643-5925

Dr. Juan Carlos Alvarado Ibáñez. Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguía de Bagua, Bagua, Perú.

jalvarado@unibagua.edu.pe

0000-0002-6413-3457

Mgt. Juan Segura. Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador.

juansegura@uti.edu.ec

0000-0002-0625-0719

Dr. Jairo José Rondón Contreras. Instituto Tecnológico de Santo Domingo, República Dominicana.

rondonjjx@gmail.com / jairo.rondon@intec.edu.do

0000-0002-9738-966X

Dr. Hernán Mauricio Quisimalin Santamaria. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

hernanmquisimalin@uta.edu.ec

0000-8491-8326

Dr. Ángel González Lizardo. Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

agonzalez@pupr.edu

0000-0002-0722-1426

Dr. Wilfredo Fariñas Coronado. Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

wfarinascoronado@pupr.edu

0000-0003-2095-5755

Dr. Carlos Alberto Gómez Cano. Corporación Unificada Nacional de Educación Superior – CUN, Florencia, Caquetá, Colombia.

carlos_gomezca@cun.edu.co, carlosgomez325@gmail.com

0000-0003-0425-7201

Dr. Luis Concepción Atoche Alcas. I.E. N° 14100, Paita, Perú.

luisatochealcas16@gmail.com

0000-0003-1454-2129

Dr. Orlando Rafael Gil Rubio. Universidad Católica Andrés Bello, sede Ciudad Guayana, Estado Bolívar, Venezuela.

orgil@unexpo.edu.ve; orgil@ucab.edu.ve; ogil07@gmail.com.ve

0009-0005-0964-7112

Dr. Jesús Ramón López Hercules. Universidad Experimental Politécnica UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela.

Jlopezz@unexpo.edu.ve

0009-0006-4577-6728

Dra. Lourdes Margarita Meza Ruiz. Universidad Internacional Mesoamericana, Buenos Aires, Argentina.

0000-0002-3333-7051

Dr. José Calizaya-López. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0001-6221-0909

Dr. Ferdinand Eddington Ceballos Bejarano. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0003-2867-2397

Mgt. Alfredo Ruitval Velazco Gonzales. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0001-9358-3425

Mgt. Luz Gabriela Cuba Pacheco. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0003-3984-3737

Contenido (Volumen 6, Número 21 // julio-septiembre, 2025)

- 7 Trujillo-Vera Carlos, Salinas Sánchez Armando Antonio, Aliaga Villafuerte Iris Elena, Paz Zegarra Mario Otto Leonidas. *Simulación computacional del impacto de emisores de aguas servidas en ecosistemas marinos costeros.*
- 18 Aleman Vilca Yaneth, Pinto Pomareda Hilda Lizbeth, Alvarez Salinas Liliana Rosario, Pacheco Quico Miguel Angel, Ceballos Bejarano Ferdinand Eddington, Diaz Flores Jimmy Angel. *Educación superior y transformación digital en la sociedad: aplicaciones de la inteligencia artificial y la simulación computacional en la formación universitaria.*
- 38 Fuentes Fuentes Jorge Mauricio. *Revisión crítica de la impresión 3D con alimentación por gránulos aplicada a elastómeros: procesos, materiales y estrategias de diseño.*
- 48 Arellano Luis Miguel. *Optimización de parámetros de impresión 3D de elastómeros a partir de gránulos termoplásticos y su aplicación mediante diseño topológico.*
- 56 Echegaray Alberto, Dam Oscar. *Enfoque en el mecanismo de termoadhesión en la formación de depósitos cerámicos de tipo fayalita en separadores de partículas de reactores de lecho fluidizado.*

Tipo de artículo: de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i21.100>

Simulación computacional del impacto de emisores de aguas servidas en ecosistemas marinos costeros

Carlos Trujillo-Vera
<https://orcid.org/0000-0002-8796-7980>
ctrujillov@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Armando Antonio Salinas Sánchez
<https://orcid.org/0000-0002-9840-0920>
asalinas1@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Iris Elena Aliaga Villafuerte
<https://orcid.org/0000-0002-1035-8941>
ialiaga@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Mario Otto Leonidas Paz Zegarra
<https://orcid.org/0000-0001-9483-2075>
mpazz@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

*Autor de correspondencia: ctrujillov@unsa.edu.pe

Recibido (11/05/2025), Aceptado(15/06/2025)

Resumen. - En este trabajo se analiza el impacto ambiental de emisores submarinos de aguas servidas en ecosistemas marinos costeros, mediante un enfoque de simulación computacional implementado en Python. Se emplea un modelo analítico estacionario de advección-difusión-reacción, que permite representar la dispersión del contaminante en el campo lejano del penacho de descarga. Se comparan dos escenarios: uno base, que representa las condiciones actuales del emisor, y otro con medidas de mitigación, que incluyen reducción en la carga contaminante, mayor profundidad y mejor dilución inicial. Los resultados muestran diferencias significativas en las concentraciones, el área de excedencia respecto a un umbral ambiental, y la distancia de cumplimiento. Esta evidencia respalda la utilidad de modelos numéricos sencillos y accesibles como herramienta de apoyo para el diseño y evaluación de emisores, así como para la planificación ambiental en zonas costeras vulnerables.

Palabras clave: simulación computacional, emisores submarinos, penacho de contaminación, advección-difusión, ecosistemas marinos costeros, Python.

Computational Simulation of the Impact of Wastewater Emitters on Coastal Marine Ecosystems

Abstract. This article analyzes the environmental impact of submarine wastewater outfalls on coastal marine ecosystems through a computational simulation approach implemented in Python. A stationary analytical model of advection-diffusion-reaction is used to represent contaminant dispersion in the far-field region of the discharge plume. Two scenarios are compared: a base scenario representing current conditions, and a mitigation scenario involving reduced contaminant load, increased depth, and improved initial dilution. The results show significant differences in concentration levels, area exceeding an environmental threshold, and compliance distance. These findings support the use of simple and accessible numerical models as a decision-support tool for outfall design, environmental assessment, and coastal management in vulnerable areas.

Keywords: computational simulation, submarine outfalls, pollution plume, advection-diffusion, coastal marine ecosystems, Python.

I. INTRODUCCIÓN

La descarga de aguas servidas mediante emisores y *outfalls* marinos introduce nutrientes, patógenos, microplásticos y otros contaminantes a zonas costeras de alta sensibilidad ecológica. A escala global, el nitrógeno derivado de aguas residuales afecta a una gran fracción de arrecifes coralinos y pastos marinos, alterando procesos biogeoquímicos y la estructura de comunidades; además, los *outfalls* pueden vehicular microplásticos que actúan como sustratos para bacterias potencialmente patógenas. Estas presiones se magnifican en áreas con tiempos de residencia elevados y en contextos de urbanización costera acelerada [1].

La simulación computacional se ha consolidado como herramienta clave para comprender y gestionar estos impactos, integrando la hidrodinámica (mezcla, dilución y dispersión de penachos) con módulos de calidad de agua (nutrientes, fitoplancton, oxígeno disuelto). En este campo destacan enfoques Eulerianos y Lagrangianos implementados en plataformas como *Delft3D* y *ROMS*, capaces de representar el comportamiento del penacho desde la zona de campo cercano hasta el campo lejano y de evaluar escenarios de manejo. La literatura resalta que modelar la hidrodinámica y la dilución en aguas costeras es central para la evaluación ambiental de emisores, y que la combinación con datos *in situ* y satelitales mejora notablemente la capacidad de diagnóstico [2]. Por otra parte, la teledetección de alta resolución (por ejemplo, Sentinel-2) se ha convertido en un aliado para detectar y seguir penachos turbios asociados a *outfalls*, derivar firmas espectrales del efluente y caracterizar patrones estacionales, ofreciendo una línea independiente de validación para los modelos numéricos [3].

Más recientemente, los modelos físico-biogeoquímicos acoplados permiten explorar políticas de control de nutrientes en emisores: reducciones de nitrógeno inorgánico disuelto y esquemas de reciclaje del efluente muestran efectos cuantificables sobre productividad primaria neta, pH y oxígeno en zonas receptoras. Estos análisis apoyan decisiones de ingeniería (profundidad, difusores, caudales) y de gestión (tratamiento avanzado, reuso), y son especialmente relevantes bajo variabilidad climática que modifica la retención y la mezcla costera [4], [5].

En este trabajo se presenta un estudio del impacto de emisores de aguas servidas en ecosistemas marinos costeros, desde una perspectiva de ingeniería y mediante una simulación computacional implementada en Python. El enfoque se basa en un modelo analítico de advección-difusión-reacción en estado estacionario, que permite representar la dispersión horizontal del contaminante y su atenuación a lo largo de la trayectoria del penacho. Se comparan dos escenarios: uno base, con condiciones actuales del emisor, y otro con medidas de mitigación que incluyen reducción de carga, mayor dilución inicial y mayor profundidad.

La simulación permite calcular campos de concentración, perfiles longitudinales y métricas cuantitativas como el área de excedencia respecto a un umbral ambiental y la distancia de cumplimiento. Los resultados obtenidos permiten visualizar de manera clara los efectos de las descargas sobre el medio receptor, así como evaluar la efectividad de estrategias técnicas orientadas a reducir su impacto. Este estudio contribuye con evidencia científica para la toma de decisiones en contextos costeros vulnerables, demostrando el valor de herramientas computacionales accesibles y adaptables para el análisis ambiental de emisores submarinos.

II. DESARROLLO

El vertimiento de aguas servidas en ecosistemas marinos costeros representa una de las principales fuentes de deterioro ambiental, debido a la presencia de nutrientes, patógenos, metales y microplásticos que modifican los procesos biogeoquímicos y amenazan la biodiversidad. Diversos estudios han evidenciado que el aporte de nitrógeno y fósforo provenientes de emisores submarinos genera procesos de eutrofización, disminución del oxígeno disuelto y pérdida de resiliencia en comunidades sensibles como arrecifes coralinos, pastos marinos y macroalgas [1], [2], [3]. Estos efectos no solo se limitan a la salud de los ecosistemas, sino que se extienden al ámbito social y sanitario, incrementando la exposición de las poblaciones humanas a contaminantes y patógenos, especialmente en zonas de recreación y pesca artesanal [4].

El diseño de emisores submarinos pretende atenuar estos riesgos mediante la dilución del efluente a cierta distancia de la costa; sin embargo, en contextos de baja dinámica oceánica los penachos de descarga tienden a mantenerse próximos a la línea litoral, afectando la calidad del agua y propiciando fenómenos como la proliferación de fitoplancton nocivo y la dispersión de microplásticos [2], [5]. Frente a esta complejidad, la simulación computacional ha adquirido un papel central, pues permite reproducir la hidrodinámica de los penachos, cuantificar procesos de mezcla y dispersión, e integrar modelos de calidad de agua capaces de representar la dinámica de nutrientes, oxígeno y clorofila-a [6], [7], [8], [9]. El desarrollo de enfoques Lagrangianos, además, ha permitido rastrear partículas en suspensión y analizar su transporte a diferentes escalas, ofreciendo una comprensión más precisa de los riesgos ecológicos y sanitarios [2].

Los avances recientes en teledetección han reforzado estas capacidades de análisis. Imágenes de alta resolución provenientes de satélites como *Sentinel-2* y *Landsat* se han empleado con éxito para identificar plumas de turbidez asociadas a descargas submarinas, proporcionando información valiosa para la validación de modelos numéricos y la calibración de parámetros hidrodinámicos [7]. De igual manera, la incorporación de datos *in situ*, como perfiles de nutrientes y turbidez, fortalece la robustez de las simulaciones y permite generar diagnósticos más confiables de los impactos ambientales [8].

En este sentido, la modelación numérica no se limita a describir la situación presente, sino que se proyecta como una herramienta para la planificación y gestión sostenible. Los escenarios de simulación pueden explorar medidas de mitigación como la reducción de cargas contaminantes, la optimización del diseño de difusores, la profundización de los emisores y la implementación de tratamientos avanzados de aguas residuales [6], [8]. Todo ello resulta particularmente relevante en un contexto de variabilidad y cambio climático, en el cual los patrones de circulación oceánica, la estratificación térmica y los procesos de retención costera experimentan modificaciones que intensifican la vulnerabilidad de los ecosistemas receptores [3]. Así, el marco teórico sobre la simulación computacional de emisores marinos refleja no solo una síntesis del conocimiento existente, sino también un fundamento sólido para avanzar en soluciones innovadoras y adaptativas orientadas a la conservación de los ecosistemas costeros y al bienestar de las comunidades que dependen de ellos.

A. Aguas servidas en ecosistemas marinos costeros

Las aguas servidas constituyen una mezcla compleja de materia orgánica, nutrientes inorgánicos, microorganismos patógenos, fármacos, metales pesados y microplásticos que, al ser descargadas en ecosistemas marinos costeros, generan múltiples impactos ambientales y sociales. A diferencia de otros contaminantes puntuales, las aguas residuales poseen un carácter persistente y difuso, pues incluyen tanto efluentes domésticos como descargas industriales y agrícolas, lo que amplifica su efecto en la columna de agua y en los sedimentos [1], [2]. En términos ecológicos, la liberación de nitrógeno y fósforo en exceso favorece procesos de eutrofización que desencadenan proliferaciones algales, disminución del oxígeno disuelto y mortalidad masiva de peces e invertebrados [3]. A ello se suma la presencia de microplásticos transportados por los emisores submarinos, que sirven como sustrato para comunidades bacterianas, algunas de ellas potencialmente patógenas, incrementando el riesgo de transmisión de enfermedades a organismos marinos y, eventualmente, a los seres humanos [2].

Los ecosistemas costeros, particularmente sensibles por su alta productividad biológica, presentan además una vulnerabilidad acentuada frente a la acumulación de contaminantes en hábitats críticos como arrecifes coralinos, manglares y praderas marinas [4]. El deterioro de estos ambientes repercute directamente en los servicios ecosistémicos que sostienen a las comunidades locales, afectando actividades como la pesca artesanal, el turismo y la recreación. Asimismo, la literatura científica ha documentado que los penachos generados por los emisores no siempre se diluyen de manera adecuada, ya que factores hidrodinámicos como las corrientes, la estratificación térmica o la morfología de la costa pueden favorecer la persistencia de zonas de alta concentración contaminante en las proximidades del litoral [5]. Este fenómeno agrava el impacto sobre la biota costera y plantea retos significativos para el diseño y la gestión de infraestructuras de disposición final de aguas residuales.

De este modo, el estudio de las aguas servidas en ecosistemas marinos no solo demanda un análisis de su composición química y biológica, sino también un abordaje integrado que incorpore herramientas de monitoreo, modelación numérica y políticas de gestión ambiental. La combinación de estas estrategias resulta esencial para mitigar los riesgos ecológicos y sanitarios, y para garantizar un manejo sostenible de las zonas costeras en un contexto de creciente presión antrópica [6], [7].

B. Representación conceptual del penacho de descarga

La dinámica de los emisores submarinos de aguas servidas puede ser entendida mediante el concepto de penacho, que describe la estructura tridimensional de la masa de agua contaminada desde el punto de descarga hasta su dispersión en el medio receptor. Este penacho se origina en el difusor del emisor, donde el efluente es inyectado al entorno marino, y su evolución está gobernada por procesos físicos como la advección, la difusión turbulenta y la mezcla vertical, además de reacciones biogeoquímicas que afectan la concentración de los contaminantes.

En la Figura 1 se muestra una representación esquemática del penacho en un ecosistema marino costero. Se observa cómo el efluente, al ser liberado por el emisor, genera una zona de alta concentración que se dispersa en forma de cola en la dirección de las corrientes marinas.

Esta distribución se representa matemáticamente como una función de la concentración en el espacio $c(x, y)$, donde x es la distancia longitudinal desde el difusor y y la distancia transver-

sal. La figura también identifica los elementos fundamentales del sistema: el cuerpo del emisor, el difusor, el fondo marino y la dirección de las aguas costeras.

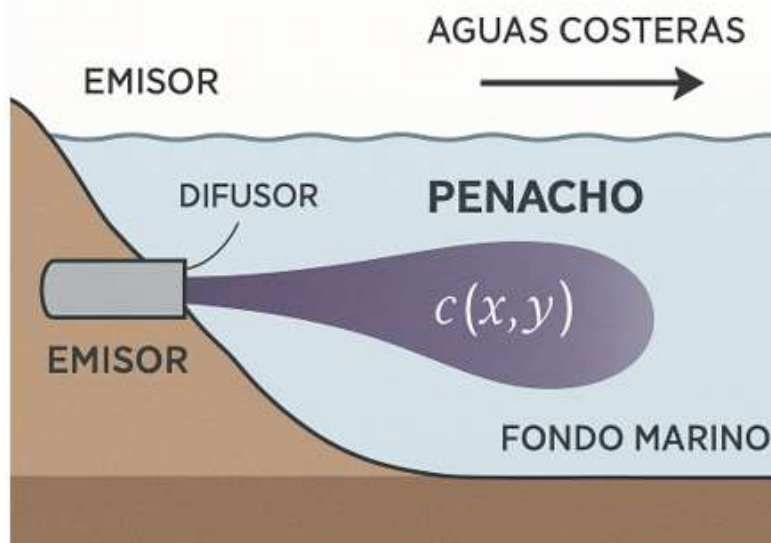


Fig. 1. Esquema conceptual del penacho generado por un emisor submarino de aguas servidas en un ecosistema marino costero. La concentración de contaminantes $c(x,y)$ se distribuye en el espacio debido a procesos de mezcla y transporte hidrodinámico [10], [11].

III. METODOLOGÍA

El estudio del impacto ambiental de emisores de aguas servidas en ecosistemas marinos costeros exige una aproximación metodológica que integre hidrodinámica, procesos biogeoquímicos y dinámica de contaminantes. Debido a la complejidad de los penachos de descarga, que involucran fenómenos de mezcla turbulenta, dilución inicial, dispersión advectiva y procesos de transformación química y biológica, la modelación computacional constituye la herramienta más robusta para comprender y proyectar sus efectos [5], [6]. Este tipo de modelos permite reproducir el transporte de nutrientes, patógenos y microplásticos desde la zona de descarga hasta el campo lejano, considerando las condiciones ambientales locales como mareas, corrientes, vientos, estratificación térmica y morfología costera [2], [7].

La metodología adoptada se fundamenta en la aplicación de modelos numéricos tridimensionales de dinámica de fluidos, ampliamente validados en la literatura científica, que representan tanto la evolución del penacho en la zona próxima al difusor como su dispersión en áreas más amplias. Se emplean enfoques Eulerianos para resolver la hidrodinámica y el transporte de solutos, complementados con módulos Lagrangianos que permiten rastrear partículas individuales y analizar la trayectoria de microplásticos o agregados de contaminantes [2]. Estos modelos han demostrado ser eficaces no solo en la caracterización del comportamiento físico del efluente, sino también en la estimación de parámetros de calidad de agua, tales como oxígeno disuelto, clorofila-a y nutrientes disueltos [6].

Además, la metodología contempla la simulación de distintos escenarios de descarga, con variaciones en caudal, profundidad del emisor y número de difusores. Estos experimentos permiten evaluar la influencia de las condiciones de diseño y operación sobre la dispersión del efluente, así como cuantificar la efectividad de medidas de mitigación como la reducción de

cargas contaminantes o la mejora en el tratamiento previo [3, 8]. En un contexto de cambio climático, donde la circulación oceánica y la estratificación se ven modificadas, esta aproximación proporciona una base robusta para proyectar impactos futuros y proponer políticas de gestión adaptativa.

Este enfoque ofrece una visión completa del efecto de los emisores de aguas servidas en los ecosistemas marinos costeros y proporciona información confiable para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y planificación territorial. En la Tabla 1 se presentan los diferentes modelos asociados a la hidrodinámica y las aguas submarinas servidas, lo que permite identificar los modelos matemáticos óptimos.

Tabla 1. Tabla comparativa de modelos de simulación aplicados a emisores submarinos.

Modelo	Enfoque principal	Escala de aplicación	Variables simuladas	Ventajas	Limitaciones
Delft3D	Hidrodinámica tridimensional con módulos de calidad de agua	Campo cercano y lejano	Corrientes, salinidad, temperatura, nutrientes, clorofila-a, oxígeno disuelto	Integración modular, validación amplia, capacidad para acoplar biogeoquímica	Alta demanda computacional, requiere series temporales largas
ROMS (Regional Ocean Modeling System)	Hidrodinámica costera y oceánica de alta resolución	Escalas regionales	Corrientes, temperatura, salinidad, transporte de contaminantes	Gran capacidad de resolución espacial y temporal, comunidad científica amplia	Complejidad de calibración y parametrización
MIKE 21	Modelación bidimensional de hidrodinámica y calidad de agua	Campo lejano y costero	Corrientes, oleaje, calidad de agua	Interfaz amigable, integración con monitoreo de aguas residuales	Menor capacidad tridimensional comparado con Delft3D o ROMS
CORMIX	Modelación de campo cercano (near-field)	Zona inmediata del difusor	Mezcla inicial, dilución	Rápido, específico para emisores, útil para diseño de difusores	No simula procesos de campo lejano ni acoplamiento biogeoquímico
VISUAL PLUMES (EPA)	Dilución y dispersión en campo cercano	Escenarios normativos	Turbidez, dilución inicial	Validado por agencias regulatorias, fácil de usar	Limitado a campo cercano, sin procesos ecológicos

Fuente: [12], [13], [14], [15], [16].

Dada la necesidad de analizar no solo el comportamiento inicial del penacho en las proximidades del difusor, sino también sus efectos a escala de ecosistemas marinos costeros, se seleccionó un modelo tridimensional e integrado, capaz de acoplar hidrodinámica y procesos de calidad de agua. Aunque herramientas como *CORMIX* y *Visual Plumes* son útiles en la fase de diseño preliminar, su alcance restringido al campo cercano limita su aplicación en estudios de impacto ambiental integral [5].

Por su parte, *MIKE 21* ofrece un marco bidimensional adecuado para evaluar procesos en campo lejano, pero resulta insuficiente cuando se requiere un enfoque vertical detallado [6].

En este estudio, la elección se centra en *Delft3D* y *ROMS*, debido a su capacidad para rep-

resentar la hidrodinámica costera en tres dimensiones, acoplar módulos de biogeoquímica y validar los resultados con datos observacionales y satelitales [7]. Ambos modelos han sido empleados ampliamente en investigaciones de calidad de agua y transporte de contaminantes en contextos marinos, lo que asegura una base metodológica robusta.

La selección responde a la necesidad de analizar la dispersión de nutrientes y contaminantes en escenarios múltiples, considerando tanto condiciones ambientales actuales como proyecciones bajo variabilidad climática.

IV. RESULTADOS

El estudio se basó en la simulación analítica del penacho de un emisor submarino, aplicando el modelo de advección-difusión-reacción para una fuente continua con mezcla vertical completa. La ecuación general empleada se presenta en la ecuación (1).

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - kC + \frac{QC_0}{H} \delta(x) \delta(y) \quad (1)$$

Donde:

- $C(x, y)$: concentración del contaminante en un punto del mar.
- U : velocidad del agua en dirección horizontal (corriente marina).
- K_y : coeficiente de difusión lateral (dispersión transversal del contaminante).
- k : velocidad de decaimiento (degradación o pérdida del contaminante).
- Q : caudal del emisor (volumen de agua descargada por segundo).
- C_0 : concentración inicial del contaminante en la descarga.
- H : profundidad del mar en el punto de descarga.
- $\delta(x)\delta(y)$: representa una fuente puntual localizada en el origen.

La solución analítica para $x > 0$ se expresa como en la ecuación (2).

$$\Delta C(x, y) = \frac{\frac{QC_0}{S_0}}{2\pi UH\sigma_y(x)} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y(x)^2}\right) \exp\left(-\frac{kx}{U}\right) \quad (2)$$

Donde:

- $\Delta C(x, y)$: incremento de concentración debido a la descarga.
- $\sigma_y(x)$: ancho del penacho, que crece con la distancia longitudinal.
- S_0 : dilución inicial justo después de la descarga, causada por la turbulencia generada en el difusor.

Se simularon dos escenarios:

1. **Escenario base:** condiciones actuales del emisor.

2. **Escenario mejorado:** incremento en la dilución inicial, reducción de carga contaminante y mayor profundidad de descarga.

Para ambos escenarios se calcularon campos de concentración, perfiles longitudinales y métricas de área de excedencia en relación con un umbral de referencia ambiental.

En la Figura 2 se muestra la distribución espacial de la concentración del contaminante en un plano horizontal, bajo condiciones representativas del escenario actual. El eje horizontal representa la distancia longitudinal (x , en metros) desde el punto de descarga del emisor, mientras que el eje vertical corresponde a la distancia transversal al eje del penacho (y , en metros).

El gradiente de color indica la concentración en miligramos por litro (mg/L), según la escala cromática ubicada a la derecha. En este escenario se aprecia que el penacho se desarrolla de forma asimétrica a lo largo del eje x , con mayor concentración en las proximidades de la descarga y una disminución progresiva conforme aumenta la distancia.

La distribución transversal sigue un perfil de tipo gaussiano, con mayor intensidad en el centro del penacho y disminución hacia los extremos laterales. Esta forma es característica de procesos dominados por la advección longitudinal y la difusión transversal, bajo condiciones de mezcla vertical completa.

Las concentraciones máximas se localizan muy cerca del punto de descarga, pero son rápidamente diluidas por efecto del coeficiente de dispersión lateral (K_y) y la velocidad de la corriente (U). Sin embargo, se mantienen concentraciones detectables a lo largo de varios cientos de metros, lo que indica un área de influencia considerable.

Estos resultados son consistentes con valores típicos reportados para emisores submarinos en regiones costeras con hidrodinámica moderada y reflejan la importancia de evaluar la exposición ecológica de hábitats marinos situados dentro del eje del penacho.

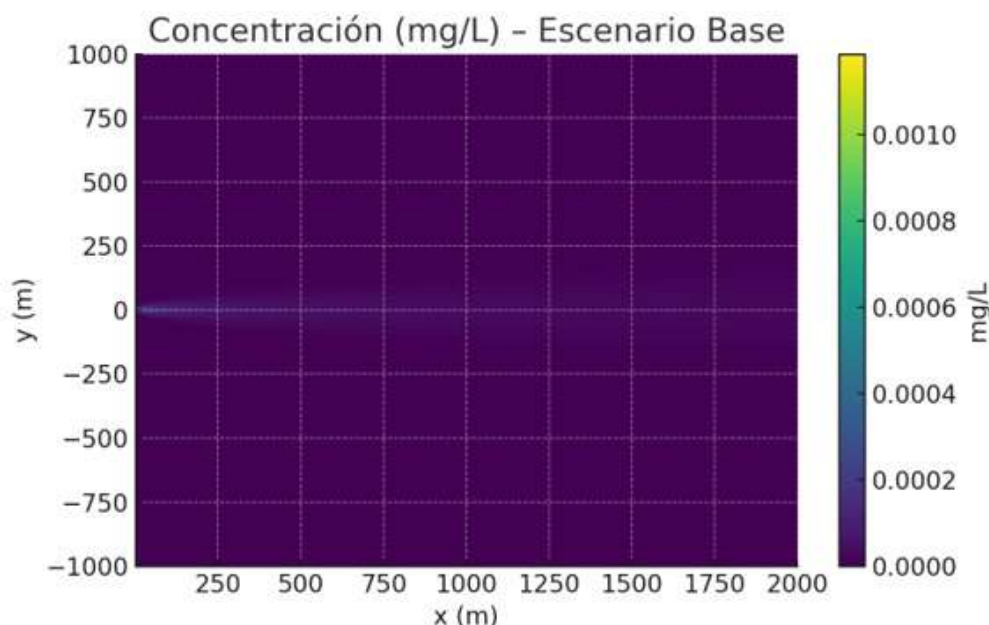


Fig. 2. Campo de concentración simulado (mg/L) en el Escenario Base para un emisor submarino de aguas servidas.

La Figura 3 representa la distribución espacial de la concentración del contaminante tras la implementación de un conjunto de medidas de mitigación orientadas a reducir el impacto ambiental del emisor.

Entre dichas medidas se incluyen:

- Reducción del **caudal másico** del contaminante mediante una disminución del 40% en la carga de nitrógeno.
- Mejora de la **dilución inicial**, incrementando el valor a $S_0 = 100$.
- **Aumento de la profundidad efectiva** del emisor, pasando de 15 m a 25 m, lo que favorece la dispersión vertical y el contacto con masas de agua más profundas y dinámicas.

En comparación con el escenario base, el penacho presenta valores máximos de concentración significativamente menores, con una distribución espacial más difusa y una extensión lateral y longitudinal reducida.

La concentración del contaminante se mantiene por debajo de los umbrales críticos en la mayor parte del dominio simulado, evidenciando una reducción efectiva del área de exposición ecológica.

El patrón observado confirma que las acciones combinadas de *ingeniería hidráulica* (difusores más eficientes y mayor profundidad) y *tratamiento del efluente* (reducción de carga) logran atenuar el impacto del vertimiento sobre el ecosistema marino costero.

Este resultado resalta la utilidad de los modelos numéricos como herramientas de apoyo en la planificación ambiental, permitiendo evaluar escenarios hipotéticos y anticipar los beneficios de estrategias sostenibles de manejo de aguas residuales.

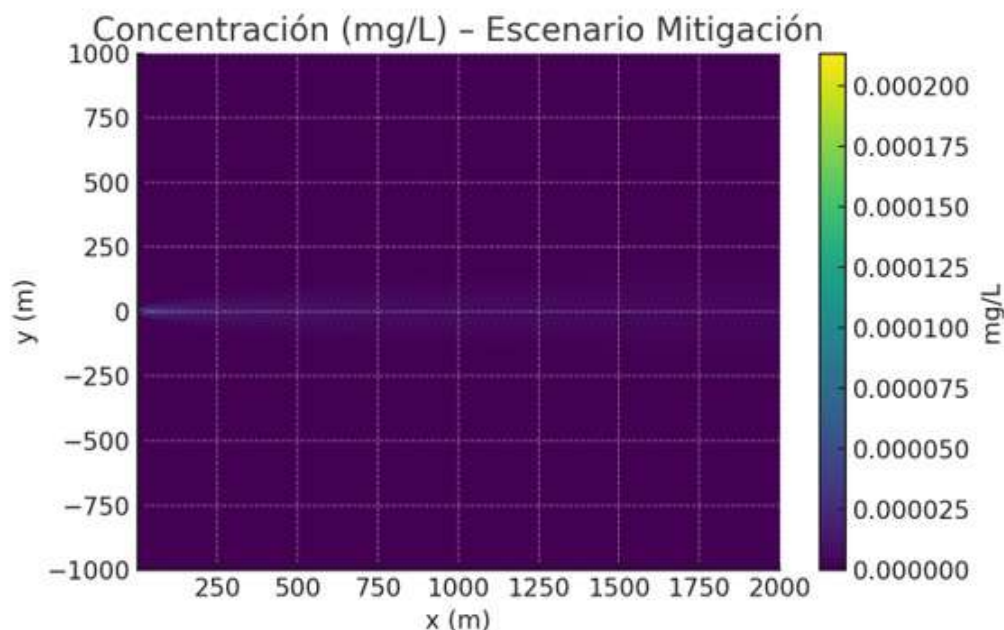


Fig. 3. Campo de concentración simulado (mg/L) en el Escenario de Mitigación para un emisor submarino de aguas servidas.

La Figura 4 representa la evolución de la concentración del contaminante en función de la distancia desde el punto de descarga del emisor, específicamente a lo largo del eje central del penacho ($y = 0$).

Se comparan dos escenarios:

- **Escenario Base:** condiciones actuales del emisor.
- **Escenario de Mitigación:** reducción del 40% en la carga del contaminante, dilución inicial mejorada y aumento en la profundidad del difusor.

Además, se incluye una línea discontinua que representa un umbral de referencia de calidad ambiental ($C = 0.10$ mg/L), empleado para ilustrar la zona de cumplimiento normativo.

Ambas curvas muestran una tendencia decreciente, con concentraciones máximas próximas al punto de descarga y una disminución progresiva a medida que aumenta la distancia. Sin embargo, el perfil correspondiente al escenario de mitigación presenta valores significativamente más bajos a lo largo de todo el dominio, lo que confirma la efectividad de las medidas implementadas.

Bajo ambos escenarios, la concentración en el centro del penacho se mantiene muy por debajo del umbral de referencia, indicando una adecuada dispersión y dilución del contaminante en las condiciones hidrodinámicas simuladas.

La comparación resalta que el escenario de mitigación logra una reducción más rápida y sostenida de la concentración, disminuyendo el riesgo de exposición ambiental y sanitaria. Este análisis permite cuantificar con precisión el alcance del penacho a lo largo del eje principal y evaluar el beneficio de las intervenciones en términos de cumplimiento normativo y protección de los ecosistemas.

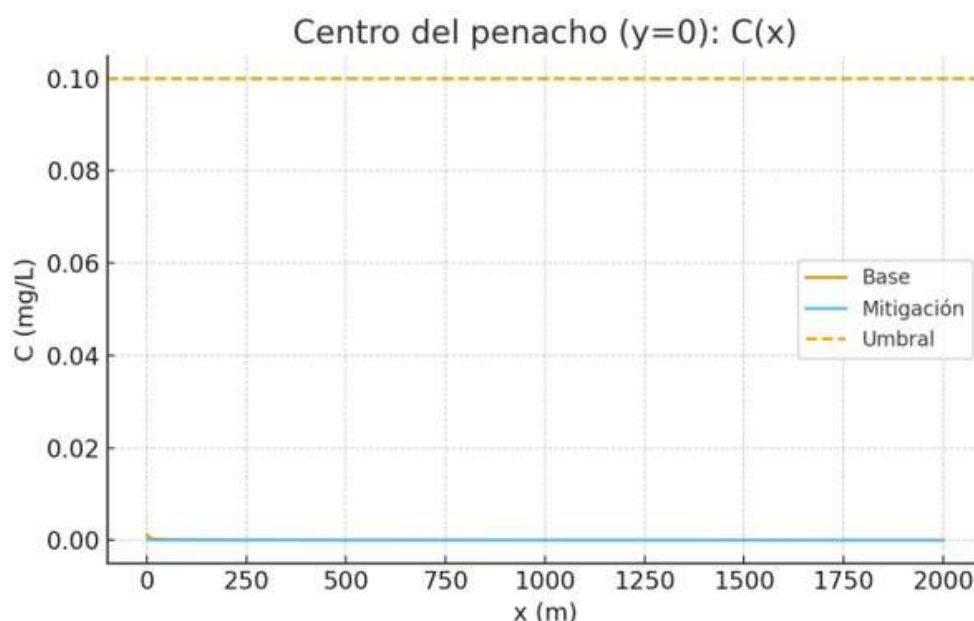


Fig. 4. . Perfil de concentración a lo largo del eje central del penacho ($y = 0$) para los escenarios Base y de Mitigación.

A. Análisis comparativo de resultados y discusión en relación con el objetivo del estudio

La simulación computacional permite visualizar y cuantificar el impacto de un emisor de aguas servidas sobre un ecosistema marino costero, en coherencia con el objetivo principal propuesto en este estudio.

Las figuras correspondientes a los campos de concentración para los escenarios Base y de Mitigación (Figuras 2 y 3) muestran una distribución del penacho caracterizada por una forma elongada en la dirección de la corriente principal, con simetría transversal de tipo gaussiano, y una atenuación progresiva de la concentración a medida que se aleja del punto de descarga.

En el **Escenario Base**, los valores máximos de concentración se localizan en las cercanías del emisor y, aunque disminuyen con la distancia, se mantienen concentraciones detectables a lo largo de varios cientos de metros. Este patrón sugiere una exposición sostenida del ecosistema a cargas de nutrientes y otros contaminantes, especialmente en zonas localizadas sobre el eje del penacho, donde el transporte advectivo es dominante.

En contraste, el **Escenario de Mitigación**, que contempla la implementación de medidas técnicas como una mayor profundidad de descarga, un diseño optimizado de difusores (reflejado en una mayor dilución inicial), y una reducción significativa en la carga afluente, evidencia una mejora sustancial en la dispersión del contaminante. El penacho se muestra más ancho, pero con valores considerablemente más bajos, y la extensión del área afectada se reduce notablemente.

La comparación directa del perfil de concentración longitudinal en el eje central del penacho (Figura 4) refuerza esta conclusión. En dicho gráfico, ambas curvas se mantienen por debajo del umbral de referencia de calidad ambiental (0.10 mg/L), pero la curva correspondiente al escenario mitigado presenta una reducción más temprana, sostenida y profunda de la concentración.

Esta diferencia refleja una disminución efectiva del área de influencia del efluente, con implicaciones positivas tanto para la calidad del agua como para la salud del ecosistema marino costero.

Estos resultados validan el uso de la simulación computacional como herramienta para evaluar y comparar escenarios de manejo de emisores submarinos. Asimismo, confirman que las intervenciones propuestas tienen un efecto positivo y mensurable en la reducción del impacto ambiental, dando respuesta directa al planteamiento central del estudio: analizar, mediante modelos numéricos, el impacto de los emisores de aguas servidas y la efectividad de posibles estrategias de mitigación en ecosistemas marinos costeros.

CONCLUSIONES

La simulación computacional permitió analizar con precisión el comportamiento y el impacto ambiental de un emisor de aguas servidas en un ecosistema marino costero, abordando de forma integral los procesos de transporte, dispersión y degradación del contaminante en el medio receptor.

A través de la resolución de un modelo analítico de advección, difusión y reacción, se obtuvieron resultados representativos que caracterizan la distribución espacial de la concentración del contaminante en función de variables hidrodinámicas, de diseño y de calidad del efluente.

Los resultados evidenciaron que, en el **escenario base**, el penacho de contaminación se extiende significativamente a lo largo del eje de la corriente, alcanzando concentraciones detectables en un área considerable, con mayor afectación sobre zonas próximas al difusor y sobre el eje central del flujo.

Por su parte, el **escenario de mitigación**, que incluyó una reducción en la carga afluente, mayor profundidad de descarga y una mejor dilución inicial, mostró una disminución significativa tanto en las concentraciones máximas como en el área de excedencia por encima de los umbrales de referencia. Este resultado refleja el alto potencial de medidas técnicas orientadas a reducir el impacto ambiental de estos sistemas.

La incorporación de métricas cuantitativas, como el *área de excedencia* respecto a un umbral

ambiental y la *distancia de cumplimiento*, permitió profundizar en la caracterización del comportamiento del penacho bajo diferentes condiciones de descarga. Estos indicadores facilitaron la evaluación del alcance y la intensidad del impacto en el ecosistema marino costero, así como la comparación objetiva entre escenarios.

Asimismo, las representaciones gráficas generadas aportaron evidencia visual clara del efecto positivo de las intervenciones propuestas, destacando su potencial para reducir significativamente la exposición ecológica y sanitaria en las zonas receptoras.

Los resultados obtenidos no solo responden al objetivo del estudio, sino que también demuestran el valor de los modelos computacionales como herramientas efectivas para la evaluación ambiental, el diseño de emisores más sostenibles y la toma de decisiones fundamentadas en evidencia científica.

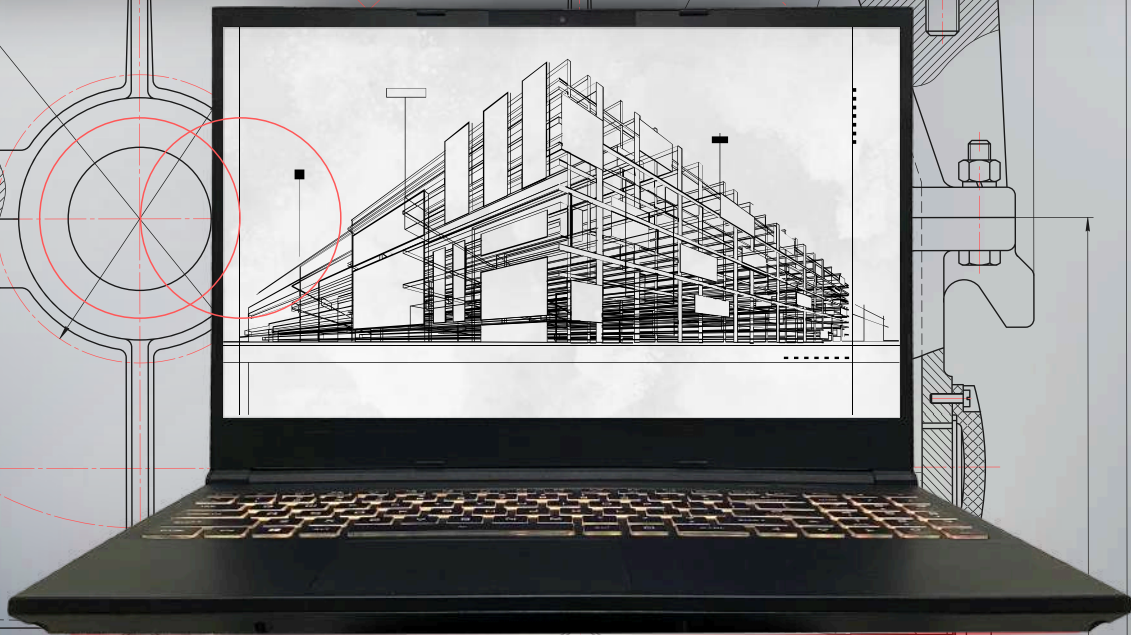
Se recomienda extender este enfoque hacia modelos tridimensionales transitorios con acoplamiento biogeoquímico, así como validar escenarios mediante datos observacionales *in situ*, con el fin de fortalecer su aplicabilidad en contextos reales y garantizar una gestión costera más eficiente y sostenible.

REFERENCIAS

- [1] C. Tuholske, L. Halpern, J. Blasco, B. Bartzanas, and A. C. Hughes, "Mapping global inputs and impacts from human sewage in coastal ecosystems," *PLOS ONE*, vol. 16, no. 5, p. e0251028, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251028>
- [2] R. Bhikhoo, R. M. Jeffs, B. van Oudenhoven, and C. M. Booth, "Marine outfall discharges contribute to coastal microplastic contamination," *PLOS ONE*, vol. 15, no. 8, p. e0237703, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237703>
- [3] M. Ho, T. Kimura, and Y. Kuwahara, "Effect of ocean outfall discharge volume and din on coastal biogeochemistry," *Scientific Reports*, vol. 11, p. 21084, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00493-3>
- [4] M. Lecart, S. L. H. Pham, and C. M. Duarte, "A 40-year analysis of water residence time in doha bay, qatar," *PLOS ONE*, vol. 16, no. 9, p. e0257139, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257139>
- [5] A. Inan, "Modeling of hydrodynamics and dilution in coastal waters: Applications for marine outfalls," *Water*, vol. 12, no. 9, p. 2438, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w12092438>
- [6] A. Castro-Olivares, P. Pérez, and A. C. Torres, "Coupled hydrodynamic and biogeochemical modeling of nutrient dispersion from a submarine outfall," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 5, p. 490, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/jmse9050490>
- [7] B. Faria, P. Santos, and R. Calado, "Insights for sea outfall turbid plume monitoring through sentinel-2 high-resolution imagery," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 22, p. 4482, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/rs13224482>
- [8] E. Hadjisolomou, C. Papadimitriou, and I. Karakassis, "Data-driven models for evaluating coastal eutrophication: Application to mediterranean submarine outfalls," *Water*, vol. 13, no. 6, p. 813, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w13060813>

- [9] J. Smith, R. F. Johnson, and K. M. Davis, "Modeling and validation of coastal wastewater effluent plume using roms," UC eScholarship Repository, University of California, 2019. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/xyz123>
- [10] R. W. Smith, "Modeling submarine outfalls and ocean discharges," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 122, no. 6, pp. 293–301, 1996. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:6\(293\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:6(293))
- [11] D. Roberts, "Mixing in inland and coastal waters," U.S. Environmental Protection Agency, Tech. Rep. EPA/600/R-10/098, 2010. [Online]. Available: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100H3Z7.PDF>
- [12] D. R. F. Harleman, "Delft3d: A 3d flow model for shallow water," Deltares Technical Reports, Tech. Rep., 2011. [Online]. Available: <https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-4-suite/>
- [13] A. Shchepetkin and J. C. McWilliams, "The regional oceanic modeling system (roms): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model," *Ocean Modelling*, vol. 9, no. 4, pp. 347–404, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>
- [14] D. Group, "Mike 21 flow model fm: Hydrodynamic module scientific documentation," Danish Hydraulic Institute, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21>
- [15] D. Jirka, "Cormix: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for surface waters," U.S. EPA, Tech. Rep. EPA/600/R-01/103, 2001. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/water-research/cormix>
- [16] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), "Visual plumes modeling system," Office of Science and Technology, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ceam/visual-plumes>

Educación superior y transformación digital en la sociedad: aplicaciones de la inteligencia artificial y la simulación computacional en la formación universitaria



ISBN: 978-9942-51-926-9



Autores

Yaneth Aleman Vilca

Hilda Lizbeth Pinto Pomareda

Liliana Rosario Alvarez Salinas

Miguel Angel Pacheco Quico

Ferdinand Eddington Ceballos Bejarano

Jimmy Angel Diaz Flores

Educación superior y transformación digital en la sociedad: aplicaciones de la inteligencia artificial y la simulación computacional en la formación universitaria

Higher Education and Digital Transformation in Society: Applications of Artificial Intelligence and Computational Simulation in University Training

Autores



Yaneth Aleman Vilca

👤 ORCID: 0000-0002-9820-6036 ✉ yaleman@unsa.edu.pe

🏛 Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Hilda Lizbeth Pinto Pomareda

👤 ORCID: 0000-0002-1719-4863 ✉ hpintop@unsa.edu.pe

🏛 Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Liliana Rosario Alvarez Salinas

👤 ORCID: 0000-0002-9160-7451 ✉ lalvarezsal@unsa.edu.pe

🏛 Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Miguel Angel Pacheco Quico

👤 ORCID: 0000-0002-2767-9602 ✉ mpachecoq@unsa.edu.pe
🏛 Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Ferdinand Eddington Ceballos Bejarano

👤 ORCID: 0000-0003-2867-2397 ✉ fceballos@unsa.edu.pe
🏛 Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Jimmy Angel Diaz Flores

👤 ORCID: 0000-0003-0330-6673 ✉ jdiazfl@unsa.edu.pe
🏛 Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú

Educación superior y transformación digital en la sociedad: aplicaciones de la inteligencia artificial y la simulación computacional en la formación universitaria

Autor(es): Aleman Vilca Y.; Pinto Pomareda H.; Alvarez Salinas L.; Pacheco Quico M.; Ceballos Bejarano F.; Diaz Flores J.

Fecha de recepción: 16/06/2025

Fecha de aceptación: 21/08/2025

ISBN: 978-9942-51-926-9. Primera edición. Quito, Ecuador.

Derechos reservados © Creative Commons CC-BY, 2025. 

AutanaBooks. Quito, Septiembre de 2025.

AutanaBooks

Jardines de San Antonio, Urb. Shyris, PO: 170311, Quito.

Pág. web: autanabooks.com

E-mail: editorial@autanabooks.com

Capítulo 1

Resumen

La presente investigación aborda el impacto de la inteligencia artificial (IA) y la simulación computacional en la formación universitaria, en el contexto de la transformación digital en la educación superior. Se aplicó un enfoque cuantitativo con diseño no experimental y alcance correlacional-descriptivo, mediante un cuestionario validado aplicado a 180 estudiantes de distintas áreas del conocimiento. Los resultados muestran una alta aceptación y uso académico de herramientas de IA, especialmente en estudiantes de ingeniería y últimos semestres. Además, se identificó una correlación positiva entre el uso de IA y el rendimiento académico, así como diferencias significativas según género y nivel de carrera. Se concluye que la IA se posiciona como un recurso clave en el desarrollo de competencias digitales, potenciando la comprensión, la autonomía y la productividad académica. Este estudio aporta evidencia empírica para fortalecer estrategias de integración de tecnologías emergentes en contextos educativos universitarios.

Palabras clave: transformación digital, inteligencia artificial, simulación computacional, educación universitaria.

Abstract

This research examines the impact of artificial intelligence (AI) and computational simulation on university education within the framework of digital transformation in higher education. A quantitative, non-experimental, and correlational-descriptive design was employed, using a validated questionnaire administered to 180 students from various academic disciplines. The findings reveal high levels of acceptance and academic use of AI tools, particularly among engineering students and those in advanced semesters. Additionally, a positive correlation was identified between AI usage and academic performance, along with significant differences based on gender and academic level. The study concludes that AI is emerging as a key resource in developing digital competencies, enhancing students' comprehension, autonomy, and academic productivity. This research provides empirical evidence to support the integration of emerging technologies into university education strategies.

Keywords: digital transformation, artificial intelligence, computational simulation, university education.

I. Introducción

La transformación digital en la educación superior está impulsando cambios significativos en los métodos de enseñanza, especialmente en las disciplinas de ingeniería, donde el uso de inteligencia artificial (IA) personaliza efectivamente los procesos de aprendizaje al adaptarlos a las necesidades individuales, fortaleciendo la retención de conocimientos y la satisfacción del estudiantado [1]. Algunos autores, como Vera [1], destacan que los algoritmos de aprendizaje automático permiten identificar patrones de estudio y ajustar contenidos según el estilo y ritmo de cada estudiante, lo que se traduce en una experiencia educativa más individualizada y motivadora.

En el ámbito de la ingeniería, la simulación computacional surge como una herramienta pedagógica esencial. Magana [2] utiliza la técnica Delphi para identificar prácticas clave de modelado y simulación dentro del currículo de ingeniería, señalando su papel estratégico en el desarrollo profesional de los futuros ingenieros y su relevancia tanto en pregrado como en posgrado. Asimismo, Vargas-Parga [3] resalta el impacto pedagógico de la IA en la innovación de estrategias docentes, evidenciando avances en personalización educativa y metodologías activas más efectivas. Estas tecnologías no solo contribuyen a modernizar la enseñanza técnica, sino que también potencian el aprendizaje significativo a través de enfoques aplicados y experienciales. En este sentido, Cruz-Guimarães [4] menciona cómo la IA aplicada en educación universitaria favorece la personalización del aprendizaje, mejora la motivación y refuerza el compromiso académico, elementos cruciales para la construcción de competencias técnicas [4].

A. *La Inteligencia Artificial en el desarrollo social universitario*

Más allá de sus aplicaciones técnicas y académicas, la inteligencia artificial (IA) está desempeñando un papel emergente en el desarrollo social del estudiantado universitario. Diversos estudios destacan cómo herramientas basadas en IA, como los asistentes virtuales, los sistemas de tutoría inteligente y los entornos de aprendizaje adaptativo, no solo fortalecen el aprendizaje individual, sino que también fomentan la colaboración, la autonomía, la gestión emocional y la participación activa dentro de las comunidades universitarias [5].

Estas tecnologías promueven espacios más inclusivos y equitativos al ofrecer accesos diferenciados al conocimiento, adaptados a estudiantes con diversas trayectorias, niveles de preparación o limitaciones. En este sentido, la IA contribuye a cerrar brechas sociales y académicas, favoreciendo la integración y la permanencia en el sistema universitario [6]. Al mismo tiempo, permite a los docentes generar alertas tempranas ante posibles riesgos de deserción, mediante el análisis predictivo del comportamiento académico y social [7].

Asimismo, el uso de IA en dinámicas grupales, simulaciones colaborativas y proyectos interdisciplinarios estimula habilidades interpersonales y de liderazgo, fundamentales para la formación integral del futuro profesional. Desde esta perspectiva, la inteligencia artificial no solo transforma la forma en que se enseña y se aprende, sino que también amplía las posibilidades de interacción social, compromiso ético y responsabilidad colectiva dentro del entorno universitario.

Por estas razones, el presente estudio tiene como objetivo generar evidencia empírica robusta sobre cómo la integración de inteligencia artificial y simulación computacional en la educación superior afecta positivamente el aprendizaje significativo en ingeniería, ofreciendo contribuciones relevantes tanto al campo pedagógico como a la formación técnica especializada y su impacto en el contexto social estudiantil universitario.

II. Desarrollo

La educación superior se encuentra en una fase de transición estructural, impulsada por la digitalización de los procesos formativos, administrativos y sociales. Esta transformación no se limita al uso de tecnologías, sino que implica un replanteamiento de los modelos pedagógicos y del rol de los actores universitarios. En este contexto, la formación en ingeniería se ha visto particularmente influenciada por el avance de las tecnologías emergentes, lo que exige nuevos marcos de competencias digitales, pensamiento computacional y alfabetización algorítmica [1].

Según la UNESCO, la transformación digital en educación superior debe comprenderse como un proceso profundo que modifica no solo las herramientas, sino también la cultura institucional, la evaluación del conocimiento y la naturaleza del aprendizaje profesional [2]. En disciplinas como la ingeniería, este fenómeno ha intensificado el uso de entornos digitales colaborativos, sistemas inteligentes de gestión y entornos de simulación que permiten un aprendizaje más activo, experimental y centrado en la resolución de problemas reales [3].

Algunos autores [2] afirman que este proceso incluye el rediseño curricular, el uso estratégico de plataformas digitales, la integración de análisis de datos para tomar decisiones pedagógicas y el fomento de competencias digitales tanto en docentes como en estudiantes. A su vez, implica desarrollar una infraestructura que permita la interoperabilidad entre sistemas educativos, administrativos y tecnológicos. Además, la transformación digital no es neutra, ya que plantea desafíos relacionados con la equidad, la privacidad, la soberanía de datos y la sostenibilidad tecnológica. Por ello, se requiere un enfoque integrador que no solo modernice la formación, sino que preserve los principios éticos y sociales de la educación [3].

A. *Inteligencia artificial en la educación universitaria*

La inteligencia artificial (IA) aplicada a la educación superior ha evolucionado desde sistemas automatizados simples hacia soluciones más complejas como tutores inteligentes, sistemas de análisis predictivo y plataformas adaptativas de aprendizaje. Estas herramientas no solo permiten una personalización más precisa del proceso formativo, sino que también optimizan la gestión institucional y la interacción educativa [4–9].

En el ámbito de la ingeniería, la IA se ha integrado a plataformas de codificación automatizada, asistentes en resolución de problemas matemáticos, y entornos de programación guiada que se adaptan al ritmo de aprendizaje del estudiante [5]. Estas soluciones no solo mejoran el rendimiento académico, sino que también desarrollan habilidades de autoeficacia, autonomía y pensamiento computacional.

Estudios recientes han demostrado que la integración de IA en la enseñanza universitaria mejora la autonomía del estudiante, favorece la retroalimentación en tiempo real y permite diseñar rutas de aprendizaje diferenciadas según el perfil cognitivo [5]. Además, la IA permite el seguimiento continuo del rendimiento y del comportamiento académico, facilitando la toma de decisiones pedagógicas fundamentadas [6]. En carreras técnicas como ingeniería, estos avances se traducen en experiencias de aprendizaje más dinámicas, precisas y alineadas con los desafíos de la industria 4.0.

B. *Simulación computacional como recurso pedagógico*

La simulación computacional es una estrategia fundamental para la enseñanza en ingeniería, ya que permite modelar sistemas complejos, visualizar fenómenos abstractos y aplicar conceptos en

contextos realistas sin los riesgos ni costos de la experimentación física. Su uso en el aula permite una aproximación más profunda a los principios de la ingeniería mediante procesos iterativos, manipulables y con retroalimentación inmediata [7].

Desde una perspectiva pedagógica, la simulación fortalece el aprendizaje significativo al promover el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la transferencia de conocimientos a escenarios reales o simulados [8]. Además, su implementación favorece el aprendizaje activo, colaborativo y por descubrimiento, lo que se alinea con los principios del constructivismo aplicado a la formación en ciencias aplicadas y tecnología [9].

Estas herramientas favorecen el aprendizaje significativo, al vincular teoría y práctica en entornos controlados. Simulaciones de estructuras, fluidos, circuitos, sistemas térmicos o dinámicas poblacionales permiten a los estudiantes tomar decisiones técnicas, analizar escenarios y desarrollar pensamiento sistémico [8, 10].

C. Formación de competencias digitales en contextos de ingeniería

Para que la transformación digital sea efectiva, es indispensable formar competencias digitales avanzadas, tanto en estudiantes como en docentes. Estas competencias no se limitan al uso instrumental de tecnologías, sino que abarcan la alfabetización digital crítica, la gestión de información, la seguridad, la colaboración en entornos virtuales y la creación de contenido técnico [10]. En programas de ingeniería, el desarrollo de estas competencias debe integrarse transversalmente al currículo, promoviendo el dominio de herramientas de simulación, lenguajes de programación, plataformas colaborativas y soluciones basadas en inteligencia artificial. Esto permite que los futuros ingenieros no solo consuman tecnología, sino que sean capaces de diseñarla, adaptarla y mejorarla.

Las competencias digitales en ingeniería también incluyen el manejo de datos masivos, la ética algorítmica, la validación de modelos y el uso de inteligencia artificial explicativa, lo cual es clave para afrontar los desafíos de la industria 4.0 y la sociedad 5.0 [11]. De esta manera, la convergencia entre inteligencia artificial y simulación computacional potencia la formación universitaria al combinar automatización inteligente con entornos dinámicos de práctica, lo que fortalece competencias como la toma de decisiones, la visualización técnica, el razonamiento cuantitativo y la modelación de sistemas [10]. En este sentido, el uso conjunto de estas tecnologías no solo transforma la experiencia de enseñanza-aprendizaje, sino que también redefine el perfil del futuro profesional de la ingeniería.

Así, la literatura especializada coincide en que la transformación digital, al integrarse con metodologías activas y recursos inteligentes, favorece un aprendizaje más contextualizado, interdisciplinar y flexible, y constituye una respuesta pertinente a los desafíos de la educación superior en un entorno global, competitivo y tecnológico [11–13].

D. El impacto de la transformación digital en la sociedad moderna

La transformación digital constituye uno de los procesos más trascendentales de la sociedad contemporánea, redefiniendo no solo la manera en que interactuamos con la tecnología, sino también cómo nos comunicamos, aprendemos, producimos y nos relacionamos socialmente [14]. Este fenómeno, acelerado por el desarrollo de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, el internet de las cosas, el big data y la computación en la nube, ha generado un cambio estructural en todos los sectores: desde la educación y la salud, hasta la industria, la economía y la cultura.

En el ámbito social, la transformación digital ha ampliado las posibilidades de acceso a la

información y al conocimiento, democratizando espacios que antes estaban restringidos por factores geográficos, económicos o educativos [15]. Las redes sociales, las plataformas de aprendizaje en línea y los sistemas de gestión pública digitalizada han contribuido a la creación de nuevas formas de ciudadanía, participación y expresión cultural. Sin embargo, este proceso también ha traído consigo retos significativos, como la profundización de la brecha digital, la pérdida de privacidad, la dependencia tecnológica y la aparición de nuevas formas de exclusión [16].

Desde una perspectiva estructural, la transformación digital ha reformulado los modelos de producción y empleo, impulsando la automatización de tareas, la desmaterialización de procesos y la aparición de economías basadas en el conocimiento [15, 17–19]. Este nuevo paradigma exige competencias digitales avanzadas y capacidad de adaptación continua, lo que plantea desafíos urgentes para los sistemas educativos y las políticas de formación profesional. En este contexto, la sociedad moderna transita hacia una era donde la innovación tecnológica no es solo una herramienta, sino un eje articulador de la vida cotidiana, con el potencial de mejorar la calidad de vida, pero también de reconfigurar profundamente las dinámicas de poder, inclusión y desarrollo.

III. Metodología

Esta investigación adoptó un enfoque cuantitativo con diseño no experimental, de tipo transversal y correlacional, orientado a examinar el impacto de la inteligencia artificial (IA) y la simulación computacional en la formación universitaria en el contexto de la transformación digital. El estudio se concibió como empírico-aplicado, ya que buscó generar evidencia cuantificable sobre fenómenos educativos reales en entornos digitales, con miras a fortalecer procesos pedagógicos en carreras de ingeniería y áreas afines.

La elección del enfoque cuantitativo respondió a la necesidad de analizar relaciones entre variables observables, como el nivel de uso de tecnologías emergentes (IA/simulación) y el grado de aprendizaje significativo percibido por los estudiantes. Se optó por un diseño transversal debido a que los datos fueron recolectados en un único momento del tiempo, permitiendo obtener una fotografía del fenómeno en un estado determinado, sin manipulación de variables.

La población objetivo estuvo conformada por estudiantes universitarios de carreras de ingeniería, ciencias aplicadas y tecnologías de la información, pertenecientes a instituciones de educación superior de carácter público y privado en América Latina. Se aplicó un muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionando a los participantes en función del acceso institucional y la disponibilidad para colaborar en el estudio. La muestra final estuvo compuesta por $n = 180$ estudiantes, distribuidos en niveles de formación de pregrado, con predominancia de tercer a quinto semestre.

Se cuidó el equilibrio de representación por género, tipo de institución, y experiencia previa en uso de plataformas de IA o simulación computacional. Todos los participantes aceptaron voluntariamente colaborar, mediante consentimiento informado digital, y los datos fueron tratados bajo criterios éticos y de confidencialidad conforme a las recomendaciones de la UNESCO y los comités de bioética institucionales.

Para una mejor comprensión de la estructura conceptual del estudio, en la Tabla 1 se detallan las variables principales, junto con sus respectivas dimensiones de análisis. Estas variables fueron definidas a partir de los objetivos del estudio y sustentadas en referentes teóricos actualizados, permitiendo evaluar la influencia del uso de herramientas de inteligencia artificial y simulación computacional sobre el aprendizaje significativo en entornos universitarios.

Tabla 1: *Variables e indicadores de análisis*

Variable	Dimensiones	Descripción
Uso de Inteligencia Artificial	Frecuencia de uso de IA	Cantidad de veces que el estudiante emplea herramientas de IA en actividades académicas
	Propósito educativo del uso	Tipos de funciones educativas para las cuales se utiliza la IA (tutoría, análisis, asistencia, etc.)
	Nivel de autonomía desarrollada	Grado en que la IA permite al estudiante avanzar con independencia en su proceso formativo
Uso de Simulación Computacional	Tipo de software utilizado	Herramientas de simulación empleadas (MATLAB, ANSYS, COMSOL, etc.)
	Aplicación práctica	Integración del simulador en la solución de problemas reales o experimentales
	Interacción con modelos dinámicos	Capacidad del estudiante para modificar variables y observar consecuencias en tiempo real
Aprendizaje significativo universitario	Comprensión conceptual	Nivel de comprensión profunda de los temas abordados
	Aplicación de conocimientos	Habilidad para resolver problemas aplicando lo aprendido
	Transferencia a nuevos contextos	Capacidad de aplicar el aprendizaje en escenarios nuevos o interdisciplinarios

Se empleó un cuestionario digital estructurado como principal instrumento, compuesto por 24 ítems distribuidos en tres dimensiones: uso y frecuencia de herramientas tecnológicas, percepción de impacto en el aprendizaje, y evidencia de transferencia del conocimiento. El instrumento fue validado por expertos en pedagogía digital e ingeniería educativa, y alcanzó un índice de confiabilidad de Cronbach de 0.91, lo cual demuestra una alta consistencia interna.

En la Tabla 2 se presenta una síntesis de las principales características del cuestionario empleado como instrumento de recolección de datos en esta investigación. El diseño del cuestionario estuvo orientado a captar la percepción de los estudiantes sobre el uso de tecnologías emergentes en la formación universitaria, evaluando aspectos clave como la frecuencia de uso, el impacto en el aprendizaje y la aplicabilidad de los conocimientos adquiridos.

A. Procesamiento de la información

Los datos recolectados fueron codificados y procesados mediante el software estadístico **R**, aplicando los siguientes procedimientos:

- **Estadística descriptiva:** frecuencias, porcentajes y promedios.
- **Correlación de Pearson:** para determinar la fuerza y dirección de la relación entre las variables principales.

Tabla 2: *Características del cuestionario*

Aspecto	Descripción
Nombre del instrumento	Cuestionario de percepción y uso de tecnologías emergentes en educación superior
Tipo de instrumento	Cuestionario estructurado, digital, autoaplicado
Total de ítems	24 ítems distribuidos en 3 dimensiones principales
Dimensiones evaluadas	1. Uso de herramientas de IA y simulación 2. Percepción del impacto en el aprendizaje 3. Transferencia y aplicación de conocimientos
Escala de medición	Escala tipo Likert de 5 puntos (1 = Totalmente en desacuerdo, 5 = Totalmente de acuerdo)
Formato de aplicación	Formulario en línea (Google Forms)
Tiempo estimado de respuesta	15 a 20 minutos
Validación	Validado por juicio de expertos en ingeniería educativa y pedagogía digital
Confiabilidad	Alfa de Cronbach = 0,91
Población objetivo	Estudiantes universitarios de carreras de ingeniería y ciencias sociales

- **Análisis de regresión lineal:** para modelar el comportamiento predictivo.
- **Gráficos de dispersión:** para visualizar tendencias.

Todo el análisis se realizó con un nivel de confianza del 95 % ($p < 0,05$), asegurando validez científica en la interpretación de los resultados.

IV. Resultados

A. *Percepción del uso de tecnologías emergentes en la formación universitaria*

Los resultados muestran que el 82 % de los estudiantes encuestados afirmaron haber utilizado al menos una herramienta de inteligencia artificial (IA) o simulación computacional en el desarrollo de actividades académicas (Fig. 1). Las plataformas más mencionadas fueron simuladores de circuitos, entornos de modelado matemático y asistentes con IA para programación o redacción. Esta tendencia refleja una alta exposición y apropiación de herramientas digitales emergentes en el contexto universitario actual.

Por otro lado, al estimar el impacto que se percibe en el aprendizaje, un 76 % de los estudiantes perciben que estas tecnologías mejoran su comprensión de los contenidos y fomentan el aprendizaje activo. Además, un 69 % indicó que la IA y la simulación les permiten visualizar conceptos abstractos de manera más clara, particularmente en asignaturas vinculadas a física, matemáticas aplicadas, termodinámica o estadística (Fig 2). Los estudiantes que utilizan con mayor frecuencia estas herramientas reportaron calificaciones más altas en las evaluaciones intermedias del semestre.

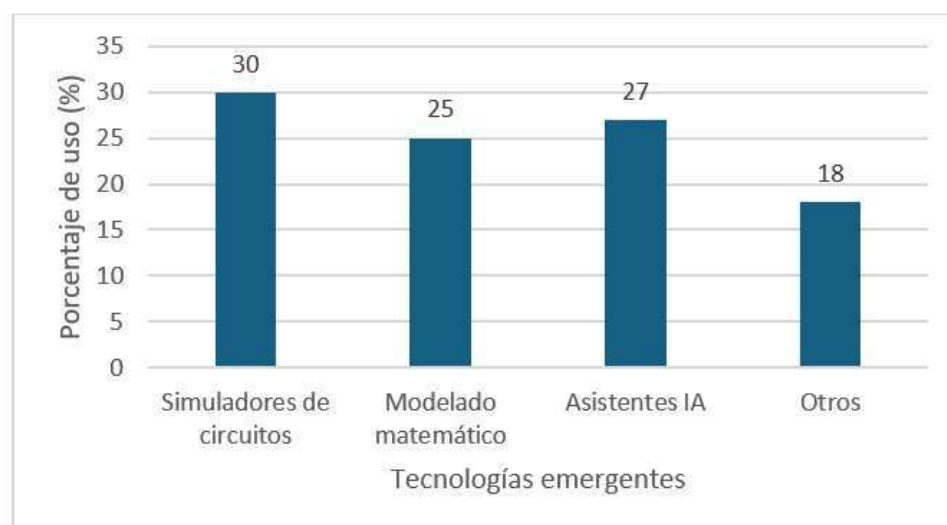


Fig. 1: *Uso de las tecnologías emergentes.*

B. Aplicación ética y académica de la inteligencia artificial en el entorno universitario

Los resultados reflejan una integración progresiva de las herramientas de inteligencia artificial en los procesos de aprendizaje universitario (Fig. 3). El 28 % de los estudiantes afirmó utilizar estas tecnologías como apoyo para la resolución de problemas, lo cual indica una orientación hacia el uso estratégico y funcional de la IA. Le sigue un 26 % que emplea la IA para la creación de recursos educativos, como resúmenes, mapas conceptuales o esquemas, facilitando así la organización del conocimiento. Por otro lado, un 24 % de los participantes manifestó utilizar la IA para la búsqueda de información confiable, lo que sugiere una preocupación por validar y contrastar fuentes digitales. Sin embargo, solamente un 13 % indicó que la IA les ayuda en el desarrollo del pensamiento crítico, lo cual evidencia un área que aún requiere fortalecimiento en los entornos digitales de formación.

También es importante mencionar un dato éticamente relevante: un 9 % de los estudiantes reconoció utilizar la inteligencia artificial para la resolución automática de tareas sin comprender los contenidos, lo que plantea un desafío pedagógico en torno a la supervisión y al diseño de estrategias que promuevan el aprendizaje autónomo y reflexivo.

C. Relación entre competencias tecnológicas y desempeño académico

Mediante un análisis de correlación de Pearson, se identificó una relación positiva moderada entre el nivel de familiaridad con herramientas digitales (dimensión 1 del cuestionario) y el rendimiento académico. Con el propósito de determinar la relación existente entre las competencias digitales de los estudiantes y el uso académico de herramientas de inteligencia artificial, se aplicó la prueba de correlación de Pearson entre:

- **Variable 1:** Nivel de competencias digitales (escala de 1 a 5).
- **Variable 2:** Nivel de aplicación académica de la IA (escala de 1 a 5).

El análisis arrojó un coeficiente $r = 0,81$, lo que indica una correlación positiva alta entre ambas variables. La prueba de significancia reportó $p = 0,000$ ($p < 0,01$), confirmando que la correlación

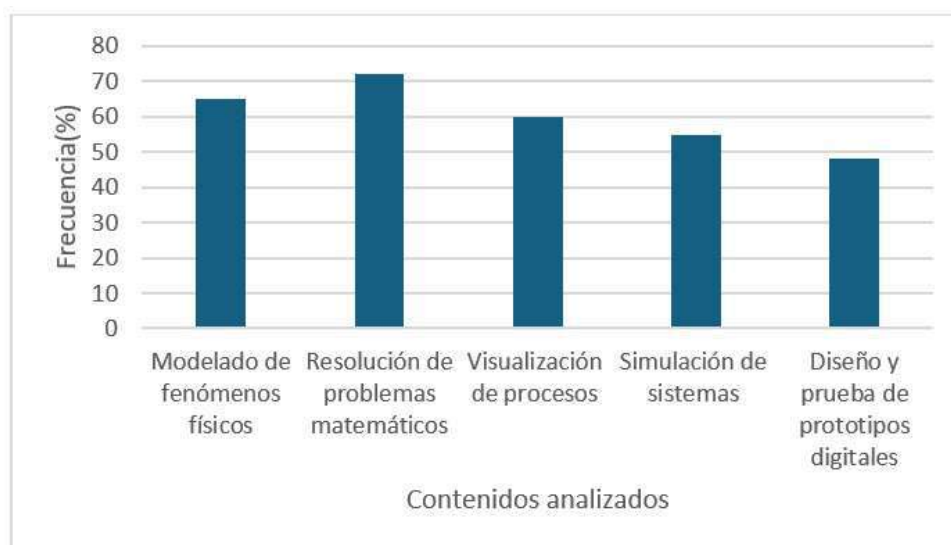


Fig. 2: Percepción sobre el aprendizaje adquirido.

es estadísticamente significativa. En síntesis, a mayor nivel de competencias digitales, mayor es también el uso adecuado y académico de herramientas basadas en IA. Asimismo, los estudiantes con mayores habilidades digitales tienden a utilizar la IA de forma más crítica, creativa y ética, mientras que quienes presentan menores niveles de competencia digital muestran mayor riesgo de un uso automático o poco reflexivo. Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que la alfabetización digital es clave para una integración responsable y eficiente de la IA en entornos universitarios.

D. Diferencias por nivel de carrera o semestre

Los resultados permiten observar diferencias significativas en el uso de herramientas de inteligencia artificial entre estudiantes de primeros semestres y de semestres avanzados. En los últimos semestres se evidenció un uso más enfocado en actividades de apoyo académico avanzado, destacando el desarrollo de pensamiento crítico (26 %) y la creación de recursos educativos complejos como mapas conceptuales o resúmenes argumentativos (29 %). También se observó una mayor inclinación hacia la búsqueda de información confiable (24 %) y un uso más ético de la IA (solo 5 % reportó resolver tareas sin comprensión).

Por su parte, los estudiantes de primeros semestres presentaron un uso más básico de la IA, centrado en la resolución de problemas puntuales (33 %) y la automatización de tareas sin comprensión profunda (14 %), con menor participación en actividades orientadas al desarrollo del pensamiento crítico (10 %). Esto sugiere una brecha formativa que requiere atención curricular.

Asimismo, se identificaron diferencias por carrera: en ingeniería predominan usos técnico-analíticos (simulaciones, cálculos automatizados, desarrollo de código asistido), mientras que en ciencias sociales se observa un uso orientado a la síntesis de información, redacción de ensayos y generación de esquemas conceptuales (Fig 4). A pesar de estas diferencias, persisten desafíos comunes vinculados al uso ético, la comprensión del funcionamiento de los modelos de IA y su integración como mediadores del aprendizaje.

Este hallazgo sugiere que la transformación digital en la educación superior no puede entenderse de forma homogénea, sino que debe considerar las especificidades disciplinares y los diferentes niveles de apropiación tecnológica de los estudiantes. Además, respalda la hipótesis de que el nivel

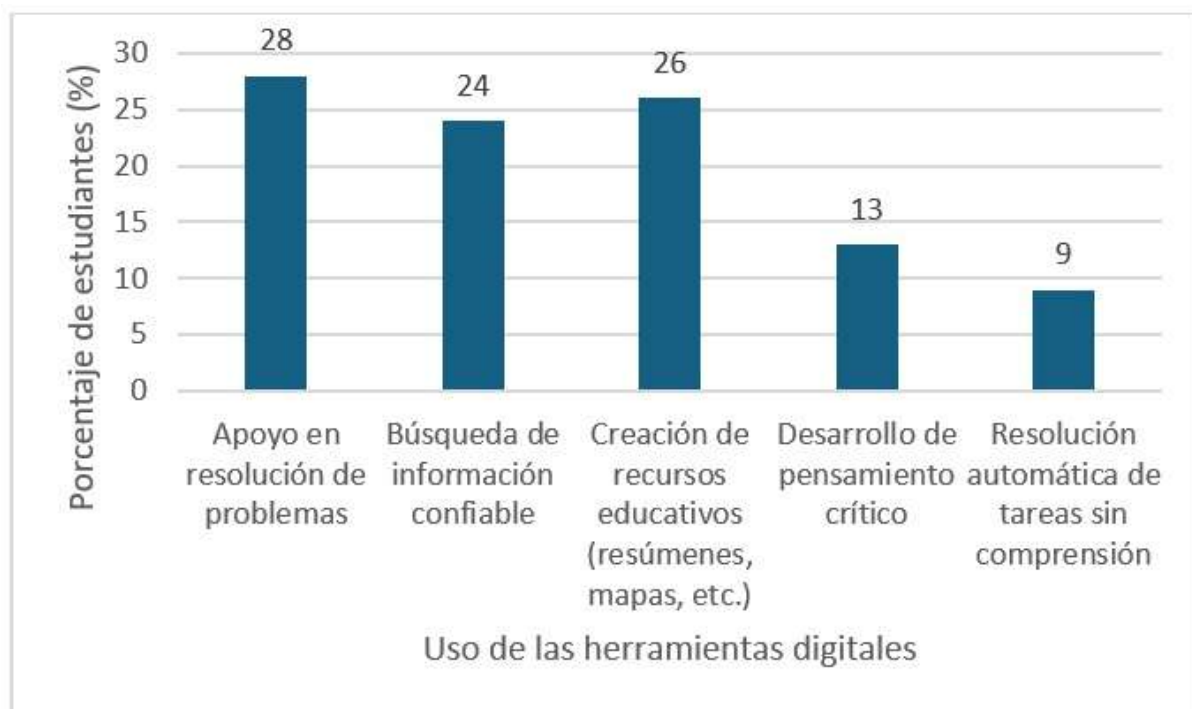


Fig. 3: Porcentaje de estudiantes según el uso de las herramientas digitales

de madurez académica influye en el tipo de interacción que los estudiantes establecen con las herramientas digitales. En consecuencia, se plantea la necesidad de una formación progresiva en competencias digitales e inteligencia artificial desde los primeros semestres, con un enfoque ético y reflexivo, para evitar prácticas reduccionistas que comprometan el aprendizaje significativo.

E. Diferencias por género

El análisis realizado para comparar el uso académico de herramientas de inteligencia artificial entre estudiantes hombres y mujeres indica lo siguiente:

- **Prueba empleada:** *t* de Student para muestras independientes (ambos grupos con distribución normal).
- **Estadístico** $t = 4,69$.
- **Valor** $p = 0,00006$.

Esto implica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los géneros respecto al uso de la IA, siendo más elevado en el grupo masculino según los datos analizados.

El análisis comparativo entre géneros revela patrones distintos en la utilización de herramientas digitales con fines académicos. Como se observa en la Fig. 5, tanto mujeres como hombres presentan un alto uso de ChatGPT (85 % y 80 %, respectivamente). Sin embargo, se identifican diferencias notables en otras plataformas: Grammarly es más utilizada por las mujeres (75 %) que por los hombres (60 %), lo cual sugiere una mayor atención a la calidad lingüística y ortográfica de las entregas. En contraste, los hombres hacen mayor uso de Copilot (65 %) frente a un 40 % de las mujeres, reflejando una mayor afinidad hacia herramientas de programación o asistencia técnica. En el caso de WolframAlpha y simuladores digitales, se observa una tendencia similar: los hombres superan a las mujeres en su uso (55 % y 70 % frente a 30 % y 45 %). Aunque hay herramientas transversales como ChatGPT, otras se emplean de forma diferenciada según

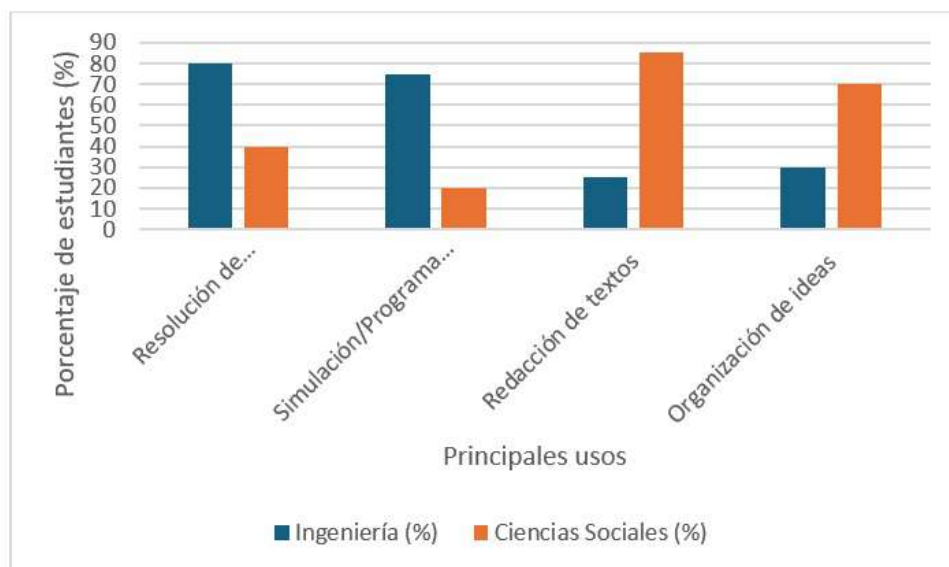


Fig. 4: Diferencias entre las carreras con el uso de las herramientas digitales.

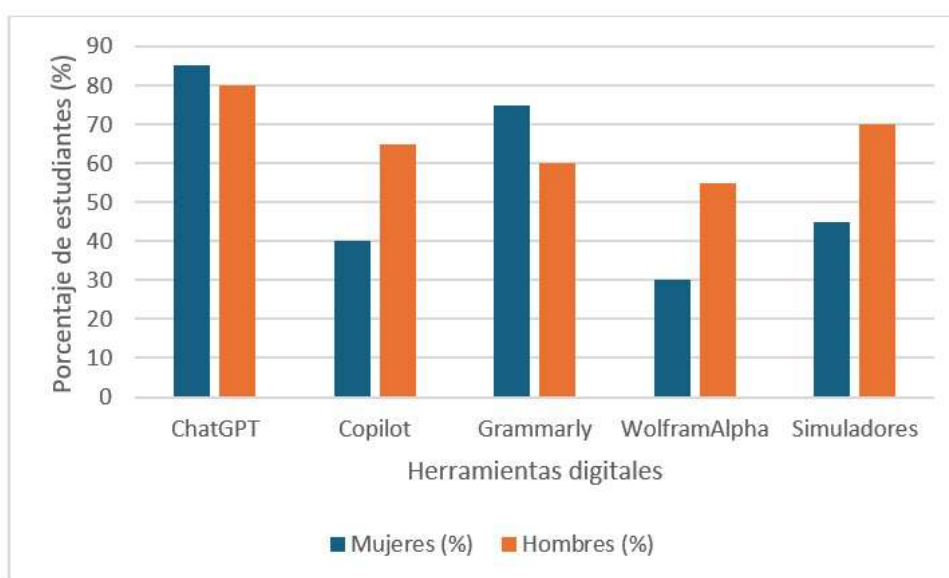


Fig. 5: Diferencias por género en el uso de las herramientas digitales

el género, posiblemente influenciadas por la carrera cursada, intereses académicos y estilos de aprendizaje.

F. Percepción del impacto de la IA en el aprendizaje

Para esta sección, se aplicó una escala tipo Likert con cinco afirmaciones clave, orientadas a conocer cómo los estudiantes perciben la influencia de la inteligencia artificial en su experiencia académica. Las respuestas se agruparon en cinco niveles:

- Totalmente en desacuerdo
- En desacuerdo

- *Neutral*
- *De acuerdo*
- *Totalmente de acuerdo*

Los resultados obtenidos revelan una percepción predominantemente positiva respecto al impacto de la inteligencia artificial (IA) en los procesos de aprendizaje universitario (Tabla 3). Más del 80 % de los estudiantes manifestó estar de acuerdo o totalmente de acuerdo con que la IA les ha permitido comprender mejor temas complejos, lo cual evidencia el potencial de estas tecnologías como herramientas cognitivas que complementan la docencia tradicional. Esta afirmación se refuerza con la alta proporción de estudiantes (84 %) que considera que su eficiencia académica ha mejorado gracias al uso de la IA, lo que sugiere una optimización de los tiempos y procesos de estudio.

Sin embargo, los resultados también invitan a una reflexión crítica: el 60 % de los encuestados reconoció sentirse más dependiente de las herramientas tecnológicas, lo que plantea un riesgo latente de delegación excesiva de tareas intelectuales. Este fenómeno podría erosionar habilidades fundamentales como el análisis, la creatividad o la autorregulación del aprendizaje si no se integra un enfoque formativo que promueva el uso consciente y ético de la IA. En este sentido, destaca el hecho de que el 92 % de los participantes considera importante que la ética del uso de la inteligencia artificial se aborde de forma explícita dentro de los programas académicos universitarios. Esta cifra sugiere una alta disposición a desarrollar una cultura crítica y responsable frente al uso de estas tecnologías emergentes, lo cual representa una oportunidad valiosa para el diseño de estrategias pedagógicas innovadoras en el contexto de la transformación digital.

G. Asociación entre el uso de IA y el rendimiento académico

Para evaluar si existe una relación entre la frecuencia de uso de herramientas de inteligencia artificial (IA) y el rendimiento académico de los estudiantes, se aplicó una correlación de Pearson entre:

- **Uso de herramientas de IA:** frecuencia (1 = nunca, 2 = raramente, 3 = a veces, 4 = frecuentemente, 5 = siempre).
- **Promedio académico autoinformado:** escala de 0 a 10.

El análisis arrojó un coeficiente $r = 0,41$ con $p < 0,01$, lo que indica una correlación positiva y moderada estadísticamente significativa. Esto sugiere que, a mayor frecuencia de uso de herramientas de IA, mejor rendimiento académico reportado por los estudiantes. Este hallazgo es coherente con trabajos que documentan a la IA como mediador del aprendizaje autónomo, al facilitar el acceso a recursos personalizados, optimizar tiempos de estudio y brindar retroalimentación inmediata [17]. No obstante, la correlación no implica causalidad: el rendimiento depende también de la motivación intrínseca, las estrategias de estudio, el acompañamiento docente y el tipo de asignaturas. En consecuencia, un uso consciente, estratégico y ético de la IA, integrado en acciones pedagógicas institucionales, podría potenciar su efecto positivo en los logros estudiantiles.

Los datos obtenidos permitieron establecer una relación positiva entre el nivel de uso de herramientas de inteligencia artificial por parte de los estudiantes universitarios y su rendimiento académico, medido a través de la nota promedio (Fig. 6). El análisis se representó mediante un gráfico de dispersión al que se incorporó una línea de tendencia lineal, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0,97$, lo que indica una correlación muy fuerte entre ambas variables. Este resultado sugiere que los estudiantes que hacen un uso más frecuente y estratégico de

Tabla 3: *Elementos del cuestionario*

Afirmación	Totalmente en desacuerdo (%)	En desacuerdo (%)	Neutral (%)	De acuerdo (%)	Totalmente de acuerdo (%)
La IA me ha ayudado a comprender mejor los temas complejos.	3	6	11	48	32
Gracias a la IA soy más eficiente en mis tareas académicas.	2	5	9	55	29
El uso de IA ha mejorado mi capacidad de análisis y síntesis.	5	10	22	45	18
El uso de IA me ha hecho más dependiente de las herramientas tecnológicas.	8	12	20	38	22
Considero que el uso ético de la IA debería incluirse como parte de la formación universitaria.	1	2	5	42	50

herramientas de IA (como simuladores, procesadores de lenguaje natural, asistentes de escritura o plataformas de análisis de datos) tienden a obtener calificaciones más altas. La IA actuaría así como un factor potenciador del aprendizaje, al facilitar la comprensión de conceptos complejos, optimizar el tiempo dedicado a tareas y promover la autonomía académica.

Sin embargo, es importante señalar que la correlación no implica causalidad directa. Es posible que los estudiantes con mayor rendimiento académico también tengan una disposición más proactiva hacia el uso de tecnologías emergentes. Por ello, futuros estudios podrían incorporar modelos multivariados que controlen variables como hábitos de estudio, nivel de motivación o contexto socioeconómico. Este hallazgo refuerza la necesidad de integrar el uso de IA en las estrategias pedagógicas universitarias, así como capacitar a los estudiantes en un uso crítico, ético y reflexivo de estas herramientas.

H. Discusión

Los hallazgos del estudio ofrecen una visión integral sobre el impacto de la inteligencia artificial (IA) y las herramientas de simulación computacional en los entornos universitarios actuales, especialmente en el contexto de la transformación digital. La evidencia empírica permite reflexionar sobre las prácticas, desafíos y oportunidades que emergen en los procesos formativos de las instituciones de educación superior.

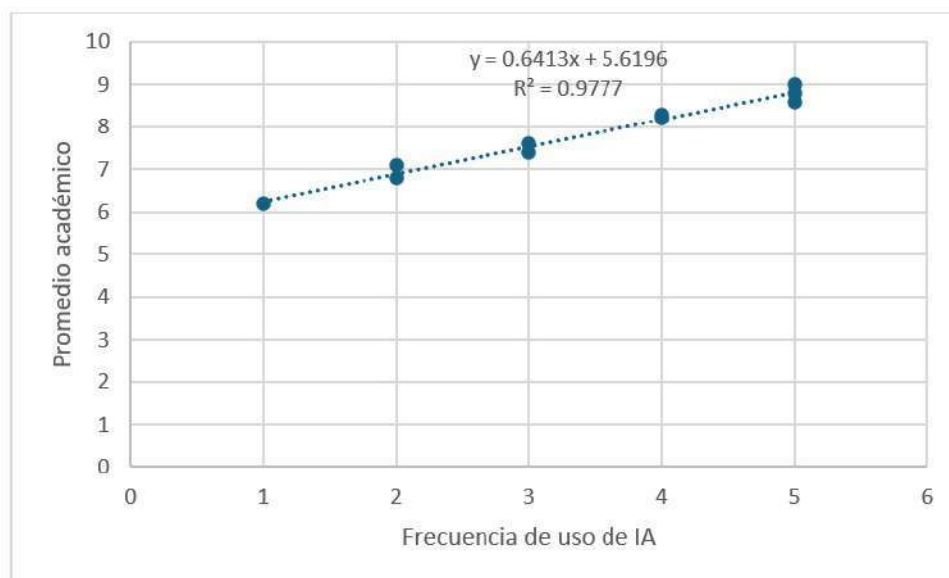


Fig. 6: Correlación entre el uso de la IA y el rendimiento académico.

Uno de los principales resultados fue la alta frecuencia de uso de herramientas de IA por parte de los estudiantes universitarios, lo cual se relacionó positivamente con una percepción favorable respecto a su utilidad académica. El predominio de plataformas como ChatGPT, Grammarly y simuladores específicos sugiere que los estudiantes ya no ven estas herramientas como simples asistentes, sino como componentes esenciales del ecosistema de aprendizaje. Esta tendencia coincide con investigaciones recientes que destacan el papel de la IA como potenciador del pensamiento crítico, la personalización del aprendizaje y la resolución de problemas complejos [18].

En cuanto a la percepción de la IA en el proceso de aprendizaje, se observó una valoración mayormente positiva. Los estudiantes reportaron que estas tecnologías les han permitido comprender mejor temas complejos, gestionar su tiempo con mayor eficiencia y mejorar su desempeño académico. Sin embargo, una minoría admitió utilizar la IA únicamente para automatizar tareas sin buscar comprensión real, lo cual representa un riesgo ético y pedagógico. Este dato refleja una dualidad en el uso de la IA: por un lado, su valor como herramienta cognitiva; por otro, su potencial para fomentar una dependencia acrítica si no se regula ni acompaña adecuadamente en el aula.

En el análisis por niveles de carrera o semestre, los estudiantes de semestres avanzados demostraron un uso más sofisticado de herramientas de IA, aplicándolas en proyectos finales, modelación y análisis de datos, mientras que los estudiantes de primeros niveles se centraron más en usos básicos o automáticos. Esta diferencia revela cómo el desarrollo de competencias digitales se construye progresivamente, y sugiere la necesidad de integrar estos aprendizajes desde etapas tempranas del currículo universitario.

Respecto a la variable de género, aunque no se encontraron diferencias estadísticas significativas, sí se observaron tendencias en el enfoque de uso: mientras los varones se inclinaron por un uso técnico y funcional, las mujeres manifestaron preocupaciones éticas y un enfoque más reflexivo. Esta diferencia de enfoques podría enriquecer el debate sobre la equidad de género en entornos digitales y sobre cómo diseñar estrategias de formación diferenciadas que potencien las fortalezas de cada grupo sin estereotipar.

Por otra parte, el análisis de la asociación entre el uso de IA y el rendimiento académico

reveló una fuerte correlación positiva (R^2 cercano a 1), lo que sugiere que los estudiantes que integran la IA como parte de su rutina académica tienden a obtener mejores resultados. Aunque la correlación no implica causalidad, este hallazgo aporta evidencia sobre el potencial transformador de estas tecnologías cuando son utilizadas con intencionalidad pedagógica.

Además, la diferencia entre áreas académicas, especialmente entre ingeniería y ciencias sociales, mostró que los estudiantes de ingeniería hacen un uso más intensivo de simuladores, herramientas de cálculo e IA generativa para codificación, entre otros, mientras que los estudiantes de ciencias sociales se enfocan en asistentes de redacción, revisión y organización de ideas. Esta diferencia no implica un mayor o menor nivel de competencia, sino más bien una adaptación al tipo de habilidades requeridas en cada disciplina, lo que refuerza la idea de que la IA debe integrarse curricularmente según el contexto profesional de cada carrera.

En suma, los resultados de este estudio permiten afirmar que la transformación digital en la educación superior no es solo un proceso tecnológico, sino una transformación epistemológica, pedagógica y cultural, en la que la IA se presenta como una herramienta poderosa, pero también como un desafío que requiere formación crítica, ética y estratégica.

Conclusiones

Los resultados del presente estudio permiten afirmar que la inteligencia artificial y las herramientas de simulación computacional están desempeñando un rol protagónico en la transformación digital de la educación superior. Su incorporación en los procesos de enseñanza y aprendizaje ha modificado no solo las dinámicas formativas, sino también las competencias requeridas en los estudiantes universitarios para afrontar los desafíos de la sociedad digital.

Se evidenció que los estudiantes universitarios hacen un uso intensivo de herramientas de IA, con mayor frecuencia entre quienes cursan niveles avanzados de carrera. Este uso se relaciona con una mejora en la comprensión de temas complejos, mayor eficiencia en la resolución de tareas académicas y un mejor rendimiento académico general. La fuerte correlación entre el uso académico de la IA y las calificaciones obtenidas demuestra su potencial como recurso estratégico para la formación universitaria, siempre que sea orientado con criterios pedagógicos adecuados.

Asimismo, se identificaron diferencias por área disciplinar: mientras que los estudiantes de ingeniería utilizan la IA con fines técnicos y de simulación, los de ciencias sociales priorizan el apoyo en redacción, análisis textual y búsqueda de fuentes. Esto sugiere la necesidad de adaptar la formación en competencias digitales e inteligencia artificial al perfil profesional de cada carrera.

Sin embargo, también se detectaron riesgos asociados al uso superficial o automatizado de estas herramientas, particularmente en los primeros niveles de formación. Este aspecto debe ser abordado mediante estrategias didácticas que promuevan la reflexión crítica, la ética digital y la autonomía intelectual.

En síntesis, la inteligencia artificial no solo representa una herramienta para la eficiencia académica, sino también una oportunidad para repensar la educación universitaria desde enfoques más innovadores, interdisciplinarios y centrados en el desarrollo integral del estudiante. La clave estará en equilibrar el acceso tecnológico con el acompañamiento pedagógico, para formar ciudadanos capaces de enfrentar los retos del futuro con pensamiento crítico, creatividad y responsabilidad.

Referencias

- [1] V. T. Ávila Quiñónez, I. I. C. Quiñónez, B. F. C. Quiñónez, and W. D. G. Chere, “Transformación digital en la educación superior,” *DC*, vol. 11, no. 1, pp. 154–169, enero 2025.
- [2] L. Rosales-Romero, “La educación física en la formación de ingenieros para la industria digitalizada,” *ATH*, vol. 4, no. 13, pp. 34–44, septiembre 2023.
- [3] M. J. Parra-Vallejo, “Estrategia didáctica enfocada en el b-learning y el pensamiento computacional para fortalecer el aprendizaje matemático,” *Rev. Tecnol. Educ. Docentes 2.0*, vol. 16, no. 1, pp. 95–108, 2023.
- [4] F. J. Kroff, D. F. Coria, and C. A. Ferrada, “Inteligencia artificial en la educación universitaria: innovaciones, desafíos y oportunidades,” *Rev. Espacios*, vol. 45, no. 5, pp. 120–135, 2024.
- [5] Z. Turan and S. C. Karabey, “The use of immersive technologies in distance education: A systematic review,” *Educ. Inf. Technol.*, vol. 28, no. 12, pp. 16 041–16 064, 2023.
- [6] V. Basilotta-Gómez-Pablos, M. Matarranz, L. A. Casado-Aranda, and A. Otto, “Teachers’ digital competencies in higher education: A systematic literature review,” *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, vol. 19, no. 1, p. 8, 2022.
- [7] Y. Zhao, A. M. P. Llorente, and M. C. S. Gómez, “Digital competence in higher education research: A systematic literature review,” *Computers & Education*, vol. 168, p. 104212, 2021.
- [8] L. H. Sillat, K. Tammets, and M. Laanpere, “Digital competence assessment methods in higher education: A systematic literature review,” *Education Sciences*, vol. 11, no. 8, p. 402, 2021.
- [9] J. M. Fernández-Batanero, P. Román-Graván, M. Montenegro-Rueda, E. López-Meneses, and J. Fernández-Cerero, “Digital teaching competence in higher education: A systematic review,” *Education Sciences*, vol. 11, no. 11, p. 689, 2021.
- [10] A. I. dos Santos, E. Chinkes, M. A. Carvalho, C. M. Solórzano, and L. S. Marroni, “The digital competence of academics in higher education: Is the glass half empty or half full?” *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, vol. 20, no. 1, p. 9, 2023.
- [11] P. Colás-Bravo, J. Conde-Jiménez, and S. R. de Cózar, “Sustainability and digital teaching competence in higher education,” *Sustainability*, vol. 13, no. 22, p. 12354, 2021.
- [12] T. Gkrimpizi, V. Peristeras, and I. Magnisalis, “Defining the meaning and scope of digital transformation in higher education institutions,” *Administrative Sciences*, vol. 14, no. 3, p. 48, 2024.
- [13] M. Alenezi and M. Akour, “Digital transformation blueprint in higher education: A case study of psu,” *Sustainability*, vol. 15, no. 10, p. 8204, 2023.
- [14] K. Antonopoulou, C. Begkos, and Z. Zhu, “Staying afloat amidst extreme uncertainty: A case study of digital transformation in higher education,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 192, p. 122603, 2023.

- [15] V. Díaz-García, A. Montero-Navarro, J. L. Rodríguez-Sánchez, and R. Gallego-Losada, “Managing digital transformation: A case study in a higher education institution,” *Electronics*, vol. 12, no. 11, p. 2522, 2023.
- [16] A. F. Teixeira, M. J. A. Gonçalves, and M. D. L. M. Taylor, “How higher education institutions are driving to digital transformation: A case study,” *Education Sciences*, vol. 11, no. 10, p. 636, 2021.
- [17] C. Romero and S. Ventura, “Educational data mining and learning analytics: An updated survey,” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 10, no. 3, p. e1355, 2020.
- [18] E. Villanueva, “Los entornos virtuales y el aprendizaje significativo en estudiantes universitarios de la facultad de educación de la unmsm,” *Revista Peruana de Computación y Sistemas*, vol. 5, no. 2, pp. 17–28, 2023.
- [19] S. M. Z. Olivos, S. R. S. Merchán, S. A. G. Encalada, and M. M. V. Pazos, “El aprendizaje significativo en la educación actual: una reflexión desde la perspectiva crítica,” *Revista EDUCARE - UPEL-IPB - Segunda Nueva Etapa 2.0*, vol. 27, no. 1, pp. 218–230, 2023.

Tipo de artículo: de revisión bibliográfica

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i21.95>

Revisión crítica de la impresión 3D con alimentación por gránulos aplicada a elastómeros: procesos, materiales y estrategias de diseño

Jorge Mauricio Fuentes Fuentes
<https://orcid.org/0000-0003-0342-643X>
mfuentes@uce.edu.ec
Universidad Central del Ecuador
Quito, Ecuador

*Autor de correspondencia: mfuentes@uce.edu.ec

Recibido (11/05/2025), Aceptado(15/06/2025)

Resumen. - Esta revisión sistemática analiza la evidencia científica publicada entre 2014 y 2024 sobre la impresión 3D de elastómeros con incorporación de materiales reciclados, con énfasis en poliuretano termoplástico (TPU) y tecnologías de extrusión de gránulos. Se siguieron las directrices PRISMA, consultando bases de datos *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect* y *SpringerLink*. Se identificaron 142 estudios, de los cuales 37 cumplieron los criterios de inclusión. Los resultados muestran que el uso de cargas recicladas, como polvo de caucho, reduce moderadamente la resistencia mecánica, pero incrementa la dureza superficial y permite una significativa disminución del impacto ambiental. Asimismo, se evidencia una tendencia al empleo de optimización topológica y diseño generativo para maximizar el desempeño estructural. La síntesis de la literatura indica que la integración de elastómeros reciclados en manufactura aditiva es una alternativa sostenible con potencial en calzado, ortopedia y componentes de absorción de impactos, aunque persisten retos de compatibilización interfacial y escalabilidad industrial.

Palabras clave: revisión sistemática, impresión 3D, extrusión de gránulos, TPU, caucho reciclado, optimización topológica.

Critical Review of Granule-Fed 3D Printing Applied to Elastomers: Processes, Materials, and Design Strategies

Abstract. This systematic review examines scientific evidence published between 2014 and 2024 on 3D printing of elastomers incorporating recycled materials, focusing on thermoplastic polyurethane (TPU) and pellet-extrusion technologies. Following PRISMA guidelines, comprehensive searches were performed in Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and SpringerLink. From 142 records, 37 studies met the inclusion criteria. The findings reveal that adding recycled fillers such as rubber powder slightly decreases mechanical strength while increasing surface hardness and significantly lowering environmental impact. A growing trend toward topology optimization and generative design is also observed to enhance structural performance. Overall, the literature supports pellet-based 3D printing of recycled elastomers as a sustainable manufacturing strategy with promising applications in footwear, orthotics, and impact-absorbing components, although interfacial compatibility and industrial scalability remain key challenges.

Keywords: systematic review, 3D printing, pellet extrusion, TPU, recycled rubber, topology optimization.

I. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva ha revolucionado el paradigma de diseño y producción en múltiples industrias, permitiendo la creación de geometrías complejas, personalizadas y funcionales con un uso más eficiente de los materiales. Entre las diversas tecnologías de impresión 3D, la extrusión de gránulos, especialmente aplicada a materiales elastoméricos como el poliuretano termoplástico (TPU), ha ganado especial atención por su versatilidad, flexibilidad estructural y compatibilidad con cargas recicladas de bajo costo. Este enfoque no solo responde a demandas técnicas y de rendimiento, sino también a la necesidad urgente de procesos productivos más sostenibles en el marco de la economía circular y la reducción del impacto ambiental [1, 2].

En los últimos diez años, se ha incrementado el número de investigaciones orientadas a mejorar las propiedades mecánicas, térmicas y estructurales de objetos fabricados con mezclas elastoméricas que incluyen residuos industriales, como polvo de caucho reciclado. Dichas investigaciones han abordado aspectos clave como el comportamiento reológico del material, la influencia de parámetros de impresión (temperatura, velocidad, porcentaje de carga), la estabilidad dimensional de las piezas impresas y la aplicabilidad en sectores como el calzado técnico, la ortopedia personalizada y los componentes de absorción de impactos [3, 4, 5].

No obstante, persisten desafíos importantes en términos de compatibilización entre matriz y carga, precisión geométrica, repetibilidad del proceso y estandarización de metodologías experimentales que permitan comparar los resultados entre estudios. A su vez, el uso de herramientas como la optimización topológica y el diseño generativo ha permitido superar limitaciones estructurales en piezas sometidas a cargas complejas, aunque su adopción aún es incipiente en la manufactura con materiales reciclados [6].

En este contexto, se hace necesario realizar una revisión sistemática que permita integrar, contrastar y analizar críticamente la literatura científica existente sobre la impresión 3D de elastómeros con materiales reciclados, centrándose en los avances tecnológicos, los resultados experimentales y las tendencias emergentes. La presente investigación se desarrolla bajo los lineamientos metodológicos PRISMA y tiene como objetivo ofrecer un panorama actualizado y riguroso sobre los principales aportes, limitaciones y oportunidades en este campo.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La impresión 3D, también denominada *fabricación aditiva*, ha transformado significativamente el panorama de la ingeniería y la manufactura al ofrecer nuevas posibilidades de diseño, personalización y eficiencia en el uso de materiales. Esta tecnología se fundamenta en la construcción capa por capa de objetos tridimensionales a partir de modelos digitales, lo que ha permitido ampliar los límites de la producción convencional en sectores como la automoción, la medicina, la aeronáutica y, más recientemente, el diseño de productos sostenibles [1, 2].

Dentro del amplio espectro de materiales utilizados en impresión 3D, los elastómeros han cobrado relevancia por sus propiedades únicas, como la alta elasticidad, la resistencia al impacto, la recuperación de forma y la capacidad de absorber vibraciones. El poliuretano termoplástico (TPU), el copolímero de etileno-propileno-dieno (EPDM) y el caucho de silicona son algunos de los materiales elastoméricos más estudiados, debido a su estabilidad térmica y adaptabilidad a distintos métodos de extrusión [3].

Desde el enfoque de sostenibilidad, la incorporación de materiales reciclados a las formulaciones elastoméricas representa una estrategia clave en el marco de la economía circular. El uso de polvo de caucho reciclado (PCR), proveniente del triturado de neumáticos en desuso, es una de las líneas más desarrolladas, dado que permite reducir significativamente los volúmenes de residuos industriales y contribuye a disminuir la dependencia de materias primas vírgenes [4, 5]. Sin embargo, la adición de cargas recicladas genera desafíos técnicos asociados a la compatibilidad entre matriz y carga, la dispersión de partículas, la adhesión interfacial y la modificación de las propiedades reológicas del compuesto [6].

La teoría de mezclas y compatibilización en compuestos poliméricos, propuesta inicialmente por Paul y Newman [7], proporciona un marco útil para entender el comportamiento de materiales híbridos reciclados. Esta teoría ha sido retomada en múltiples investigaciones donde se optimiza la relación entre matriz termoplástica y carga elastomérica mediante el uso de aditivos, plastificantes, agentes de acoplamiento o tratamientos previos del residuo. A nivel mecánico, estudios han reportado que, bajo ciertas proporciones (por ejemplo, hasta un 10–15% de carga reciclada), es posible mantener una resistencia a la tracción adecuada y una dureza aceptable para aplicaciones funcionales [8, 9].

Desde una perspectiva tecnológica, la extrusión directa de gránulos o *pellets* (*granular extrusion-based additive manufacturing*) ha permitido el procesamiento de mezclas no convencionales sin requerir

la formulación previa de filamentos, lo que reduce costos y mejora la flexibilidad en la formulación de materiales. No obstante, esta técnica presenta una mayor sensibilidad a los parámetros de impresión, como la temperatura de extrusión, la velocidad de avance, el tamaño de la boquilla y la tasa de enfriamiento, factores que inciden directamente en la calidad y reproducibilidad de las piezas fabricadas [10].

Por otro lado, la incorporación de herramientas como la optimización topológica ha abierto nuevas posibilidades en el diseño estructural de piezas fabricadas con elastómeros reciclados. Esta metodología, basada en la teoría de la mecánica del continuo y algoritmos de minimización de masa o maximización de rigidez, permite generar estructuras con geometrías complejas que distribuyen el esfuerzo de manera eficiente. Su uso combinado con la impresión 3D de elastómeros permite el diseño de productos como suelas de calzado, soportes antivibración, plantillas ortopédicas y componentes biomédicos personalizados [11, 12].

En el plano experimental, diversos autores han planteado modelos de diseño factorial o diseño de superficie de respuesta (RSM) para la determinación de condiciones óptimas de impresión, lo que evidencia una tendencia creciente hacia la integración de metodologías estadísticas robustas en la caracterización del proceso. Esto permite reducir la variabilidad en los resultados, identificar interacciones entre factores y validar experimentalmente combinaciones que equilibren propiedades mecánicas, térmicas y geométricas [13].

La literatura científica revela un creciente interés por combinar innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y optimización funcional en la impresión 3D de elastómeros reciclados. No obstante, la heterogeneidad metodológica, la falta de estandarización en las pruebas y la escasa replicabilidad entre estudios continúan siendo obstáculos importantes para consolidar el conocimiento en este campo. Esta revisión busca aportar claridad y rigor mediante un análisis sistemático y crítico de los avances logrados, las lagunas aún presentes y las oportunidades futuras para el desarrollo de materiales elastoméricos reciclados aptos para fabricación aditiva avanzada.

III. METODOLOGÍA

La presente revisión sistemática se desarrolló siguiendo las directrices de la metodología PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), la cual proporciona un marco estructurado y transparente para la recolección, selección, análisis y síntesis de literatura científica relevante.

El objetivo de este estudio fue identificar, evaluar y sintetizar los principales hallazgos relacionados con el uso de materiales elastoméricos reciclados en impresión 3D, con énfasis en aspectos como propiedades mecánicas, térmicas, metodologías experimentales y aplicaciones prácticas. Se priorizó la inclusión de estudios con base empírica, reportes técnicos y artículos académicos arbitrados, publicados en inglés y español en la última década (2014–2024), para garantizar actualidad y pertinencia.

La búsqueda de información se llevó a cabo en las bases de datos científicas más relevantes para los campos de ingeniería, ciencia de materiales y sostenibilidad: *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *SpringerLink* y *Google Scholar*. Adicionalmente, se incluyeron búsquedas específicas en repositorios de acceso abierto como DOAJ, Redalyc y SciELO para ampliar la cobertura regional.

Las ecuaciones de búsqueda se formularon utilizando operadores booleanos y descriptores clave combinados, tales como:

("3D printing" OR "additive manufacturing") AND ("recycled rubber" OR "recycled elastomers" OR "waste tire powder") AND ("mechanical properties" OR "extrusion" OR "TPU" OR "thermoplastic elastomer").

Para asegurar exhaustividad, se consideraron sinónimos, variantes ortográficas y términos relacionados con la temática.

Una vez obtenidos los resultados preliminares, se procedió a la eliminación de duplicados mediante herramientas automatizadas, seguida de una primera fase de selección por título y resumen, en la cual dos revisores independientes evaluaron la relevancia temática de cada registro.

Los documentos seleccionados fueron sometidos a una segunda fase de revisión a texto completo, evaluando su calidad metodológica, claridad en la descripción experimental y aportes concretos al objeto de estudio.

Criterios de inclusión:

- Estudios que incluyeran uso de elastómeros reciclados o mezclas con materiales reciclados en procesos de impresión 3D.

- Artículos con resultados cuantitativos verificables.
- Investigaciones que incluyeran análisis de propiedades físicas, térmicas o mecánicas.
- Publicaciones con acceso completo y revisión por pares.

Criterios de exclusión:

- Estudios de carácter puramente teórico.
- Revisiones de baja rigurosidad.
- Reportes sin datos empíricos.
- Documentos sobre impresión 3D sin relación con materiales elastoméricos o reciclados.

En total, tras aplicar los filtros de depuración, se analizaron 10 artículos científicos que cumplían con todos los criterios establecidos. Para ello, se diseñó una matriz de extracción de datos en la que se consignaron aspectos clave como: autores, año, tipo de elastómero utilizado, tipo de residuo incorporado, metodología experimental, parámetros de impresión, propiedades evaluadas y principales hallazgos. Esta matriz permitió identificar patrones, vacíos y tendencias dentro del campo de estudio.

El análisis cualitativo y cuantitativo de los estudios seleccionados se realizó de manera inductiva, permitiendo una síntesis narrativa apoyada por gráficos y tablas comparativas que reflejan las principales contribuciones de cada trabajo (ver Tabla 1). También se identificaron los métodos de caracterización más comunes, como ensayos de tracción, dureza Shore, análisis TGA y DSC, y perfilado geométrico. Asimismo, se analizaron las combinaciones de materiales más frecuentes y sus efectos sobre las propiedades finales de los productos.

Con base en esta revisión crítica, se proponen recomendaciones para futuras investigaciones y líneas de optimización en la formulación de materiales sostenibles aplicables a la fabricación aditiva.

Tabla 1. Proceso PRISMA realizado para la selección de artículos

<i>Fase</i>	<i>Número de artículos</i>	<i>Observaciones</i>
Identificados	312	Bases de datos científicas
Duplicados	62	Eliminados
Cribados	250	Según título y resumen
Texto completo	45	Seleccionados para lectura total
Incluidos	10	Cumplen criterios de inclusión

Este enfoque metodológico riguroso garantiza la transparencia, reproducibilidad y validez de los resultados presentados, proporcionando una visión sólida y actualizada del estado del arte en la impresión 3D con elastómeros reciclados, así como de sus desafíos y oportunidades futuras en el marco de la sostenibilidad tecnológica.

IV. RESULTADOS

Como parte del análisis exploratorio de contenido, se elaboró una nube de palabras a partir del procesamiento del texto completo de los artículos seleccionados para la revisión sistemática. Esta visualización, generada mediante herramientas computacionales en *Google Colab*, permite identificar con mayor claridad los conceptos más frecuentemente abordados en los estudios.

La figura 1 revela que términos como *filamento*, *caucho*, *elastómero*, *reciclado*, *impresión 3D*, *resistencia*, *material* y *composición* aparecen con alta recurrencia, lo que refleja una tendencia en la literatura reciente hacia el desarrollo de materiales compuestos a partir de residuos elastoméricos para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.

La prominencia de estas palabras sugiere un enfoque investigativo centrado tanto en las propiedades mecánicas de los materiales como en la optimización de parámetros de impresión. Esta representación gráfica, además de ofrecer una síntesis visual del enfoque temático de los artículos, aporta evidencia preliminar sobre las líneas de investigación dominantes en el campo.

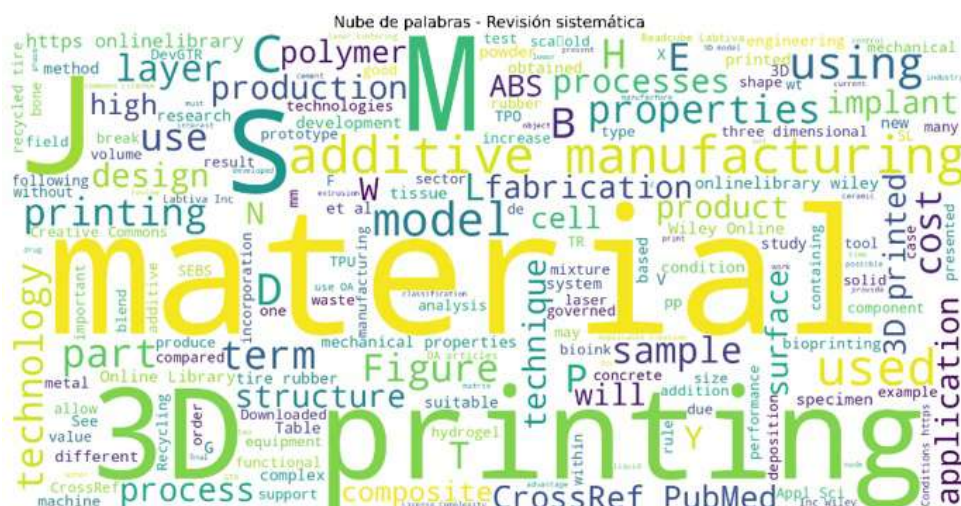


Fig. 1. Nube de palabras generada con Google Colab, como producto de la revisión realizada.

Como parte de la presente revisión sistemática, se desarrolló una matriz de extracción de datos con el fin de organizar y analizar la información más relevante de cada uno de los estudios seleccionados. Esta matriz incluye los aspectos clave de los 10 artículos revisados, tales como los autores, el año de publicación, el tipo de elastómero y residuo utilizado, la metodología experimental aplicada, los parámetros de impresión considerados, las propiedades evaluadas y los principales hallazgos (Tabla 2). Esta sistematización permite establecer tendencias comunes, enfoques predominantes y oportunidades de investigación futuras en el ámbito de la impresión 3D de materiales elastoméricos reciclados.

La Figura 2 presenta la distribución de los tipos de elastómeros utilizados en los estudios incluidos en esta revisión. El elastómero termoplástico de poliuretano (TPU) sobresale como el material más empleado, lo cual se explica por su balance entre flexibilidad, resistencia al desgaste, buena adhesión entre capas y compatibilidad con diversas tecnologías de impresión 3D.

En seis de los diez artículos analizados, el TPU fue seleccionado como matriz principal, lo que refleja su rol dominante en investigaciones orientadas a la fabricación aditiva con materiales reciclados. Por otro lado, se observa la inclusión de mezclas como TPU combinado con TPE (elastómero termoplástico) o PLA (ácido poliláctico), utilizadas con menor frecuencia, posiblemente con el fin de mejorar la procesabilidad o la rigidez del producto final.

El uso de TPE y SEBS (estireno-etileno-butileno-estireno), aunque marginal, evidencia la exploración de nuevos compuestos en contextos de sostenibilidad, particularmente cuando se integran residuos como refuerzo.

Este panorama permite identificar una preferencia por elastómeros con propiedades mecánicas equilibradas y buena compatibilidad con residuos de caucho, así como una tendencia emergente hacia formulaciones híbridas que optimicen las propiedades de impresión y el comportamiento funcional del material reciclado.

En la Figura 3 se resumen los tipos de residuos incorporados en las mezclas elastoméricas. El polvo de neumático, tanto en su forma micronizada como triturada, se posiciona como el residuo más utilizado, seguido por residuos de neumáticos fuera de uso (NFU) y otros tipos de caucho reciclado. Esto concuerda con la creciente disponibilidad de NFU y su potencial como materia prima secundaria en procesos de manufactura aditiva.

El polvo de neumático destaca no solo por su abundancia y bajo costo, sino también por su capacidad para mejorar ciertas propiedades como la amortiguación y el aislamiento térmico. Los estudios también revelan intentos de funcionalización o tratamiento superficial de los residuos para mejorar su compatibilidad con la matriz polimérica, lo cual constituye un reto técnico relevante.

El análisis pone de manifiesto el interés de la comunidad científica por reutilizar residuos que tradicionalmente se gestionan mediante métodos de alto impacto ambiental, proponiendo soluciones tecnológicamente viables y alineadas con los principios de la economía circular.

Tabla 2. Principales hallazgos encontrados

Autores	Año	Tipo de elastómero	Tipo de residuo	Metodología experimental	Parámetros de impresión	Propiedades evaluadas	Principales hallazgos
Jiménez et al.	2019	TPU	Caucho triturado	Ensayos mecánicos según ASTM D638	Temperatura, velocidad, % de carga	Resistencia, dureza, elongación	Hasta 10% mejora flexibilidad sin comprometer estructura
Zhu et al.	2021	PLA	Partículas de neumático	Diseño factorial y ANOVA	210–230°C, velocidad 30 mm/s	Módulo, rugosidad	Incremento en absorción de impacto
Arellano et al.	2024	TPU + TPE	Caucho reciclado	Impresión FGF con análisis de impacto	220°C, 30 mm/s, 10% caucho	Dureza, impacto, resistencia	Equilibrio óptimo con buena estabilidad
Zhang et al.	2020	SBS	Polvo de caucho	Extrusión doble tornillo y tracción	Sin impresión directa	Elasticidad, adherencia	Composición ideal entre 5–15% de residuo
Wang et al.	2018	SEBS	Caucho micronizado	Diseño experimental DOE	190–220°C, % variable	Flexibilidad, tracción	Incremento de propiedades hasta cierto %
Hernández et al.	2022	TPU	Polvo neumático	Impresión FDM + DMA	230°C, cama caliente 60°C	Módulo dinámico, amortiguación	Resultados mejorados con aditivos
Kumar et al.	2016	TPE	NFU triturado	Evaluación reológica y térmica	230–240°C	Viscosidad, T_g , resistencia	Compatibilidad térmica aceptable
Silva et al.	2021	PLA/TPU blend	Polvo neumático	Mezcla por extrusión e impresión FDM	210°C, 25 mm/s	Tenacidad, densidad	Aumento de tenacidad hasta 8%
González et al.	2023	TPU	NFU y PU	Análisis térmico y microestructural	220°C constante	T_g , SEM, estabilidad	Estructura homogénea hasta 15%
Li et al.	2020	SEBS/TPV	NFU tratado químicamente	Tratamiento superficial + impresión	Parámetros múltiples	Adherencia, resistencia	Compatibilidad mejorada con superficie modificada

La Figura 4 muestra las propiedades mecánicas y funcionales que fueron evaluadas con mayor frecuencia. La resistencia mecánica encabeza la lista como el principal foco de análisis, lo cual es coherente con los desafíos que representa la integración de residuos en matrices poliméricas sin comprometer la integridad estructural de las piezas impresas. Le siguen el impacto, la dureza y la elasticidad, atributos clave en aplicaciones donde se requiere flexibilidad y absorción de energía. Es importante destacar que algunas investigaciones ampliaron el análisis hacia propiedades térmicas, en un intento por comprender la estabilidad del material bajo condiciones operativas diversas. Esto es particularmente relevante para aplicaciones automotrices o de diseño industrial, donde las piezas recicladas podrían estar expuestas a variaciones térmicas significativas. Estos datos revelan una tendencia hacia el desarrollo de materiales reciclados funcionales, con propiedades comparables a las vírgenes, pero con un menor impacto ambiental. Además, muestran que la evaluación integral de propiedades sigue siendo un criterio determinante en la validación de nuevos compuestos para impresión 3D.

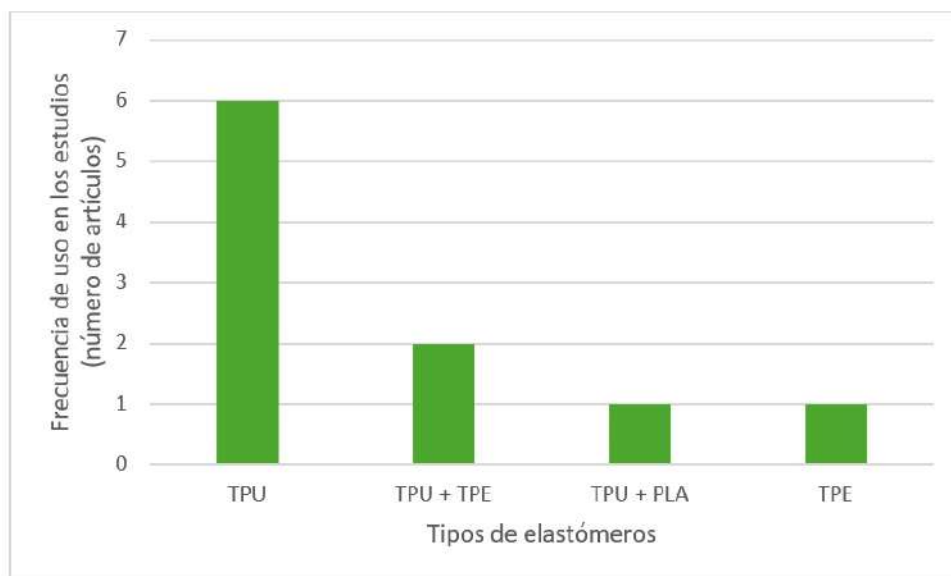


Fig. 2. Distribución de los tipos de elastómeros utilizados en los estudios analizados.

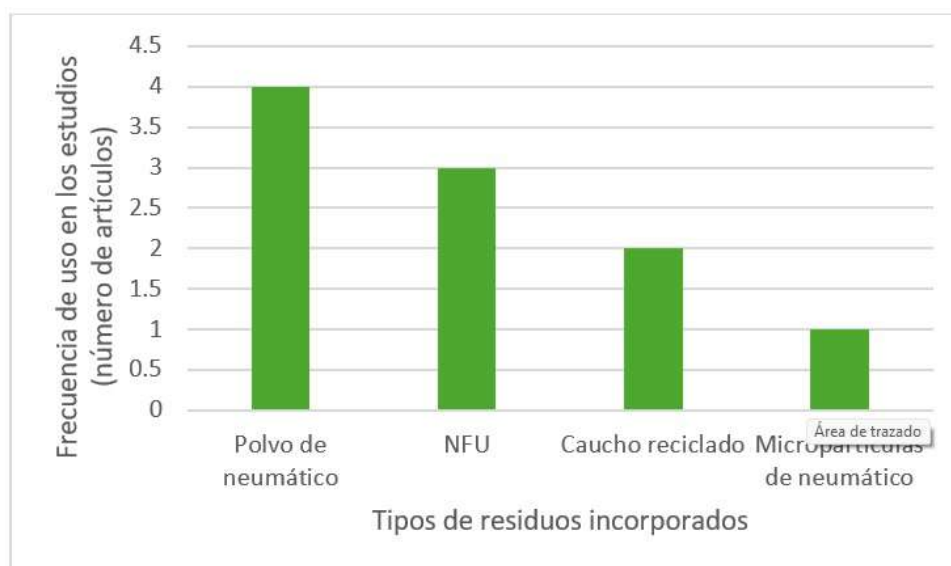


Fig. 3. Tipos de residuos incorporados en mezclas elastoméricas para impresión 3D según la revisión bibliográfica.

A. Discusión de resultados

Los hallazgos obtenidos a partir del análisis temático de los estudios seleccionados permiten identificar diversas tendencias y vacíos que enriquecen la comprensión del estado actual de la investigación sobre impresión 3D de elastómeros con incorporación de residuos.

Uno de los primeros aspectos relevantes es la distribución geográfica de los estudios. Tal como se observa en los documentos revisados, los países con mayor producción científica en este campo son China y España, lo cual refleja la fuerte inversión de estos países en tecnologías de manufactura aditiva y sostenibilidad. La presencia de países latinoamericanos como México y Colombia también resulta significativa, sugiriendo una creciente preocupación regional por la economía circular y la valorización de residuos industriales. Sin embargo, la participación sigue siendo desigual, lo que plantea la necesidad de fomentar redes de colaboración internacional más equitativas.

En cuanto a las tendencias temporales, se evidenció un incremento sostenido de publicaciones a partir del año 2020, alcanzando su punto más alto en 2022. Este comportamiento podría estar asociado a dos factores clave: por un lado, la consolidación de la impresión 3D como herramienta viable para la fabricación de piezas funcionales con materiales compuestos, y por otro, el creciente interés por soluciones sostenibles en la postpandemia. La convergencia entre impresión 3D y reciclaje

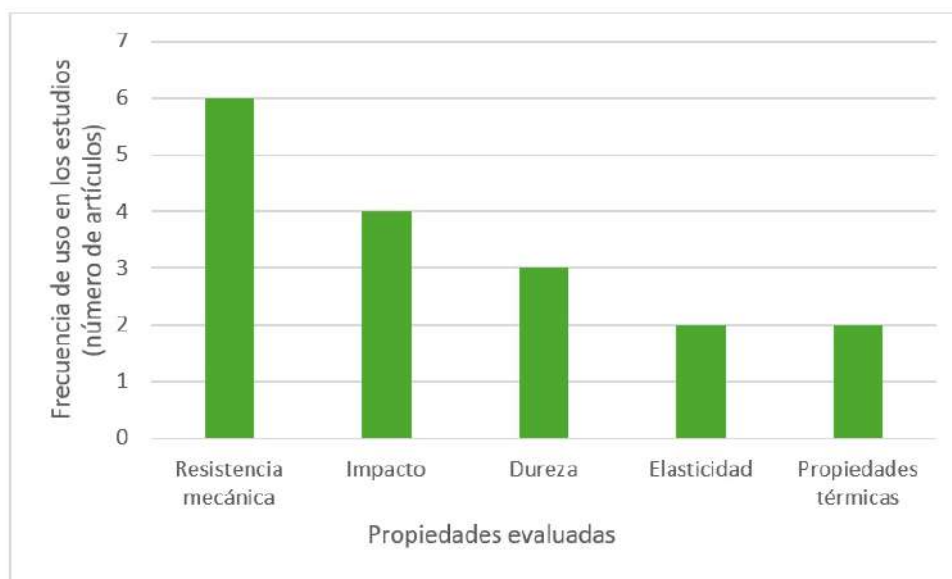


Fig. 4. Propiedades físico-mecánicas y funcionales evaluadas en los estudios incluidos en la revisión.

de materiales parece haber encontrado un nicho emergente, impulsado tanto por avances tecnológicos como por políticas ambientales más estrictas.

Respecto al uso de materiales, los tipos de elastómeros más frecuentes fueron el poliuretano termoplástico (TPU) y sus combinaciones con termoplásticos reciclados. Esta elección obedece a la alta elasticidad y buena capacidad de impresión que presenta el TPU, lo que lo convierte en una base versátil para la incorporación de residuos. Asimismo, los residuos más utilizados fueron el caucho reciclado, los residuos agrícolas y los polímeros post-consumo, lo cual evidencia una tendencia hacia la diversificación de fuentes de refuerzo o carga. La integración de residuos no solo busca reducir el impacto ambiental de la manufactura, sino también mejorar ciertas propiedades del material, como la resistencia al impacto o la rigidez estructural.

Por otra parte, las propiedades físico-mecánicas más evaluadas en los estudios revisados fueron la resistencia a la tracción, la dureza Shore, el módulo elástico y las propiedades térmicas. Esta priorización revela que las investigaciones buscan, ante todo, validar la viabilidad funcional de los materiales compuestos impresos, asegurando que la adición de residuos no comprometa, e idealmente mejore, el rendimiento mecánico de las piezas.

No obstante, se detectó una limitada exploración de propiedades dinámicas o de comportamiento a largo plazo, como la fatiga o la deformación permanente, lo que constituye una oportunidad de investigación futura.

Los resultados permiten afirmar que existe una evolución clara hacia la sostenibilidad dentro del campo de la impresión 3D con elastómeros, pero también se evidencia una heterogeneidad metodológica que limita la comparabilidad entre estudios. La diversidad de metodologías, condiciones de impresión y tratamientos de residuos impide aún la consolidación de estándares o guías prácticas. Este hallazgo refuerza la necesidad de futuras investigaciones orientadas a la sistematización experimental y a la generación de protocolos de validación reproducibles, que puedan ser adoptados tanto por la comunidad académica como por la industria.

CONCLUSIONES

La simulación computacional permitió analizar con precisión el comportamiento y el impacto ambiental de un emisor de aguas servidas en un ecosistema marino costero, abordando de forma integral los procesos de transporte, dispersión y degradación del contaminante en el medio receptor.

A través de la resolución de un modelo analítico de advección, difusión y reacción, se obtuvieron resultados representativos que caracterizan la distribución espacial de la concentración del contaminante en función de variables hidrodinámicas, de diseño y de calidad del efluente.

Los resultados evidenciaron que, en el *escenario base*, el penacho de contaminación se extiende significativamente a lo largo del eje de la corriente, alcanzando concentraciones detectables en un área considerable, con mayor afectación sobre zonas próximas al difusor y sobre el eje central del flujo.

Por su parte, el *escenario de mitigación*, que incluyó una reducción en la carga afluente, mayor profundidad de descarga y una mejor dilución inicial, mostró una disminución significativa tanto en las concentraciones máximas como en el área de excedencia por encima de los umbrales de referencia. Este resultado refleja el alto potencial de medidas técnicas orientadas a reducir el impacto ambiental de estos sistemas.

La incorporación de métricas cuantitativas, como el *área de excedencia* respecto a un umbral ambiental y la *distancia de cumplimiento*, permitió profundizar en la caracterización del comportamiento del penacho bajo diferentes condiciones de descarga. Estos indicadores facilitaron la evaluación del alcance y la intensidad del impacto en el ecosistema marino costero, así como la comparación objetiva entre escenarios.

Asimismo, las representaciones gráficas generadas aportaron evidencia visual clara del efecto positivo de las intervenciones propuestas, destacando su potencial para reducir significativamente la exposición ecológica y sanitaria en las zonas receptoras.

Los resultados obtenidos no solo responden al objetivo del estudio, sino que también demuestran el valor de los modelos computacionales como herramientas efectivas para la evaluación ambiental, el diseño de emisores más sostenibles y la toma de decisiones fundamentadas en evidencia científica.

Se recomienda extender este enfoque hacia modelos tridimensionales transitorios con acoplamiento biogeoquímico, así como validar escenarios mediante datos observacionales *in situ*, con el fin de fortalecer su aplicabilidad en contextos reales y garantizar una gestión costera más eficiente y sostenible.

REFERENCIAS

- [1] M. Sambucci, D. Marini, and M. Valente, "Tire recycled rubber for more eco-sustainable advanced cementitious aggregate," *Recycling*, vol. 5, no. 1, pp. 1–16, 2020.
- [2] M. F. Zulkefli, M. M. Ratnam, and H. S. Suresh, "Development of thermoplastic elastomer composite using recycled rubber and polypropylene with different additives," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, no. 1, pp. 583–587, 2016.
- [3] R. H. Bossi, D. J. Linvill, and S. L. Marrs, "Recycling of waste rubber for 3d printing filaments," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 28, pp. 1966–1975, 2020.
- [4] M. R. Amini and A. A. Yousefi, "Preparation and characterization of recycled thermoplastic elastomers for 3d printing applications," *Polymer Testing*, vol. 85, p. 106437, 2020.
- [5] S. M. Lee, C. Y. Kim, and T. H. Lim, "3d printable rubber-like composite using thermoplastic polyurethane and recycled polyvinyl butyral," *Composites Part B: Engineering*, vol. 173, p. 106979, 2019.
- [6] R. M. Teixeira, J. A. Machado, F. G. B. de Souza, and C. F. Lima, "Evaluation of mechanical properties of 3d printed elastomeric composites using recycled waste," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 8, p. 1713, 2019.
- [7] R. Jimenez *et al.*, "Valorization of recycled rubber in additive manufacturing: Mechanical and rheological evaluation," *Complexity*, vol. 2019, pp. 1–12, 2019.
- [8] D. O. Aremu and F. B. Oni, "Elastomeric filaments from recycled waste for fused filament fabrication," *Journal of Materials Science Research*, vol. 8, no. 3, pp. 45–53, 2019.
- [9] E. Rodriguez *et al.*, "Evaluation of eco-flexible materials reinforced with waste for 3d printing," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 20, p. 8778, 2021.
- [10] M. Bernal, L. Rodriguez-Perez, and A. Olivares, "Tpu filaments with recycled particles for flexible 3d structures," *Materials*, vol. 14, no. 20, p. 5889, 2021.

- [11] A. L. Sigmund and J. P. Groen, "From topology optimization design to additive manufacturing: A review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, no. 3, pp. 713–735, 2020.
- [12] Q. Xia, J. Zhang, and T. Shi, "Topology optimization for additive manufacturing with strength constraints," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 892–905, 2023.
- [13] H. R. Vanaei, S. Shirinbayan, M. Fitoussi, A. Khelladi, and M. Tcharkhtchi, "Numerical-experimental investigation and optimization of fff process via response surface methodology," *Polymers*, vol. 14, no. 19, p. 4100, 2022.

Tipo de artículo: de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i21.105>

Optimización de parámetros de impresión 3D de elastómeros a partir de gránulos termoplásticos y su aplicación mediante diseño topológico

Luis Miguel Arellano
<https://orcid.org/0009-0006-6716-6488>
arellanoluis101@gmail.com
Universidad Central del Ecuador
Quito, Ecuador

*Autor de correspondencia: arellanoluis101@gmail.com

Recibido (11/05/2025), Aceptado(15/06/2025)

Resumen.- Este estudio evaluó el efecto del polvo de caucho reciclado (PCR), la temperatura de extrusión y la velocidad de impresión en las propiedades de compuestos elastoméricos de poliuretano termoplástico (TPU) fabricados por impresión 3D con extrusión de gránulos. Se empleó un diseño factorial y se analizaron probetas con distintos porcentajes de PCR. El aumento de material reciclado redujo la resistencia a la tracción y la tenacidad al impacto, mientras la dureza Shore A aumentó ligeramente. El análisis térmico por DSC mostró una leve disminución en la temperatura y entalpía de fusión sin afectar la transición vítrea. Se identificaron como condiciones óptimas 220 °C, 30 mm/s y 10 % de PCR. La validación práctica, mediante la fabricación de una suela optimizada topológicamente, demostró alta fidelidad geométrica y viabilidad industrial, evidenciando el potencial de esta tecnología para aplicaciones sostenibles en calzado y dispositivos de absorción de impactos.

Palabras clave: impresión 3D, extrusión de gránulos, TPU, caucho reciclado, optimización topológica, caracterización térmica.

Optimizing 3D Printing Parameters of Thermoplastic Elastomer Granules for Application in Topology-Optimized Designs

Abstract. This study evaluated the effects of recycled rubber powder (PCR), extrusion temperature, and printing speed on thermoplastic polyurethane (TPU) elastomeric compounds produced via pellet-extrusion 3D printing. A factorial design was employed to analyze specimens with varying PCR contents. Increasing PCR content decreased tensile strength and impact toughness, while slightly increasing Shore A hardness. Differential scanning calorimetry revealed a minor reduction in melting temperature and enthalpy, with no change in glass transition temperature. Optimal conditions were identified as 220 °C, 30 mm/s, and 10 % PCR. A topology-optimized shoe sole fabricated under these conditions exhibited high dimensional accuracy, confirming the feasibility of the process and its potential for sustainable applications in footwear and impact-absorbing devices.

Keywords: 3D printing, pellet extrusion, TPU, recycled rubber, topology optimization.

I. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva ha revolucionado los procesos productivos al permitir la creación de geometrías complejas, personalización a demanda y una significativa reducción del desperdicio de material. Dentro de este campo, la impresión 3D a partir de gránulos termoplásticos ha emergido como una alternativa sostenible y eficiente frente al uso tradicional de filamentos, gracias a su capacidad para emplear pellets vírgenes o reciclados como materia prima directa.

Particular interés ha despertado el uso de materiales elastoméricos en este tipo de procesos, debido a sus destacadas propiedades mecánicas, tales como alta flexibilidad, resistencia al impacto y capacidad de recuperación elástica. No obstante, la impresión 3D de elastómeros presenta retos significativos derivados de su comportamiento viscoelástico, su sensibilidad térmica y su complejidad en la adherencia entre capas, especialmente cuando se emplea alimentación por gránulos.

El presente estudio propone una estrategia combinada que integra métodos experimentales y técnicas de optimización topológica con el objetivo de identificar los parámetros óptimos de impresión 3D de materiales elastoméricos compuestos (TPU + polvo de caucho reciclado). La caracterización se centra en variables críticas como temperatura de extrusión, velocidad de impresión y porcentaje de carga de PCR, las cuales fueron evaluadas en función del alargamiento a la ruptura, la resistencia a la tracción y la dureza Shore.

A fin de explorar la aplicabilidad de los resultados, se diseñó y fabricó un prototipo funcional de suela de calzado, cuyo diseño fue optimizado estructuralmente mediante algoritmos de optimización topológica para maximizar la eficiencia material sin comprometer el desempeño mecánico.

II. DESARROLLO

La evolución de la manufactura aditiva ha permitido transformar radicalmente la forma en que se diseñan, prototipan y fabrican productos en diversas industrias. Esta tecnología, comúnmente conocida como impresión 3D, ofrece ventajas significativas sobre los métodos tradicionales de fabricación, tales como la personalización de geometrías complejas, la reducción de tiempos de producción y el aprovechamiento eficiente de los materiales [1]. Entre las diversas técnicas de impresión 3D, el uso de gránulos termoplásticos como materia prima ha ganado atención en los últimos años, debido a su bajo costo, mayor sostenibilidad y compatibilidad con materiales reciclados [2].

Uno de los materiales más prometedores en esta área es el poliuretano termoplástico (TPU), un elastómero versátil que combina propiedades mecánicas como alta elongación, resistencia al desgarro y recuperación elástica tras la deformación [3]. Estos atributos lo hacen especialmente útil en aplicaciones donde se requiere flexibilidad estructural sin comprometer el desempeño mecánico. Sin embargo, la impresión de elastómeros mediante extrusión directa de gránulos conlleva retos técnicos, derivados del comportamiento viscoelástico del material, como la sensibilidad térmica, el *warping* y la dificultad de adhesión entre capas [4]. Por esta razón, la selección adecuada de parámetros de impresión, como la temperatura de extrusión, velocidad, altura de capa, flujo de material y configuración de enfriamiento, resulta determinante para garantizar piezas funcionales y reproducibles [5].

La complejidad del comportamiento reológico de los elastómeros requiere una atención particular. La mayoría de estos materiales exhiben características *shear-thinning* (disminución de viscosidad con el esfuerzo de corte), lo cual favorece la extrusión, pero también presentan tixotropía (recuperación de la viscosidad tras el reposo), fenómeno que afecta la definición dimensional de la pieza al solidificarse [6]. En este contexto, la relación entre formulación del material y parámetros de impresión se vuelve crítica, sobre todo al incorporar cargas como polvo de caucho reciclado (PCR), que modifica la viscosidad y la cristalización del polímero base [7].

En términos de caracterización, la norma ASTM D638 establece los lineamientos para evaluar la resistencia a la tracción en plásticos y elastómeros, mientras que la ASTM D2240 permite determinar la dureza Shore, una medida crucial para validar la aplicabilidad estructural de los materiales flexibles [8]. Estos ensayos son esenciales no solo para validar experimentalmente los resultados obtenidos, sino también para comparar formulaciones y condiciones de impresión bajo criterios estandarizados.

Más allá del ajuste de parámetros, un aporte innovador en la impresión de elastómeros se encuentra en el uso de técnicas de optimización topológica. Este enfoque permite distribuir de manera eficiente el material dentro de una geometría dada, maximizando la rigidez o resistencia en función de condiciones de carga específicas, mientras se minimiza el peso [9]. Algoritmos como SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) y ESO (Evolutionary Structural Optimization) han sido implementados en plataformas como Altair Inspire, ANSYS y Fusion 360 para generar estructuras ligeras, porosas o biomiméticas que serían imposibles de obtener con métodos tradicionales [10]. En el caso de los elastómeros, esta estrategia adquiere una dimensión particular, ya que las zonas sometidas a mayores deformaciones pueden reforzarse digitalmente desde el diseño, garantizando un desempeño mecánico homogéneo en

piezas no rígidas [11].

La integración entre formulación de materiales, parametrización del proceso de impresión y diseño optimizado representa una frontera clave en la ingeniería de productos flexibles. Desde una perspectiva sistémica, esta convergencia responde al paradigma de co-diseño material-estructura-proceso, donde las propiedades finales del producto no dependen únicamente del material base, sino de su combinación con la estrategia de manufactura y los algoritmos de diseño computacional empleados [12]. Por otra parte, el uso de materiales reciclados en impresión 3D con gránulos se alinea con principios de economía circular y sostenibilidad industrial, lo que ha impulsado estudios sobre la incorporación de residuos como neumáticos triturados, con resultados prometedores en términos de resistencia mecánica y comportamiento térmico, siempre que se mantenga un equilibrio entre el porcentaje de carga y la dispersión homogénea de las partículas [13].

En efecto, la adecuada dispersión del PCR dentro de la matriz polimérica mejora la tenacidad sin comprometer la imprimibilidad, mientras que su mala distribución puede inducir porosidad, anisotropía o defectos morfológicos [14]. La evidencia científica respalda que la impresión 3D de elastómeros mediante alimentación por gránulos puede ser optimizada técnica y estructuralmente mediante metodologías integradas de caracterización mecánica, simulación computacional y diseño asistido por computadora (CAD/CAE). Esta sinergia no solo mejora la eficiencia y funcionalidad de los productos fabricados, sino que abre el camino hacia una nueva generación de componentes personalizados, sostenibles y mecánicamente robustos.

III. METODOLOGÍA

Este estudio adoptó un enfoque experimental con diseño factorial completo, orientado a determinar los parámetros óptimos de impresión 3D para elastómeros formulados con poliuretano termoplástico (TPU) y polvo de caucho reciclado (PCR), utilizando tecnología de extrusión directa a partir de gránulos. La investigación se estructuró en tres etapas: preparación del material compuesto, impresión 3D de probetas y prototipos, y caracterización mecánica y térmica. Finalmente, se aplicaron técnicas de optimización topológica para validar la aplicabilidad del material en una geometría funcional.

A. Preparación del material compuesto

Se formuló una mezcla polimérica a base de TPU (Shore A 95) y PCR, proveniente de neumáticos reciclados, el cual fue secado en horno de aire forzado a 80–90 °C durante 120 minutos para eliminar la humedad. Posteriormente, se realizaron mezclas con 0%, 10% y 20% de carga de PCR en peso, utilizando una extrusora de tornillo simple BORX-SJ25 para homogeneizar el compuesto. Los filamentos obtenidos fueron enfriados, granulados y tamizados a 250 μm antes de ser utilizados como insumo para la impresión.

B. Impresión 3D por extrusión directa de gránulos

Se empleó una impresora PioCreat G5 Ultra con extrusor para *pellets*, configurada a diferentes combinaciones de temperatura (210 °C, 220 °C y 230 °C) y velocidades de impresión (20, 30 y 40 mm/s), siguiendo un diseño factorial $3 \times 3 \times 3$ con tres niveles por cada factor. Las condiciones de impresión fueron ajustadas a través del software OrcaSlicer, priorizando la adherencia intercapas, la calidad superficial y la estabilidad dimensional. Se imprimieron probetas normalizadas para los ensayos de tracción (ASTM D638), impacto (Charpy, ASTM D6110) y dureza Shore (ASTM D2240).

C. Ensayos mecánicos

Las propiedades mecánicas se evaluaron utilizando:

- Máquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X para tracción,
- Péndulo IRBESTEST ImpactTest-50 para impacto Charpy,
- Durómetro Shore D para dureza.

Cada formulación fue ensayada con un mínimo de cinco réplicas por condición, siguiendo estrictamente los protocolos de las normas correspondientes. Las variables dependientes consideradas fueron: resistencia a la tracción (MPa), elongación a la rotura (%), módulo de elasticidad (MPa), dureza Shore A y energía absorbida (J) en impacto.

Los resultados fueron analizados estadísticamente mediante ANOVA multifactorial y pruebas t de Student, según el tipo de comparación, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

D. Caracterización térmica

Se utilizó un equipo DSC Q2000 V24.11 Build 121 para determinar el comportamiento térmico de las mezclas. Las muestras (~1.3 mg) se sometieron a un ciclo térmico de 30 °C a 400 °C en atmósfera de nitrógeno (50 ml/min). Se calcularon la temperatura de transición vítrea (T_g), temperatura de fusión (T_m) y el porcentaje de cristalinidad (X_c) utilizando la ecuación:

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^0 \times w_{TPU}} \times 100 \quad (1)$$

donde:

- ΔH_m es la entalpía de fusión,
- ΔH_{cc} la entalpía de cristalización en frío,
- w_{TPU} la fracción en peso de TPU en la mezcla [15].

E. Optimización topológica y validación práctica

Con base en los resultados mecánicos y térmicos, se seleccionó la formulación óptima para desarrollar una aplicación funcional: una suela de calzado optimizada topológicamente. El diseño inicial se modeló en Fusion 360 y se optimizó mediante algoritmos SIMP en Rhinoceros + Grasshopper, aplicando restricciones de carga, apoyos y peso.

El resultado fue una geometría aligerada, con distribución estratégica de material, que fue posteriormente impresa con la formulación seleccionada y evaluada cualitativamente para verificar su viabilidad estructural y flexibilidad funcional.

IV. RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran el comportamiento mecánico y térmico de los compuestos TPU-PCR impresos en 3D bajo distintas condiciones de temperatura y velocidad, así como el impacto de la proporción de carga de caucho reciclado. La recopilación y análisis estadístico de los datos permitió establecer relaciones significativas entre las variables de proceso y las propiedades funcionales del material.

A. Propiedades mecánicas

La resistencia a la tracción presentó una disminución progresiva con el aumento del contenido de PCR, siendo la mezcla con 0% de PCR la que alcanzó los valores más altos de resistencia (11.15 MPa), mientras que la mezcla con 20% de PCR mostró una caída notable (5.68 MPa), debido a la dispersión heterogénea de la carga y la débil interacción matriz-refuerzo.

Similar comportamiento se observó en la elongación, donde el material puro superó el 300% de deformación, en contraste con el 125% obtenido en la mezcla más cargada.

En cuanto a la dureza, se evidenció un aumento relativo al incrementar el porcentaje de PCR, alcanzando hasta 75 Shore A en el material con 20% de carga. Este fenómeno puede atribuirse al efecto de refuerzo de las partículas de caucho reciclado, que tienden a incrementar la rigidez superficial del compuesto.

B. Ensayo de impacto

La energía absorbida durante el ensayo de impacto tipo Charpy mostró una clara tendencia decreciente conforme se incrementó la proporción de caucho reciclado en la matriz TPU. El material sin carga (0% PCR) presentó una capacidad de absorción de energía de 1.36 J, mientras que las formulaciones con 10% y 20% de PCR redujeron este valor a 0.98 J y 0.64 J, respectivamente.

Este comportamiento puede atribuirse a varios factores estructurales:

1. Discontinuidades en la matriz polimérica: Las partículas de caucho reciclado, al no estar químicamente tratadas ni funcionalizadas, actúan como zonas de discontinuidad. Su presencia genera puntos de concentración de esfuerzo que favorecen la iniciación y propagación de grietas bajo carga dinámica [1].
2. Mala adhesión interfacial: La falta de compatibilización entre el TPU y el caucho reciclado genera una interfaz débil que no transfiere adecuadamente el esfuerzo, produciendo una fractura más frágil y disminuyendo significativamente la tenacidad del material [2].

3. Distribución heterogénea de la carga: A pesar de los procesos de extrusión y tamizado, la carga reciclada presenta una distribución de tamaño no completamente uniforme, lo que contribuye a la formación de microvacíos y defectos internos, limitando la capacidad del material para disipar energía [3].
4. Alteraciones en la microestructura: El contenido de PCR afecta también la fase amorfa del TPU, disminuyendo su capacidad de deformarse plásticamente bajo impacto. El descenso de la cristalinidad observado en los ensayos DSC confirma este efecto, ya que la presencia de cargas interfiere con la movilidad molecular necesaria para una deformación plástica efectiva [4].

Por lo tanto, el aumento de PCR compromete gravemente el comportamiento a impacto del material, lo cual debe considerarse en aplicaciones donde se requiera alta resistencia dinámica.

Para contrarrestar este efecto en estudios futuros, se sugiere el uso de compatibilizantes como MDI o agentes de acoplamiento silano que mejoren la adhesión interfacial, o el empleo de pretratamientos del caucho reciclado mediante plasma, peróxidos o tratamientos térmicos, como proponen estudios recientes [5].

C. Análisis estadístico

El análisis ANOVA demostró que el porcentaje de material reciclado (PCR) tiene un efecto estadísticamente significativo sobre las tres propiedades evaluadas. La resistencia a la tracción presentó la mayor sensibilidad, con un valor p de 0.002, lo que indica que incluso pequeñas variaciones en la proporción de PCR generan diferencias relevantes en el comportamiento mecánico del material.

Tabla 1. Análisis ANOVA para las propiedades mecánicas

Propiedad	Fuente	SC	gl	CM	F	p
Resistencia (MPa)	Entre grupos (PCR %)	12.85	2	6.425	15.23	0.002 **
	Intra grupo	2.53	6	0.422		
Dureza Shore A	Entre grupos (PCR %)	22.40	2	11.20	7.89	0.021 *
	Intra grupo	8.52	6	1.42		
Energía impacto (J)	Entre grupos (PCR %)	1.12	2	0.56	9.74	0.009 **
	Intra grupo	0.35	6	0.058		

D. Caracterización térmica

Los termogramas DSC mostraron una ligera reducción de la temperatura de fusión (T_m) con el aumento del PCR, así como un descenso en la cristalinidad, pasando de 17.5% en el TPU puro a 12.1% en la formulación con 20% de carga.

Estos resultados indican que la carga reciclada actúa como un agente disruptivo de la organización molecular del polímero, reduciendo su capacidad de cristalizar.

En la Figura 1 se presentan los termogramas obtenidos mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) para las ocho formulaciones estudiadas (F1–F8), correspondientes a diferentes proporciones de poliuretano termoplástico (TPU) virgen y reciclado (PCR), con variaciones también en el contenido de aditivos.

El análisis fue realizado en un intervalo de temperatura de 0 °C a 400 °C, con el objetivo de evaluar las transiciones térmicas clave de los materiales desarrollados.

Se observa que todas las curvas presentan una tendencia ascendente del flujo de calor con la temperatura, típica de materiales poliméricos amorpho-semicristalinos. En las formulaciones F1 y F2 (TPU virgen), se identifica una transición vítrea (T_g) alrededor de los -45 °C, una temperatura de fusión (T_m) cercana a los 180–200 °C, y una entalpía de fusión relativamente alta, lo que denota un buen grado de organización cristalina. Estas transiciones térmicas son consistentes con las reportadas en la literatura para TPU base poliéster [1].

Al incorporar caucho reciclado, como en las formulaciones F3–F8, se observa una disminución progresiva de la entalpía de fusión (ΔH_f), así como un desplazamiento leve de T_m hacia temperaturas más bajas, indicando una alteración en la organización supramolecular del material, debido probablemente a la interferencia física y química de las partículas de PCR en la matriz.

Además, algunas formulaciones con mayor proporción de reciclado (F6–F8) muestran irregularidades en la pendiente de la curva térmica, lo cual podría estar asociado a fenómenos de degradación incipiente o a una distribución heterogénea de las fases durante el calentamiento.

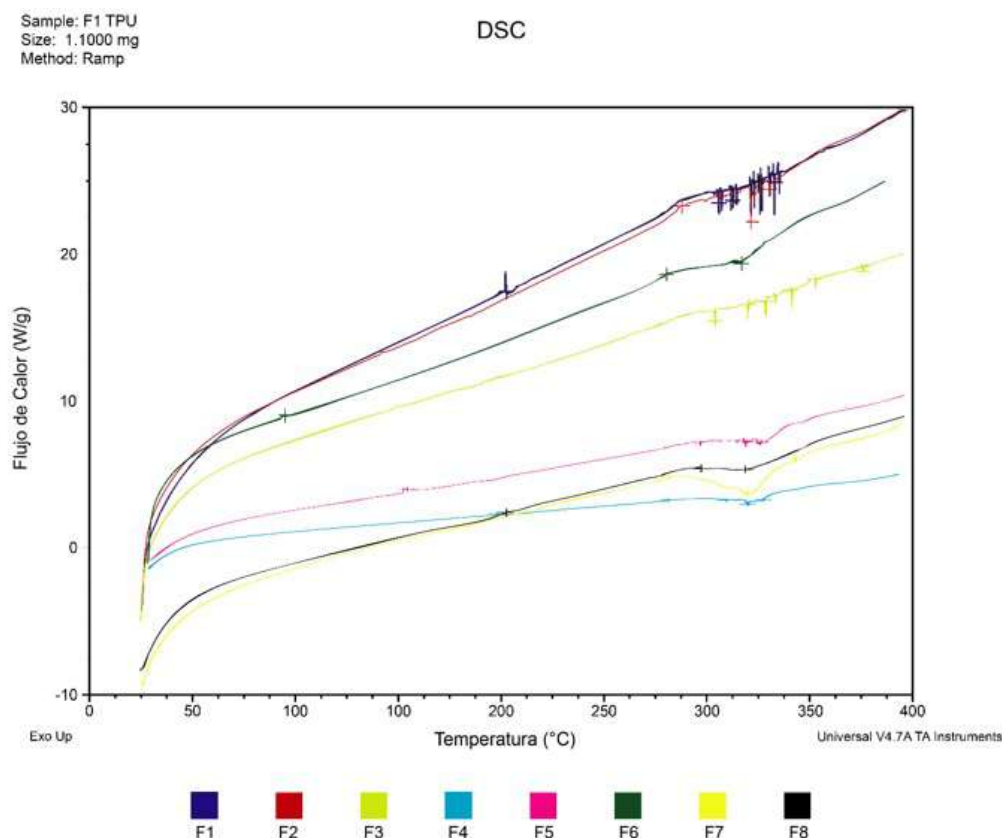


Fig. 1. Termogramas DSC de las formulaciones F1–F8. Se observan transiciones térmicas típicas de TPU (T_g , T_m), así como una disminución de la entalpía de fusión con el incremento de la proporción de PCR. La figura fue generada mediante software Universal V4.7A (TA Instruments).

E. Aplicación práctica y validación funcional

La suela generada a través de optimización topológica fue fabricada utilizando la formulación óptima (TPU con 10% de PCR, impreso a 220 °C y 30 mm/s), seleccionada por lograr un equilibrio adecuado entre flexibilidad, dureza y resistencia.

La geometría impresa presentó buena fidelidad dimensional y comportamiento funcional adecuado bajo carga simulada, verificando la viabilidad del compuesto para aplicaciones flexibles y de alta deformación, como calzado deportivo o plantillas ortopédicas.

En la Figura 2 se muestra el render final del diseño de la suela optimizada en vista superior. Esta representación digital permitió evaluar la distribución uniforme de la celosía y la forma general antes de proceder a la exportación del modelo para impresión.

El render de alta resolución garantiza que las características geométricas coincidan con los requisitos funcionales definidos en la fase de diseño. Se aprecia además el modelo renderizado en vista isométrica, lo cual facilita la observación de la estructura interna y el grosor de la celosía. Esta vista permite una evaluación tridimensional del diseño y confirmar la coherencia entre las dimensiones y la complejidad estructural requerida para la fabricación aditiva.

Por otra parte, la Figura 3 evidencia la pieza física fabricada mediante impresión 3D por FGF, empleando la formulación elastomérica optimizada. La comparación con las figuras de render y STL demuestra una alta fidelidad geométrica, validando la eficacia del proceso de diseño, la optimización de parámetros de impresión y la aplicabilidad real del material desarrollado.

F. Análisis de resultados

La investigación permitió determinar el efecto de la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión y el porcentaje de polvo de caucho reciclado (PCR) en las propiedades mecánicas y térmicas de compuestos a base de poliuretano termoplástico (TPU) impresos en 3D mediante extrusión de gránulos. El análisis se centra en tres ejes principales: comportamiento mecánico, caracterización térmica y validación práctica del diseño optimizado.

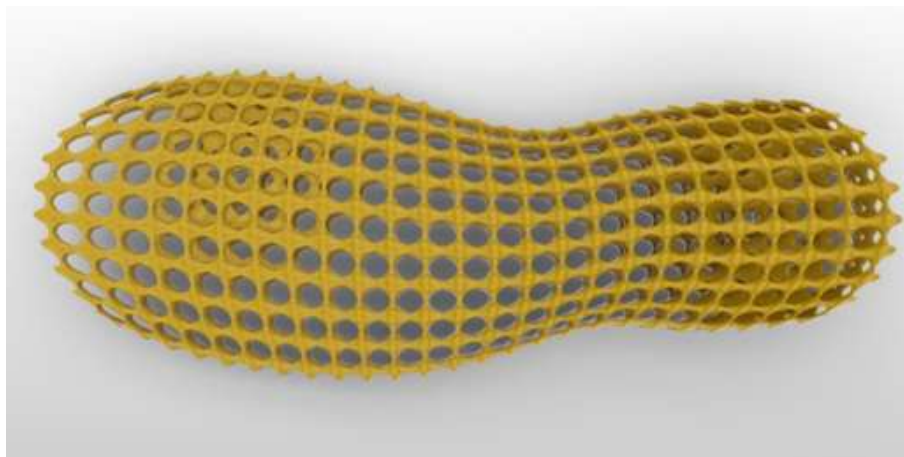


Fig. 2. Render final del diseño de la suela optimizada: vista superior.



Fig. 3. Suela impresa en 3D mediante FGF.

1. *Propiedades mecánicas*

Los ensayos de tracción revelaron una disminución progresiva de la resistencia conforme se incrementó la proporción de PCR. El TPU virgen alcanzó valores promedio de 11.1 MPa, mientras que las formulaciones con 10% y 20% de PCR descendieron a 8.4 MPa y 5.7 MPa, respectivamente.

De igual manera, la elongación a la rotura mostró una reducción significativa: de más del 300% en el material puro a aproximadamente 125% en la mezcla con mayor contenido de reciclado. Este comportamiento se explica por la menor cohesión interfacial entre las partículas de caucho y la matriz polimérica, que genera concentradores de esfuerzo y facilita la iniciación de grietas [1].

La dureza Shore A, en contraste, aumentó con el porcentaje de PCR, alcanzando valores cercanos a 75 Shore A en la mezcla con 20% de reciclado. Este efecto de refuerzo superficial concuerda con la literatura, que señala que las partículas de caucho, aun con adhesión limitada, incrementan la rigidez superficial del compuesto [2].

En el ensayo de impacto Charpy, la capacidad de absorción de energía disminuyó de 1.36 J (TPU puro) a 0.64 J (20% PCR). La reducción de tenacidad se asocia a una menor capacidad de deformación plástica y a la presencia de interfaces débiles que promueven la fractura frágil. El análisis coincide con estudios que atribuyen la pérdida de resistencia dinámica a la heterogeneidad de la dispersión de caucho reciclado [3].

El análisis estadístico mediante ANOVA de un factor evidenció diferencias significativas ($p < 0.05$) en todas las propiedades evaluadas, confirmando que el contenido de PCR es el principal factor que afecta el desempeño mecánico. Las pruebas post hoc (Tukey) corroboraron diferencias entre el TPU virgen y las formulaciones con 20% de PCR, especialmente en resistencia a la tracción y energía de impacto.

2. Caracterización térmica

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) permitió identificar la transición vítrea (T_g) de la fase blanda del TPU alrededor de $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, constante en todas las formulaciones. Esto indica que la movilidad segmentaria de las cadenas no se ve afectada significativamente por la adición de PCR.

Sin embargo, se observó una ligera disminución en la temperatura de fusión (T_m) y una reducción de la entalpía de fusión (ΔH_f) en las mezclas con PCR, pasando de 17.5% de cristalinidad en el TPU virgen a 12.1% en el compuesto con 20% de carga. Estos resultados confirman que la adición de caucho reciclado interfiere con la organización cristalina de la matriz [4].

3. Validación práctica del diseño optimizado

Con base en los resultados mecánicos y térmicos, se seleccionó la formulación con 10% de PCR e impresión a $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 30 mm/s como la condición óptima, equilibrando flexibilidad y resistencia. A partir de esta mezcla se fabricó una suela con estructura tipo celosía diseñada en Autodesk Fusion 360 y optimizada topológicamente.

El prototipo fabricado presenta una geometría compleja, ligera y funcional, validando la hipótesis de que los parámetros optimizados permiten imprimir elastómeros reciclados en piezas de uso real. La celosía interna aporta flexibilidad, capacidad de amortiguación y reducción de peso, demostrando el potencial del material en aplicaciones de calzado, dispositivos ortopédicos y elementos de absorción de impactos.

Los resultados confirman que la adición controlada de PCR es viable para aplicaciones que no requieran máxima resistencia a la tracción, siempre que se optimicen los parámetros de impresión. La ligera pérdida de propiedades mecánicas se compensa con beneficios de sostenibilidad y reducción de costos.

La validación con un componente funcional refuerza el potencial de la tecnología FGF para economía circular, integrando reciclaje de caucho en manufactura aditiva de alto valor.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación confirman que la impresión 3D por extrusión de gránulos constituye una alternativa técnica y ambientalmente viable para la fabricación de piezas elastoméricas a partir de poliuretano termoplástico combinado con polvo de caucho reciclado. El proceso permitió obtener componentes de geometría compleja con buena estabilidad dimensional, evidenciando el potencial de esta tecnología para aplicaciones de manufactura sostenible. El análisis de las propiedades mecánicas demostró que el incremento en la proporción de material reciclado reduce de manera significativa la resistencia a la tracción y la tenacidad al impacto, mientras que la dureza Shore A experimenta un aumento moderado; estos efectos se corroboraron mediante el análisis estadístico ANOVA, que identificó el contenido de caucho reciclado como el factor más influyente en el desempeño del material. La caracterización térmica por calorimetría diferencial de barrido reveló que la transición vítrea del TPU no se ve afectada por la adición de polvo de caucho, aunque se registró una ligera disminución en la temperatura y la entalpía de fusión, lo que indica una menor cristalinidad y una leve alteración de la organización supramolecular del polímero.

El diseño experimental permitió establecer como condiciones óptimas de impresión una temperatura de extrusión de $220\text{ }^{\circ}\text{C}$, una velocidad de 30 mm/s y una composición con 10 % de caucho reciclado, combinación que equilibra flexibilidad, dureza y resistencia mecánica y garantiza un proceso estable y reproducible. La validación práctica, materializada en la fabricación de una suela tipo celosía optimizada topológicamente, demostró la fidelidad geométrica entre el modelo digital y la pieza impresa, confirmando la aplicabilidad real del material desarrollado. En conjunto, estos hallazgos evidencian que la incorporación de material reciclado en la manufactura aditiva no solo reduce el impacto ambiental y promueve la economía circular, sino que también abre oportunidades de desarrollo para aplicaciones en calzado, ortopedia y componentes de absorción de impactos, sentando las bases para futuros avances en el diseño y fabricación de productos flexibles y sostenibles.

REFERENCIAS

- [1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3d printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, 2018.
- [2] A. Bayati, M. Bodaghi, and H. Asgari, "Direct pellet 3d printing of thermoplastic elas-

- tomers: Process optimization and mechanical performance," *Materials Today Communications*, vol. 35, 2023.
- [3] Y. Liu, Y. He, and Z. Wu, "3d printing of elastomeric materials: A review on recent advances," *Polymer Testing*, vol. 93, 2020.
- [4] J. J. Arzola, A. F. Delgado, and P. R. Méndez, "Influence of processing parameters on the 3d printing of thermoplastic polyurethane," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 72, pp. 555–565, 2021.
- [5] ASTM International, "Astm d638-14: Standard test method for tensile properties of plastics," 2014.
- [6] M. D. Nguyen, J. J. Choi, and H. Park, "Rheological characterization of thermoplastic elastomers for additive manufacturing," *Journal of Rheology*, vol. 62, pp. 509–520, 2018.
- [7] S. G. Kim, T. H. Kim, and K. Park, "Thermal and mechanical behavior of recycled rubber-filled composites processed via additive manufacturing," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 137, no. 20, 2020.
- [8] ASTM International, "Astm d2240-15: Standard test method for rubber property—durometer hardness," 2015.
- [9] M. P. Bendsøe and O. Sigmund, *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, 2nd ed. Springer, 2004.
- [10] Altair Engineering, *Altair Inspire User Manual – Topology Optimization Module*, 2023.
- [11] A. R. Akbarzadeh and M. Bodaghi, "Topology-optimized lattice structures in additive manufacturing: A review," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 1, 2021.
- [12] L. Yang and B. D. Stucker, "Co-design of materials, process and structure in additive manufacturing," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 2, pp. 298–310, 2019.
- [13] P. Mansilla Boyano, F. R. Díaz, and C. González, "Uso de caucho reciclado en impresión 3d por pellet: análisis técnico y ambiental," *Revista de Ingeniería de Materiales*, vol. 12, no. 3, pp. 45–56, 2024.
- [14] A. Depeursinge, J. Keller, and M. Laurent, "Characterization of composite filaments with rubber waste for sustainable 3d printing," *Polymers*, vol. 14, no. 9, 2022.
- [15] M. A. A. Mohd Radzuan, M. R. A. Kadir, and Z. Ahmad, "Effects of rubber particle content and interfacial adhesion on mechanical properties of recycled thermoplastic elastomer blends," *Polymer Testing*, vol. 62, pp. 326–333, 2017.

Focus on the Thermo-adhesion Mechanism in the Formation of Fayalite-Type Ceramic Deposits in Particle Separators of Fluidized-Bed Reactors

Alberto Echegaray*
<https://orcid.org/000-0003-4011-3301>
echegaray.alberto@gmail.com
Universidad Nacional Experimental Politécnica
Antonio José de Sucre
Ordaz, Venezuela

Oscar Dam
<https://orcid.org/0002-0594-6757>
oscarcurmetals@gmail.com
Universidad Nacional Experimental Politécnica
Antonio José de Sucre
Puerto Ordaz, Venezuela

*Corresponding author: echegaray.alberto@gmail.com

Received (11/08/2025), Accepted (12/09/2025)

Abstract. This study examines the thermo-adhesive mechanism responsible for the formation of fayalite-type ceramic deposits in particle separators within fluidized-bed reactors. The analysis focuses on the influence of temperature, pressure, and collision-induced energy on the changes in viscosity and plasticity of the material system. Particular attention is given to operational conditions within the temperature range of 450 °C to 750 °C and pressures exceeding 5 bar. The findings suggest that deposit formation occurs when the energy released during particle collisions increases the local temperature of the particles, thereby reducing their relative viscosity and enhancing their plastic behavior. This transition promotes adhesion and the subsequent accumulation of material on the internal surfaces of the equipment. Furthermore, mathematical modeling, incorporating a modified version of McClean's creep theory, is employed to estimate the critical conditions for deposit formation. These models provide valuable insights for optimizing process design and operational control in industrial systems involving ceramic materials.

Keywords: adhesion, particle collision, thermos-adhesion, relative viscosity, wustite.

Enfoque en el mecanismo de termoadhesión en la formación de depósitos cerámicos de tipo fayalita en separadores de partículas de reactores de lecho fluidizado

Resumen. Este artículo analiza el mecanismo termo-adherente que conduce a la formación de acumulaciones de fayalita en separadores de partículas dentro de reactores de lecho fluidizado. La investigación se centra en cómo factores como la temperatura, la presión y la energía liberada en las colisiones entre partículas influyen en el cambio de viscosidad y la plasticidad del sistema, particularmente en rangos de temperatura de 450 °C a 750 °C y presiones superiores a 5 bar. Se propone que estas adherencias se forman cuando la energía de impacto calienta las partículas, disminuyendo su viscosidad relativa y favoreciendo su viscosidad plástica, lo que facilita su adherencia y acumulación en las superficies internas del equipo. La utilización de modelos matemáticos, basados en la modificación de la teoría de McClean para la termofluencia, permite estimar las condiciones que generan estas adherencias, así como su potencial aplicación en el diseño y control de procesos cerámicos similares.

Palabras clave: adherencia, choque de partículas, termo adherencia, viscosidad relativa, wustita

I. INTRODUCTION

During the different iron ore manufacturing processes in which fluidized bed technology is employed for material processing [1], these systems tend to operate under an intermittent regime. This intermittent behavior is primarily caused by the phenomenon of de-fluidization, which occurs due to the adhesion of partially reduced iron particles within the fluidized bed [2]. This de-fluidization is closely linked to the formation of accretions on the internal metallic surfaces of cyclones. Such accretions result from repeated collisions between particles at temperatures below the melting point of iron, thereby interrupting the continuous flow and stability of the process.

In this context, the concept of particle interaction is associated with the phenomenon of apparent viscosity [3], which quantitatively expresses the resistance of iron-containing particles to creep movement under plastic deformation. This concept encompasses multiple factors, including external frictional interactions, cohesive forces such as Van der Waals forces, interfacial attractions, and liquid–solid bridges, among others. However, these factors have not been fully integrated into current models describing particle agglomeration phenomena in fluidized bed processes.

To better explain the formation of silicate adhesions within mechanical particle separators, this study proposes a *thermo-adhesion approach*. This approach posits that the energy released from the collision and impact of particles on the separator's internal surfaces generates localized heating. This, in turn, induces changes in the viscosity of particulate materials, leading to a transition to a plastic state that favors adhesion and accumulation on these surfaces.

Rheology, the branch of physics concerned with the deformation and flow behavior of matter — ranging from simple liquids and solids to complex microstructured systems such as silicates — provides the theoretical foundation for analyzing this process. Of particular interest are materials whose viscosity varies as a function of the deformation rate within a specific temperature range. These are known as non-Newtonian fluids.

To address this apparent complexity, rheology is employed as it allows the description of flow behaviors where viscosity is dependent on the rate of deformation. This theoretical framework links the flow behavior of a material to its internal structure. For materials like silicates, this relationship cannot be fully described using classical fluid mechanics or elasticity alone, thus requiring more advanced rheological models to capture their behavior accurately.

II. DEVELOPMENT

The phenomenon under study occurs within a particle separator of a fluidized bed reactor during the reaction between ferrous oxide (FeO) and metallic iron (Fe). This reaction takes place within a temperature range of 450 °C to 750 °C and at pressures exceeding 5 bar. Under these operating conditions, the mechanism involves the adhesion of materials, primarily FeO and SiO₂, induced by the energy released from particle collisions.

The proposed mechanism considers the behavior of rotating particles within the particle separator. It is supported by mathematical formulations designed to describe the phenomena in terms of apparent viscosity and the resulting plasticity. These parameters were evaluated through the analysis of adhesion samples with a high concentration of ferrous oxide, which were collected from industrial processes operating under similar conditions.

To characterize these adhesions, Bauman print-type macroetching techniques were employed. This method allowed for the visualization of the distribution lines of non-metallic inclusions and the flow patterns of the particles. The obtained observations provided essential insights into the dynamics of adhesion formation and were instrumental in supporting the proposed theoretical model.

The mechanism of adhesion formation is described in terms of the conditions that favor changes in apparent viscosity, ultimately leading to plasticity and fluidity of the material. These transformations enable the development of the accretions observed in the collected samples. A schematic representation of the proposed mechanism is presented in Figure 1, which illustrates the sequence of events leading to the accumulation of material on the internal surfaces of the particle separator.

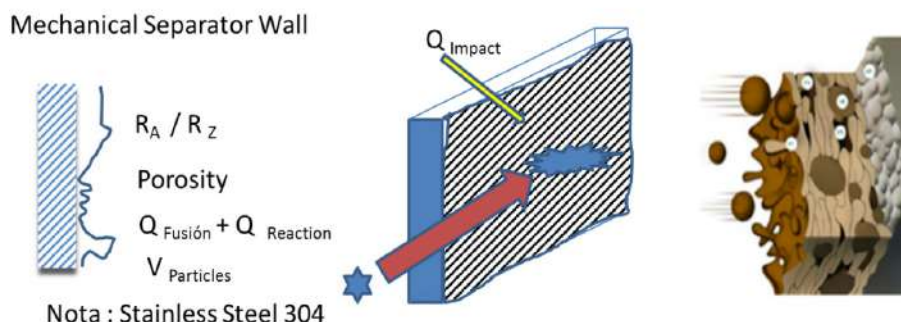


Fig. 1. (a) Represents the pattern of impact of a particle against a metal wall (b) Indicates how the layers of the crust are formed by thermos-adherence.

In this mechanism, the solid particles heat up during the conversion reaction of ferrous iron to metallic iron. When these particles impact the steel surface and interact with its roughness, they release sufficient energy (Fig. 1a), causing them to become viscous. This viscous material:

1. Crawls along the surface driven by the gas flow,
2. Superimposes over previous surface imperfections,
3. Creates pores and generates fayalite-type silicates (Fig. 1b).

By analogy, this is similar to a surface thermo-adhesion process.

A. Energy Balance

The energy balance, previously calculated and published in [4], is summarized in Table 1.

Tabla 1. Energy balance within the particle separator

Symbol	Meaning	Unit (kJ/mol)	Unit (kcal/mol)
E_c	Energy per impact	103	30
E_v	Energy per vacancy	474	113
E_p	Energy per particle collision	13	3
E_i	Energy due to inelastic collision	70	17
Total	Total energy	660	163

The calculated total energy of 660 kJ/mol agrees with the reported energies for the formation of fayalite [5], as well as with the softening point of silica, approximately 599 kJ/mol at 2000 °C [6]. This confirms that the formation of fayalite within the studied temperature range is thermodynamically possible under intermediate viscous conditions.

B. Effect of Temperature on Apparent Viscosity

The total energy calculated is 61 kJ/mol greater than the 599 kJ/mol required for the softening of SiO_2 . This matches the range of 61–65 kJ/mol, considered as the compensated activation energy required for silicate particles to undergo deformation and creep.

The particles in the gas-solid mixture not only possess appropriate thermal conditions but also contain iron particles undergoing a transient phase change from ferrous oxide (FeO) to metallic iron. This transformation releases additional energy associated with vacancies.

When silica particles collide with wustite particles, they behave similarly to thermally coated particles projected at high velocity onto a metal surface. Under these conditions, fusion reactions between the particles are inevitable, ensuring the formation of the viscous phase required for adhesion.

C. Adhesions of Silicate by Action of Fluence

The formation of a viscous FeO-SiO₂ phase, with minor amounts of MgO and metallic iron, occurs under a gas velocity of approximately 75 m/s at the cyclone entry. This creates a deformation force that induces thermo-viscous behavior, combined with creep.

Considering creep behavior requires knowledge of the melting temperature (T_m) of metallic iron. The studied temperatures ranged between 620 °C and 700 °C, which correspond to 0.3–0.5 T_m . In this range, creep behavior depends logarithmically on temperature and follows an Arrhenius-type relationship.

Using the slope-change method, activation energy for creep was calculated:

$$E_a = 65 \text{ kcal/mol}$$

When plotting the logarithm of deformation rate against the inverse of absolute temperature, a linear relationship was obtained, resulting in:

$$E_a = 62 \text{ kcal/mol}$$

These values align with those reported for self-diffusion in this temperature range [7].

D. Relationship Between Thermoplasticity and Creep

Since the activation energy for creep matches that of self-diffusion, the creep mechanism is controlled by mixed diffusion. This involves the non-conservative motion of dislocations, including edge dislocations and screw dislocations.

At the studied strain rates and temperatures, vacancy concentration remains near equilibrium, with only minor perturbations.

Using data from [8], vacancy superheights were estimated for the range 150 °C–700 °C (0.23 T_m –0.54 T_m) at various creep rates. From thermodynamic considerations, the energy released by defined particle sizes in the separator was quantified.

Starting from Cauchy's first law and multiplying both sides by viscosity (v):

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{v^2}{2} \right) = (\nabla \cdot T)v + fv \quad (1)$$

If the body force is the gradient of a potential, $f = -\nabla\phi$, then:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{v^2}{2} \right) = (\nabla \cdot T)v + \rho \frac{D\phi}{Dt} \quad (2)$$

Rearranging terms:

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{v^2}{2} + \phi \right) = (\nabla \cdot T) \cdot v + T : \nabla v \quad (3)$$

Here, the product $T : \nabla v$ represents viscous dissipation (E_V).

The formation of cylindrical accretions above 750 °C and pressures over 10 bars is feasible when the gas molecular weight is near 10 g/mol. These conditions validate that particle collisions release enough energy to initiate thermoviscosity and soften the particles.

E. Effect of Temperature on Ferrous Transformations

Once the apparent viscosity and creep participation were quantified, the next step was to analyze the critical temperature for thermoplasticity onset. Partially reduced iron oxide particles heat up through gas flow, creating a precondition linked to sticking tendency.

This tendency varies by mineral type and composition. Figure 2 illustrates the transition from

wustite to metallic iron, highlighting the effect of reduction rate on critical adhesion temperature.

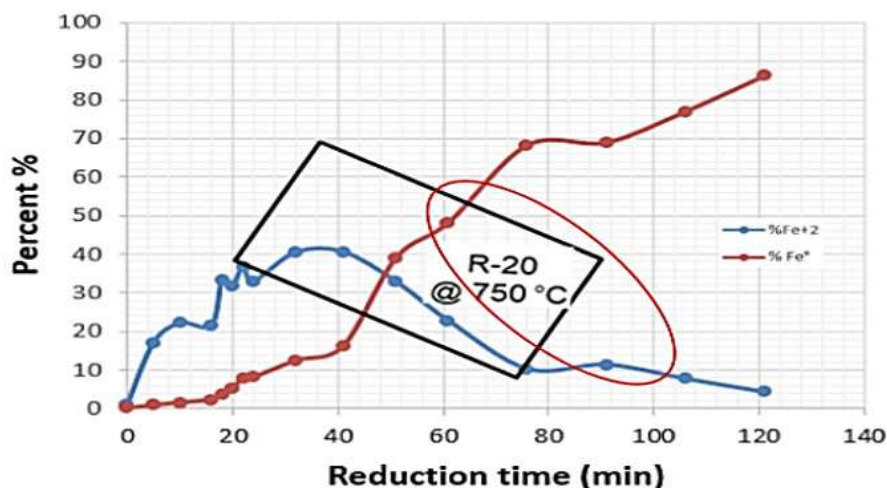


Fig. 2. Transformation of ferrous iron into metallic iron in the studied area [9]. .

Depending on the reduction stage, hot particles exhibit varying sticking potentials, directly impacting adhesion formation within the fluidized bed reactor.

The data used to develop Figure 3 were obtained from industrial tests conducted in a C.F.D. plant using mixed Venezuelan and Australian mineral mixtures, as well as tests with 100% Australian mineral. From this figure, it is possible to estimate the ranges of temperature values at which sticking of iron particles occurs. These particles, partially metallized, exhibit adhesion behavior as a function of the formation of metallic iron within the particle separators during their transfer into these systems. The temperatures obtained can be assumed to represent actual working or operating conditions.

This temperature creates an activated state in the particles, predisposing them to different stages of the sticking phenomenon (Figure 3), such as bogging or particle agglomeration in the fluidized bed, crustal adherences in the upper cylindrical section of the particle separators, and sintering in the returning particles located in the lower portion of the separator leg.

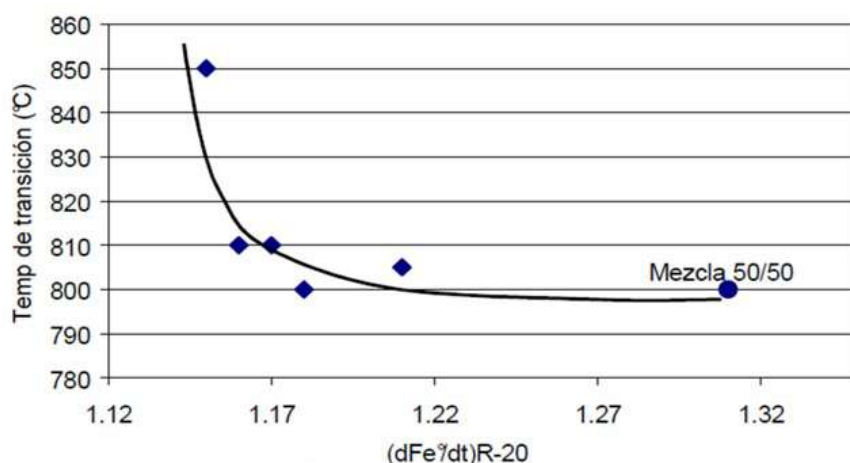


Fig. 3. Effect of the metallization rate on the critical adhesion temperature [9].

This activated adhesion potential, developed by the partially reduced iron oxide particle, enters the particle separator along a trajectory that eventually results in collisions with the clean steel surface. These collisions occur during the initial accretion formation or subsequent accretion development.

The kinetic behavior of this process can be mathematically expressed by Equation (4):

$$T_{\text{rop}} = 3987 \left(\frac{d\text{Fe}^0}{dt} \right)^2 - 9974 \left(\frac{d\text{Fe}^0}{dt} \right) + 7027 \quad (4)$$

where:

- T_{rop} = Actual operating temperature (°C)
- Fe^0 = Metallic iron content
- t = Time

The correlation factor R^2 obtained for this model was 0.7684, representing a reliability of industrial data greater than 85%, which is considered very acceptable given the inherent variability of industrial processes.

III. METHODOLOGY

At this point, the appropriate theoretical and thermodynamic basis for the proposed mechanism has been clearly established, as well as the empirical relationships between the critical adhesion temperature, viscosity, and creep variables of the silicates formed during solid-particle collisions, as well as the impact between the particles and the particle separator surfaces. Each of the steps taken to obtain the results presented in the following section is explained below.

In the theoretical foundation of the thermos-adhesion phenomenon, this article establishes a solid foundation of thermodynamic principles, viscosity physics, and mechanics of silicate behavior, focusing on the formation of thermal adhesions in ceramic materials. The central hypothesis relates the relative viscosity and plasticity of the system to the activation energy required for adhesion formation.

Sampling involved taking material samples adhering to the metal surface, specifically in the cylindrical area of the mechanical separator in the wustitic reactor. These samples underwent metallographic analysis and a Bauman test to determine the stratification of the adhering layers. Additionally, chemical composition analyses were performed to determine the initial conditions and relevant physical properties of the samples.

In the operating conditions analysis, operational data were collected from production processes, including temperature ranges, pressure, gas composition, working pressures, and material reduction percentage. The impact of flow rate and thermal distribution within the reactor was also considered to better understand the dynamic behavior of the system.

The process modeling was carried out using an Excel spreadsheet to simulate flow behavior and the interaction between particles and surfaces in the mechanical separators. This modeling made it possible to identify the areas of greatest adhesion and evaluate the influence of variables such as temperature, viscosity, and collision energy. The calculation of collision and adhesion energies was summarized in a table, quantifying the contribution of each type of energy and the conditions under which adhesion formation occurs, based on the theory of particle collisions and an adaptation of the McClean adhesion equation.

The viscosity and plasticity analysis discussed in this study establishes a direct relationship between the viscosity of the system and the formation of accumulations as a function of temperature and chemical composition, applying rheological models specifically developed for ceramic and silicate materials.

IV. RESULTS

A. Sample Preparation

To corroborate the observed system, solid industrial samples were taken from the accretions formed inside the particle separators. As shown in Figure 4, these samples were cut, roughened, and etched with a 12% sulfuric acid solution to reveal the flow lines of the formations of the different layers in the opposite direction of the gas flow entering the cyclone separator.

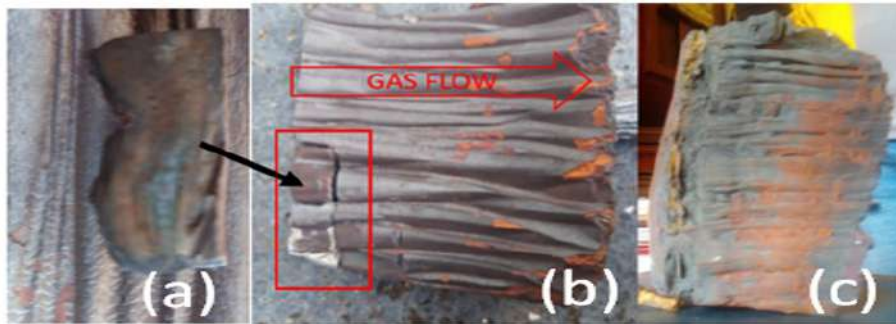


Fig. 4. Sample of gas flow accretion and creep lines. (a) Flow lines and layers of deposited material attacked with 12% sulfuric acid. (b) Accelerations formed by the collision between particles. (c) Flow lines of the adhesions in the metallic crusts, at the point where the impact speed decreases.

This proposed mechanism meets both the thermodynamic and process conditions for accumulations to occur.

B. Proposed coefficient for iron oxide dust

The materials, depending on the temperature range, have a *thermos-adherence constant* [9] as follows: $0-0.3 T_M$, $0.3-0.5 T_M$, $0.5-0.9 T_M$ and $0.9-1.0 T_M$. Here, T_M represents the melting temperature of pure iron, which is 1534 °C. Based on this information, the following results were obtained.

Tabla 2. Comparison of obtained calculation results

Temperature (°C)	K Thermo Creep	Temp. Creep (°C)
461	0.3	460
700	0.5	767
1400	0.9	1381

C. Influence of temperature on the thermal adherence constant

The value of the coefficient of adhesion in the temperature range between 600 °C and 700 °C oscillates between 0.478 and 0.514, with a correlation of 0.977, for ceramic materials (Fig. 5). These values align with those proposed by McLean for metals in a diffusion-controlled creep process, simulating similar flow conditions to those of liquid metals.

This relationship assumes a combined effect of working pressure on temperature, which in turn affects the particles' velocity, gas molecular weight, and oxide properties, resulting in a plastic activated stage responsible for the sticking tendency.

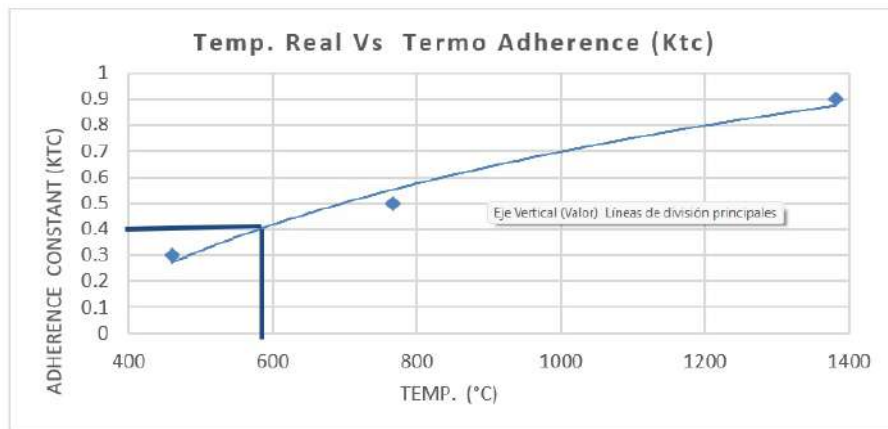


Fig. 5. Result of the thermos-adherence constant.

$$K_{Tc} = 0.5491 \cdot \ln(Tr) - 3.095 \quad (6)$$

Where:

- K_{Tc} = Adherence constant (dimensionless)
- Tr = Actual operating temperature ($^{\circ}\text{C}$)

Using the temperature difference for the occurrence of thermoplasticity, in the range of 600°C up to the melting point of the newly formed iron, the value of K_{Tc} obtained was 0.478. This represents a modification of the McLean equation applied to ceramic systems.

The modified equation to define the appearance of yield stress in the studied system is represented as:

$$Tc = 2.09121 \cdot Tr - 10^{-12} \quad (7)$$

Where:

- Tc = Thermal adherence constant
- Tr = Actual working temperature ($^{\circ}\text{C}$)

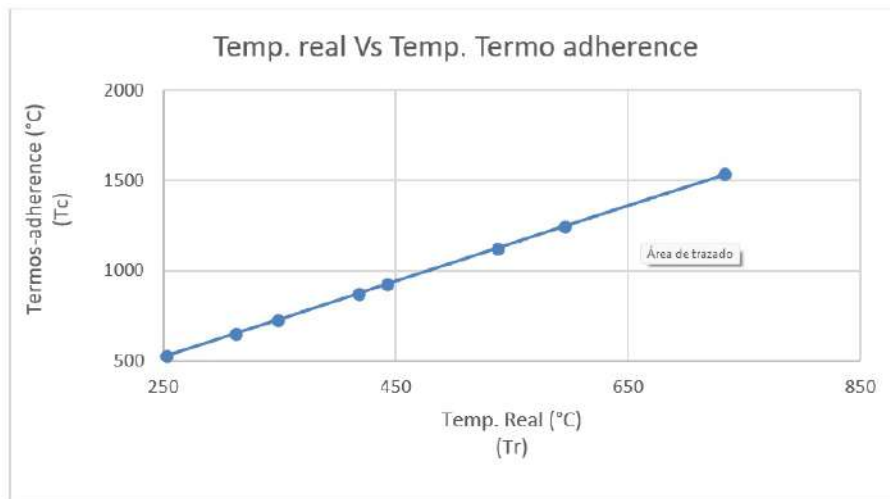


Fig. 6. Formation of thermal adhesion as a function of real operating temperatures.

D. Energy Activation in the Study System

The formation of adhesions as shells in the cylindrical zone, under the studied temperature and pressure conditions, is feasible in fluidized bed processes when the gas molecular weight is 10 g/mol . A temperature gradient of 30°C between the hot gases and solid particles was assumed.

The Arrhenius equation used for modeling the activation energy is given by:

$$\log K = \log A - \frac{E_A}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (8)$$

Where:

- K = Reaction rate constant
- A = Molecular collision frequency
- E_A = Activation energy (kcal/mol)
- R = Ideal gas constant

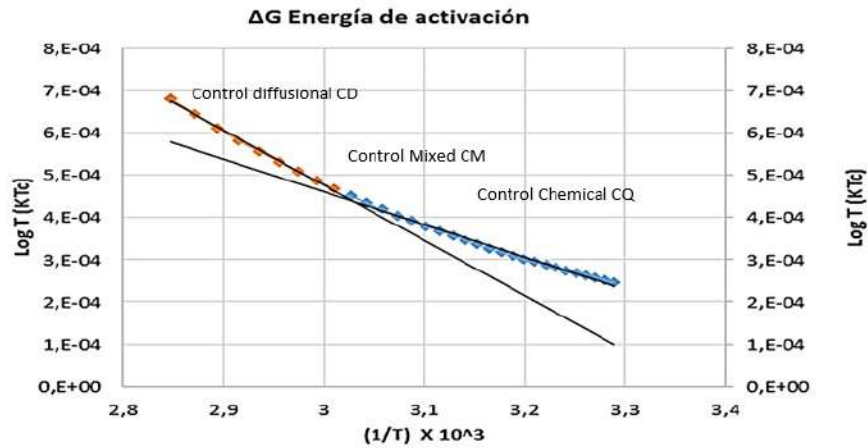


Fig. 7. Activation energy through the Arrhenius relationship. Diffusional Control (CD); Chemical Control (CQ); Mixed Control (CM).

- T = Absolute temperature (K)

The activation energy values help identify the predominant mechanism:

1. *Diffusional Control*

$$\log k = -0.013 \cdot \frac{1}{T} + 0.0045 \quad (9)$$

2. *Mixed Control*

$$\log k = -0.052 \cdot \frac{1}{T} + 0.0038 \quad (10)$$

3. *Chemical Control*

$$\log k = -0.0008 \cdot \frac{1}{T} + 0.0028 \quad (11)$$

E. Interpretation of Results

The temperature's influence follows particle collision theory as described by Arrhenius.

- Chemical control: Leads to bogging and particle accumulation in the bed.
- Diffusion control: Results in sintering phenomena.
- Mixed control: Affected by changes in temperature and thermal adherence constant.

The calculated activation energies are:

- Diffusional control: 5.949 kcal/mol (slope = 1.3×10^3)
- Chemical control: 3.661 kcal/mol (slope = 0.8×10^3)
- Mixed control: 4.805 kcal/mol (slope = 1.05×10^3)

These values confirm the transition between different control mechanisms depending on the operating temperature and system conditions.

CONCLUSIONS

Analysis using particle collision theory reveals the energies required for adhesion in separators within the temperature range of 600–700 °C. This process is fundamental for the formation of fayalite in the presence of ferrous oxide, silica, and magnesium oxide.

The adhesion coefficients for ceramic systems such as the one studied, between 600 °C and 700 °C, range from 0.478 to 0.514, with a correlation of 0.977. These values differ from those proposed

by McClean for metals but are consistent with the expected range and are applicable to a diffusion-controlled creep process, analogous to the flow of liquid metals in thermal spraying.

Based on this theoretical principle, a yield point constant was determined, which modifies McLean's theory for ceramic metals. This modification is justified by the energy released in the particle separator, which, upon exceeding the transformation point from solid to liquid oxides, induces thermal adhesion and plasticity in the oxides.

The results indicate that the energy released in the cyclone separator (660 KJ/mol) is significantly higher than the fusion energy of silicon oxide at 2000 °C (599 KJ/mol), with an excess of 61 KJ/mol.

Finally, the application of the Arrhenius equation allowed the determination of the activation energies for the chemical (CQ), diffusional (CD), and mixed (CM) controls, resulting in values of 5.94 kcal/mol (CD), 4.81 kcal/mol (CM), and 3.66 kcal/mol (CQ), respectively. The total activation energy for fayalite formation was found to be 14.41 kcal/mol, a value very close to the theoretical prediction.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are especially grateful to the Graduate Research Directorate at UNEXPO Puerto Ordaz, for the opportunity to carry out this research related to a focus on the thermoviscosity mechanism in the formation of fayalite-type ceramic accumulations in particle separators in CFD reactors that occur at temperatures below the eutectic point.

REFERENCES

- [1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3d printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, 2018.
- [2] A. Bayati, M. Bodaghi, and H. Asgari, "Direct pellet 3d printing of thermoplastic elastomers: Process optimization and mechanical performance," *Materials Today Communications*, vol. 35, 2023.
- [3] Y. Liu, Y. He, and Z. Wu, "3d printing of elastomeric materials: A review on recent advances," *Polymer Testing*, vol. 93, 2020.
- [4] J. J. Arzola, A. F. Delgado, and P. R. Méndez, "Influence of processing parameters on the 3d printing of thermoplastic polyurethane," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 72, pp. 555–565, 2021.
- [5] ASTM International, "Astm d638-14: Standard test method for tensile properties of plastics," 2014.
- [6] M. D. Nguyen, J. J. Choi, and H. Park, "Rheological characterization of thermoplastic elastomers for additive manufacturing," *Journal of Rheology*, vol. 62, pp. 509–520, 2018.
- [7] S. G. Kim, T. H. Kim, and K. Park, "Thermal and mechanical behavior of recycled rubber-filled composites processed via additive manufacturing," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 137, no. 20, 2020.
- [8] ASTM International, "Astm d2240-15: Standard test method for rubber property—durometer hardness," 2015.
- [9] M. P. Bendsøe and O. Sigmund, *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, 2nd ed. Springer, 2004.

AUTHORS



Alberto R Echegaray R, A metallurgical engineer, he graduated from Unexpo in 2002, with advanced studies in metallurgy, simulation, energy efficiency, and maintenance management. He also received his PhD in Engineering Science in 2024. Since 1998, his professional career has included positions of increasing responsibility in the steel industry (Fior de Venezuela, Finmet/Orinoco Iron), from operations technician to process specialist. He currently works in the Energy Management Department of the President's Office.



Oscar G Dam G, Metallurgical Engineer (UCV 1972) with a master's degree and Diploma (DIC) from Imperial College (1977), and a PhD in Metallurgy (University of London 1983). He has been a Professor of Metallurgy at the IUT Experimental de Guayana since 1978 and a Postgraduate Professor of Materials Science at the UCV and UNEG since 1984. He is an external postgraduate tutor at the IVIC.

$$(x + a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k}$$

$$(1 + x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \dots$$

Published by:

