



UNIVERSIDAD
LIBRE®

InGENIO LIBRE

Universidad Libre - Facultad de Ingeniería
Año 15 - ISSN 2322-8415

No. **25**
VOL. 15

“La verdad no se encuentra ni en la tesis
ni en la antítesis, sino en una síntesis
emergente que reconcilia las dos”.

Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770-1831)

- El impacto de la Inteligencia Artificial en la educación en Colombia.
- Uso de escoria como componente principal de un revestimiento protector.
- Ética y regulación del uso de la Inteligencia Artificial.
- Comparación de las propiedades mecánicas de probetas de resina poliéster.





UNIVERSIDAD LIBRE®
Vigilada Mineducación

María Elizabeth García González
Presidenta Nacional

César López Meza
Rector Nacional

Fernando Arturo Salinas Suárez
Rector Seccional

Nidia María Jirado Tajan
Decana de la Facultad de Ingeniería

Ricardo Santa Quintero
Editor Revista Ingenio Libre

EDITORIAL

“La verdad no se encuentra ni en la tesis ni en la antítesis, sino en una síntesis emergente que reconcilia las dos.”

*Georg Wilhelm
Friedrich Hegel (1770-1831)*

En este número de la revista Ingenio Libre se han concentrado diversos puntos de vista sobre la ingeniería, la ciencia y la tecnología, demostrando que el pensamiento humano avanza por el enfrentamiento y reconciliación de ideas opuestas y no por certezas absolutas.

En el contexto de la ética de la IA, la seguridad poscuántica o, incluso, de la evolución de los materiales industriales, se invita a los estudiantes y profesores a pensar que el progreso técnico y científico debe ir acompañado de una reflexión crítica que integre múltiples perspectivas.

La riqueza del proceso educativo se mide por el grado de pensamiento crítico que aplicamos en nuestro actuar diario, dado

que la creación de nuevo conocimiento solo es posible por el “enfrentamiento y reconciliación de ideas opuestas” y mediante un proceso de síntesis que expresa el grado de madurez del conocimiento que ostentan profesores y alumnos.

En los artículos publicados hoy se podrá observar diversos grados de madurez en los conocimientos que son reflejo del proceso de enseñanza-aprendizaje, lo que demuestra que es un proceso que todos podemos recorrer y salir victoriosos.

Agradezco a los autores por su paciencia en la publicación de este número de la revista Ingenio Libre y ratificamos nuestra convicción de que la ciencia se construye con visiones diversas, en el enfrentamiento de las ideas y con la validación fáctica que nos da la ingeniería.

Ricardo Andrés Santa Quintero
Editor en jefe
Revista Ingenio Libre

SALUDO DE LA DECANA

Desde las aulas y los laboratorios, la Decanatura de Ingeniería saluda a todos los estudiantes, docentes y lectores que hacen de esta publicación una herramienta fundamental en el proceso de difusión de ideas y resultados de la investigación. También se extiende un saludo al Comité Editorial de este número de la revista Ingeniería Libre.

El pragmatismo con el que se educa en ingeniería es una pieza clave para el desarrollo económico y social del país. Con los aportes y desarrollos de la ingeniería, la industria mejora sus procesos de producción, realiza innovaciones de producto, proceso y mercadeo, siendo ellos garantía de crecimiento económico y fortaleza de una mejor sociedad. En las aulas y laboratorios de la universidad se entiende y se practica la generación de valor, la optimización y la eficiencia, diseñando respuestas útiles y funcionales a problemáticas que vive nuestra sociedad.

El editorial de esta revista nos habla de la síntesis como respuesta filosófica a los retos que presenta día a día nuestro país y la región. Se deja claro que las soluciones surgen del proceso de contraste entre diversas ideas y diseños, y que durante el proceso no se trata de desechar

las ideas, aunque sean contrarias a la que prevalece, sino que, por el contrario, se busca, mediante consenso, la unión de las partes para constituir un todo. Esto sintetiza lo más significativo, relevante y consistente de los diversos puntos de vista existentes.

La síntesis no significa uniformidad sino articulación: unir ciencia, tecnología y el componente humano nos permite comprender la realidad en la complejidad actual. De allí la afirmación “el todo es más que la suma de sus partes”, y es gracias al proceso de síntesis que se logran objetivos comunes, soluciones a futuro y, sobre todo, un camino que direcciona todos los esfuerzos, los concentra y genera valor para la sociedad.

Agradezco a los docentes que se encargan de acompañar a nuestros estudiantes en estos procesos y que tienen una idea común: el pragmatismo orientado por el consenso y la síntesis de ideas, ese es el espíritu de nuestras aulas y laboratorios.

Nidia María Jirado
Decana de la Facultad de Ingeniería

EL IMPACTO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA EDUCACIÓN EN COLOMBIA

The impact of Artificial Intelligence on education in Colombia

*Angie Sanabria, estudiante de
Ingeniería de Sistemas, semillero Sensorama.*

*Ricardo Santa, Profesor Universitario
en Ingeniería de Sistemas*

10009-0001-0164-732X. Universidad Libre de Colombia, Bogotá, Colombia,
Angiel-sanabriaa@unilibre.edu.co.
Universidad Libre de Colombia, Bogotá, Colombia,
Ricardo.santa@unilibre.edu.co.

*Fecha de recepción: 16/06/2025
Fecha de aceptación del artículo: 25/08/2025*

RESUMEN

La inteligencia artificial (IA) está desempeñando un papel cada vez más importante en la transformación de sistemas educativos a nivel mundial. En Colombia, su implementación tiene un gran potencial para mejorar la accesibilidad, la equidad y la personalización del aprendizaje, aspectos clave para garantizar el derecho a la educación. Sin embargo, su integración enfrenta importantes desafíos como la falta de capacitación docente, la brecha digital y cuestiones éticas relacionadas con la protección de datos. Este artículo examina cómo la IA puede impactar la educación en Colombia, basándose en una revisión exhaustiva de estudios internacionales, investigaciones locales y políticas gubernamentales. Además, se incluyen los principios para un uso ético y seguro de la IA en educación, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS4), para garantizar una educación de calidad y sostenible.

Palabras clave: Impacto, Inteligencia Artificial, Derecho a la Educación, Colombia, Brecha Digital, Capacitación Docente, Protección de Datos.

ABSTRACT

Artificial intelligence (AI) is playing an increasingly important role in transforming educational systems worldwide. In Colombia, its implementation has great potential to improve accessibility, equity, and personalized learning—key aspects for ensuring the right to education. However, its integration faces significant challenges, such as a lack of

teacher training, the digital divide, and ethical issues related to data protection. This article examines how AI can impact education in Colombia, based on a comprehensive review of international studies, local research, and government policies. Additionally, it outlines the principles for the ethical and safe use of AI in education, aligned with the Sustainable Development Goals (SDG4), to ensure quality and sustainable education.

Keywords: Impact, Artificial Intelligence, Right to Education, Colombia, Digital Divide, Teacher Training, Data protection.

1. INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial (IA) se ha consolidado como una de las tecnologías más revolucionarias en varios campos, incluyendo el educativo. Su capacidad para modificar el sistema educativo de Colombia se ha potenciado debido al uso creciente de tecnologías digitales y a la puesta en marcha de políticas públicas que fomentan el acceso a recursos de educación virtual.

La implementación de la IA en la educación debe estar fundamentada en principios de seguridad, ética y transparencia, tal como lo propone el “Manifiesto de IA Segura en la Educación”. Este marco establece directrices claras para garantizar que la tecnología sea utilizada como un complemento y no un sustituto de los educadores humanos, promoviendo un aprendizaje inclusivo, sostenible y alineado con los objetivos educativos.

Por otra parte, un reto significativo es la carencia de formación para profesores en el manejo de tecnologías novedosas, incluyendo la IA. De acuerdo con un estudio de la Fundación Ford (2021) sobre Educación y Tecnología en América Latina, únicamente el 25% de los profesores en Colombia se consideran aptos para incorporar tecnologías

digitales en su labor educativa. Esta carencia de capacitación restringe la habilidad de los docentes para utilizar el potencial de la IA en las clases.

Objetivo: El objetivo de este estudio es analizar el impacto de la inteligencia artificial en la educación en Colombia, identificando las regulaciones y normativas que actualmente existen. Se busca responder a las siguientes preguntas: ¿Qué regulaciones y/o medidas debe tener la IA para garantizar que el uso de la IA respete los derechos educativos de los estudiantes, especialmente en protección de datos? ¿Cómo puede la IA mejorar el acceso a la educación en Colombia? ¿Cómo Colombia ha implementado la inteligencia artificial en la educación?

Para alcanzar este objetivo, se llevará a cabo:

1. Una revisión exhaustiva de la literatura académica.
2. Un análisis de políticas públicas, normativas que regulan el uso y la implementación de la inteligencia artificial.

2. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico de este estudio es cualitativo, con el objetivo de proporcionar una visión profunda sobre el impacto de la

inteligencia artificial (IA) en la educación en Colombia, con un enfoque en su implementación, normativas y avances en el ámbito educativo y social. Se priorizaron fuentes publicadas en los últimos cinco años, tanto en inglés como en español. A continuación, se describen los principales componentes de la metodología empleada:

1. Revisión de la literatura académica y bibliográfica:

Se llevó a cabo una exhaustiva revisión de literatura en bases de datos académicas, como SIBUL, Scopus y Google Académico, así como en informes de organismos internacionales y publicaciones científicas especializadas. Las palabras clave empleadas en las búsquedas fueron: “Inteligencia Artificial”, “Inteligencia Artificial en la Educación”, “Aplicaciones de la Inteligencia Artificial”, “Impacto de la IA en la educación”, “Estudios de la Inteligencia Artificial”, “Avances en la implementación de IA en Colombia”, “Desafíos de la IA”.

A continuación, se muestran en la tabla 1, las fuentes de investigación consultadas:

Tabla 1.

Fuentes de investigación consultadas

Fuentes consultadas	Encontradas	Consultadas
Sibul	28597	60
Scopus	1424	45
Google Académico	16000	60
Otras fuentes	38.000	50
Total		215

Fuente: Elaboración propia.

De los artículos consultados (215) en las plataformas mencionadas anteriormente en la tabla 1, se revisaron los cuales eran más recientes y relevantes para el análisis.

2. Revisión de políticas y normativas:

Se llevó a cabo una revisión de documentos de políticas públicas y marcos regulatorios, nacionales e internacionales sobre el uso de la inteligencia artificial en la educación. Para ello, se consultaron bases de datos académicas como Scopus y SIBUL, así como fuentes adicionales como Google Académico y otras fuentes, con el fin de obtener información actualizada.

Las búsquedas se realizaron utilizando palabras clave como “ética”, “principios IA”, “normativa”, “regulaciones”, entre otras relevantes. En el contexto colombiano, se analizaron leyes y directrices clave, como el Plan Nacional de Tecnologías para la Educación (2020) y la Ley 1581 de 2012 sobre la protección de datos personales. A nivel internacional, se revisaron documentos de organismos como la UNESCO y el Banco Mundial, los cuales abordan la inteligencia artificial en la educación y sus implicaciones éticas y normativas.

A continuación, las fuentes de información recopiladas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2.

Fuentes de investigación sobre políticas y normativas.

Fuentes consultadas	Encontradas	Consultadas
Sibul	26500	030
Scopus	46	28
Google Académico	16700	60
Otras fuentes	10100	15
Total		123

Fuente: Elaboración propia.

De las fuentes consultadas (123) en las plataformas mencionadas anteriormente en la tabla 2, se revisaron los cuales eran más recientes y relevantes para el análisis.

3. DESARROLLO

Principios para un uso seguro y ético de la IA en educación

Antes de profundizar en los principios específicos que definen el uso seguro y ético de la IA en la educación, es esencial proporcionar un marco estructurado para guiar la integración de estas tecnologías. Según esta revista, el artículo titulado “Inteligencia Artificial Segura, Transparente y Ética: Claves para una Educación Sostenible de Calidad (ODS4)”, publicado en la International Journal of Educational Research and Innovation [1], establece los siguientes principios para garantizar que las aplicaciones de IA se alineen con las estrategias educativas, manteniendo los niveles necesarios de seguridad, precisión y ética:

1. **Confidencialidad (SAIE1):** El sistema debe proteger la seguridad y confidencialidad de los datos de los estudiantes, incluyendo identidades, roles, registros académicos e interacciones.
2. **Alineación con estrategias educativas (SAIE2):** Las herramientas de IA deben apoyar las necesidades de la institución y cumplir con estándares de gobernanza, evitando su uso indebido.
3. **Alineación con prácticas didácticas (SAIE3):** Las aplicaciones de IA deben alinearse con prácticas didácticas definidas, integrándose bien en la educación.
4. **Precisión y minimización de errores (SAIE4):** Los sistemas de IA deben priorizar la precisión y minimizar errores, evitando alucinaciones comunes.
5. **Interfaz clara y comportamiento comprensible (SAIE5):** La IA debe presen-

tarse de una manera que estudiantes y docentes entiendan sus usos y limitaciones.

6. **Complemento a los educadores humanos (SAIE6):** La IA debe complementar, pero no reemplazar, a los educadores, limitándose a tareas administrativas y bajo supervisión humana.
7. **Formación ética y transparencia (SAIE7):** Los modelos de IA deben ser entrenados éticamente, minimizando sesgos y promoviendo la confianza.

Por otra parte, la Ley de Inteligencia Artificial de la Unión Europea (UE), la cual se implementó en agosto de 2024, representa un hito en la regulación del desarrollo y uso de la inteligencia artificial. Esta legislación busca garantizar que las aplicaciones de IA sean seguras, transparentes y respetuosas con los derechos fundamentales de las personas, estableciendo un marco claro para su utilización. La ley es una de las más completas en su tipo, marcando un precedente a nivel internacional [2].

La normativa divide los sistemas de IA en tres categorías principales según el nivel de riesgo:

- ✓ **Riesgo mínimo:** Esta categoría abarca aplicaciones cotidianas de IA como los filtros de spam en correos electrónicos, asistentes virtuales básicos o sistemas de recomendación en plataformas de comercio electrónico. Estos sistemas no representan amenazas significativas para las personas, por lo que no están sujetos a grandes restricciones, aunque deben mantener principios básicos de transparencia.
- ✓ **Riesgo alto:** Los sistemas clasificados en esta categoría son aquellos que tie-

nen un impacto directo en la vida de las personas, como los utilizados para decisiones laborales (por ejemplo, contratación de un personal), sistemas educativos, diagnósticos médicos o evaluaciones de crédito. Estas aplicaciones están sujetas a requisitos más estrictos, como garantizar la calidad de los datos utilizados, implementar medidas de supervisión humana y cumplir con altos estándares de ciberseguridad. Esto busca evitar situaciones donde decisiones tomadas por IA sean injustas o discriminatorias.

- ✓ **Riesgo inaceptable:** Aquí se incluyen sistemas cuya naturaleza pone en riesgo derechos fundamentales o la seguridad de las personas. Ejemplos incluyen tecnologías de manipulación psicológica, sistemas de puntuación social (como los utilizados para categorizar a las personas según su comportamiento) o ciertos usos del reconocimiento facial en lugares públicos. Estas aplicaciones están directamente prohibidas dentro del territorio de la UE.

Un aspecto innovador de esta ley es que también regula los modelos de IA de uso general, como los sistemas que pueden realizar múltiples tareas avanzadas, entre ellos los modelos de generación de texto como los que usamos en la actualidad. Estos sistemas deberán cumplir con requisitos específicos que aseguren su transparencia, confiabilidad y seguridad, especialmente porque tienen un alcance más amplio y pueden influir en diversas áreas.

Aunque muchas disposiciones de la ley entrarán en vigor en 2026, unas, como la prohibición de sistemas de riesgo inaceptable, se activaron con mayor rapidez, subrayando la urgencia de proteger a los ciudadanos de posibles abusos. Además, la

UE busca posicionarse como un referente global, y esta legislación tiene el potencial de influir en la forma en que otras regiones regulan la IA en el futuro [2].

Aplicaciones y avances de IA en la educación

Las aplicaciones de aprendizaje inteligente son instrumentos pedagógicos que emplean tecnologías de inteligencia artificial, tales como LLM y modelos de difusión, para generar contenido e integrarse en plataformas LMS como Moodle, Sakai o Blackboard. Desde finales de 2022, el interés en asistentes de Inteligencia Artificial, como perplexity, ha crecido. que emplea LLM para resolver interrogantes y producir contenido con citas.

En 2024, OpenAI presentó “Asistentes”, una herramienta que facilita la creación de asistentes de Inteligencia Artificial en aplicaciones a medida, orientados a proporcionar respuestas basadas en fuentes y procesar lenguaje natural, manejando contextos complicados y proporcionando resultados estructurados [4].

En Colombia, una muestra significativa de los avances en IA es la estrategia “Potencia Digital”, promovida por el Ministerio TIC. Esta iniciativa busca democratizar el acceso a la inteligencia artificial, fomentando su uso en múltiples sectores y facilitando su integración en procesos productivos, educativos y administrativos [3]. “Potencia Digital” se fundamenta en tres pilares esenciales:

1. **Acceso y apropiación tecnológica:** que implementa programas de alfabetización digital en IA para estudiantes, emprendedores y funcionarios públicos, con el objetivo de reducir la brecha de conocimiento sobre esta tecnología.

2. Innovación y desarrollo de aplicaciones IA: Fomenta alianzas entre los sectores público, privado y académico para desarrollar soluciones basadas en IA que optimicen servicios en áreas clave como salud, educación, seguridad y comercio.

3. Infraestructura y datos abiertos: creación de plataformas y repositorios de datos abiertos que faciliten el entrenamiento de modelos de IA, promoviendo la transparencia y el uso responsable de esta tecnología [3].

Revisión de Tecnologías IA en la Educación

ChatGPT, en su versión gratuita lanzada al público en noviembre de 2022, no cumple completamente con los principios de inteligencia artificial segura en la educación establecidos por García-Peñalvo [1]. Aunque representa una herramienta innovadora, presenta limitaciones en aspectos clave como confidencialidad, alineación educativa y supervisión humana, esenciales para garantizar su seguridad y eficacia en entornos educativos. OpenAI ofrece una versión personalizada, las GPT, diseñadas para tareas específicas de aprendizaje, enseñanza o trabajo, que permiten a los usuarios adaptar el sistema mediante instrucciones y conocimientos adicionales sin requerir codificación.

Estas GPT pueden alinearse principalmente con los principios mencionados en este artículo, los “Principios para un uso seguro y ético de la IA” en educación como SAIE3 (alineación didáctica) y SAIE4 (precisión), al centrarse en contextos educativos concretos y mejorar la relevancia de los resultados. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la transparencia, protección de datos y supervisión humana [5]. Por

tanto, aunque ChatGPT y las GPT representan avances prometedores, su cumplimiento con los estándares de IA segura en la educación es limitado, lo que subraya la necesidad de mejoras para su completa adaptación a entornos educativos seguros y éticos [1].

Personalización del Aprendizaje

El aprendizaje personalizado, impulsado por la Inteligencia Artificial, es otro de los beneficios más significativos para el sistema educativo colombiano. Un estudio realizado por EdTech Europe (2022) sobre el uso de la inteligencia artificial en el ámbito educativo [6]. Se evidenció en América Latina que las plataformas fundamentadas en inteligencia artificial permiten que los estudiantes obtengan conocimientos a su propio ritmo y reciban retroalimentación inmediata, lo que incrementa su motivación y rendimiento. En Colombia, el uso de estas plataformas puede ser de mucha ayuda dando beneficios para estudiantes que, por diversas razones, requieren un método de enseñanza personalizado para sus necesidades particulares.

De acuerdo con la UNESCO (2021), la IA posee la habilidad de personalizar el aprendizaje, incrementar la eficacia en la gestión y fomentar la equidad en los sistemas de educación. En Colombia, un país marcado por la variedad geográfica y socioeconómica, la IA podría ser un instrumento esencial para disminuir las disparidades en la educación, particularmente en las áreas rurales y desfavorecidas [12].

Accesibilidad y Equidad

Las aplicaciones de aprendizaje inteligente son herramientas que usan tecnologías de IA, como LLM y modelos de difusión, para

crear contenido y integrarse en LMS como Moodle, Sakai o Blackboard. Desde finales de 2022, ha crecido el interés en asistentes de IA, como perplexity. En 2024, OpenAI lanzó “Asistentes”, que permite crear asistentes de IA en aplicaciones personalizadas [7].

Una investigación llevada a cabo por La Red Nacional de Formación Virtual (2021), evidenció que las plataformas educativas adaptativas fundamentadas en Inteligencia Artificial posibilitan que los alumnos, sin importar su localización, tengan acceso a cursos y contenidos de excelente calidad. De acuerdo con esta investigación, el 65% de los alumnos rurales que emplearon estas plataformas experimentaron avances notables en su desempeño escolar, lo que evidencia que la Inteligencia Artificial puede convertirse en un instrumento potente para vencer la inequidad en el acceso a la educación [7]. No obstante, tal como señalan autores como Pérez & Gómez (2023), el efecto de la Inteligencia Artificial en la equidad se basa en la infraestructura tecnológica existente.

Predicción y prevención del abandono escolar

La Inteligencia Artificial desempeña un rol esencial en la detección precoz de los alumnos con riesgo de deserción escolar. A través del estudio de datos académicos y de comportamiento, los sistemas fundamentados en Inteligencia Artificial pueden prever qué alumnos tienen más probabilidades de dejar sus estudios y sugerir intervenciones personalizadas para prevenirlo. El estudio de estos datos posibilita que los sistemas educativos brinden respaldos concretos para alumnos en situación de vulnerabilidad, lo que conlleva a una reducción notable de la deserción escolar [8].

Formación Docente y Capacitación en Tecnologías Emergentes

Otro reto significativo es la carencia de formación para profesores en el manejo de tecnologías novedosas, incluyendo la inteligencia artificial [18]. De acuerdo con un estudio de la Fundación Ford (2021) acerca de Educación y Tecnología en América Latina, únicamente el 25% de los profesores en Colombia se consideran aptos para incorporar tecnologías digitales en su labor educativa. Esta carencia de capacitación restringe la habilidad de los profesores para utilizar el potencial de la Inteligencia Artificial en las clases [13].

El Plan Nacional de Formación Docente en TIC (MEN, 2022) reconoce la necesidad de capacitar a los docentes en el uso de tecnologías emergentes, pero la implementación de este plan se enfrenta a retos relacionados con la disponibilidad de recursos y el tiempo para formación continua. Como mencionan Carbonell-García et al [4]. La integración exitosa de la IA depende de la capacitación constante de los docentes para poder usar herramientas tecnológicas que optimicen el aprendizaje [7].

Riesgos y Consecuencias de la IA

De acuerdo con el artículo “Regulación del Manejo de la Inteligencia Artificial, Consecuencias y Daños a la Sociedad por su Mal Uso” de Loján Alvarado y Cárdenas Villavicencio, los sistemas de inteligencia artificial (IA) presentan importantes desafíos en el ámbito de la ciberseguridad [9]. Entre los principales riesgos se encuentran los ataques de envenenamiento de datos, que consisten en la manipulación de la información de entrenamiento para alterar el comportamiento de los modelos, y la suplantación de modelos legítimos, donde un sistema es engañado para aceptar

uno falso. También existe el peligro de la extracción de modelos, que implica el robo de parámetros y arquitecturas, y la inserción de backdoors, vulnerabilidades ocultas que comprometen los modelos. Además, los ataques adversarios representan un desafío al engañar a los sistemas y provocar fallos [12]. Para contrarrestar estos riesgos, se recomienda emplear tecnologías como cifrado, firmas digitales y blockchain, aunque los ransomwares inteligentes continúan evolucionando y aprovechando la IA para personalizar ataques globales [9].

No obstante, más allá de los riesgos técnicos, El uso responsable de la IA en el ámbito educativo requiere entender sus limitaciones y consecuencias éticas. Aunque estas tecnologías pueden ofrecer soluciones innovadoras, no deben sustituir el juicio humano ni disminuir la importancia del pensamiento crítico y el contexto social de cada estudiante. Esto destaca la necesidad de abordar estas herramientas de manera crítica y ética, alineadas con las políticas educativas del siglo XXI. Uno de los desafíos clave es:

Dependencia tecnológica: El uso excesivo de herramientas basadas en IA puede debilitar habilidades esenciales como el pensamiento crítico, la resolución de problemas o la toma de decisiones autónoma, tanto en estudiantes como en docentes [17].

POLÍTICA NACIONAL DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

A partir del año 2025, con la firma de la “Política Nacional de Inteligencia Artificial”, la educación sobre IA y la educación usando la IA, será uno de los pilares para impulsar la transformación social y económica de Colombia a mediano y largo plazo [16].

Es así como el CONPES 4144, titulado “Política Nacional de Inteligencia Artificial”, reconoce la importancia transversal de la IA en múltiples sectores, incluyendo potencialmente la educación. Si bien el documento no dedica una sección exclusiva a la educación, sí establece objetivos y líneas de acción que tienen implicaciones relevantes para este campo. La política busca impulsar la transformación social y económica de Colombia mediante la adopción y el desarrollo ético y sostenible de sistemas de IA. Este enfoque general sienta las bases para considerar cómo la IA puede impactar y mejorar el sector educativo en diversos niveles [15].

Uno de los pilares fundamentales del CONPES 4144 es el Desarrollo de Capacidades y Talento Digital. Este pilar reconoce la necesidad de formar a los colombianos en las habilidades necesarias para el diseño, uso y apropiación de la IA. En el contexto educativo, esto implica la necesidad de desarrollar currículos y programas de formación que permitan a estudiantes y educadores comprender y utilizar las herramientas de IA de manera efectiva. Además, se busca fortalecer el talento digital necesario para impulsar la investigación, el desarrollo y la innovación en sistemas de IA en el país [16].

Identifica insuficiencias en la investigación, desarrollo e innovación en Inteligencia Artificial y el impacto directo en el sector educativo, ya que la falta de investigación y desarrollo en IA educativa puede frenar la adopción de soluciones innovadoras y adaptadas a las necesidades del contexto colombiano. Superar estas insuficiencias requiere de la articulación de actores del ecosistema de innovación, incluyendo las instituciones educativas, para promover el desarrollo y uso responsable de la IA en la enseñanza y el aprendizaje [15].

CONCLUSIONES

Regulaciones y medidas necesarias para el uso ético de la IA: Es indispensable establecer marcos normativos claros que aseguren la protección de los derechos educativos de los estudiantes, especialmente respecto a la confidencialidad y protección de datos personales. Para ello, se recomienda adoptar principios éticos como confidencialidad, transparencia, supervisión humana y minimización de errores, alineados con normativas internacionales, como la Ley de IA de la Unión Europea.

Impacto positivo de la IA en la accesibilidad educativa: La IA posee un gran potencial para mejorar significativamente el acceso a la educación en Colombia, particularmente en áreas rurales y desfavorecidas. El uso de plataformas educativas adaptativas y personalizadas fundamentadas en IA ha demostrado aumentar considerablemente el desempeño académico y reducir inequidades educativas.

Situación actual de implementación de IA en Colombia: El país ha comenzado a integrar la IA en el ámbito educativo mediante iniciativas como “Potencia Digital”, que promueve la apropiación tecnológica, la innovación en soluciones educativas basadas en IA y la creación de infraestructuras digitales

abiertas. A pesar de estos avances, la plena implementación enfrenta barreras como la insuficiente capacitación docente y limitaciones en infraestructura tecnológica.

Desafíos pendientes para una integración efectiva de la IA: Uno de los retos críticos es mejorar la formación continua de los docentes en tecnologías emergentes. Actualmente, solo una minoría de profesores se siente capacitada para integrar adecuadamente estas herramientas en sus prácticas educativas, lo que limita el aprovechamiento total del potencial de la IA.

Riesgos éticos y de ciberseguridad: Es fundamental implementar medidas sólidas de ciberseguridad y formación ética para contrarrestar riesgos inherentes al uso indebido de la IA, tales como ataques de envenenamiento de datos, vulnerabilidades ocultas y ataques adversariales. Estas medidas deben ser integrales y continuamente actualizadas, promoviendo buenas prácticas de seguridad tecnológica y protección de la información. No obstante, pese a la existencia de normas y leyes vigentes, actualmente no existe una entidad específica encargada de verificar y regular constantemente el cumplimiento efectivo de dichas normativas. prácticas educativas, lo que limita el aprovechamiento total del potencial de la IA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Alier, F. J. García-Peñalvo, J. Pereira, y M. J. Casany, «Inteligencia Artificial Segura, Transparente y Ética: Claves para una Educación Sostenible de Calidad (ODS4)», *International Journal of Educational Research and Innovation*, vol. 2024, pp. 15–30. [En línea]. Disponible en: <https://www.upo.es/revistas/index.php/IJERI/article/view/11036>
- [2] Administración Electrónica, «Entrada en vigor de la Ley Europea de Inteligencia Artificial», *Administración Electrónica*, 02 agosto 2024. [En línea]. Disponible en: https://administracionelectronica.gob.es/pae_Home/pae_Actualidad/pae_Noticias/2024/Agosto/noticia-2024-08-02-Entrada-vigor-Ley-Europea-Inteligencia-Artificial.html.
- [3] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (Ministerio TIC), *Con aprobación de Conpes de IA, Colombia cuenta con Política Pública para el desarrollo de la Inteligencia Artificial*, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/399915:Con-aprobacion-de-Conpes-de-IA-Colombia-cuenta-con-Politica-Publica-para-el-desarrollo-de-la-Inteligencia-Artificial>
- [4] E. L. Muñoz Andrade, «Aplicación de la inteligencia artificial en la educación superior», *Docere*, n.º 29, pp. 21–25, feb. 2024.
- [5] M. González, R. Sánchez, y J. Ortega, «Privacidad de los datos personales en plataformas educativas de IA: Retos y oportunidades en Colombia», *Revista de Derecho y Tecnología*, vol. 15, n.º 2, pp. 132–149, 2022.
- [6] The World Bank, *Education and Artificial Intelligence: Case Studies in Latin America*, 2022.
- [7] Ministerio de Educación Nacional de Colombia (MEN), *Plan Nacional de Tecnologías para la Educación*, 2020.
- [8] L. Pérez y A. Gómez, «Brecha digital y acceso a las tecnologías educativas en Colombia», *Revista de Innovación Educativa*, vol. 22, n.º 3, pp. 210–225, 2023.
- [9] H. P. Loján Alvarado y O. E. Cárdenas Villavicencio, «Regulación del Manejo de la Inteligencia Artificial, Consecuencias y Daños a la Sociedad por su Mal Uso», *Ciencia Latina*, vol. 8, n.º 1, pp. 1966–1978, feb. 2024.
- [10] OECD, *Tecnologías Educativas y Administración Escolar*, 2021.
- [11] World Bank, *Education and Artificial Intelligence: Case Studies in Latin America*, International Bank for Reconstruction and Development, 2024.
- [12] UNESCO, *La Inteligencia Artificial en la Educación: Un Marco para la Acción*, 2021.
- [13] J. R. Garcés Ángulo, W. G. Aguilar Chasipanta, S. D. Rodríguez Bermeo, y C. D. P. Burbano Padilla, «Impacto de la Inteligencia Artificial en la Educación Superior», *DC*, vol. 10, n.º 3, pp. 983–995, ago. 2024.
- [14] Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC), *Informe sobre conectividad y acceso a internet en Colombia*, 2020.
- [15] CESA, *Colombia y el desarrollo de la inteligencia artificial*, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cesa.edu.co/news/colombia-y-el-desarrollo-de-la-inteligencia-artificial>
- [16] Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), *Política Nacional de Inteligencia Artificial*, CONPES 4144, Departamento Nacional de Planeación, Bogotá, D.C., 14 feb. 2025.
- [17] C. Pombo, «¿Cómo integrar a la inteligencia artificial en la educación de manera responsable?», *Blog del BID*, 14-dic-2023. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.iadb.org/educacion/es/inteligencia-artificial-educacion>
- [18] *INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA EDUCACIÓN*, *ReDTIS*, vol. 7, no. 1, pp. 100–106, Dec. 2023, doi: 10.61530/redtis.vol7.n1.2023.136.100-106.

USO DE ESCORIA COMO COMPONENTE PRINCIPAL DE UN REVESTIMIENTO PROTECTOR: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Using slag as a major component of a protective coating: a bibliographic review

G. Rojas¹, J. Florian², J. Ferneli³, H. Rojas⁴, J. Escobar⁵

¹Universidad Libre Seccional Bogotá – Facultad de Ingeniería
ginethn-rojasf@unilibre.edu.co

²Universidad Libre – Seccional Bogotá – Facultad de Ingeniería.
johnj-florianm@unilibre.edu.co

³Universidad Libre – Seccional Bogotá – Facultad de Ingeniería.
josef-girlh@unilibre.edu.co

⁴Universidad Libre – Seccional Bogotá – Facultad de Ingeniería
hector.rojas@unilibre.edu.co

⁵Universidad Libre – Seccional Bogotá – Facultad de Ingeniería
josef-escobarz@unilibre.edu.co

RESUMEN

Esta revisión analiza el estado actual del uso de la escoria en la fabricación de recubrimientos, destacando su potencial como material protector. Un proceso clave en su desarrollo es el slag splashing, utilizado en la industria siderúrgica para recubrir los hornos con escoria fundida, reduciendo el desgaste y prolongando la vida útil de los equipos. Este método ha servido de base para investigaciones que buscan optimizar la composición y propiedades de la escoria en aplicaciones de recubrimiento. La escoria se emplea en recubrimientos industriales innovadores, como pinturas y recubrimientos cerámicos, destacando por su resistencia y estabilidad térmica. Además, su uso en cementos, concretos e infraestructura vial impulsa la economía circular, reduciendo desechos industriales y fomentando materiales más sostenibles.

Palabras clave: Recubrimientos de escoria, pinturas industriales a base de escoria, cerámicas de escoria, slag splashing.

ABSTRACT

This review analyzes the current state of slag utilization in coating manufacturing, highlighting its potential as a protective material. A key process in its development is

slag splashing, used in the steel industry to coat furnaces with molten slag, reducing wear and extending equipment lifespan. This method has served as the basis for research aimed at optimizing the composition and properties of slag for coating applications.

Slag is employed in innovative industrial coatings, such as paints and ceramic coatings, recognized for their durability and thermal stability. Additionally, its use in cement, concrete, and road infrastructure promotes the circular economy, reducing industrial waste and fostering more sustainable materials.

Keywords: Slag coatings, slag-based industrial paints, slag ceramics, slag splashing.

1. INTRODUCCIÓN

Slag is a very common by-product of the iron and steel industry. With a production of around 1.90 billion tons per year [1], massive quantities of slag can be recovered. Its most common use is in the construction industry [2], sometimes achieving better results than classic materials. Slag is mostly used as a road construction material [3] or fine concrete aggregate [4], though many other usages are being developed from rail construction [5] to marine construction blocks [6]. It can be used as a fertilizer in agriculture [7], to neutralize soil acidity [8], enhance crop productivity, mitigate greenhouse gas emissions [9], and stabilize heavy metals in contaminated soils [10]. It is also utilized for wastewater treatment thanks to its porosity [11]. It is in this rather active context for slag, the use of slag as a coating is arising [12]. All these uses create slag a globally traded resource and show that it should not be considered a waste product gave the multiple opportunities for reuse [13]. The wide variety of uses of slag is a consequence of the many components that make up slag. Each mine produces a different slag which can be valued in different ways.

2. METHODOLOGY: DOCUMENT SELECTION AND REVIEW

To develop this review, a structured methodology was followed to ensure a comprehensive analysis of the current state of research on slag-based protective coatings. A systematic search was conducted using academic databases, including Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar, to identify relevant studies. The selection process was based on the following criteria:

- **Keywords and Search Strategy:** Terms such as slag coatings, industrial slag painting, slag ceramic, slag splashing, and slag-based glass ceramics were used, employing Boolean operators (AND, OR) to refine the results.
- **Inclusion Criteria:** Articles were selected based on their relevance to slag applications in coatings, their publication in peer-reviewed journals or technical reports, and their contribution to understanding the material's properties and applications.
- **Exclusion Criteria:** Studies not directly related to protective coatings, those with

outdated or redundant data, and papers lacking sufficient technical information were excluded.

Following this process, over 70 references were incorporated, covering recent advancements, material properties, and industrial applications of slag-based coatings. This approach ensures that the review provides a wellsupported and up-to-date perspective on the topic.

3. ORIGIN OF A SLAG

Slag is an inevitable by-product in metal making process. Most of the slag produced today is ferrous slag. It comes from an ore

used to produce iron or steel. In this review, we concentrate on this kind of slag, bearing in mind that slag from different ores exists with different mineralogical compositions, including in general less iron and more extracted minerals (for example titanium slag will have titanium among its main components).

There are two major categories of slag: steel slag (slag of basic oxygen furnace BOF), and iron slag (slag of blast furnace BF). Steel slags are produced when the molten Fe from the blast furnace and scrap steel are combined with alloys to produce a particular type or grade of steel (Fig. 1).

Figure 1.

Schematic explanation of slag generation in a blast furnace operation to produce iron and in a modern steel plant to produce steel [16].

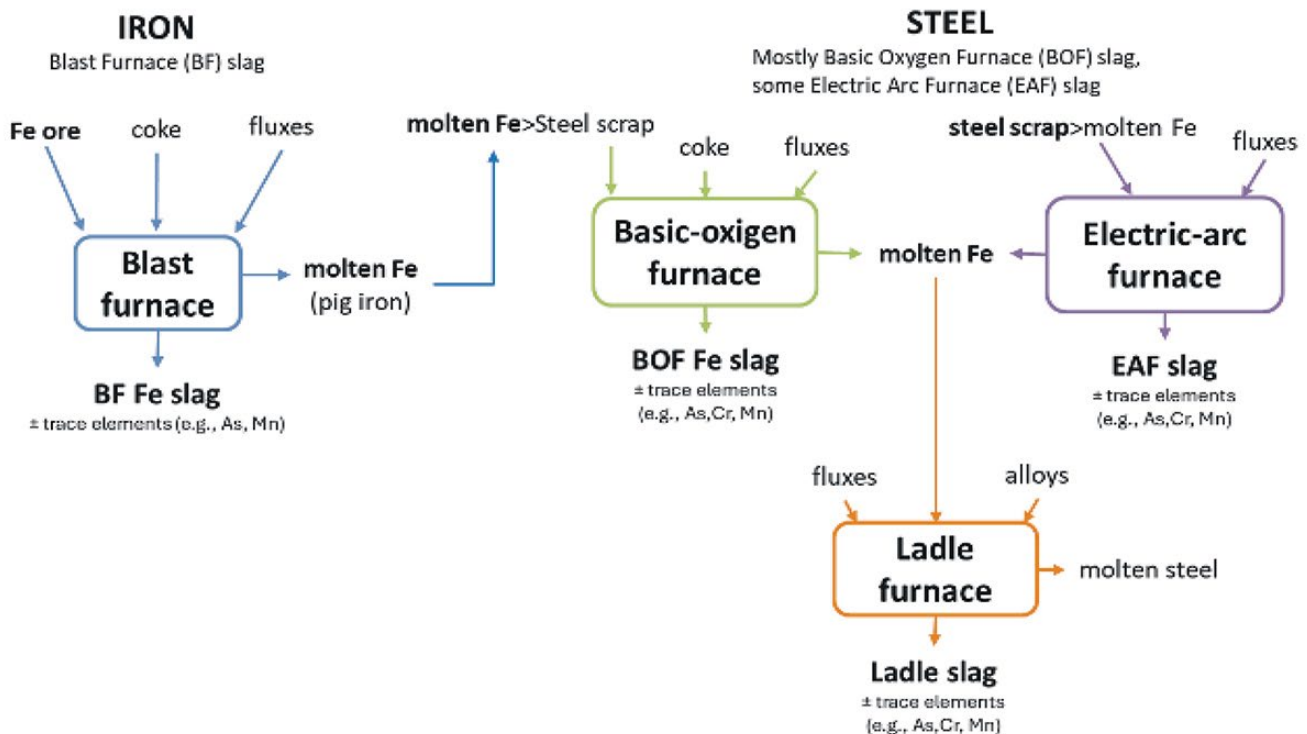


Figure 1. also illustrates the processes which could produce 126 kg Steelmaking slag (BOF) and 275 kg Ironmaking slag (BF) of slag for each ton of steel produced [14]. Together, those routes make up 70% of world steel production. These two types of slag will hereafter be referred to as BOF slag and BF slag. Scrap-based steel accounts for about 30% of global steel production, it is produced by recycling steel and electric arc furnace (EAF), is in general grouped with BOF slags [15].

There are three main types of marketed ironmaking or BF slag, categorised by how they are cooled – air-cooled, granulated, and pelletised (or expanded). Steelmaking slag (BOF and EAF) is cooled similarly to aircooled BF slag and is used for most of the same purposes. As the production process varies at this stage, depending on the type of steel being made, the resulting slag also has diverse chemical properties making it more difficult to use than ironmaking slag. Some of the recovered slag is used internally in the steelmaking furnace or sinter plant, while approximately 50% of the recovered slag is used externally in construction applications, primarily roads [17].

3.1 Gray Iron Smelting Slag: Generation, Composition, and Management

Gray iron smelting slag is a byproduct generated during the production of cast iron in smelting processes that use cupola, electric, or induction furnaces. This type of slag forms from impurities in the iron ore and added fluxes, combining with oxidation products from the charge materials and the refractory linings of the furnace. Unlike blast furnace slag, which comes from pig iron production and has a higher lime content, or steel slag, which is rich in metallic oxides and phosphorus and sulfur compounds, gray iron slag forms during the

smelting stage and can have applications in construction and other industries [18].

3.1.1 Generation of Slag in the Smelting Process

Reactions in the Furnace: During the smelting of gray iron, impurities such as sulfur and phosphorus react with fluxes (limestone or dolomite) to form slag. This material floats on molten iron due to its lower density, allowing for its separation and collection [18, 20].

Volume generated: Approximately 50 to 200 kg of slag are generated per ton of gray iron produced, depending on the ore quality, furnace design, and additives used [18].

Operational factors: Conditions such as furnace temperature, charge composition, and flux ratios directly influence the quantity and quality of slag generated [19, 21].

Mineralogical structure: The slag is primarily composed of crystalline phases such as wollastonite and fayalite, as well as amorphous glassy phases. These characteristics influence its mechanical and chemical properties [19, 20].

3.1.2 Typical composition of a ferrous slag.

The main components of slag are calcium and silica, and to a lesser extent aluminum, magnesium, and iron (much more present in BOF slag). These elements are present in the form of oxides. Table 1 contains a summary of ferrous slag chemistry from nearly 40 sources and for each slag type, lists the minimum, maximum, and average values, as well as the number of samples or analyses (n_1) and the number of studies (n_2) that reported the chemistry. The slags from diverse sites are still quite different, as they come from different mines and have undergone distinct transformation processes.

Table 1.

Summary of major, minor, and trace element chemistry of slag-by-slag type [16].

Component	Fe				Pre-1900 Fe				Steel			
	Min wt.%	Max wt.%	Average wt.%	n1 n2	Min wt.%	Max wt.%	Average wt.%	n1 n2	Min wt.%	Max wt.%	Average wt.%	n1 n2
Al₂O₃	5,86	41,2	14,3 41	13	3,42	22,3	10,6 42	4	0,02	44,3	7,49 60	
CaO	0,15	93,4	36,1 38	12	1,34	40,1	15,2 42	4	1,63	70,1	34,9 62	
FeO	0,02	13,6	1,6 37	11	0,08	61,8	16,1 42	4	1,07	50,9	22,9 61	
K₂O	0,08	5,06	0,99 33	10	0,19	3,67	1,41 37	4	0,01	3,89	0,24 29	
MgO	1,66	19,6	8,78 41	13	0,14	24,7	8,87 42	4	0,43	19,9	7,22 58	
MnO	0,01	26	1,9 34	10	0,04	11,6	0,95 42	4	0,02	21,5	4,32 55	
Na₂O	0,09	2,65	0,49 33	12	0,06	0,76	0,36 37	3	0,02	0,57	0,16 31	
S	0,38	3,15	1,27 26	6	0,02	0,96	0,19 20	1	0,03	1,06	0,22 30	8
SiO₂	26,6	46,1	35,3 41	13	27,2	61,3	45,2 42	4	0,03	61,1	16,9 56	
TiO₂	0,02	3,7	0,63 36	9	0,02	1,1	0,79 37	3	0,02	1,98	0,66 37	

Abbreviations: min=minimum value, max=maximum value, n1=number of samples ,n2=number of studies that have values.

Major element concentrations are reported as oxides, which is the common convention for expressing majorelement bulk chemical concentrations as well as the chemical composition of crystalline oxides and silicates.

Calcium Oxides (CaO): Originates from the limestone flux, essential for neutralizing acidic components in the ore and forming a stable slag [17], [18].

Silica (SiO₂): The primary acidic component, derived from the iron ore and the refractory lining of the furnace [17], [19].

Magnesium Oxides (MgO): Provided by fluxes such as dolomite, these oxides enhance the stability of the slag [19].

Iron Oxides (FeO and Fe₂O₃): These are byproducts of iron oxidation during smelting [9], [20].

Alumina (Al₂O₃): Present in smaller amounts, alumina contributes to the viscosity of the slag [19].

3.1.3 Trace Elements

In addition to its primary components, ferrous slag contains trace elements that can significantly impact its environmental behavior and usability. Some of the most relevant trace elements include manganese (Mn), sulfur (S), and phosphorus (P) [20].

Manganese (Mn): Present in small quantities, manganese can influence the mechanical properties of slag-based coatings. However, excessive leaching of manganese into the environment may pose toxicity risks to aquatic ecosystems.

Sulfur (S): Sulfur in slag originates from the ironmaking process and can be problematic if not properly managed. When exposed

to moisture, sulfur compounds can lead to the formation of acidic leachates, potentially contributing to soil and water contamination.

Phosphorus (P): While phosphorus can enhance slag's cementitious properties, excessive amounts may cause eutrophication in water bodies if leached in uncontrolled conditions.

As an example of a real characterization of gray iron slag the Table 2 presents relevant data. An X-ray fluorescence spectrometer (MagixPro PW-2440 Philips, WDXRF) equipped with a Rhodium tube and a maximum power of 4 kW was used for the analysis. This equipment has a sensitivity of 100 ppm (0.01%) for detecting heavy metallic elements.

Table 2.

Real characterization of gray iron slag [23].

Element	Element y/o compound	XRF-8083 M-SLAG (wt. %)
Silicon	SiO ₂	49,50%
Calcium	CaO	32,30%
Aluminum	Al ₂ O ₃	10,19%
Iron	Fe ₂ O ₃	2,79%
Manganese	MnO	2,48%
Titanium	TiO ₂	0,83%
Potassium	K ₂ O	0,63%
Magnesium	MgO	0,39%
Sulfur	SO ₂	0,25%
Sodium	Na ₂ O	0,23%
Barium	Ba	0,13%
Chromium	Cr	0,09%
Cerium	Ce	0,07%
Strontium	Sr	0,04%
Zirconium	Zr	0,03%
Phosphorus	P ₂ O ₅	0,03%
Vanadium	V	0,01%
Zinc	Zn	73 ppm*
Rubidium	Rb	47 ppm*
Yttrium	Y	27 ppm*
		* Informative values

The chemical composition of the gray iron slag analyzed in Table 2 shows a high content of silica (49.50%) and calcium (32.30%), which suggests its suitability for ceramic and glass coatings due to its chemical stability and mechanical strength.

The presence of aluminum (10.19%) and magnesium (0.39%) enhances its thermal stability and corrosion resistance, while the low iron content (2.79%) reduces the risk of oxidation. Additionally, elements such as manganese (2.48%) and titanium (0.83%) can improve hardness and durability.

However, controlling the sulfur content (0.25%) is essential, as excessive levels could affect coating adhesion. These findings align with previous studies highlighting the influence of silica and calcium content on the suitability of slag for industrial coatings [16, 22].

3.1.4 Management and Applications of Gray Iron Slag

Processing and Reuse:

Cooling: Slag can be rapidly cooled in water (granulated slag) or allowed to cool slowly in air (crystallized slag), affecting its texture and usability [18], [21].

Crushing and Classification: Crushing and classification are key processes in slag treatment, defining its granulometry, homogeneity, and usability. Crushing reduces slag into smaller, manageable particles, enhancing reactivity, while classification sorts them by size and composition for consistent application. Studies [20] show that proper classification improves slag's performance in construction materials like concrete and road bases, while also enhancing its efficiency in environmental applications such as wastewater treatment and soil stabilization [21].

Industrial Applications:

Construction: Used as an aggregate in concrete mixtures, road bases, and in the production of bricks and blocks [17], [19].

Soil Conditioner: Due to its calcium and magnesium content, it can improve acidic soils in agricultural applications [19], [20].

Thermal Insulation: Granulated slag can be processed into mineral wool for thermal and acoustic insulation [21].

Environmental Impact:

Benefits: Reusing slag minimizes landfill disposal, reduces the need for raw material extraction, and lowers CO₂ emissions associated with the production of virgin materials [9], [20].

Risks: Improperly managed slag can leach elements such as sulfur or phosphorus, posing risks to soil and groundwater [18], [21].

3.2 Processes of Non-Ferrous Metal Smelting That Generate Slags

Non-ferrous slags are byproducts generated during the smelting of nonferrous metals such as copper, zinc, and lead. These metallurgical processes involve the separation of the desired metals from impurities present in the ores, resulting in the formation of slags primarily composed of silicates and metallic oxides.

Copper Smelting Fusion Process:

Copper concentrate is subjected to high temperatures in a reverberatory or flash furnace, where copper sulfide is converted into metallic copper and sulfur dioxide. During this process, impurities combine with the added fluxes to form slag, which floats on the molten metal and is periodically removed [24, 25].

Zinc Smelting Pyrometallurgical

Process: Zinc concentrate is heated in a roasting furnace to oxidize sulfides to oxides. Then, in a reduction furnace, zinc oxide is reduced to metallic zinc, while impurities combine with fluxes to form slag [26].

Lead Smelting: Blast Furnace

Process: Lead ore is mixed with coke and fluxes and introduced into a blast furnace. At high temperatures, lead melts and separates from impurities, which form slag [27].

Their chemical composition varies depending on the processed ore and the specific smelting conditions, but it generally includes the following main components:

Silica (SiO₂): Acts as an acidic component in slag formation. Its content can vary widely; for example, in copper slags, SiO₂ levels can range between 38% and 49% [24].

Iron oxides (FeO and Fe₂O₃): Present in significant amounts, especially in copper slags, where Fe₂O₃ content can range between 18% and 37% [24].

Calcium (CaO) and magnesium oxides (MgO): These oxides originate from the fluxes added during smelting to facilitate slag formation and the removal of impurities. Their presence is essential for the formation of stable mineral phases in slag [25].

Alumina (Al₂O₃): Although generally present in smaller proportions, alumina contributes to the formation of mineral phases and affects the physical properties of slag [26].

Other components: Depending on the ore and smelting process, slags may contain other elements such as manganese oxides (MnO), zinc oxides (ZnO), lead oxides

(PbO), and trace elements like arsenic (As), chromium (Cr), and nickel (Ni) [27].

The generation of non-ferrous slags is directly related to the type of metal produced and the smelting techniques employed. For example, in copper production, approximately 2 to 3 tons of slag are generated per ton of metal produced [28]. These slags are classified as non-hazardous waste, as they meet the maximum permissible levels of contaminants, facilitating their potential reuse in various industrial applications [29].

It is important to note that the composition and quantity of slag generated may vary depending on the operational practices of each smelter and the specific characteristics of the processed ore [30]. Therefore, it is essential to conduct a detailed characterization of slags to determine their potential applications and ensure environmentally responsible management [31].

3.3 Slag splashing

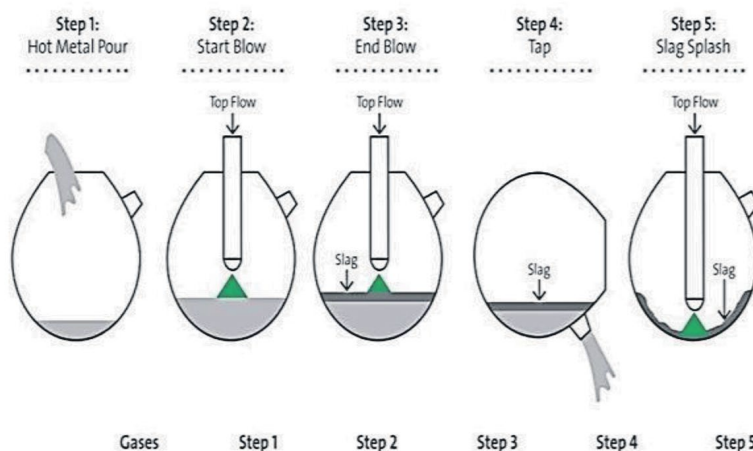
If slag is used as a coating, it is mainly because of the slag splashing technique. It was in 1992

that the Indiana Harbour Works of LTV first discovered and implemented that practice. The vessels, used for the transformation of pig iron into steel (BOF process), the lining had to be protected from mechanical erosion and chemical corrosion due to the numerous cycles they are subjected to. To protect them, slag splashing is currently used worldwide. It has the advantage of being very economical and environmentally friendly as it finds a use for what would otherwise be an undesirable waste. It also has the advantage of being easy to do and requiring no additional equipment.

Slowly this technique was used in the other steel melting shops of the world and Inland's no. 4 BOF Shop has reported a lining life of plus 6000 heats (steelmaking cycles) [32]. Fig. 2 shows the origins of ferrous slags, slag splashing consists of reusing part of the slag produced by the pig iron process. At the end of the transformation process, only slag remains at the bottom of the vessel. Some of the slag is removed so as not to create too much coating and lose vessel volume, and then add components are usually added to improve the quality of the coating.

Figure 2.

Diagram of the stages in the steelmaking process using the Basic Oxygen Furnace (BOF) [33].



The oxygen lance is then used to spray the molten slag onto the vessel walls. The oxygen lance, used in the steel/slag separation process, is now used to blow nitrogen at high pressure, resulting in a better-quality coating.

This process is also based on the complex composition of slag. Since slag has several distinct phases at the splashing temperature around 1600°C - 1800°C [32], the more liquid phase is projected onto the vessel walls and gives better adhesion while the more solid phase will remain at the bottom of the vessel which needs better protection as it is subjected to more erosion and higher temperatures [34].

3.4 Correction of the composition

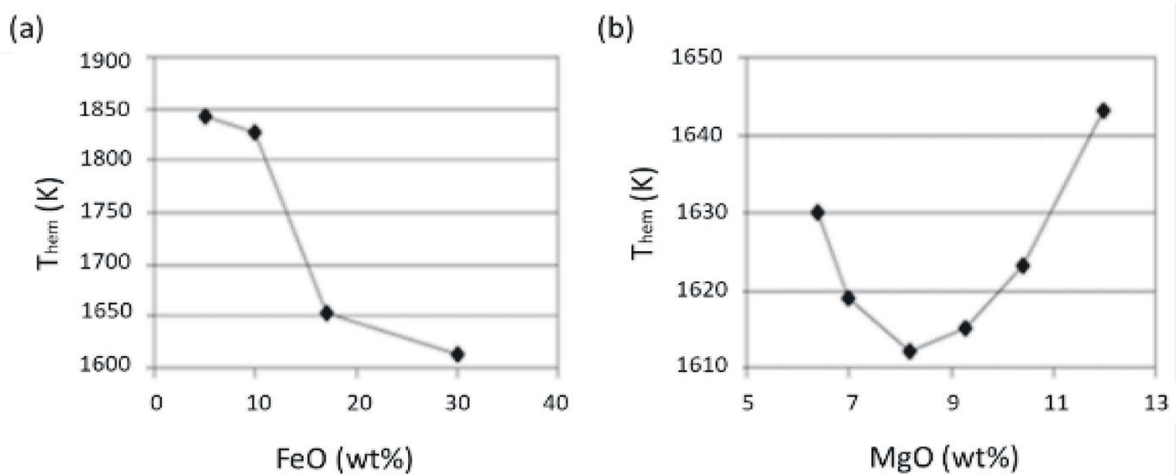
The slag in the vessel is usually combined with additives to gain a better result. The purpose of this mixing is mostly to correct the viscosity of the slag. Indeed, a low viscosity is required for a good splashing of the slag [35]. It is contemplated that a slag should have a liquid fraction of at least

90% for good splashing. The presence of solid particles is significant even at very high temperatures and should therefore be avoided [36].

However, a slag saturated with MgO (MgO-C is the main additive of splashing slag) is preferred, as it will make the slag more viscous. MgO will form magnesium ferrite and react with itself making up most of the viscous phase of the slag (at high melting temperature), causing it even more viscous and increasing its melting temperature [34]. The result is a layer in the bottom with a high melting temperature and a better thickness [37]. This MgO saturation will however increase the erosion damage according to Biao et al. On the other hand, Figure 3 shows how the carbon (from the MgO-C) will react with the dissolved FeO which helps to form a very low viscous phase on the surface and to decrease the proportion of Fe in the viscous phase (Fe lowering the melting temperature) [37] [38]. MgO's concentration should be a minimum of 8% if not 13% and be over saturated [38][39], while FeO should remain under 15% [40].

Figure 3.

The effect of a) FeO and b) MgO on the hemispherical temperature [38].

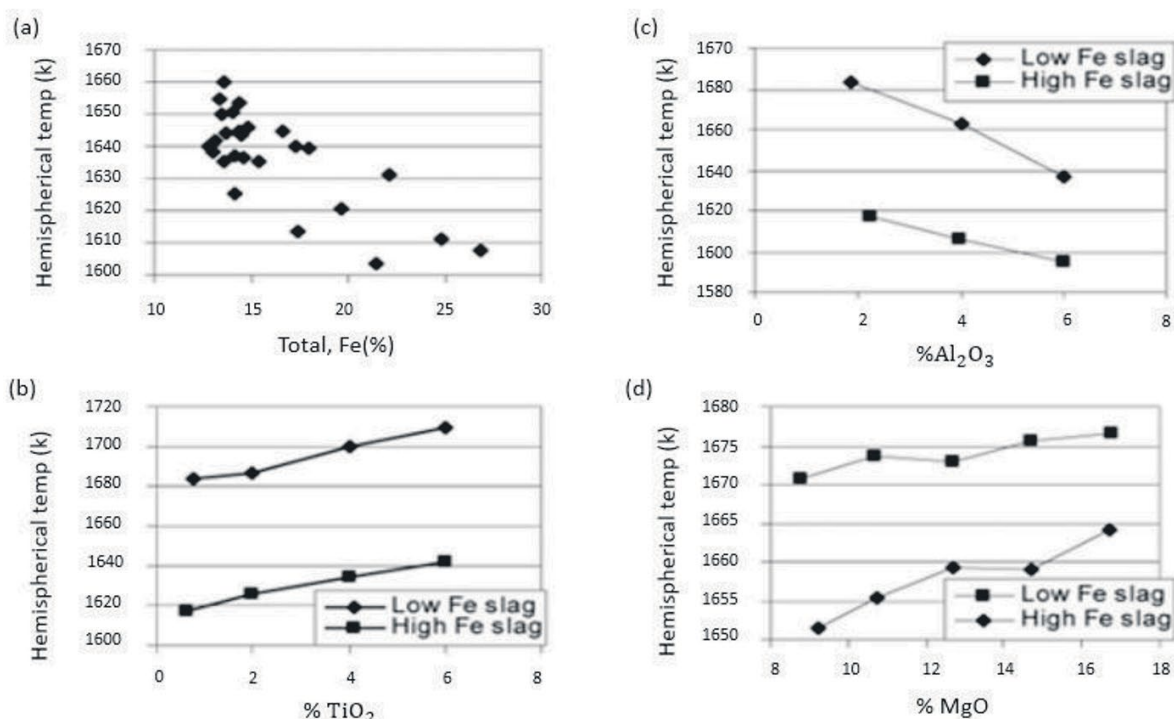


With MgO-C, the second classic addition to slag is SiO₂. A CaO/SiO₂ ratio of 2.5 is considered ideal for the high melting phase. Calcium will form calcium ferrites in the low melting phase with iron, while CaO in the high melting phase will form 3 CaO - SiO₂ or 2 CaO - SiO₂ complexes, called C3S and C2S¹⁹. The slag should therefore not contain excess CaO or its high melting phase will lose in quality. More generally, slags with a high

magnesium content and then silica are to be preferred for a good high melting point phase [33-41]. Aluminum is an unfavorable element for slag splashing. It tends to lower the melting temperature. Another element known to be disadvantageous is titanium. The presence of titanium increases the viscosity and favors the formation of a low melting point phase, which should be avoided [42].

Figure 4.

The effect of a) Fe, b) Ti, c) Al and d) Mg on hemispherical temperature [38].



The basicity of the slag should be around 3 pH, a rather basic slag. Higher basicity increases the amount of CaO and decreases the amount of MgO, which is not desirable. A lower pH decreases the C2S and C3S content in the molten slag, which would induce a good high melting point phase [39].

Figures 3 and 4 illustrate how the chemical composition of slag influences its

hemispherical temperature, a key parameter for slag splashing. In Figure 3(a), it can be observed that an increase in FeO significantly reduces the melting temperature, aligning with its effect of generating a low-viscosity phase [37]. On the other hand, Figure 3(b) shows that MgO content follows a “U-shaped” pattern, indicating that insufficient MgO decreases the melting temperature, while oversaturation helps stabilize the desired

viscous phase [38]. Figure 4 reinforces these observations by showing that Al_2O_3 reduces the melting temperature, confirming its detrimental effect on slag splashing [42]. Likewise, TiO_2 tends to increase viscosity but can also promote the formation of a low melting point phase, which is undesirable [42]. Finally, a higher MgO content contributes to increasing the melting temperature, validating the need for oversaturation to enhance the coating's durability [38][39].

These relationships between composition and temperature are essential for adjusting slag splashing chemistry and optimizing its performance.

Today, most of the investigations around the slag splashing process focus on the optimization of the process in its mechanical part. Indeed, slag splashing is at a high technological level, principal characteristics are the height of the lance, its angle, the number of nozzles, the addition of the second lance below the vessel, or the speed of the blast.

4. INDUSTRIAL SLAG PAINTING.

The use of slag as a coating or as a component of a coating is just starting to be explored. The first series of studies on the potential of BF slag from Turkey is pioneering the field [43][44][45].

By mixing it with a pitch for good adhesion conditions to the protected material, real slag coatings could be realized. These have shown very good corrosion resistance. Indeed, the strong presence of certain oxides, in particular silica oxide (SiO_2), allows good resistance to corrosion. The coating acquired has better tensile strength and better pull-out test results than the control specimens [43].

Although this covering process is not the most widely used, its encouraging results have paved the way for further studies.

Advanced techniques such as plasma spraying have also been explored for applying slag-based coatings. Plasma spraying offers several advantages compared to other methods, including its ability to create dense and uniform coatings, even on complex surfaces [44, 45].

Although it tends to be more expensive due to specialized equipment and energy requirements, its efficiency in achieving excellent adhesion and corrosion resistance, particularly at high temperatures, often outweighs the costs [45]. Additionally, it has demonstrated superior performance in terms of durability and wear resistance compared to traditional application methods like brushing or dipping [44].

In this study, slag is used as a second protective layer without being mixed with another substance [36]. It should be noted that this slag is a ferrochromium slag that contains very little calcium (3%) and a lot of magnesium (30%). From a structural point of view, the homogeneity of the material obtained is satisfactory with a porosity comparable to that of the industrial control coating. The surface finish is also satisfactory. Finally, they revealed that the slag coating retains excellent corrosion resistance at high temperatures (no alteration at 600°C).

4.1 Influence of Slag Components in Paints

Majumdar and Jana [46] emphasized the versatility of glass and glass-ceramic coatings for industrial applications. They demonstrated that silica-rich slags, when combined with proper binders, enhance the durability, mechanical strength, and

resistance of protective coatings under harsh environmental conditions.

Saraswati et al. [47] investigated anticorrosive coatings by combining ball-milled wood charcoal and titanium dioxide (TiO_2) using a flame spray method. The study revealed that TiO_2 contributes significantly to corrosion resistance by forming a protective oxide layer, while the wood charcoal particles enhance the adhesion and uniform distribution of the coating. These results indicate that combining slag with TiO_2 could further optimize corrosion resistance in industrial slag-based paints.

Sowmya and Sankaranarayanan [48] conducted a spectroscopic analysis of slags, observing that the mineral phases in slags, such as silicates and aluminates, contribute significantly to their thermal stability and chemical inertness. Their preliminary observations highlight the role of slag composition in determining its behavior during high-temperature applications, making it a suitable candidate for protective coatings. Spectroscopic techniques revealed the presence of phases like gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) and spinel (MgAl_2O_4), which enhance the overall resistance to thermal and chemical degradation.

As for BOF slag, the first study in 2019 analyses its performance as a plasma spraying coating [45]. Although different parameters are analyzed (spraying speed and angle, erodent size, and erodent temperature), only the spraying speed seems to have a substantial influence. The lower the speed, the better the coating got. This study confirms, once again, the feasibility of coating with pure slag.

A second study supports the results of the first [49]. This time the BOF slag used was mixed with a binder (a classical method

of coating manufacture) and compared to two commercial powders. The BOF coating has a higher porosity, which is explained by the irregular nature of the grains in the slag powder. The tests carried out aimed to evaluate the performance of the coatings in terms of load resistance at varying temperatures. The slag coating again proved to be very interesting at high temperatures, as it does not lose its structure and cohesion. Its resistance, whether under low or high loads, is close to that of commercial powders.

These different studies all tend to show that the use of slag as the basis of a coating could be a very common solution in the future. Although the application conditions and the compositions of the coatings remain to be optimized, coatings with properties comparable to those of industrial coatings could be produced from different slags.

5. CERAMIC-GLASS COATINGS

5.1 Liquid Glass coatings

Liquid glass is a new type of coating that appeared in the 1980s. It provides protection against all external elements: liquids, acids, and alkalis. It has the advantage of being very thin, transparent (and therefore often invisible), impermeable, and applies a low tension to the protected surface allowing it to adapt to flexible surfaces. Since it is glass, the main element in the composition of this coating is silica [50][51]. As slag is an important source of silica, the possibility of using it to make glass coatings is, therefore, worth exploring.

The main difficulty in the manufacture of liquid glass is the proper crystallization of the liquid components. A series of studies by researcher Galina Sycheva explores the crystallization and nucleation of glass

based on slag [52][53][54][55]. The structure of these glasses is based on melilite ($2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$) and diopside ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), as well as on magnesiochromite (other structures are possible but most studies observed melilite and/or diopside along with gehlenite and pyroxene). The nucleation and crystallization of slag occur at $750\text{--}1000^\circ\text{C}$ with a preheat of around 1350°C . The protection seems to be performant up to $400\text{--}500^\circ\text{C}$ and undergoes first changes around 640°C .

5.2 Influence of several key elements

Sycheva shows the feasibility of such a glass and the importance of perovskite (CaTiO_3) and Cr_2O_3 . Both act as catalysts that significantly improve glass vitrification. She determined an optimal of 2%w of Cr_2O_3 . She also gives a general composition ratio for major elements:

$$\text{TiO}_2: \text{CaO}: \text{MgO}: \text{Al}_2\text{O}_3: \text{SiO}_2 = 1:7.2:1.8:2.6:7.4.$$

On the other hand, iron ions are disadvantageous because they increase the temperature of the glass, which leads to undesirable reactions [56], though Wang et al [57] were able to generate good glass with 10% of FeO .

Serekpaveva et al. also show that the micro strength of glass is increased in the presence of chromium oxide. The best CaO/SiO_2 ratio for ideal crystallization and mechanical properties should be around 0.42[58].

Mihailova et al. [59] observed better crystallization with kaolin and Al_2O_3 additives, however, they don't suggest it as general advice and rather adapt to the slag composition. Majumdar and Jana [46] observed that glass-ceramic coatings, when

optimized with controlled additions of TiO_2 and Cr_2O_3 , exhibit superior mechanical properties, including improved thermal stability and reduced crystallization temperature. They recommended maintaining specific CaO/SiO_2 ratios for enhanced durability.

Crystallization temperatures of $750\text{--}1000^\circ\text{C}$ and preheats around 1350°C were identified as optimal conditions to ensure robust vitrification and formation of stable phases [46]. The inclusion of Cr_2O_3 at 2% significantly improves the mechanical strength and resistance to thermal shock.

Saraswati et al. [47] demonstrated that TiO_2 -based coatings developed using flame spray methods provide excellent thermal stability and anticorrosive performance in environments with high humidity and acidic exposure. This highlights the potential for combining TiO_2 with slag to enhance resistance to thermal shock and oxidation in ceramic glass coatings.

Solntsev [60] analyzed high-temperature composite coatings based on glass and ceramics, specifically for aerospace applications. These coatings demonstrated exceptional thermal resistance up to 1200°C , alongside remarkable mechanical stability under extreme operational conditions. Solntsev emphasized the ability of these coatings to maintain phase stability, reduce oxidation rates, and withstand rapid thermal cycling, making them ideal candidates for industrial and aerospace protective layers.

Sofyan et al. [61] investigated WC-Co coatings for high-temperature rocket nozzle applications. The study demonstrated that WC-Co coatings provide outstanding mechanical strength and thermal resistance in extreme environments, with operational temperatures exceeding 1200°C . These

findings emphasize the importance of material selection and phase stability in protective coatings, suggesting that integrating slag into similar systems could enhance high-temperature performance and mechanical durability.

Sycheva [62] investigated crystal growth and nucleation in lithium silicate glasses, revealing the mechanisms that influence the formation of crystalline phases. The study emphasized the role of controlled thermal treatments in enhancing the mechanical strength, thermal stability, and phase distribution within glass-ceramic coatings. These findings are significant for optimizing slag-based glass-ceramic systems, particularly where crystal nucleation and growth can be manipulated to achieve desired structural and performance characteristics.

Efimov et al. [63] discussed the challenges and opportunities associated with processing ash and slag waste for silicate material synthesis. The study identified effective strategies for transforming waste into high-value construction materials, highlighting their potential use in protective coatings due to their stability and durability.

Fredericci et al. [64] examined the crystallization mechanisms and properties of blast furnace slag glass, showing that controlled cooling rates significantly influence phase development and structural integrity. The study's results suggest that glass derived from slag exhibits enhanced mechanical properties and chemical resistance when properly processed, making it suitable for industrial coatings.

Huang et al. [65] provided an extensive overview of steel slag utilization, emphasizing its versatility in construction

and potential for innovative applications, such as protective coatings. Their analysis underlined the importance of developing cost-effective and environmentally sustainable processes for utilizing steel slag on a larger scale.

Sycheva and Poljakova [54] analyzed volume nucleation of crystals in glass based on blast furnace slag. Their study highlighted how specific thermal treatments and compositional adjustments influence the growth of crystalline phases within the glass matrix. These findings are critical for ensuring uniform microstructural properties and enhanced mechanical performance in coatings derived from slag. By controlling nucleation parameters, the study demonstrated that slag-based glasses could achieve improved thermal and chemical resistance, particularly under industrial conditions.

Sycheva and Poljakova [55] investigated surface crystallization in blast furnace slag glasses, emphasizing the role of surface-active agents and thermal treatment parameters. The study demonstrated that controlling surface energy factors and nucleation rates can optimize the surface properties of coatings, enhancing their resistance to wear, corrosion, and thermal stress. These findings highlight new avenues for improving slag-derived coatings for industrial applications.

Sycheva [66] further explored the influence of chemical differentiation in blast furnace slag-based glasses on the nucleation of crystals. The study highlighted how chemical gradients and local compositional heterogeneities affect the growth of crystalline phases, emphasizing the importance of homogenizing the slag feedstock before glass production. These findings underline critical parameters

for ensuring consistent performance in slag-derived coatings.

Wang et al. [67] examined the addition of Cr_2O_3 in glass-ceramics derived from blast furnace slag. Their findings revealed that the inclusion of Cr_2O_3 significantly enhances the thermal stability and mechanical strength of the material. Crystallization studies indicated the formation of stable phases, such as spinel and diopside, which contribute to improved resistance to thermal shock and wear. These properties position slag-based glass-ceramics containing Cr_2O_3 as suitable candidates for high-temperature industrial applications.

Zhao et al. [68] investigated high-basidity steel slag-derived glass-ceramics and their crystallization mechanisms. The study found that the formation of high-density phases like anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) and wollastonite (CaSiO_3) significantly improved the mechanical properties, including compressive strength and fracture toughness. These glass-ceramics exhibited enhanced thermal stability and resistance to acid and alkali corrosion, highlighting their potential for use in extreme industrial environments.

5.3 Slag-Fly Ash-Glass Cullet glass ceramic coating

On this basis, a mixture of three silicate mine rejects consisting of slag, fly ash, and glass cullet from mines in the Boyaca region (Colombia) was used to produce a glass protector (10% of slag) [69], as well as a slag quartz coating (65 to 72% of slag) [56]. Using the same materials, glass-ceramic coatings are now also being studied. Thus, the same team was able to manufacture, from the same materials, a new glass-ceramic coating [70]. The slag content is 10 and 55%. The phase change temperatures

are the same as for glasses and suggest service temperatures of at least 400°C . A study of the fracture resistance reveals a relatively low resistance but is expected for this type of material, ranging from 3.5 to 11 MPa. Furthermore, the density of glass ceramics is in the range of 1.6- 3.2 (light coating).

A second study [71] with materials from the same region confirms the feasibility of glass ceramic. It confirms the undesirable effect of iron since at levels exceeding 4% iron oxide the samples could not vitrify. The glass ceramic obtained had microhardness values of 612 to 701 MPa, fracture toughness values of 0.45–1.06 MPa $\text{m}^{1/2}$, friction coefficients μ of 0.57–1.0, and porosities of 0.18–5.7%, like the characteristics of standard materials. The glass-ceramic proved its good resistance to NaOH with low mass losses, but less promising results with HNO_3 . Zhao et al. were able to make real ceramics [72]. By mixing at least 35% slag with clays, ceramic coatings, like glass ones, could be made. Like liquid glass coatings, they are based on the melilite and diopside (CaO-MgO-SiO_2 - $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ - SiO_2).

Though, these ceramics have the advantage of forming at very high temperatures, around 1300 – 1400°C , and have a satisfactory bending resistance of 55 MPa for $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ and around 100 MPa for CaO-MgO-SiO_2 .

Karamanova et al. [73] were also able to produce ceramics from slag. The ceramics are made from mixtures incorporating 30, 50, and 70% slag with additional quartz (Kaolin) and sand (SiO_2). The higher the slag content, the better the mechanical properties of the ceramic, reaching 70% slag a bending strength of 49 MPa, a hardness of 800 HV, and a density of 2.13 g/cm^3 . The final structures of these ceramics differ from those of Zhao et al. since they are pyroxene

and anorthite, formed around 1200°C. An earlier study was also able to recycle slag and make it part of a glass-ceramic coating [74]. Good adhesion to metal was observed.

6. DISCUSSION

Despite the interesting results obtained in most studies, it is difficult to generalize the results obtained. The great variety of slag compositions multiplies the necessary studies and makes the success of the applications we have seen more uncertain. It can already be noted that, as in the construction field, basic slags, i.e., with a high silica content, are the most promising.

However, promising results are obtained with all types of slag, and although at this stage we cannot generalize the results obtained, comparisons with studies carried out using similar slag should give similar results.

It is therefore in the interest of a mine operator to explore the options seen above, particularly if there is a silicate source nearby. Indeed, even if the necessary preliminary research may seem daunting, the multiplication of recent studies, which manage to obtain good coatings with almost any mixture, show the immense interest that slag has. Whether it is from a financial or ecological point of view, the valorization of this waste must be an important issue for the mining operators.

At present, three countries account for most of the studies used in this document. First, China, as the largest steel producer [75] with more than half of the world's production, with more general articles as reviews. Secondly, Russia and Turkey, with many articles either purely scientific or more technical and industrial in focus. The participation of these countries is

explained, firstly, by the fact that they are major steel producers, but also because the reuse of slag is now a major theme for emerging countries, which include Russia, Turkey, and even India. For these countries, steel production is important to support their growing economies and produces large quantities of slag to be disposed of, which these countries are unable to do, unlike developed countries such as Japan, Germany, and the United States [76].

While the US and Japan were pioneers in the design of slag splashing, their slag reuse rate of over 95% (Japan is an exporter of slag and the US an importer now) has meant that research into the use of slag as a coating has not been favored in these countries [78][79].

Despite the promising results achieved with slag coatings, variability in slag composition presents challenges for standardization. However, studies like those conducted by Majumdar and Jana [46] demonstrate the feasibility of producing industrial-grade coatings with consistent properties when silica-rich slags are used and optimized with additives like TiO_2 and Cr_2O_3 .

The use of slag in coatings offers both economic and environmental benefits by promoting the recycling of industrial byproducts while providing materials with competitive performance characteristics. Findings from Saraswati et al. [47] further confirm that incorporating TiO_2 can optimize anticorrosive performance, adhesion, and resistance under challenging conditions.

Additionally, Solntsev [60] highlights the potential for slag-derived glass-ceramic coatings in high-temperature aerospace applications, offering enhanced thermal resistance and mechanical durability. Wang et al. [67] specifically emphasize the role of

Cr_2O_3 in enhancing the structural integrity and durability of these materials. Zhao et al. [68] specifically emphasize the importance of high-basicity slag compositions in achieving superior structural and mechanical performance.

While Sofyan et al. [61] reinforce the critical role of thermal resistance and mechanical strength in extreme environments. Sowmya and Sankaranarayanan [48] further demonstrate the importance of slag's spectroscopic properties, which influence its structural integrity and high-temperature performance.

Sycheva [62],[66] and Sycheva and Poljakova [54] provide essential insights into crystal nucleation mechanisms and the effects of chemical differentiation on slag glass performance.

7. CONCLUSION

Using slag as a base for coatings presents both economic and environmental opportunities. The analyzed studies indicate that, with appropriate compositions and processes, it is possible to obtain coatings of quality comparable to current industrial standards.

Slag, particularly from steelmaking processes, contains a mixture of silicon oxides (SiO_2), calcium oxides (CaO), aluminum oxides (Al_2O_3), and magnesium oxides (MgO), which directly influence its thermal and mechanical properties.

The ability of slag to enhance thermal resistance, maintaining structural stability at temperatures exceeding 600°C , as well as its corrosion resistance, adhesion, and durability under extreme conditions,

demonstrates its versatility in industrial applications.

However, one of the main challenges is the variability in slag composition, which limits process standardization.

For instance, slags with a SiO_2 content above 40% exhibit better chemical resistance, while a CaO/SiO_2 ratio of approximately 2.5 is ideal for forming stable high-melting phases such as gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$). Results are more consistent when silica-rich slags are used, which can be improved by incorporating additives such as TiO_2 (between 2% and 5%) and Cr_2O_3 (around 2%), optimizing vitrification, mechanical strength, and coating adhesion.

Additionally, advanced application methods, such as plasma spraying, enable the creation of dense and uniform coatings with controlled porosity near 5%, enhancing performance under high thermal load conditions. Although this process is more expensive due to high energy consumption (power up to 40 kW) and the need for specialized equipment, its ability to operate with adjustable projection speeds between 100 and 200 m/s provides significant technical advantages for demanding applications.

The economic and technical viability of slag reutilization in coatings requires further research, particularly to optimize component ratios and application parameters. For example, maintaining MgO saturation in the range of 8% to 13% has proven to be critical for stability at high temperatures. In this way, a new industrial sector focused on the value of these by-products could be created, providing significant benefits for both environmental sustainability and cost reduction in the coatings industry.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] World Steel Association, "December 2021 crude steel production and 2021 global totals," World Steel Association, 2022. [Online]. Available: <https://worldsteel.org/media/pressreleases/2022/december-2021crudesteel-production-and-2021-globaltotals>.
- [2] A. Shahbaz, N. Mallick, y T. Loganathan, "Does globalization impede environmental quality in developed economies? An application of the dynamic ARDL simulations approach," *Environ Dev Sustain*, vol. 20, no. 4, pp. 1779-1801, ago. 2018. doi: 10.1007/s10668-016-9759-x.
- [3] L. Sofia, M. Josef, C. Ivan, y K. Jurate, "Leaching Behaviour of Copper Slag, Construction and Demolition Waste and Crushed Rock Used in a Full Scale Road Construction," *Journal of Environmental Management*, vol. 204, pp. 695-703, 2017.
- [4] J. Yi, L. Tung-Chai, S. Caijun, P. Shu Yuan, Characteristics of Steel Slags and Their Use in Cement and Concrete-A Review, Resources, Conservation and Recycling (2018), pp. 187-197.
- [5] S. Mohammad, B. Kiachehr, M. Reza, Application of alkali-activated slag concrete in railway sleepers, *Materials and Design*, 69 (2015), pp. 89-95.
- [6] Takahashi, Tatsuhito & Yabuta, Kazuya. (2002). New Applications for Iron and Steelmaking Slag. NKK Technical Review.
- [7] S. Das, J. G. Lee, S. R. Cho, H. J. Song, y P. J. Kim, "Cropping With Slag to Address Soil, Environment, and Food Security," *Front. Microbiol.*, vol. 10, p. 1320, jun. 2019. doi: 10.3389/fmicb.2019.01320.
- [8] A.M. Torkashvand and S. Sedaghatthoor, "Converter slag as a liming agent in the amelioration of acidic soils," *International Journal of Agriculture & Biology*, vol. 9, no. 5, pp. 715-720, 2007. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/228663048_Converter_slag_as_a_liming_agent_in_the_amelioration_of_acidic_soils
- [9] J. Chen, Y. Xing, Y. Wang, W. Zhang, Z. Guo, y W. Su, "Application of iron and steel slags in mitigating greenhouse gas emissions: A review," *Sci. Total Environ.*, vol. 844, p. 157041, 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157041.
- [10] I. H. Aziz, M. M. A. B. Abdullah, M. A. A. M. Salleh, L. Y. Ming, L. Y. Li, A. V. Sandu, P. Vizureanu, O. Nemes, y S. N. Mahdi, "Recent Developments in Steelmaking Industry and Potential Alkali Activated Based Steel Waste: A Comprehensive Review," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 5, p. 1948, 2022. doi: 10.3390/ma15051948.
- [11] C. Solanki, "Utilization of Steel Slag for Wastewater Treatment: A Review," en *Sustainable Building Materials and Construction*, B. Kondraivendhan, C. D. Modhera, y V. Matsagar, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2022, pp. [páginas del capítulo], doi: 10.1007/978-981-168496-8_50.
- [12] M. Oge, D. Ozkan, M. B. Celik, M. S. Gok, y A. C. Karaoglanli, "An Overview of Utilization of Blast Furnace and Steelmaking Slag in Various Applications," *Mater. Today Proc.*, vol. 11, no. 1, pp. 516-525, 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2019.01.023. [13] OEC, "slag and ash n.e.c. in chapter 26," [Online]. Available: <https://oec.world/en/profile/hs/otherslag-and-ash>.
- [14] J. Zhang, H. Matsuura, y F. Tsukihashi, "Processes for Recycling," 2014. doi: 10.1016/B978-0-08-096988-6.00036-5.
- [15] World Steel Association, "About Steel, how steel is made?" [Online]. Available: <https://worldsteel.org/aboutsteel/about-steel/>.
- [16] N. M. Piatak, M. B. Parsons, y R. R. Seal, "Characteristics and environmental aspects of slag: A review," *Appl. Geochem.*, vol. 57, pp. 236-266, 2015. doi: 10.1016/j.apgeochem.2014.04.009.
- [17] ScienceDirect, "The mineralogical composition of slags from gray iron production," *Constr. Build. Mater.* [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619309035>.
- [18] ScienceDirect, "Properties of slags in metallurgical processes," *Minerals Eng.* [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687519301442>.
- [19] SpringerLink, "Non-ferrous and ferrous slags: Environmental insights," *J. Environ. Sci.* [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40831-018-0182-0>.

- [20] ScienceDirect, "Recycling and valorization of ferrous and non-ferrous slags," J. Sustain. Mater. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20301600>.
- [21] Springer, Technological advances in slag reutilization, Advances in Environmental Technology, 2019. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9783319513734>.
- [22] X. Zhang, J. Chen, J. Jiang, J. Li, R. D. Tyagi, y R. Y. Surampalli, "The potential utilization of slag generated from iron- and steelmaking industries: a review," Environ. Geochem. Health, vol. 42, no. 5, pp. 1321–1334, 2020. doi: 10.1007/s10653-019-00419-y.
- [23] Universidad Nacional de Colombia, "Informe experimental: Laboratorio Interfacultades de Fluorescencia de Rayos X," Sede Bogotá, Bogotá D.C., Colombia, mayo 05 de 2022, código [BDL-XRF-065-2022].
- [24] ScienceDirect, "Copper slag valorization: Environmental and industrial insights," J. Cleaner Prod. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687519301442>. [25] SpringerLink, "Mineralogical and chemical properties of non-ferrous slags," Miner. Process. Extr. Metall. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40831-018-0182-0>.
- [26] ScienceDirect, "Recycling and reuse of zinc slags in construction," Resources, Conservation and Recycling. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619309035>.
- [27] SpringerLink, "Advances in lead smelting slag management," J. Sustain. Metall. [Online]. Available: <https://www.springer.com/article/10.1007/s40831-018-0182-0>.
- [28] Revista de Metalurgia, "Caracterización de escorias de fundición de cobre," Rev. Metal., vol. 55, no. 1, pp. 45–59, 2020. [Online]. Available: <https://revistademetalurgia.revistas.csic.es>.
- [29] ScienceDirect, "Environmental benefits of non-ferrous slag reuse," J. Environ. Manage. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619309035>.
- [30] Springer, Advances in slag recycling technologies, Advances in Sustainable Metallurgy, 2018. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9783319513734>.
- [31] ScienceDirect, "Characterization and reuse of non-ferrous slags in construction," J. Hazard. Mater. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20301600>.
- [32] K. Mills, Y. Su, A. Fox, Z. Li, R. Thackray, y H. Tsai, "A Review of Slag Splashing," ISIJ Int., vol. 45, pp. 619–633, 2005. doi: 10.2355/isijinternational.45.619.
- [33] A. Makwana, A. Sane, X. He, y G. Buragino, "Novel Method for Stirring BOF Melts in Conjunction with Slag Splashing," Air Products, Allentown, PA, US, Informe Técnico 335-20-001US, [En línea]. Disponible: <https://www.airproducts.com/media/files/en/335/335-20-001-usnovel-method-for-stirring-bofmelts.pdf>.
- [34] B. Tang et al., "IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.," vol. 199, p. 042054, 2018.
- [35] M. Barron, D. Medina, y I. Hilerio, "CFD Analysis of Influence of Slag Viscosity on the Splashing Process in an Oxygen Steelmaking Converter," Modeling and Numerical Simulation of Material Science, vol. 3, no. 3, pp. 90–93, 2013. doi: 10.4236/mnsms.2013.33012.
- [36] Z. Liu, B. Blanpain, y M. Guo, "Viscosity of Partially Crystallized BOF Slag," 2016. doi: 10.1007/978-3-31948093-0_33.
- [37] Z. Yuan, Y. Wu, H. Zhao, H. Matsuura, y F. Tsukihashi, "Wettability Between Molten Slag and MgO–C Refractories for the Slag Splashing Process," ISIJ Int., vol. 53, p. 598, 2013. doi: 10.2355/isijinternational.53.598.
- [38] H. Tsai, L. Dong, L. Li, B. Song, y W. Chen, "Proc. Asia Steel Int. Conf.," Chinese Society for Metals, Beijing, 2000, p. 170.
- [39] G. Chen y S. He, "Effect of MgO content in slag on dephosphorisation in converter steelmaking," Ironmaking Steelmaking, vol. 42, pp. 433–438, 2014. doi: 10.1179/1743281214Y.00000000246.
- [40] S. Devi, "Optimization of Slag Chemistry for Slag Splashing to Increase Converter Lining Life," Steel and Metallurgy, vol. 16, pp. 4–12, 2014.
- [41] R. R. Yin et al., "The study on the interface reaction characteristics of different binary slag, CaO – MgO, Al₂O₃ – CaO, Al₂O₃ – MgO, SiO₂ – CaO, SiO₂ – MgO," Metalurgija, vol. 58, no. 1-2, pp. 15–18, 2019.
- [42] H. Tsai, L. Dong, L. Li, B. Song, y W. Chen, "Proc. Asia Steel Int. Conf.," Chinese Society for Metals, Beijing, 2000, p. 170.

- [43] H. Binici y O. Aksogan, "The use of ground blast furnace slag, chrome slag and corn stem ash mixture as a coating against corrosion," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 11, pp. 4197–4201, 2011. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.057.
- [44] Y. Kucuk et al., "Ferrochromium slag as a protective coating material against oxidation for caster rolls," *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, vol. 15, pp. 1240–1247, 2018. doi: 10.1111/ijac.12875.
- [45] P. Pati, M. Satpathy, y A. Satapathy, "Erosion Wear Response of Linz Donawitz Slag Coatings: Parametric Appraisal and Prediction Using Imperialist Competitive Algorithm and Neural Computation," *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, vol. 12, no. 2, pp. 95–106, 2019. doi: 10.4271/05-12-02-0008.
- [46] A. Majumdar y S. Jana, "Glass and Glass-Ceramic Coatings: Versatile Materials for Industrial and Engineering Applications," *Bulletin of Materials Science*, vol. 24, no. 1, pp. 69–77, 2001. [47] T. E. Saraswati, K. Nugroho, y M. Anwar, "An Anticorrosion Coating from Ball-milled Wood Charcoal and Titanium Dioxide Using a Flame Spray Method," *Int. J. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 983–992, 2018.
- [48] T. Sowmya y S.R. Sankaranarayanan, "Spectroscopic Analysis of Slags Preliminary Observations," in *II International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts*, The South African Institute of Mining and Metallurgy, South Africa, 2004, pp. 693–697.
- [49] M. Oge, A. C. Karaoglanli, y M. B. Celik, "Room and high temperature wear behaviors of steelmaking slag coating and WC reinforced composite coatings," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 399, p. 126162, 2020. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126162.
- [50] P. Liu, W. Lianqi, X. Zhou, Y. Shufeng, y Y. Chen, "A glass-based protective coating on stainless steel for slab reheating application," *J. Coat. Technol. Res.*, vol. 8, pp. 149–152, 2011. doi: 10.1007/s11998-010-9302-1.
- [51] L. Aries, "Preparation of electrolytic ceramic films on stainless steel conversion coatings," *J. Appl. Electrochem.*, 1994. doi: 10.1007/BF00249857.
- [52] G. Sycheva, "Volume and Surface Nucleation of Crystals in Glass Based on Blast-Furnace Slag," *J. Crystallization Process and Technology*, vol. 7, pp. 11–47, 2017. doi: 10.4236/jcpt.2017.72002.
- [53] G. Sycheva, "Nucleation of Crystals in Glass Based on Blast Furnace Slag: Influence of Chemical Differentiation on the Process of Nucleation," *Glass Phys. Chem.*, vol. 45, pp. 19–28, 2019. doi: 10.1134/S1087659619010127.
- [54] G. A. Sycheva y I. G. Poljakova, "Volume Nucleation of Crystals in Glass Based on Blast Furnace Slag," *Glass Phys. Chem.*, vol. 39, pp. 248–260, 2013.
- [55] G. A. Sycheva y I. G. Poljakova, "Surface Crystallization of Glass Based on Blast Furnace Slags," *Phys. Chem. Glass*, vol. 42, pp. 512–520, 2016.
- [56] M. Serekpaveva et al., "Investigation of the Properties of Metallurgical Slags and Dust of Electro Filters to Obtain Protective Anticorrosive Coatings," *Int. J. Technol.*, vol. 13, p. 544, 2022. doi: 10.14716/ijtech.v13i3.4214.
- [57] Z. Wang, W. Ni, Y. Jia, L. Zhu, y X. Huang, "Crystallization behavior of glass ceramics prepared from the mixture of nickel slag, blast furnace slag and quartz sand," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 356, no. 31–32, pp. 1554–1558, 2010. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.05.063.
- [58] Z. Yang, Q. Lin, S. Lu, Y. He, G. Liao, y Y. Ke, "Effect of CaO/SiO₂ ratio on the preparation and crystallization of glass-ceramics from copper slag," *Ceram. Int.*, vol. 40, no. 5, pp. 7297–7305, 2014. doi: 10.1016/j.ceramint.2013.12.071.
- [59] I. K. Mihailova, P. R. Djambazki, y D. Mehandjiev, "The effect of the composition on the crystallization behavior of sintered glass-ceramics from blast furnace slag," *Bulg. Chem. Commun.*, vol. 43, no. 2, pp. 293–300, 2011.
- [60] S.S. Solntsev, "High-temperature Composite Materials and Coatings on the Bases of Glass and Ceramics for Aerospace Technics," *Russ. J. Gen. Chem.*, vol. 81, no. 5, pp. 992–1000, 2007.
- [61] B. T. Sofyan, C. C. Berndt, M. Stefano, y H. J. Pardede, "WC-Co Coatings for High Temperature Rocket Nozzle Applications: An Applications Note," *Int. J. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 48–56, 2010.
- [62] G. A. Sycheva, "Crystal Growth and Nucleation in Glasses in The Lithium Silicate System," *J. Crystallization Process and Technology*, vol. 6, pp. 29–55, 2016.
- [63] N. N. Efimov et al., "Problems of Complex Processing of Ash and Slag Waste and Synthesis of Silicate Materials for

- Construction Purposes on Their Basis," *Technique and Technology of Silicates*, vol. 2, pp. 17–21, 2010.
- [64] C. Fredericci, E. D. Zanutto, y E. C. Ziemath, "Crystallization Mechanism and Properties of a Blast Furnace Slag Glass," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 273, pp. 64–75, 2000.
- [65] Y. Huang et al., "An Overview of Utilization of Steel Slag," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 16, pp. 791–801, 2012.
- [66] G. A. Sycheva, "The Nucleation of Crystals in Glass is Based on Blast Furnace Slag. Influence of Chemical Differentiation on The Origin," *Phys. Chem. Glass*, vol. 1, pp. 29–41, 2019.
- [67] Y. C. Wang, W. B. Xin, X. G. Huo, G. P. Luo, y Z. Fang, "Preparation and Properties of Blast Furnace Slag Glass-Ceramics Containing Cr_2O_3 ," *HighTemp. Mater. Process.*, vol. 38, pp. 726–732, 2019.
- [68] G. Zhao, Y. Li, W. Dai, y D. Cang, "Crystallization Mechanism and Properties of High Basicity Steel Slag Derived Glass-Ceramics," *J. Ceram. Soc. Japan*, vol. 124, pp. 247–250, 2016.
- [69] D. Ayala Valderrama y J. Gómez Cuaspud, "Characterization of fly ash, slag and glass hull for the obtaining of vitreous materials," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 935, p. 012040, 2017. doi: 10.1088/1742-6596/935/1/012040.
- [70] D. M. Ayala Valderrama et al., "Development and Characterization of Glass-Ceramics from Combinations of Slag, Fly Ash, and Glass Cullet without Adding Nucleating Agents," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 12, p. 2032, 2019. doi: 10.3390/ma12122032.
- [71] E. Montoya-Quesada, M. A. Villaquirán-Cacedo, y R. Mejía de Gutiérrez, "New glassceramic from ternary-quaternary mixtures based on Colombian industrial wastes: Blast furnace slag, copper slag, fly ash and glass cullet," *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio*, vol. 61, no. 4, pp. 284–299, 2022. doi: 10.1016/j.bsecv.2020.11.009.
- [72] L. Zhao, W. Wei, B. Hao, X. Zhang, y D. Cang, "Synthesis of steel slag ceramics: chemical composition and crystalline phases of raw materials," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 22, pp. 325–333, 2015. doi: 10.1007/s12613015-1077-z.
- [73] E. Karamanova, G. Avdeev, y A. Karamanov, "Ceramics from blast furnace slag, kaolin quartz," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 31, no. 6, pp. 989–998, 2011. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.01.006.
- [74] V. A. Smolii et al., "Enamel coatings based on slag wastes from heat and electric power plants," 2011. doi: 10.1134/S1087659611030126.
- [75] World Population Review, "Steel Production by Country 2022," [Online]. Available: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/steel-production-by-country>.
- [76] Recovery, "Slag recycling," [Online]. Available: https://www.recoveryworldwide.com/en/artikel/slagrecycling_3528047.html.
- [77] H. Matsuura et al., "Recycling of ironmaking and steelmaking slags in Japan and China," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, 2022. doi: 10.1007/s12613-0212400-5.
- [78] Nippon Slag Association, "Slag Use in Japan," *Nippon Slag Association Report*, 2021. [Online]. Available: <https://www.slg.jp/e/statistics/>.
- [79] J. A. Ober, "Iron and Steel Slag," U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Jan. 2021. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-iron-steel-slag.pdf>.

DESGASTE METABÓLICO: SU IMPACTO EN LA HUELLA DE CARBONO DE LA INDUSTRIA Y LA EFICIENCIA EN LOS PROCESOS PRODUCTIVOS

Metabolic burnout: Its impact on the industry's carbon footprint and efficiency in production processes

Paul Hadad Leal Hernández¹
Sonia Lucila Meneses Velosa²

¹Universidad Libre, Bogotá, Colombia, paulh-lealh@unilibre.edu.co

²Universidad Libre, Bogotá, Colombia, sonial.menesesv@unilibre.edu.co

Fecha de recepción: 16/06/2025

Fecha de aceptación del artículo: 25/08/2025

RESUMEN

Este artículo analiza el desgaste metabólico en los procesos industriales como un factor de vital importancia para el análisis de ciclo de vida (ACV), con un enfoque en su impacto en la huella de carbono y la eficiencia operativa. Esto a partir de un estudio de caso en una bodega de maquila, se evaluó el desgaste metabólico de los operarios en diversas fases del proceso, adaptando la metodología ACV bajo la norma ISO 14040:2007. Los resultados muestran que este componente intangible, aunque usualmente no es considerado en evaluaciones ambientales, tiene un papel relevante en la sostenibilidad de los procesos al influir en el consumo de recursos, en la productividad y en las emisiones indirectas de CO₂. El artículo concluye con recomendaciones para optimizar el uso de los recursos, reducir el desgaste físico de los trabajadores y mejorar la eficiencia industrial desde un enfoque más integral y sostenible.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida, Desgaste metabólico, Huella de carbono, Logística de maquila, Sostenibilidad ambiental

ABSTRACT

This article explores metabolic wear and tear in industrial processes as a key factor for life cycle analysis (LCA), with a focus on its impact on carbon footprint and operational efficiency. Based on a case study in a maquila warehouse, the metabolic wear of operators in various phases of the process was evaluated, adapting the LCA methodology under the ISO 14040:2007 standard. The results show that this intangible component, although usually not considered in environmental evaluations, has a relevant role in the

sustainability of the processes by influencing resource consumption, productivity and indirect CO₂ emissions. The article concludes with recommendations to optimize the use of resources, reduce the physical wear and tear of workers and improve industrial efficiency from a more comprehensive and sustainable approach.

Keywords: Life cycle analysis, Metabolic wear, Carbon footprint, Maquila logistics, Environmental sustainability

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático y la sostenibilidad ambiental han tomado un papel central en la agenda global, impulsados por iniciativas como la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

En este contexto, la medición y reducción de la huella de carbono se han convertido en una prioridad para múltiples sectores, incluida la industria logística y de manufactura. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV), definido bajo la norma ISO 14040:2007, es una de las herramientas más utilizadas para evaluar los impactos ambientales de productos y servicios a lo largo de su vida útil.

Sin embargo, la aplicación del ACV en entornos industriales se ha enfocado tradicionalmente en recursos tangibles como el consumo de materiales y energía, dejando de lado factores intangibles que pueden influir significativamente en la sostenibilidad operativa, uno de estos elementos es el desgaste metabólico de los trabajadores, entendido como el esfuerzo energético necesario para ejecutar tareas en un ambiente laboral determinado.

Este aspecto, aunque no suele considerarse dentro de los análisis ambientales, puede influir en el consumo de recursos, la eficien-

cia de los procesos y las emisiones indirectas de CO₂.

Este estudio busca incorporar el desgaste metabólico en el ACV, analizando su impacto en la huella de carbono y la eficiencia productiva en un entorno logístico, para ello, se llevó a cabo un estudio de caso en una bodega de cross-docking, donde se midieron las emisiones asociadas a cada fase operativa: recepción, alistamiento, maquila y despacho.

Se estableció un enfoque metodológico adaptado que permite cuantificar la energía metabólica de los operarios y su relación con las emisiones de carbono, utilizando factores de conversión de calorías a Kg CO₂ eq.

Los hallazgos de este estudio permiten ampliar el alcance del ACV en servicios logísticos, proporcionando una visión más integral del impacto ambiental y permitiendo la formulación de estrategias para optimizar la eficiencia operativa, reducir la carga física sobre los trabajadores y minimizar las emisiones indirectas, con este enfoque, se busca no solo mejorar la sostenibilidad de los procesos productivos, sino también generar un modelo replicable para otras industrias interesadas en reducir su huella de carbono de manera más holística.

1.1. Objetivo general

Evaluar el impacto del desgaste metabólico dentro del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) bajo la norma ISO 14040:2007, con el fin de determinar su influencia en la huella de carbono y la eficiencia operativa en procesos logísticos de maquila. Para ello, se analizará el consumo energético de los operarios en cada fase del proceso (recepción, alistamiento, maquila y despacho) y su conversión en emisiones de CO₂ eq, estableciendo una metodología cuantificable y replicable.

1.2. Objetivos específicos

- Cuantificación del desgaste metabólico en procesos logísticos; se analizará el esfuerzo energético requerido en cada una de las fases del proceso (recepción, alistamiento, maquila y despacho) mediante herramientas de medición fisiológica y factores de conversión energética. Esto permitirá estandarizar los valores de gasto metabólico en función de la intensidad del trabajo y la carga física de los operarios.
- Relación entre el desgaste metabólico y la huella de carbono; a través de la conversión de calorías a Kg CO₂ eq, se establecerá un modelo que permita identificar el impacto ambiental asociado al esfuerzo físico humano en entornos industriales. Este modelo contribuirá a una mejor comprensión de cómo la fatiga operativa puede influir en el consumo de recursos y en la eficiencia del proceso productivo.
- Análisis comparativo del impacto ambiental entre fases operativas; se determinará qué etapas del proceso presentan mayor incidencia en la huella de carbono, diferenciando entre emisiones directas e indirectas. Esto permitirá

identificar áreas críticas donde la gestión del desgaste metabólico podría generar mejoras en la sostenibilidad ambiental como en la productividad.

- Optimización del modelo ACV para incluir factores intangibles; se adaptará la metodología tradicional del ACV para integrar el desgaste metabólico como una variable medible y comparable dentro de la evaluación del ciclo de vida de los servicios logísticos. Esta optimización permitirá a la industria adoptar una perspectiva más integral de la sostenibilidad, considerando tanto los impactos materiales como los esfuerzos humanos involucrados en la operación.
- Formulación de estrategias para la reducción del desgaste metabólico y la mejora en la eficiencia operativa; a partir de los hallazgos obtenidos, se diseñarán recomendaciones para optimizar la organización del trabajo, mejorar la ergonomía laboral y reducir la carga física sobre los operarios y se propondrán estrategias para disminuir la huella de carbono con mejoras en la planificación operativa y el uso eficiente de los recursos.

2. REVISIÓN LITERARIA Y CONCEPTUALIZACIÓN

2.1. Contextualización desgaste metabólico

El desgaste metabólico es un factor clave en la evaluación del esfuerzo físico requerido para realizar tareas específicas dentro de un entorno laboral, se define como el consumo energético del cuerpo humano durante la ejecución de actividades, influenciado por variables como la intensidad del trabajo, el tipo de actividad muscular, la postura adoptada y las condiciones ambientales. A pesar de su impac-

to en la productividad y el bienestar de los trabajadores, este aspecto ha sido poco explorado en estudios ambientales, quedando fuera de los análisis tradicionales del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Desde una perspectiva fisiológica, el desgaste metabólico se mide en kilocalorías (Kcal) consumidas por el cuerpo en función del tipo de tarea realizada, para su cuantificación, se pueden emplear metodologías estandarizadas como la Norma Técnica de Prevención (NTP) 1011 y el Protocolo de Gasto Energético de la Escuela Colombiana de Ingeniería, que establecen valores de referencia según el nivel de esfuerzo requerido.

2.1.1. Relación entre Desgaste Metabólico y Huella de Carbono

El impacto del desgaste metabólico en la huella de carbono se basa en la relación entre el consumo energético del trabajador y los recursos adicionales requeridos para mantener su desempeño, estudios recientes han demostrado que una mayor carga metabólica puede generar efectos secundarios como:

Incremento en la demanda de insumos y energía, debido a pausas operativas y menor eficiencia en la ejecución de tareas.

Aumento en la tasa de rotación de personal, lo que implica procesos de entrenamiento más frecuentes y un mayor uso de recursos administrativos, mayor desgaste de infraestructura y equipos, especialmente en tareas de alto esfuerzo que exigen adaptaciones ergonómicas en el entorno laboral.

A partir de estos factores, es posible establecer una equivalencia entre el desgaste metabólico y las emisiones indirectas de CO₂, integrando este parámetro dentro del

ACV. Para ello, se emplean factores de conversión que permiten transformar el consumo energético humano en su equivalente en kilovatios-hora (kWh) y posteriormente en Kg CO₂ eq, facilitando su incorporación en los análisis de impacto ambiental.

2.1.2. Innovación Metodológica y sus aplicaciones en la Industria

Si bien el ACV ha sido ampliamente utilizado en la evaluación de impactos ambientales, pocos estudios han considerado el desgaste metabólico como un factor de emisión, la metodología propuesta en este estudio amplía el alcance del ACV al integrar la energía metabólica dentro del análisis de ciclo de vida de los procesos logísticos de maquila.

Este enfoque permite no solo una evaluación más precisa del impacto ambiental, sino también la formulación de estrategias para optimizar la gestión de recursos, mejorar las condiciones laborales y reducir la huella de carbono desde una perspectiva más integral. La incorporación de este concepto en la industria puede generar beneficios significativos en términos de eficiencia operativa, sostenibilidad y bienestar de los trabajadores.

2.2. Metodología y Adaptación del ACV para Evaluar el Desgaste Metabólico

2.2.1. Definición de Objetivos y Alcance

El estudio tiene como objetivo principal evaluar el impacto del desgaste metabólico dentro del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en un entorno logístico de maquila, tomando como referencia la norma ISO 14040:2007. Para ello, se ha delimitado el análisis a los procesos operativos de una bodega cross-docking en la sede Montevideo de la empresa Solística, considerando

el consumo energético de los operarios y su conversión en emisiones de CO₂ eq.

Para estructurar el análisis, se adoptó un enfoque “Puerta a Puerta”, que abarca todas las operaciones realizadas dentro de la bodega desde la recepción de mercancías hasta su despacho final. Este enfoque permite identificar los puntos críticos donde el esfuerzo humano genera impactos ambientales indirectos, contribuyendo a la huella de carbono del proceso.

2.2.2. Macroproceso del Estudio

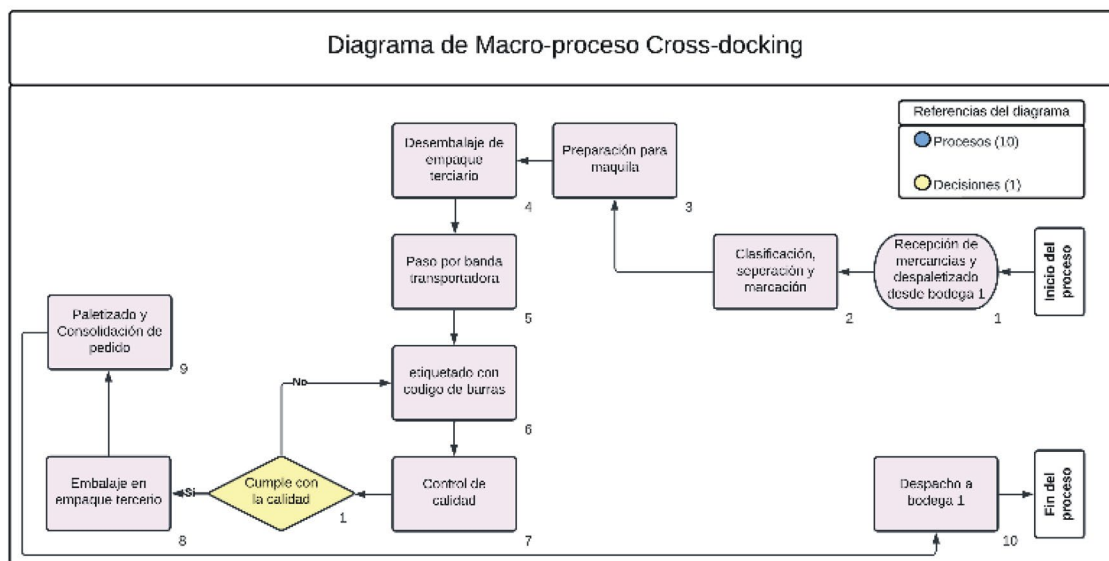
Para evaluar el impacto del desgaste metabólico en un contexto industrial, se adaptó la metodología del Análisis de Ci-

clo de Vida (ACV) por procesos, lo que permitió calcular con precisión el impacto ambiental derivado de la actividad humana en cada fase operativa.

Este enfoque se justifica debido a su capacidad para evaluar impactos ambientales en todas las etapas productivas, permitiendo un análisis detallado del consumo de recursos y la eficiencia operativa.

El estudio se estructuró en cuatro fases operativas clave, cada una con una estructura diferenciada en términos de consumo energético, esfuerzo físico y generación de emisiones. A continuación, se presenta el esquema del macroproceso evaluado:

Figura 1.
Diagrama de Macroproceso en Bodega Logística.



Fuente: Desarrollada por los autores, 2025, Universidad Libre.

Fase 1 - Recepción de mercancías

- Incluye la descarga, despaletizado, clasificación y marcación de los productos entrantes.
- Representa una de las fases con mayor carga física para los operarios, debido al

manejo manual de carga y las tareas repetitivas.

- Se identificó un factor de emisión de 0.086 Kg CO₂ eq por hora y metro cúbico, relacionado tanto con el uso de equipos como con el desgaste metabólico del personal.

Fase 2 - Alistamiento

- Consiste en la preparación de los productos antes de su procesamiento en la línea de maquila.
- Se caracteriza por un impacto ambiental moderado (0.021 Kg CO₂ eq por hora y metro cúbico), con menor desgaste metabólico en comparación con la fase de recepción.

Fase 3 - Maquila:

- Incluye procesos de desembalaje, etiquetado, rotulado y control de calidad de los productos.
- Se identificó que los operarios realizan tareas de precisión con menor carga física, pero el proceso aún genera emisiones indirectas.
- Se calculó un factor de emisión de 0.078 Kg CO₂ eq por hora y metro cúbico, destacando la influencia del desgaste metabólico en la eficiencia de la operación.

Fase 4 – Despacho

- Última fase del proceso, donde se empaquetan y preparan los productos para su distribución.
- Se identificó como la fase con mayor impacto ambiental debido al uso de película stretch y otros materiales de embalaje, alcanzando un factor de emisión de 0.131 Kg CO₂ eq por hora y metro cúbico.

2.2.3. Metodología de Evaluación del Desgaste Metabólico

Para cuantificar el impacto del desgaste metabólico en cada una de estas fases, se emplearon herramientas de conversión energética que permitieron traducir el esfuerzo físico en emisiones indirectas de CO₂. Se utilizó la conversión del desgaste energético en emisiones de CO₂ mediante factores de conversión de calorías a kWh y posteriormente a Kg de CO₂ eq.

Este análisis se realizó a partir de la medición del esfuerzo físico en cada tarea operativa, estandarizando un factor de emisión por fase y estableciendo la relación entre el desgaste metabólico y la eficiencia del proceso productivo.

Con estos datos, se logró demostrar que el esfuerzo humano, aunque generalmente omitido en los análisis ambientales convencionales, juega un papel fundamental en la sostenibilidad de los procesos logísticos.

3. RESULTADOS DEL ESTUDIO

La inclusión del desgaste metabólico en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) permitió identificar variaciones en los impactos ambientales entre las diferentes fases del proceso logístico de maquila, tradicionalmente, el diseño de procesos en entornos industriales y logísticos se ha centrado en la optimización de tiempos, costos y eficiencia ergonómica, pero sin considerar de manera explícita el impacto que el desgaste metabólico tiene en la sostenibilidad operativa.

Este estudio demuestra que la energía metabólica requerida por los operarios no solo influye en la productividad y en la salud de los trabajadores, sino que también afecta el consumo de recursos y las emisiones indirectas de CO₂. Para evaluar esta relación, se llevó a cabo un análisis detallado de cada fase operativa, utilizando un enfoque basado en metro cúbico de almacenamiento como unidad de referencia, en concordancia con las métricas de eficiencia de la empresa analizada.

3.1. Evaluación General del Impacto Ambiental por Fase

Cada fase del proceso logístico fue analizada en términos de esfuerzo físico, con-

sumo de recursos y generación de emisiones. Los principales hallazgos fueron los siguientes:

- **Fase 1 (Recepción):** Presentó el mayor desgaste metabólico debido a la manipulación manual de carga y el despaletizado. Se identificó un factor de emisión de 0.086 Kg CO₂ eq por hora y metro cúbico.

- **Fase 4 (Despacho):** Generó el mayor impacto ambiental total, influenciado por el uso de materiales de embalaje como película stretch y el esfuerzo adicional de los operarios en la preparación de envíos. Se registró un factor de emisión de 0.1316 Kg CO₂ eq por hora y metro cúbico.

- **Fases 2 y 3 (Alistamiento y Maquila):** Aunque con un impacto menor, también contribuyeron significativamente a la huella de carbono debido a la carga física acumulativa en tareas repetitivas de preparación y control de calidad.

Para ilustrar el procedimiento seguido en todas las fases, se presenta un ejemplo basado en la Fase 1 (Recepción).

3.1.1. Ejemplo de Evaluación de la Fase 1: Recepción de Mercancías

En esta fase, los operarios llevan a cabo actividades de clasificación, separación y marcación de productos, lo que implica un alto nivel de esfuerzo físico. Para determinar el impacto ambiental, se construyó un inventario de recursos, considerando tanto insumos materiales como el gasto energético humano.

3.1.2. Cálculo del Impacto Ambiental de Recursos Tangibles

Se estableció una tabla de factores de emisión para cada insumo empleado, uti-

lizando datos de referencia de emisiones de CO₂ por unidad consumida, la siguiente ecuación permitió calcular el impacto ambiental por metro cúbico de almacenamiento:

- $FEr = Er / V$

Donde:

- FEr es el factor de emisión del recurso en Kg CO₂ Eq/m³
- Er es la emisión total del recurso en Kg Co₂ Eq/h
- V es el volumen total analizado en metros cúbicos (m³)

Para el caso de una estiba de madera, con un factor de emisión de 9.44 Kg CO₂ en un período de vida útil de 10 años, la conversión a impacto por metro cúbico y hora se realizó aplicando la siguiente fórmula:

$$FE_{estiba} = 9.44 / 86.400$$

Lo que resulta en un factor de emisión de 0.00010926 Kg CO₂ eq/h para este insumo.

Estos cálculos se replicaron para todos los materiales empleados en la fase de recepción, obteniendo una emisión total de 0.086 Kg CO₂ eq por hora y metro cúbico para esta etapa.

3.2. Evaluación del Desgaste Metabólico por Fases

El desgaste metabólico fue analizado en cada fase operativa utilizando la metodología propuesta en la NTP 322, que establece valores de referencia para el consumo energético según el tipo de actividad, se utilizó la Figura 2, la cual presenta los valores de gasto calórico según el esfuerzo realizado.

Figura 2.*Estimación del Desgaste Metabólico. Fuente [15]*

		Media Kcal/min	Rango Kcal/min
Trabajo manual	Ligero	0,4	0,2 - 1,2
	Pesado	0,9	
Trabajo con un brazo	Ligero	1,0	0,7 - 2,5
	Pesado	1,7	
Trabajo con dos brazos	Ligero	1,5	1,0 - 3,5
	Pesado	2,5	
Trabajo con el cuerpo	Ligero	3,5	2,5 - 15,0
	Moderado	5,0	
	Pesado	7,0	
	Muy pesado	9,0	

A partir de esta referencia, se calcularon las emisiones de CO₂ equivalentes generadas por el desgaste metabólico, empleando la siguiente ecuación:

$$\bullet \text{ Emetabólico} = \text{Kcal} / 860 * \text{FEkWh}$$

Donde:

- Kcal es el consumo calórico del operario en la fase analizada
- 860 es el factor de conversión de kcal a kWh
- FEkWh es el factor de emisión por kilovatio-hora (0.41 Kg CO₂/kWh)

Para la Fase 1, se identificó un consumo metabólico promedio de 36 Kcal por operario en las tareas más exigentes. Aplicando la conversión:

$$\bullet \text{ Emetabólico} = (36 / 860) * 0.41 = 0.017 \text{KgCO}_2 \text{eq/h}$$

Estos valores se estandarizaron a Kg CO₂ eq por metro cúbico, permitiendo una comparación directa con otros factores de emisión.

Figura 3.*Desgaste metabólico por fase.*

Tipo de trabajo		Kcal	Kg CO2 eq	kWh por etapa	kg CO2 eq /m3	Tiempo de operación (min)	Sumatoria de la fase
FASE 1							
Trabajo con el cuerpo	Pesado	36,00	0,017	3,09	0,00243	14,00	0,003623
Trabajo con el cuerpo	Ligero	4,50	0,002				
Trabajo con el cuerpo	Pesado	36,00	0,017	1,51	0,00027		
Trabajo con el cuerpo	Ligero	4,50	0,002				
Trabajo con dos brazos	Ligero	4,00	0,002	3,03	0,00083		
Trabajo con el cuerpo	Moderado	26,00	0,012				
Trabajo con un brazo	Ligero	3,00	0,001	1,20	0,00010		
FASE 2							
Trabajo con dos brazos	Ligero	4,00	0,002	0,605	0,00013	10,000	0,000977
Trabajo con dos brazos	Ligero	5,50	0,003	1,806	0,00017		
Trabajo con dos brazos	Ligero	1,75	0,001	0,907	0,00020		
Trabajo con el cuerpo	Ligero	4,50	0,002				
Trabajo con dos brazos	Moderado	15,00	0,007	2,417	0,00048		
FASE 3							
Trabajo con el cuerpo	Ligero	11,50	0,005	1,81	0,00037	12,00	0,001748
Trabajo con dos brazos	Ligero	14,50	0,007	5,42	0,00046		
Trabajo con dos brazos	Ligero	14,50	0,007	5,42	0,00046		
Trabajo con dos brazos	Ligero	14,50	0,007	5,42	0,00046		
FASE 4							
Trabajo con un brazo	Pesado	11,20	0,005	3,61	0,00036	17,70	0,003394
Trabajo con el cuerpo	Pesado	22,00	0,010	1,83	0,00070		
Trabajo con dos brazos	Ligero	2,50	0,001	0,30	0,00008		
Trabajo con el cuerpo	Pesado	5,90	0,003	0,43	0,00019		
Trabajo con el cuerpo	Muy pesado	64,00	0,031	4,27	0,00203		
Trabajo con un brazo	Ligero	1,20	0,001	0,12	0,00004		

Fuente: Desarrollada por los autores, 2025, Universidad Libre.

3.2.1. Análisis Comparativo entre Fases

Los resultados mostraron que la Fase 1 es la de mayor desgaste metabólico, seguida de la Fase 4, lo que refuerza la hipótesis de que el esfuerzo físico no solo impacta la eficiencia operativa, sino también la huella de carbono del proceso.

En términos de impacto ambiental: La Fase 1 tuvo el mayor desgaste metabólico individual (0.0155 Kg CO₂ eq/h por m³). La Fase 4, a pesar de un menor esfuerzo físico, generó mayor impacto total debido al uso de materiales contaminantes. Las Fases 2 y 3 presentaron valores menores, pero el efecto acumulativo del desgaste metabólico en estas etapas no debe subestimarse.

3.3. Momento Cero: Evaluación de la Capacidad Instalada

Uno de los elementos clave en el análisis fue la incorporación del Momento Cero, que

hace referencia a los recursos que generan impacto ambiental incluso en ausencia de actividad operativa.

Este concepto es particularmente relevante en centros logísticos y plantas industriales, donde ciertos equipos y espacios mantienen un consumo energético constante debido a requerimientos normativos, de seguridad o de infraestructura.

Para la bodega de cross-docking evaluada en este estudio, el Momento Cero incluyó elementos como: Sistemas de transporte interno, bandas transportadoras, inyector de tinta, Equipos de cómputo y almacenamiento de datos, Iluminación y consumo energético mínimo por operario.

Los cálculos de impacto se realizaron con base en el volumen operativo disponible (15 m³ de almacenamiento asignado al estudio) y un período de vida útil de 10 años. La figura 4 presenta los valores obtenidos:

Figura 4.

Momento cero. Fuente: Desarrollada por los autores, 2025, Universidad Libre.

Capacidad Instalada	Cantidad	Factor de emisión	Consumo kWh	kg de CO ₂ /h
Banda transportadora con inyector de tinta	1	0,126 kg de CO ₂ /h	6,6	0,001273
Equipo de cómputo estándar	1	0,243 kg de CO ₂ /h	-	0,016200
Energía eléctrica		0,126 kg de CO ₂ /kwh	0,1845	0,001550
Área para la línea de maquila	15 m ³	0,5890 ton de CO ₂ /Ton de cemento	-	0,000127
Emisión de Kg de CO ₂ eq por m ³	Hora de trabajo	Día de trabajo	Mes de trabajo	Década de trabajo
	0,005851	0,046807	1,404203	168,504352

El factor de emisión asociado al Momento Cero se calculó con la siguiente ecuación:

$$FEmc = EMC / V$$

Donde:

- FEmc es el factor de emisión en Kg CO₂ eq/m³

- EmcE es la emisión total de la capacidad instalada en Kg CO₂ eq/h
- V es el volumen disponible en m³

Los resultados obtenidos muestran que la capacidad instalada representa un factor de emisión de 0.0058 Kg CO₂ eq/h por m³, lo que indica que incluso en escenarios de baja actividad, existe una contribución constante a la huella de carbono, estos datos permiten entender que la eficiencia ambiental no solo depende de las emisiones operativas, sino también del impacto generado por la infraestructura y los recursos en estado de reposo.

3.4. Evaluación Final de los Impactos Ambientales

Para consolidar los hallazgos, se realizó un análisis comparativo entre todas las fases operativas y el Momento Cero, obteniendo un factor de emisión total para el proceso logístico, la figura 5 muestra los valores obtenidos por cada fase:

Figura 5.

Totales de la operación. Fuente: Desarrollada por los autores, 2025, Universidad Libre.

Fase	Kg CO ₂ eq h /m ³	Impacto Dia de trabajo
Fase 1	0,086340182	0,690721458
Fase 2	0,067947703	0,543581622
Fase 3	0,078052504	0,624420036
Fase 4	0,131665608	1,053324868
Impacto total diario		2,912047983

Los principales resultados indican que:

- La Fase 4 (Despacho) tuvo el mayor impacto ambiental diario, alcanzando un factor de 1.053 Kg CO₂ eq/día por m³.

- La Fase 1 (Recepción), aunque con menor impacto total, presentó el mayor desgaste metabólico, lo que sugiere que la optimización en esta etapa puede mejorar tanto la eficiencia operativa como la sostenibilidad.

La contribución del Momento Cero (0.0058 Kg CO₂ eq/h por m³) refuerza la necesidad de considerar estrategias de eficiencia energética en la infraestructura operativa.

Con estos resultados, se logra una visión más integral del impacto ambiental del proceso logístico, permitiendo diseñar estrategias de optimización enfocadas en la reducción del desgaste metabólico, la mejora en la gestión de recursos y la mitigación de emisiones indirectas de carbono.

4. CONCLUSIONES

Este estudio ha demostrado que la integración del desgaste metabólico en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) bajo la norma ISO 14040:2007 permite una evaluación más completa y precisa del impacto ambiental en procesos logísticos.

Tradicionalmente, los análisis ambientales se han enfocado en factores tangibles, como el consumo de materiales y energía, dejando de lado el esfuerzo físico de los operarios como un factor determinante en la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones.

La metodología implementada permitió traducir el gasto metabólico en Kg CO₂ eq, estableciendo una relación directa entre el esfuerzo humano y la huella de carbono de cada fase operativa. A partir de este enfoque, se lograron las siguientes conclusiones clave:

- El desgaste metabólico es un factor crítico en la huella de carbono industrial

- Se demostró que el esfuerzo físico de los operarios no solo afecta la productividad y la salud laboral, sino que también influye en la eficiencia energética y el consumo de recursos.
- La Fase 1 (Recepción) presentó el mayor desgaste metabólico (0.0155 Kg CO₂ eq/h por m³), mientras que la Fase 4 (Despacho) tuvo el impacto ambiental total más alto (1.053 Kg CO₂ eq/día por m³).
- El análisis de cada fase permitió identificar oportunidades de optimización en la gestión de la carga de trabajo, con el fin de reducir el impacto ambiental y mejorar las condiciones laborales.
- La infraestructura operativa genera un impacto ambiental constante (Momento Cero)
- Se evidenció que los recursos en estado de reposo dentro de la bodega generan emisiones de CO₂ eq incluso cuando la operación está detenida.
- Se calculó un factor de emisión de 0.0058 Kg CO₂ eq/h por m³, lo que resalta la importancia de implementar estrategias de eficiencia energética en la infraestructura operativa.
- La adaptación del ACV para incluir factores intangibles amplía su aplicabilidad.
- La metodología desarrollada permitió incorporar el desgaste metabólico como una variable cuantificable dentro del ACV, logrando una visión más integral del impacto ambiental.
- La conversión de energía metabólica a CO₂ eq valida la importancia de considerar factores intangibles dentro de los estudios de sostenibilidad industrial.
- Este enfoque puede ser replicado en otros sectores productivos donde el esfuerzo humano juega un papel fundamental en la eficiencia operativa.

4.1. Recomendaciones para la Industria

Con base en los hallazgos de este estudio, se sugieren las siguientes estrategias para optimizar la gestión operativa y reducir el impacto ambiental:

- Incorporar mediciones de esfuerzo físico en la planificación operativa.
- Implementar sistemas de rotación de tareas para reducir la carga metabólica en fases críticas como Recepción y Despacho.
- Implementar medidas de eficiencia energética para disminuir el impacto del Momento Cero.
- Evaluar la viabilidad de tecnologías automatizadas que reduzcan el esfuerzo físico sin comprometer la eficiencia del proceso.
- Continuar investigando la relación entre desgaste metabólico y emisiones de CO₂ eq en diferentes sectores industriales.
- Desarrollar herramientas que permitan automatizar la medición del esfuerzo humano en estudios de impacto ambiental.

4.2. Consideración Final

El estudio establece un nuevo enfoque para la evaluación ambiental en procesos industriales, integrando factores fisiológicos en el análisis de sostenibilidad, los resultados obtenidos evidencian que la

carga metabólica del trabajador influye directamente en la eficiencia operativa y la huella de carbono, lo que abre la puerta a futuras investigaciones y desarrollos metodológicos.

La integración del desgaste metabólico en el ACV representa un avance metodológico en la evaluación ambiental, permitiendo una gestión más precisa de los procesos productivos y una mejor planificación estratégica para la reducción del impacto ambiental en la industria.

5. AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, han sido fundamentales en la realización de este estudio y en mi formación profesional.

A mi madre, Sandra, por ser un pilar inquebrantable en mi vida. Su apoyo incondicional, su consejo sabio y su capacidad para inspirarme han sido esenciales en cada uno de mis logros. Su fortaleza y dedicación han sido un modelo por seguir,

recordándome siempre la importancia de la perseverancia y la pasión por lo que hacemos.

A mi padre, Alfredo, por ser un ejemplo de disciplina, esfuerzo y visión. Su constante motivación y su confianza en mis capacidades me han impulsado a explorar siempre nuevos horizontes y a no rendirme ante los desafíos. Su guía ha sido clave para mantenerme enfocado en mis objetivos, incluso en los momentos más difíciles.

A mi directora de proyecto, Sonia, cuya paciencia, conocimientos y orientación han sido fundamentales en la culminación de esta investigación. Su compromiso con la excelencia académica y su capacidad para transformar dificultades en oportunidades me han permitido llevar este trabajo a un nivel que jamás imaginé posible. Su acompañamiento y retroalimentación han sido claves para que este estudio se materializara con éxito.

A todos, gracias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Arapack, "Envase primario, secundario y terciario ¿conoces la diferencia?," Arapack, 29 de julio de 2019. [En línea]. Disponible en: <https://arapack.com/envase-primario-secundario-y-terciario-conoces-la-diferencia>
- [2] Y. Buriticá-Cardona, W. A. Cataño-Ramos, y O. F. Arbeláez-Pérez, "Estimación de las emisiones de CO₂ de concretos modificados con residuos de vidrio," Redalyc, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://redalyc.org/journal/6078/607870799004/html>
- [3] US EPA, "Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero - Cálculos y referencias," US EPA, 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos>
- [4] Ática, "¿Cuánto CO₂ emite el plástico?," 8 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.atica.co/cuanto-co2-emite-el-plastico>
- [5] Ecoembes, "Los ordenadores también emiten CO₂ - Ecoembes | The Circular Lab," Ecoembes | The Circular Lab, 28 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://thecircularlab.com/los-ordenadores-tambien-emiten-co2>
- [6] IPCC, "EFDB - Basic Search." [En línea]. Disponible en: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef.php
- [7] T. Fadel, "¿Qué importancia tiene el cubing en logística? | Transportes Fadel." [En línea]. Disponible en: <https://es.fadeltransportes.com.br/cual-es-la-importancia-del-cubicaje-en-la-logistica>
- [8] X. González, "En Colombia el factor de emisión de CO₂ por generación eléctrica es de 164,38 gramos por kWh," Diario La República, 18 de febrero de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://larepublica.co/especiales/colombia-potencia-energetica/en-colombia-el-factor-de-emision-de-co2-por-generacion-electrica-es-de-164-38-gramos-por-kwh-2966236>
- [9] Diputación Foral de Gipuzkoa, "Guía para el cálculo de las emisiones de CO₂." [En línea]. Disponible en: <https://egoitza.gipuzkoa.eus/WAS/CORP/DMSEskae-rakWEB/api/v1/descargarDocumento/es?ejercicio=2023&dpto=5&proced=MAEFIC01&dtip=1015>
- [10] Gobierno de Islas Baleares, "Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero." [En línea]. Disponible en: <https://caib.es/sacmicrofront/archivo-pub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531>
- [11] INSST, "NTP 1011: Determinación del metabolismo energético mediante tablas," Portal INSST. [En línea]. Disponible en: <https://www.insst.es/documentacion/coleccion-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/29-serie-ntp-numeros-996-a-1030-ano-2014/nota-tecnica-de-prevencion-ntp-1011>
- [12] ISO, "Organización Internacional de Normalización," 27 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/es/home>
- [13] ISO, "ISO 14040:2006(es), Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia." [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:vl:es>
- [14] Laura, "Microbiota y bienestar," 2 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://microbiotaybienestar.es/como-afecta-temperatura-corporal-nuestro-metabolismo>
- [15] INSST, "NTP 322: Valoración del riesgo de estrés térmico: índice WBGT." [En línea]. Disponible en: https://insst.es/documentos/94886/326853/ntp_322.pdf
- [16] XM, "Resultado de cálculo de Factor de Emisión del Sistema Interconectado Nacional, para inventario de Gases de Efecto Invernadero." [En línea]. Disponible en: <https://www.xm.com.co/noticias/5548-resultado-de-calculo-de-factor-de-emision-del-sistema-interconectado-nacional-para>
- [17] Solística, "Solística – Soluciones Logísticas Integrales 3PL," 6 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://solistica.com/>
- [18] Autofact, "Tipos de camiones en Colombia," 26 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://autofact.com.co/blog/comprar-carro/mercado/tipos-camiones>

- [19] CeroCO₂, "Te ayudamos a ser neutro en CO₂," CeroCO₂ - Te Ayudamos En Tu Ruta de Descarbonización. [En línea]. Disponible en: <https://ceroco2.org/soluciones-ceroco2/calculo-huella-de-carbono/que-es-la-huella-de-carbono>
- [20] UNFCCC, "Why the Global Stocktake is Important for Climate Action this Decade." [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/topics/global-stocktake/about-the-global-stocktake/why-the-global-stocktake-is-important-for-climate-action-this-decade>
- [21] Studylib, "Gasto energético - Escuela Colombiana de Ingeniería," Studylib.es, 28 de febrero de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://studylib.es/doc/5457160/gasto-energ%C3%A9tico---escuela-colombiana-de-ingenier%C3%ADa>

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EL ALGORITMO DE FIRMA CRYSTALS-DILITHIUM Y SU RENDIMIENTO

Literature review on the Crystals-Dilithium signature algorithm and its performance

Franco Stiven Fonseca Montañez
Ricardo Andrés Santa Quintero

Universidad Libre, Bogota, Colombia, francos-fonsecamunilibre.edu.co,
Universidad Libre, Bogota, Colombia, ricardo.santaq@unilibre.edu.co

RESUMEN

La criptografía no solo es una herramienta exclusiva de los especialistas en seguridad informática, sino que se ha convertido en un elemento esencial en actividades cotidianas, las transacciones de comercio electrónico, la conectividad, la protección de datos en redes sociales, el almacenamiento seguro de datos personales y el cifrado de correos electrónicos son apenas algunos de los ejemplos en donde la criptografía juega un papel crucial para la protección de esta información. Actualmente la mayoría de aplicaciones y sistemas utilizan en su firma digital el algoritmo RSA, este se basa en la dificultad que presenta la computación convencional para factorizar enteros de gran tamaño. La criptografía clásica está bajo amenaza debido a la computación cuántica y al algoritmo Shor, que resuelve este problema de factorización. Por tal motivo, el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) inició un proceso para solicitar, evaluar y estandarizar algoritmos criptográficos resistentes a la tecnología cuántica, tras varias rondas realizadas, surgió "CRYSTALS-Dilithium, que es uno de los tres esquemas de firma digital incluidos en la tercera ronda de elección de estándar post-cuántico. Este algoritmo se basa en la dificultad del problema de encontrar vectores más cortos en retículos, que sigue las pautas del conocido esquema de Fiat-Shamir" [1]. En el presente artículo se consultaron diferentes fuentes documentales con el fin de presentar a modo de compendio una introducción de los conceptos básicos que sustentan el protocolo y una revisión descriptiva de su rendimiento.

ABSTRACT

Cryptography is not only a tool exclusively for computer security specialists but has become an essential element in everyday activities. E-commerce transactions, connectivity, data protection on social networks, secure storage of personal data, and email encryption are just a few examples where cryptography plays a crucial role in

protecting this information. Currently, most applications and systems use the RSA algorithm for their digital signatures. This algorithm is based on the difficulty that conventional computing presents in factoring large integers. Classical cryptography is under threat due to quantum computing and the Shor algorithm, which solves this factoring problem. For this reason, the National Institute of Standards and Technology (NIST) initiated a process to request, evaluate, and standardize quantum-resistant cryptographic algorithms. After several rounds, CRYSTALS-Dilithium emerged as one of the three digital signature schemes included in the third round of post-quantum standard selection. This algorithm is based on the difficulty of finding the shortest vectors in lattices, which follows the guidelines of the well-known Fiat-Shamir scheme. In this article, various documentary sources were consulted to present a summary of the basic concepts underlying the protocol and a descriptive review of its performance.

Palabras clave: Criptografía postcuántica, Retículos, CRYSTALS-Dilithium, firmas digitales.

1. INTRODUCCIÓN

La criptografía en esencia es la práctica y el estudio de técnicas que permiten proteger la información y asegurar la comunicación de accesos no autorizados [1]. La criptografía ha estado presente desde la antigüedad y ha ido evolucionando junto con la sociedad, desde el simple cifrado del Emperador César hasta las sofisticadas máquinas de encriptación Enigma utilizada durante la Segunda Guerra Mundial [2]. Con el desarrollo de la tecnología y el surgimiento de los computadores y el internet, surgió la necesidad de evolucionar dichos mecanismos para adaptarse a los nuevos requerimientos.

Al ser la criptografía piedra angular de la seguridad en la información, lo que ha generado grandes desafíos, uno de ellos es la llegada de la computación cuántica, que podría ser capaz de dar solución a problemas matemáticos en los que se basan los algoritmos criptográficos convencionales que se usan hoy en día mediante el uso del

algoritmo de Peter Shor. Y es que en 1994 el profesor estadounidense de matemáticas aplicadas Peter Shor, desarrolló un algoritmo que aprovecha la naturaleza cuántica de los qubits para factorizar de manera eficiente números enteros grandes. Este algoritmo fue implementado por primera vez en el año 2001, por el grupo IBM, que consiguió factorizar 15 en 3 y 5 utilizando un ordenador cuántico de resonancia magnética nuclear [2].

Debido a esta situación, el Instituto de Estándares y Tecnología Norteamericano (NIST), realizó una convocatoria a nivel internacional en el año 2016, que fue conocida como criptografía postcuántica o PQC por sus siglas en inglés (Post-Quantum Cryptography). En esta se convocó a ser postulados nuevos estándares criptográficos asimétricos, resistentes a la computación cuántica. En el año 2022 y tras varias rondas, el NIST publicó los estándares que se pueden considerar como los ganadores de esta convocatoria. Esta lista contempla tres esquemas de firma digital: CRYSTALS-

Dilithium, FALCON y SPHINCS. Los dos primeros algoritmos basan su seguridad en diferentes problemas matemáticos definidos sobre la estructura de los retículos, a diferencia del último esquema que los hace sobre las funciones hash. En este trabajo se presenta el concepto de retículo y sus propiedades, posteriormente se profundiza en los problemas computacionales asociados a los mismos y por último se aborda el esquema de firma digital CRYSTALS-Dilithium y su rendimiento.

2. METODOLOGÍA

El artículo presentado corresponde a una revisión bibliográfica, a fin de definir las principales características del algoritmo de firma digital CRYSTALS-Dilithium.

Esta revisión se realizó en dos niveles: primero, desde la perspectiva de la criptografía postcuántica, su origen y evolución y segundo, enfocada en el esquema CRYSTALS-Dilithium y su rendimiento. Con ello se logró obtener gran cantidad de documentos que permitieron comprender de mejor manera el objeto de estudio.

La búsqueda se realizó en distintos gestores, como lo son Google Académico y en los diferentes repositorios de universidades que abarcaran esta temática tanto en idioma español como inglés. Esta búsqueda se ejecutó con los términos: “Criptografía postcuántica” y “CRYSTALS-Dilithium”. En el artículo, se detalla, una revisión de información publicada sobre el tema, las características, rendimiento y comparación del algoritmo de firma digital CRYSTALS-Dilithium.

3. PRELIMINARES

Con la aparición de la computación cuántica y su futura comercialización muchos de los algoritmos criptográficos que actual-

mente son utilizados quedaran obsoletos; ejemplo de estos son RSA, DSA O ECD-SA. Sin embargo, esto no significa que la computación cuántica llegará a destruir la criptografía tal y como se conoce, ya que actualmente existen otro tipo de criptografías que también se erigen como algoritmos potenciales frente a esta tecnología. Ejemplo de ellos son:

- **Criptografía basada en hash (hash-based):** incluye sistemas criptográficos como las firmas Lamport y el esquema de firmas Merkle

- **Criptografía basada en código (code-based):** Para ejemplificar este algoritmo se puede nombrar el esquema de firmas McEliece que se basa en los códigos de Goppa.

- **Criptografía basada en sistemas de ecuaciones multivariable:** Este algoritmo se basa en la dificultad existente para la resolución de sistemas de ecuaciones con múltiples variables. Un ejemplo es el esquema Rainbow.

- **Cifrado simétrico basado en clave secreta de Rijndael:** También conocido como AES, es un cifrado simétrico que basa su seguridad en la longitud de su clave.

- **Criptografía basada en enrejado (lattice based):** En esta familia de algoritmos se encuentran sistemas criptográficos de intercambio de claves de aprendizaje con errores, o las firmas de anillos de aprendizaje con errores. [3]

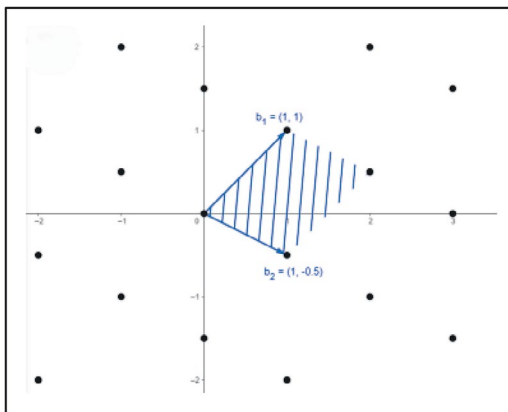
“La “Cryptographic Suite for Algebraic Lattices” (CRYSTALS) abarca dos primitivas criptográficas: Kyber, un mecanismo de encapsulación de clave (KEM) seguro de indistinguibilidad bajo el Ataque de texto Cifrado Elegido Adaptativo [IND-CCA2];

y Dilithium, un algoritmo de firma digital Imposibilidad de Falsificar bajo Ataque de Mensaje Elegido [EUF-CMA]. Ambos algoritmos se basan en problemas complejos sobre retículos modulares” [11]

3.1. Retículos

Los retículos son una disposición discreta y regular de puntos en un espacio real Euclideo de dimensión n . Se refiere a discreto dado que cada par de puntos se encuentra distanciado al menos por un valor mayor a 0 [4].

Figura 1. 1.
Retículo 2-dimensional [4]



3.2. Problemas principales basados en retículos

Los retículos son estructuras geométricas que permiten formular problemas matemáticos complejos, para este caso, se describen dos problemas de difícil resolución tanto para las computadoras clásicas como para las cuánticas, esto los convierte en una base sólida para la criptografía postcuántica.

- **Problema del vector más corto (SVP):** Por sus siglas en inglés, Shortest Vector Problem. Consiste en encontrar el vector más corto en un retículo

- **Problema del vector más cercano (CVP):** Por sus siglas en inglés, Closest Vector Problem. Consiste en dado un vector en V , el espacio vectorial en el que se define N , encontrar el vector del retículo N que diste menos de él. [5]

3.3. CRYSTALS-Dilithium

Este esquema de firma digital basa su seguridad en el problema de encontrar los vectores más cortos en un retículo. Además de su seguridad, algunas de las características que diferencian estos esquemas son:

- **Facilidad en su implementación:** Para conseguir esquemas seguros de firma digital basados en problemas con retículos se debe aleatorizar la firma mediante una distribución normal, procedimiento altamente costoso a nivel computacional. Dilithium logra solucionar este inconveniente ya que utiliza distribuciones uniformes.

- **Tamaño de clave publica:** Este esquema tiene la menor combinación de tamaños de la clave publica y de la firma de entre todos los esquemas propuestos para el concurso del NIST. [6]

4. RESULTADOS

El objetivo de este artículo es realizar una revisión bibliográfica en donde se evidencie el rendimiento del esquema CRYSTALS-Dilithium, tanto en el tamaño de la clave y firma como en la generación de las mismas. Para ello se consultaron múltiples fuentes, en las que se realizó la comparación de este algoritmo frente a otros de su misma naturaleza.

Para ilustrar de la mejor manera el rendimiento del algoritmo de firma CRYSTALS-Dilithium, es de suma importancia compararlo con sus versiones, por ello se presenta

en primera instancia el artículo elaborado por “CRYSTALS

Cryptographic Suite for Algebraic Lattices” [7], en donde se muestran las pruebas de rendimiento que se obtuvieron de un núcleo de una CPU Intel Core-i7 6600U (Skylake). Estas pruebas de rendimiento son de dos implementaciones diferentes: una de referencia en C y una implementación optimizada con instrucciones vectoriales AVX2. [7]

Figura 4.1.
CRYSTALS-Dilithium 2 [7]

Dilithio2					
Tamaños (en bytes)	Ciclos Skylake (ref.)		Ciclos Skylake (avx2)		
		generación:	300751	generación:	124031
paquete:	1312	firmar:	1355434	firmar:	333013
firma:	2420	verificar:	327362	verificar:	118412

Figura 4.2.
CRYSTALS-Dilithium 3 [7]

Dilithio3					
Tamaños (en bytes)	Ciclos Skylake (ref.)		Ciclos Skylake (avx2)		
sk:		generación:	544232	generación:	256403
paquete:	1952	firmar:	2348703	firmar:	529106
firma:	3293	verificar:	522267	verificar:	179424

Figura 4.3.
CRYSTALS-Dilithium 3 [7]

Dilithio5					
Tamaños (en bytes)	Ciclos Skylake (ref.)		Ciclos Skylake (avx2)		
sk:		generación:	819475	generación:	298050
paquete:	2592	firmar:	2856803	firmar:	642192
firma:	4595	verificar:	871609	verificar:	279936

Uno de los resultados más notorios que se arrojó de estas pruebas, son que la implementación del algoritmo con las instrucciones vectoriales logra un mayor rendimiento tanto en el tiempo de generación de firmas como en el tamaño de las mismas.

Tras comprender el funcionamiento del algoritmo Dilithium y su rendimiento en comparación a sus diferentes versiones, es consecuente compararlo con los diferentes tipos de algoritmos de su misma familia, con el propósito final de determinar cuál de ellos brinda un mayor rendimiento.

Para ello se presenta el trabajo de grado [8], en donde se analizaron los resultados de ejecutar los distintos algoritmos de firma digital, que se clasifican para este documento en nivel de seguridad 5. Para este caso en concreto se contemplaron los siguientes esquemas:

- Rainbow IV
- Dilithium (3,5)
- Falcon 1024

Tabla 4.1.
Medida de ciclos de algoritmos de firma nivel 5 [8]

Algoritmo	Generación	Firma	Verificación
Rainbow-IV-Classic	21166582680	148941889	152162128
Rainbow-IV-Circumzenithal	24366122583	148798833	160442673
Rainbow-IV-Compressed	24369767186	11511037035	160329869
Dilithium5	306077	580400	289547
Dilithium5-AES	168424	386924	170355
Falcon-1024	82268715	2071864	344583

Tabla 4.2.
Características de algoritmos de firma de nivel 5 [8]

Algoritmo	PK Size	SK Size	Signature Size
Rainbow-IV-Classic	1930600	1408736	212
Rainbow-IV-Circumzenithal	536136	1408736	212
Rainbow-IV-Compressed	536136	64	212
Dilithium5	2592	4864	4595
Dilithium5-AES	2592	4864	4595
Falcon-1024	1793	2305	1330

En la tabla 4.1. se evidencia que tanto el algoritmo Dilithium como Falcon poseen tamaño de claves muy pequeños en comparación al algoritmo Rainbow. Sin embargo, en cuanto al tamaño de la firma, el algoritmo Rainbow es mucho más pequeño en comparación a los demás algoritmos.

También se puede observar que en la tabla 4.2. los algoritmos Dilithium y Falcon tardan mucho menor tiempo en las tres fases en comparación al algoritmo Rainbow.

Tras realizar estas pruebas se concluyó que Dilithium fue uno de los algoritmos más rápidos, sobre todo al usar AES internamente [8].

Hasta este punto se puede evidenciar que los algoritmos Dilithium y Falcon han demostrado un mejor rendimiento en cada una de las pruebas realizadas.

Por ello se presenta este trabajo de grado [9], en donde se compararon los esquemas Dilithium (2, 3 y 5) y Falcon (512, 1024) tanto en tamaño de claves como de firmas en función a su nivel de seguridad.

Tabla 4.3.

Tamaño de claves y firma (en bytes) [9]

Candidato	Nivel de seguridad	Clave pública	Clave privada	Firma
Dilithium	Nivel 2	1312	2528	2420
	Nivel 3	1952	4000	3293
	Nivel 5	2592	4864	4595
Falcon-512	Nivel 1	897	7553	666
Falcon-1024	Nivel 5	1793	13953	1280

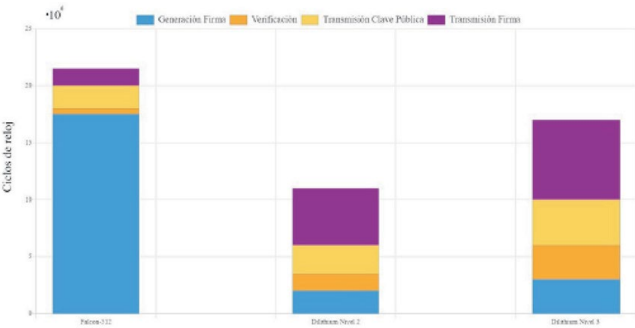
En la tabla 4.3. se observa que el algoritmo Dilithium es mayor en su ancho de banda en comparación al algoritmo Falcon, debido al mayor tamaño de la clave pública y firma.

Esto implica que las firmas Dilithium no caben en un solo paquete de internet, lo que conlleva a que ciertas aplicaciones que utilicen Dilithium tengan que reprogramarse, lo cual genera mayores costos.

También se comparó el rendimiento computacional, utilizando un procesador ARM Cortex M4.

Figura 4.4.

Rendimiento usando el procesador ARM Cortex M4 [9]

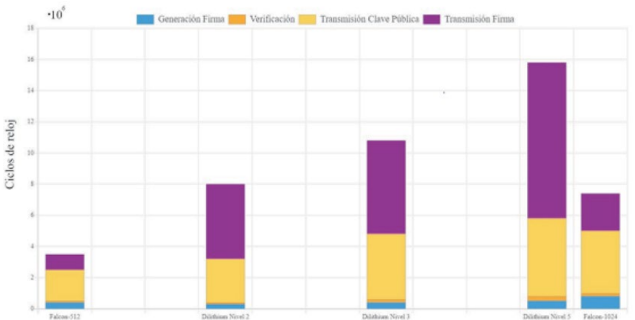


Respecto al rendimiento de los dos algoritmos, se destaca la rápida velocidad de verificación de firmas con la que cuenta el algoritmo Falcon, pese a ello tanto en la generación de firmas como de claves el algoritmo Dilithium es notablemente superior. Es importante mencionar que estas pruebas se realizaron con un procesador que no cuenta con soporte para operaciones de coma flotante, lo que indica que el algoritmo Falcon requiere cierto tipo de microprocesadores para alcanzar su óptimo rendimiento. [9]

Para tal fin se exponen los resultados de las pruebas realizadas en un microprocesador de x86-64 con extensiones AVX2 de los dos algoritmos (Falcon, Dilithium)

Figura 4.5.

Rendimiento en pruebas de firma usando el procesador x86-64 con extensiones AVX2 [9]



Al realizar las pruebas en este tipo de microprocesador, se evidencio que la generación de firmas del algoritmo Dilithium es ligeramente más rápida, no obstante, el tamaño de firma y clave pública del algoritmo Falcon es mucho menor. También se puede observar que el requerimiento de recurso del algoritmo Falcon es bastante mayor en comparación a Dilithium lo que lo hace inviable para dispositivos con restricciones de memoria [9].

5. CONCLUSIONES

- El esquema Dilithium satisface la propiedad de vinculación fuerte que puede ser muy útil para el cumplimiento de una de las características angulares de la criptografía, el no repudio.

- Debido a su gran eficiencia y su sólida base teórica, el esquema de firma digital Dilithium es uno de los algoritmos que mayor interés ha suscitado por parte del NIST

- Comparando los distintos resultados de las pruebas elaboradas en los artículos citados, se puede establecer que el esquema Dilithium ofrece un mejor rendimiento no solo en el tamaño de las claves y firmas, sino que también se muestra superior en referencia a los recursos que consume en su proceso.

- Tras la revisión bibliografía se pudo constatar que Dilithium es uno de los algoritmos que mayor rendimiento ofrece en comparación a los otros esquemas del mismo tipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. González. Á. Hernández. Sistemas de Criptografía a lo Largo de la Historia. Universidad Politécnica de Madrid. 2024. https://oa.upm.es/82676/1/TFG_DAVID_GONZALEZ_LABRADA.pdf
- [2] B. Benavente de Lucas. El algoritmo de Shor. Universidad de Barcelona. 2024. https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/217048/2/tfg_benavente_de_lucas_beatriz.pdf
- [3] RedUNCI. Actas del XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación. Instituto Tecnológico de Buenos Aires. 2017. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/61343>
- [4] M. Betancort. Estructura de retículos y su aplicación en la criptografía. Universidad de La Laguna. 2023. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/33970/Estructura%20de%20reticulos%20y%20su%20aplicacion%20en%20la%20criptografia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] P. G. Méndez. Introducción a la Criptografía Homomórfica. Universidad de La Laguna. 2022. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/30351/Introduccion%20a%20la%20Criptografia%20Homomorfica.pdf?sequence=1>
- [6] O. Prieto. CRYSTALS: Kyber Y DILITHIUM. Los Próximos Estándares de Criptografía Postcuántica. Universidad de Oviedo. 2023. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/68991/TFG_Olai-PrietoFernandez.pdf?sequence=4
- [7] Cryptographic Suite for Algebraic Lattices. CRYSTALS. 2021. <https://pq-crystals.org/dilithium/index.shtml>
- [8] D. A. García. Estudio Y Comparativa De Los Principales Algoritmos De Criptografía Post-Cuántica. Universidad Rey Juan Carlos. 2023. <https://burjcdigital.urjc.es/items/981a4f30-416e-4233-a8e1-6eb-78054d5ef>
- [9] A. M. Martín. Diseño De Nodo Inalámbrico Para Implementación de Técnicas de IA Y Ciberseguridad en el Edge De IOT. Universidad Politécnica de Madrid. 2024. https://oa.upm.es/80563/1/TFG_AMM_02_02.pdf
- [10] J. E. Peña. Aplicaciones Básicas de la Criptografía en la Vida Cotidiana. Universidad San Isidro Labrador. <https://uisil.net/repositorio/files/54/PEN%CC%83A%20ALVAREZ%20JUAN%20EZEQUIEL.pdf>
- [11] S. Sánchez. CRIPTOGRAFÍA POST-CUÁNTICA. Universidad De Jaén. 2022. <https://crea.ujaen.es/server/api/core/bitstreams/4016e174-35a3-4fc0-ae54-109f6f680078/content>

HACKING EN ENTORNOS FÍSICOS: DESAFÍOS Y SOLUCIONES EN LA CIBERSEGURIDAD EN ENTORNOS FÍSICOS SOPORTADOS EN EL USO DE DRONES COMO AGENTES DE SEGURIDAD

Hacking in physical environments: Challenges and solutions in cybersecurity in physical environments supported by the use of drones as security agents

David Esteban Moreno¹

¹Universidad Libre de Colombia, Bogotá, Colombia,
davide-morenof@unilibre.edu.co

RESUMEN

La evolución de la tecnología ha transformado diversos ámbitos, incluida la ciberseguridad, donde el avance del hacking y las tecnologías ha generado nuevos desafíos. En este contexto, resulta fundamental analizar el papel que desempeñan los entornos físicos en la seguridad de los sistemas de información, considerando su impacto en la protección de datos y en la infraestructura tecnológica actual.

Este estudio presenta un análisis detallado sobre el reconocimiento del fundamento científico detrás de las tecnologías y técnicas recientes de hacking en entornos físicos. Se propone un enfoque integral que combina medidas de seguridad innovadoras para proteger sistemas físicos y digitales, destacando la importancia de la ingeniería en el fortalecimiento de la ciberseguridad. A través de metodologías ágiles y tecnologías avanzadas, se busca mitigar los riesgos asociados a la exposición de infraestructuras críticas y canales de información.

Finalmente, se resalta la necesidad de un aprendizaje continuo y una mayor responsabilidad en el uso de herramientas tecnológicas, promoviendo la adopción de estrategias que garanticen la protección tanto de sistemas organizacionales como personales. Esta perspectiva fomenta un modelo de seguridad proactivo y adaptativo ante las crecientes amenazas en el ámbito de la ciberseguridad.

Palabras clave: Ciberseguridad, hacking, protección de la información.

ABSTRACT

The evolution of technology has transformed various fields, including cybersecurity, where the advance of hacking and technologies has generated new challenges. In this context, it is essential to analyze the role that physical environments play in the security of information systems, considering their impact on data protection and the current technological infrastructure.

This study presents a detailed analysis on the recognition of the scientific rationale behind recent hacking technologies and techniques in physical environments. A comprehensive approach is proposed that combines innovative security measures to protect physical and digital systems, highlighting the importance of engineering in strengthening cybersecurity. Through agile methodologies and advanced technologies, it seeks to mitigate the risks associated with the exposure of critical infrastructures and information channels.

Finally, it highlights the need for continuous learning and greater responsibility in the use of technological tools, promoting the adoption of strategies that guarantee the protection of both organizational and personal systems. This perspective promotes a proactive and adaptive security model in the face of growing cybersecurity threats.

Keywords: Cybersecurity, hacking, information protection.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la ciberseguridad se ha consolidado como un pilar fundamental dentro de las tecnologías de la información, esenciales para el funcionamiento de la sociedad y las organizaciones. Sin embargo, el avance tecnológico ha traído consigo nuevas vulnerabilidades, especialmente en los sistemas ciberfísicos, donde amenazas como el hacking representan riesgos significativos que pueden comprometer la integridad de infraestructuras críticas, afectando tanto a empresas como a instituciones.

A lo largo del desarrollo de la ingeniería, se han construido innumerables sistemas de información basados en principios teóricos que buscan mejorar su flexibilidad, acce-

sibilidad e innovación. Sin embargo, esta evolución también ha expuesto vulnerabilidades en la lógica de los sistemas, generando la necesidad de nuevas estrategias de protección. En este contexto, la seguridad ciberfísica se convierte en un desafío crucial, ya que el desarrollo tecnológico no solo transforma nuestra interacción con el mundo, sino que también nos hace cada vez más dependientes de estos sistemas. Este proyecto se enfoca en la investigación y evaluación de los fundamentos teóricos sobre los cuales se construyen los sistemas de información y telecomunicaciones, con especial énfasis en su seguridad. Para ello, se analizarán conceptos clave como ciberseguridad, jamming, espectro electromagnético, infraestructura de seguridad, anti-jamming, ataques de denegación de servicio (DoS), modulación adaptativa y

técnicas reactivas de ciberseguridad. Además, se integrarán los principios de seguridad establecidos por la norma ISO 27001, emitida por la Organización Internacional de Normalización.

Asimismo, se estudiarán las condiciones ambientales necesarias para la implementación de estas medidas en entornos físicos, considerando los factores que influyen en la efectividad de las técnicas descritas [7]. Finalmente, se realizará un análisis técnico sobre las características de los dispositivos y tecnologías que conformarán la infraestructura de ciberseguridad propuesta.

Si bien los modelos de seguridad en espacios físicos aún están en desarrollo, es fundamental recuperar y reforzar los principios que permiten el funcionamiento de estas tecnologías desde su origen. La ingeniería tiene el compromiso de evolucionar constantemente, comprender las tendencias tecnológicas y garantizar que la innovación se base en una sólida comprensión de los fundamentos científicos, fortaleciendo así la seguridad de los sistemas y su aplicabilidad en el mundo real.

2. METODOLOGÍA

El enfoque para la investigación se determinó como un enfoque mixto, esta decisión se conceptualiza con la intención de comprender de manera profunda y holística de los desafíos y soluciones en este campo en constante evolución. Esta elección se fundamenta en la naturaleza multifacética de la ciberseguridad, que involucra tanto aspectos técnicos y cuantificables como dimensiones más cualitativas y contextuales. A través de este enfoque, se busca identificar tanto la frecuencia y naturaleza de las amenazas cibernéticas, como las percepciones,

experiencias y prácticas de los usuarios y profesionales de la ciberseguridad. Esto permitirá no solo cuantificar el impacto de las amenazas y evaluar la eficacia de las medidas de seguridad implementadas, sino también comprender mejor las necesidades, desafíos y oportunidades reales en este ámbito.

En primera instancia, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de incidentes previos relacionados con ataques de hacking en entornos físicos. Esta revisión permite comprender el funcionamiento fundamental de las telecomunicaciones y las bases científicas en las que se sustentan las tecnologías de la información. La documentación utilizada incluye informes técnicos, normativas de seguridad y artículos académicos publicados en fuentes reconocidas como la IEEE [16].

En segunda instancia, se realiza un estudio detallado de los componentes electrónicos involucrados en la solución propuesta. Esto implica el análisis técnico de dispositivos anti-jamming y sus contramedidas, así como la evaluación de soluciones previas para la integración de drones con herramientas de seguridad establecidas. Se examinan diseños de hardware, protocolos de comunicación y posibles limitaciones técnicas en su implementación.

A través de esta metodología, se busca comprender la ciberseguridad desde una perspectiva dinámica, explorando la integración de tecnologías en entornos reactivos que requieren sistemas automatizados avanzados [12]. Este enfoque permite evaluar los riesgos potenciales y fortalecer la infraestructura de seguridad en diversos tipos de instalaciones, proporcionando una visión ampliada sobre las amenazas y soluciones en el ámbito de la ciberseguridad.

3. DESARROLLO

3.1 Ciberseguridad

Las infraestructuras de información que se ha instaurado en la sociedad actual derivan de la proliferación de sistemas que, a pesar de presentarse como herramientas digitales, tienen todos sus recursos instanciados en espacios físicos. Este proceso ha llevado a que la informática se centre predominantemente en las cualidades del software, dejando indiscutiblemente expuestas sus vulnerabilidades [12].

Estas vulnerabilidades han influido en la forma en que los ingenieros en estas áreas y los hackers han abordado los sistemas, dedicando incansables esfuerzos al estudio de los equipos en entornos digitales para identificar y explotar estas vulnerabilidades en beneficio propio.

La ingeniería se basa en encontrar las aplicaciones prácticas de los fundamentos científicos estudiados en diversas áreas, desarrollando directamente cómo es posible generar comunicaciones inalámbricas, un fenómeno que, visto desde una perspectiva menos moderna, resulta verdaderamente fascinante.

Las telecomunicaciones se apoyan en los desarrollos de la física, específicamente en campos como las ondas y, más específicamente aún, en el espectro electromagnético.

Estas propiedades del entorno tienen aplicaciones vastas en todas las áreas, pero el principal desafío surge cuando se reconoce que el conocimiento es una fuente mutable de poder, y que tanto el funcionamiento como las vulnerabilidades de estas herramientas están determinadas por el manejo de las tecnologías que se utilizan.

3.1.1 Hacking en espacios físicos

Inicialmente, se entendía que el hacking podía ocurrir tanto a nivel físico como sistemático. Sin embargo, en el desarrollo masivo de infraestructuras tecnológicas, se asumió que los problemas de intervenciones físicas podrían resolverse al estandarizar parámetros de seguridad ya concebidos y sistematizados. Así, el enfoque se centró en la arquitectura de los sistemas y en el estudio del flujo de datos [15]. No obstante, técnicas de hacking recientes como el Jamming han demostrado que el concepto de hacking se está expandiendo a instancias no antes conceptualizadas por las empresas. Estos sistemas generan una posibilidad de reinterpretar el hacking. “Estos activos pueden ser dañados por agentes maliciosos a través de ataques habilitados por cibernética o físicamente, particularmente aquellos que explotan la interacción a menudo ignorada entre el mundo cibernético y físico” Tsgkanos (2016)

El enfoque del desarrollo se ha centrado en separar de manera tajante los espacios físicos y digitales, sin reconocer que se está generando un punto en el que las cualidades físicas del entorno tienen un impacto significativo en el desarrollo adecuado de la infraestructura de un sistema [7]. A medida que la tecnología avanza, la dirección apunta hacia una mayor unificación conceptual de los mundos físico y virtual.

3.1.2 Interferencias y ataques electromagnéticos

Los ataques electromagnéticos constituyen una amenaza significativa en el ámbito de la ciberseguridad en espacios físicos, ya que pueden afectar la integridad y disponibilidad de los sistemas electrónicos sin necesidad de acceso físico directo. Estos ataques aprovechan la vulnerabilidad de

los dispositivos y redes que dependen de señales electromagnéticas para su funcionamiento, como las telecomunicaciones, los sistemas de navegación y los dispositivos IoT. A diferencia de los ataques cibernéticos convencionales, que operan a través de redes digitales, los ataques electromagnéticos actúan a nivel físico, interfiriendo en la transmisión de datos o dañando los componentes electrónicos [16].

Su aplicación puede ir desde la interrupción temporal de una comunicación hasta la destrucción permanente de equipos críticos, lo que hace que sean una preocupación creciente en sectores como la defensa, la infraestructura crítica y la seguridad empresarial.

Uno de los ataques más comunes en esta categoría es el jamming, una técnica que consiste en la emisión intencionada de señales de radiofrecuencia para interferir en la comunicación inalámbrica. Este tipo de ataque puede afectar redes Wi-Fi, GPS, sistemas de control de drones y otras tecnologías que dependen de la conectividad inalámbrica, generando interrupciones o pérdida total de servicio.

Además, el spoofing electromagnético es otra técnica utilizada para falsificar señales legítimas, desviando drones, desorientando vehículos autónomos o manipulando datos en redes de telecomunicaciones [14]. Estas amenazas no solo comprometen la funcionalidad de los sistemas, sino que también pueden poner en riesgo la seguridad de infraestructuras críticas y la protección de datos sensibles.

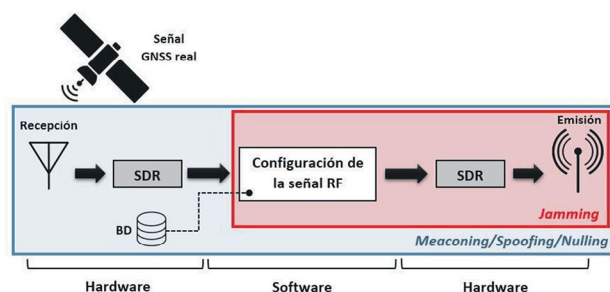
En un nivel más destructivo, se encuentran los ataques basados en pulsos electromagnéticos (EMP, por sus siglas en inglés), los cuales generan una sobrecarga de energía que puede dañar circuitos electrónicos y

deshabilitar dispositivos en un área determinada. Un ataque EMP puede provenir de fuentes naturales, como tormentas solares, o ser generado artificialmente mediante dispositivos especializados.

Estas técnicas han sido objeto de estudio en ámbitos militares y de defensa, debido a su capacidad de inutilizar equipos electrónicos sin necesidad de contacto físico. Para mitigar estas amenazas, es fundamental implementar blindajes electromagnéticos, técnicas de detección de interferencias y protocolos de seguridad adaptativos, asegurando la resiliencia de los sistemas frente a estos riesgos.

La siguiente figura muestra un esquema general de cómo se compone el flujo de un ataque de jamming, como intercepta las señales del dispositivo y finalmente las nulifica.

Figura 1.
Jamming strategy, tomada de [1].



3.1.3 Jamming intencionado vs no intencionado

Pese al latente peligro que es el jamming, no siempre se presenta como un acto deliberado, tomando en cuenta la gran variedad de frecuencias y dispositivos que hoy en día se despliegan en los diferentes espacios, pueden llegar a presentarse casos no maliciosos de esta caída de servicios, es importante comprender cuales son los

alicientes para ambos casos, enmarcar de forma adecuada ambas perspectivas para identificar cuáles son las preventivas que se deben estandarizar en la infraestructura de ciberseguridad de cualquier entorno.

El jamming intencionado ocurre cuando un atacante genera interferencias deliberadas con el objetivo de interrumpir o bloquear las comunicaciones en un sistema específico.

Este tipo de ataque puede utilizarse en distintos escenarios, como sabotaje de infraestructuras críticas, interrupción de redes militares, espionaje, o incluso bloqueos de señales en dispositivos de rastreo. Dentro del jamming intencionado, existen diversas técnicas:

- **Jamming de banda ancha:** en este caso los atacantes emiten señales en un amplio rango de frecuencias, de esta manera llegan a afectar diversos canales de comunicación sin tener un objetivo específico.

- **Jamming de banda estrecha:** Por otra parte, en este enfoque si existe un objetivo específico, afectando únicamente un canal generando ruido en el canal del espectro electromagnético.

- **Jamming impulsado:** Este tipo de jamming es intermitente, lo cual dificulta considerablemente la detección del ataque, siendo más eficiente para el atacante.

Por otra parte, el jamming no intencionado ocurre debido a interferencias involuntarias que se pueden dar cuando varios dispositivos sobreponen sus señales en el espectro en la banda ancha.

Este punto es complejo ya que conlleva un planteamiento de cuales herramientas en la infraestructura pueden ser mal integra-

das en el modelo, o incluso provenir de instalaciones vecinas que presentan el mismo problema, por mencionar algunos casos específicos existen:

- **Ruido electromagnético:** proviene de sistemas eléctricos, como motores, transformadores o sistemas de alta tensión que pueden provenir de la infraestructura pública o privada de electricidad.

- **Fenómenos atmosféricos:** Casos aislados como tormentas solares pueden afectar al propagarse en las señales de radio.

- **Interferencia de otros dispositivos:** Aparatos tecnológicos como los routers, dispositivos con sistemas integrados de bluetooth o incluso electrodomésticos del hogar pueden operar en las mismas frecuencias que ciertos sistemas.

Sin importar el tipo de jamming ambos escenarios comprometen de forma importante la seguridad y estabilidad de la infraestructura de telecomunicaciones de cualquier entorno, por ello es importante hacer un análisis esquematizado del espacio y tráfico en el espectro [10].

Con la creciente presencia de dispositivos tecnológicos que hacen uso del espectro electrónico es aún más importante manejar controles de protección y mitigación de dichos casos, hacer uso de filtros de frecuencia, sistemas de modulación adaptativa, y protocolos de comunicación y interferencias.

3.1.4 Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

El FHSS es una técnica ampliamente utilizada en sistemas de comunicación para mitigar los efectos del jamming. Consiste en cambiar rápidamente la frecuencia de

transmisión en un patrón pseudoaleatorio, lo que dificulta que un atacante pueda interferir en una frecuencia específica durante un tiempo prolongado [10]. Este método es especialmente efectivo contra el jamming de banda estrecha, ya que el atacante tendría que predecir y bloquear múltiples frecuencias al mismo tiempo, lo cual es costoso y difícil de implementar. Prosiguiendo desde este punto se mitigarían los impactos dados por el atacante, ya que el jamming depende de espacios físicos el atacante tiene que estar en cierta medida cerca de las instalaciones, de este punto en adelante se debería continuar con el desarrollo de las estrategias de detección y ubicación de las señales para proceder a un protocolo de seguridad presencial.

3.1.5 Filtrado y cancelación de interferencias

El uso de filtros de señal es una técnica fundamental para reducir el impacto del jamming. Mediante filtros de paso de banda y algoritmos avanzados de procesamiento de señales, es posible identificar y suprimir señales interferentes, permitiendo que las señales legítimas sean recibidas con mayor claridad [14]. Además, se pueden emplear técnicas de cancelación activa de interferencias, donde se detecta la señal de jamming y se genera una señal inversa para anular su efecto sobre las comunicaciones.

3.1.6 Detección y respuesta reactiva ante ataques de Jamming

Integrándose a las medidas preventivas, es crucial contar con sistemas de detección de jamming que puedan identificar intentos de interferencia en tiempo real. Estos sistemas pueden emplear técnicas de análisis de espectro de radiofrecuencia y algoritmos de inteligencia artificial para detectar patrones de interferencia sospechosos.

Una vez identificado un ataque, se pueden activar respuestas automáticas, como el cambio de canal, la reducción de potencia de transmisión para minimizar la detección o incluso la implementación de contramedidas electrónicas contra el atacante.

Los analizadores de espectro permiten detectar la presencia de interferencias de radiofrecuencia y analizar su intensidad, ancho de banda y patrones de modulación. Modelos avanzados, como los de Rohde & Schwarz o Keysight [], pueden operar en tiempo real y ayudar a identificar anomalías en el espectro de radio.

Teniendo una medida y estrategias exactas para la mitigación de ataques, hace falta protocolos de seguridad que ubiquen en el espacio físico las fuentes emisoras de los ataques de jamming para así actuar de forma coordinada con los equipos de seguridad de las instalaciones [15]. Para localizar la fuente de interferencia, se pueden emplear múltiples receptores distribuidos en diferentes ubicaciones para determinar la dirección desde la cual proviene la señal de jamming. Esta técnica, conocida como DF (Direction Finding) o Radiogoniometría, permite triangular la posición del emisor con alta precisión.

3.1.7. Estrategias para el reforzamiento de las telecomunicaciones

En este punto se procederá a enlistar algunas de las principales estrategias que se deben mantener en mente a la hora de plantear un sistema de seguridad en espacios físicos para la mitigación de ataques en telecomunicaciones, fundamentalmente se describirán cuáles son las medidas estandarizadas para la independencia y adaptabilidad del sistema de telecomunicaciones en caso de una posible interacción por parte de un agente externo.

Tabla 1.*Medidas de seguridad a implementar en un sistema de ciberseguridad físico.*

Medidas de seguridad	Descripción
Control de accesos físicos	Uso de tarjetas RFID, escáneres de huellas dactilares o reconocimiento facial para restringir la entrada a áreas críticas.
Guardias de seguridad	Personal capacitado para supervisar y controlar accesos no autorizados.
Zonificación y segmentación	Separar áreas sensibles dentro de un edificio con diferentes niveles de autorización.
Blindaje electromagnético	Uso de salas Faraday y materiales conductores para evitar espionaje electrónico o interferencias.
Monitoreo del espectro RF	Uso de detectores de jamming para identificar interferencias deliberadas.
Fuentes de energía de respaldo	Uso de UPS y generadores para mantener operativos los sistemas en caso de cortes eléctricos.
Centros de datos redundantes	Replicación de información en múltiples ubicaciones para evitar la pérdida de datos.
Planes de contingencia y recuperación ante desastres	Estrategias para restablecer operaciones rápidamente tras un incidente.

3.2 Dispositivos de vuelo no tripulados

Los drones de vuelo inicialmente se dan como herramientas que permiten generar dispositivos de movilización, pese a ello se han implementado como herramientas que aportan de manera importante una revolución en el sentido de dinamizar los sistemas enfocándolos en diversos campos, ya sea en áreas como la fotografía, vigilancia, agricultura, inspección de infraestructuras, o incluso defensa, son inventos que se han revolucionado debido al aporte que generan a la hora de expandir las capacidades humanas en sentido de su presencia en diversos tipos de entornos, favoreciendo la manera en la cual se puede comprender un sistema a partir de su perspectiva.

Se reinterpreta la manera en la cual se puede comprender la tecnología al instaurarse en un paradigma diferente de forma independiente, pese a ello la función y cualidades de los drones mantienen su principal

intención, el generar dinamismo en la recolección u entrega de datos, al romper de una manera significativa la manera tan estática como se solían concebir los sistemas de información, se pasa a producir de una manera conceptualmente más adecuada el cómo se puede alimentar las necesidades del entorno de una manera activa y constantemente en auto evaluación[9]. “Technology is playing its part in globalization and the drone technology is such a technology with a usage ever increasing in a vast range of disciplines such as agriculture, health and military.”

Ayamga-(2021)

3.2.1 Articulación de los drones como herramientas en el anti-jamming

Dispositivos de recolección de información como los drones siguen siendo un nicho de la ingeniería que se está desarrollando, aun así, es de vital importancia reconocer la practicidad y dinamismo que proponen

los drones a la hora de desplegarse entornos reales y descomponer diversos factores que de manera natural se suelen concebir como cuestiones mayores, pero gracias a estos dispositivos se pueden estandarizar y descomponer las variables que producen la factibilidad de que ocurra algo [14].

Como se mencionó previamente, los chips de radiofrecuencia antijamming funcionan mediante el análisis de señales de radiofrecuencia, identificando patrones característicos de interferencias maliciosas. Aunque esta tecnología ofrece una solución efectiva al integrarse como parte de la infraestructura de seguridad, presenta una limitación significativa: su naturaleza estática. Estos sensores se instalan en ubicaciones específicas y tienen un rango de efectividad de poco más de 40 metros a la redonda, lo que provoca una disminución en su precisión y velocidad de detección a medida que se alejan de su punto de instalación.

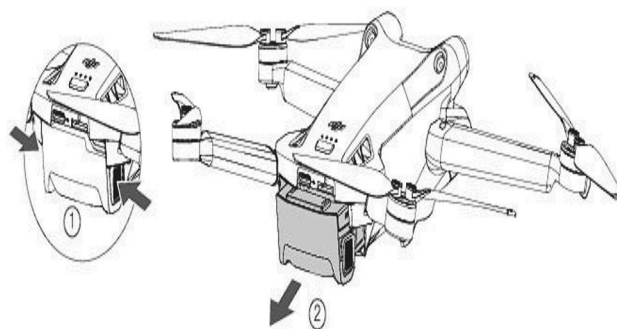
La alternativa que se propone para superar esta limitación sería la integración de estos chips de análisis en drones, combinados con sistemas de triangulación de señales de radiofrecuencia (RF). Esta fusión tecnológica permitiría realizar un escaneo en tiempo real de banda ancha sobre toda el área protegida, ofreciendo una cobertura mucho más dinámica y adaptable.

Mientras los drones patrullan el perímetro, el sistema de triangulación detectaría de manera precisa las señales de interferencia, permitiendo localizar con mayor exactitud el punto de origen del ataque. Esta capacidad no solo mejoraría la detección temprana de amenazas, sino que también optimizaría la respuesta operativa, al coordinar la intervención inmediata de los cuerpos de seguridad pertinentes [8]. De este modo, se incrementaría significativa-

mente la protección de la infraestructura física frente a ataques de jamming, garantizando una defensa proactiva y adaptable ante intentos de sabotaje o espionaje electrónico.

Figura II.

Modelo base de estructura de dron, tomado de [3].



3.2.2 Problemas técnicos de los equipos de drones

En el desarrollo actual de los drones los puntos más importantes a considerar en sentido de sus desventajas directas con el proyecto son inicialmente los problemas con la duración de batería en periodos extensos, la seguridad y vigilancia se debe dar como un proceso continuo el cual en sentido técnico puede llegar a generar problemas de rendimientos. Los drones actuales incluso metiéndose con equipos de punta pueden llegar a tener una duración de batería que oscilaría entre las dos y tres horas, dichas condiciones también pueden llegar a verse permeadas por factores como la velocidad que asuma el dron en sus rutas, que otras funciones este haciendo, ya sea un escaneo con los infrarrojos del dron, toma de fotos o video, etc.

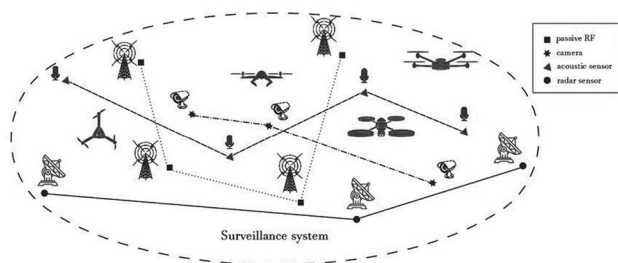
Pese a lo anterior se pueden dar diversas técnicas que apoyen con el rendimiento y el “estrés” que puede llegar a generar en un nivel técnico el hacer un despliegue y

monitoreo ininterrumpido de los drones, pese a las complicaciones que puede llegar a generar no hay mejor tecnología que ayude a mantener un flujo de datos que es constantemente dependiente de un despliegue en espacios físicos, el dinamismo y velocidad que ofrece super por mucho a las herramientas actuales. “La explotación de la tercera dimensión (el espacio aéreo), facilita el uso rápido y oportuno de las tecnologías inherentes al poder aeroespacial [13]. Esto se debe a que, al utilizar el espacio aéreo, libre de obstáculos importantes; es posible operar con un mayor grado de acción tanto en tiempo como en espacio.” Cedeño (2017)

Una de las técnicas más adecuadas para el manejo continuo de los drones en uso sería la “rotación de drones”, la rotación de los drones implicaría el uso de una flota de drones que se alternan entre períodos de vuelo activo y períodos de descanso y recarga. Este enfoque tiene varias ventajas a la hora de hacer la conversión en espacios físicos, los cuales pueden llegar a tener necesidad y cualidades diversas en sentido tanto demográfico como físicas.

Figura III.

Planteamiento inicial de modelo de vigilancia por rotación, tomado de [2].



3.2.3 Automatización de rutas de vigilancia

Cubriendo los problemas a nivel técnico, es importante entender a nivel logístico

de qué forma se organizaran los drones para que el sistema de vigilancia por bandadas funcione de forma automatizada, naturalmente se debe hacer una instalación para que los equipos de seguridad puedan instruirse a través de un sistema que se integre de forma comprensible y a su vez automatice la mayor parte de procesos, sin que el personal de seguridad deba estar altamente calificado con la construcción a nivel técnico del sistema de vigilancia.

Tras hacer una zonificación de la infraestructura a la cual se anclarán los dispositivos, es importante demarcar de forma adecuada cual será la extensión de la zona de los drones par así determinar cómo serán los recorridos y hacer una operación conjunta con los equipos de seguridad haciendo sondeos que no dejen al descubierto ninguna zona en periodos extendidos.

La automatización de rutas de vigilancia con drones DJI utilizando Python se puede lograr a través del SDK oficial de DJI, conocido como DJI Mobile SDK o el DJI Onboard SDK, que permite programar y controlar los drones de manera personalizada. A través de bibliotecas como DJI-SDK-Python, es posible definir rutas preestablecidas mediante coordenadas GPS, establecer altitudes específicas y configurar la velocidad de vuelo. El proceso comienza con la creación de un script en Python que define los puntos de control (waypoints), permitiendo que el dron realice patrullas automáticas a lo largo de una trayectoria definida [3]. Además, es posible integrar condiciones para que el dron reaccione ante eventos específicos, como intensificar la vigilancia en zonas donde se detecten señales de interferencia. La automatización de estas rutas permite ejecutar misiones de vigilancia programadas de manera eficiente, minimizando la intervención humana y maximizando la cobertura del terreno en tiem-

po real, lo que resulta ideal para sistemas de seguridad física avanzados.

3.2.4 Interoperabilidad con sistemas de seguridad

La interoperabilidad de los drones con los sistemas de seguridad es un aspecto clave para maximizar la eficacia en la detección y respuesta ante amenazas. Al integrarse con centros de mando y control, los drones pueden transmitir en tiempo real datos de telemetría, imágenes y alertas de interferencia de señales, permitiendo una rápida toma de decisiones. Además, la compatibilidad con cámaras térmicas y sensores ópticos amplía su capacidad de vigilancia, permitiendo detectar intrusos incluso en condiciones de baja visibilidad [12]. Asimismo, los drones pueden coordinarse con otros dispositivos de seguridad, como alarmas automatizadas, torres de vigilancia y equipos de respuesta, activando protocolos de acción inmediata en caso de detección de jamming u otras amenazas. Esta interoperabilidad garantiza una cobertura más completa del perímetro de seguridad, optimizando la protección de infraestructuras críticas y reduciendo los tiempos de reacción ante incidentes.

3.2.5 Contramedidas ante ataques de jamming a los drones

Las contramedidas contra el jamming son estrategias diseñadas para mitigar los efectos de la interferencia intencional en las comunicaciones y garantizar la continuidad operativa de los sistemas de seguridad. Entre las soluciones más efectivas se encuentran el uso de tecnologías de espectro ensanchado, como el frequency hopping spread spectrum (FHSS) y el direct sequence spread spectrum (DSSS), que permiten que las señales de comunicación varíen de frecuencia. Además, la implementación de antenas direccionales y filtros de se-

ñal ayuda a reducir la vulnerabilidad ante fuentes de interferencia externas [14]. Otra contramedida clave es la detección temprana del jamming mediante sensores RF especializados y drones con capacidades de triangulación, lo que permite localizar rápidamente la fuente de interferencia y tomar acciones correctivas.

Figura IV.

Diagrama de arquitectura sistema de seguridad con drones, elaboración propia.



4. CONCLUSIONES

El hacking, al igual que la tecnología, se fundamenta en un desarrollo creativo e ingenioso de los sistemas, basado en una profunda comprensión de las normas que rigen nuestra capacidad como sociedad para crear herramientas tanto poderosas como potencialmente destructivas. Hoy en día, el análisis y la prevención de amenazas en la seguridad de los datos se han convertido en un aspecto crítico tanto para organizaciones como para individuos. El jamming, en particular, representa una amenaza creciente que nos obliga a reflexionar sobre la necesidad de involucrarnos activamente en la tecnología, no solo para aprovechar sus beneficios, sino también para asumir la responsabilidad de su uso y protección.

La ciberseguridad está evolucionando hacia un entorno cada vez más dinámico e interconectado, en el que la frontera entre lo digital y lo físico se vuelve difusa. Por

ello, la implementación de sistemas dinámicos capaces de responder de manera rápida y eficiente se vuelve esencial para fortalecer la seguridad en infraestructuras críticas.

La integración de drones en el ámbito de la ciberseguridad es un claro ejemplo de cómo podemos reinterpretar la tecnología para adaptarnos a un mundo en constante cambio. En un contexto donde la información es un recurso invaluable, la capacidad de recopilar y procesar datos en tiempo real se está convirtiendo en un estándar en la ingeniería, con implicaciones tanto positivas como negativas.

El futuro de la seguridad en cualquier entorno dependerá de la convergencia de múltiples disciplinas. La necesidad de un enfoque interdisciplinario es inminente en un mundo que avanza hacia una conectividad sin precedentes, impulsado por la innovación y la constante redefinición de sus propias reglas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INCIBE-CERT, «Spoofing y jamming sobre los GNSS», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.incibe.es/incibecert/blog/spoofing-y-jamming-los-gnss>.
- [2] INCIBE-CERT, «Spoofing y jamming sobre los GNSS», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.incibe.es/incibecert/blog/spoofing-y-jamming-los-gnss>.
- [3] D. Cepeda, «DJI Mini 3 Pro Battery – All You Need to Know», DroneBlog, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.droneblog.com/dji-mini-3pro-battery/>
- [4] Prodea.com, «Structures in mobile tools for infrastructure», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://prodea.com.ar/?p=486953815.q>
- [5] R. Hernández, «Uso de los Drones o Vehículos Aéreos no Tripulados en la Agricultura de Precisión, Medellín, 2021.
- [6] B. Montoya, «Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo», Dialnet, vol. 16, 2020.
- [7] H. Pyrayesh, «Jamming Attacks and Anti-Jamming Strategies in Wireless Networks: A Comprehensive Survey, Wuhan, 2019.
- [8] Z. E. Rewini, «Cybersecurity Attacks in Vehicular Sensors», Texas, 2021.
- [9] G. Salazar, «Drones: tecnología con futuro promisorio en la gestión forestal», Scielo, vol. 24, 2020.
- [10] X. Wang, «Dynamic Spectrum AntiJamming Communications: Challenges and Opportunities», Singapur, 2018.
- [11] J. Smith, «Diseño y Construcción de Drones Autónomos, Editorial Tecnológica, 2020.
- [12] A. García, «Seguridad Cibernética en Sistemas de Drones Autónomos», Revista de Tecnología Avanzada, vol. 5, n° 2, pp. 123-135, 2019. DOI: 10.1234/rtav.2019.12345.
- [13] Administración Federal de Aviación (FAA), «Regulaciones de Operación de Drones Comerciales en Estados Unidos, Departamento de Transporte de los Estados Unidos, 2021. Disponible en: <https://www.faa.gov/drones>.
- [14] K. Grover, A. Lim, «Anti jamming wireless networks», International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems, vol, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJAHUC.2014.066419>.
- [15] A. Liu, S. Nagel «Jamming is not cool any more», Nature, 1998. [En línea]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/23819>.
- [16] D. Gavalas, C. Constantopoulos «A survey on jamming attacks and countermeasures in WSNs», IEEE Xplore, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5343062>.

ÉTICA Y REGULACIÓN DEL USO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL: UNA MIRADA ENTRE COLOMBIA Y EUROPA

Ethics and regulation of the use of Artificial Intelligence: A perspective between Colombia and Europe

*Cristhian David Tapiero Padilla¹
Ricardo Andrés Santa Quintero²*

¹Estudiante de Ingeniería de Sistemas Universidad Libre
cristhiand-tapierop@unilibre.edu.co

²Tutor *ricardo.santaq@unilibre.edu.co*

Fecha de recepción: 16/06/2025

Fecha de aceptación del artículo: 25/08/2025

1. INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial se ha consolidado como uno de los avances tecnológicos más influyentes del siglo XXI, transformando diversos sectores como la salud, la educación, la arquitectura o la ingeniería. Sin embargo, este rápido crecimiento también plantea interrogantes éticos profundos.

Por un lado, los usuarios interactúan con sistemas que funcionan como cajas negras, cuyo funcionamiento interno resulta desconocido para la gran mayoría y que ponen en riesgo la protección de datos personales y biométricos. Por otro lado, su implementación en profesiones que afectan directamente la vida humana genera dudas sobre la responsabilidad, la precisión y los límites que deben imponerse a estas herramientas.

Aunque la IA ha alcanzado niveles de sofisticación sin precedentes, aún no logra

abarcarse la totalidad de las necesidades humanas, lo que obliga a reflexionar sobre sus riesgos. En este contexto, surge la necesidad de analizar la regulación como un mecanismo para equilibrar innovación y ética.

Este ensayo tiene como objetivo abordar comparativamente el marco normativo europeo, pionero en el tema, y el proyecto colombiano de regulación de la inteligencia artificial, con el fin de evaluar qué principios deben guiar su uso ético en la sociedad contemporánea y como un marco híbrido resulta más completo para la aplicación integral en diversas áreas de la sociedad y la industria moderna.

Fundamentos Éticos de la Inteligencia Artificial

Se debe entender la inteligencia artificial como un conjunto de técnicas que aprenden patrones a partir de grandes

volúmenes de datos para realizar tareas específicas. Estos sistemas no piensan ni comprenden como las personas, ya que estos modelos aproximan respuestas con base en cálculos estadísticos y, en ocasiones, pueden producir errores o interpretaciones equivocadas.

Su expansión y aplicación en tareas cotidianas ha reavivado preocupaciones sociales sobre sustitución de tareas y sobre el impacto de decisiones automatizadas en ámbitos sensibles como la salud, la educación, las finanzas o la administración pública.

Esas preocupaciones no se explican solo por miedo o desconocimiento, sino por riesgos reales asociados a la calidad de los datos, al desconocimiento del funcionamiento de los modelos y a la transferencia de decisiones de alto impacto a herramientas que no poseen juicio moral ni racional (además de contar con contextos limitados de muchas situaciones).

Los avances actuales son el resultado de una evolución gradual de la automatización del cálculo, el cómputo de propósito general y el aprendizaje automático. El salto reciente proviene de la disponibilidad de datos y poder de cómputo, junto con nuevas arquitecturas de modelos.

En este contexto, conviene distinguir dos momentos: el entrenamiento, cuando se construye el modelo a partir de grandes cantidades de datos estructurados, y la inferencia, cuando el modelo genera salidas para usuarios.

Esta distinción es clave para abordar debates sobre derechos de autor, licencias y privacidad, porque la procedencia de los datos, las bases legales para su uso y las obligaciones de atribución o transparencia pueden variar entre ambas fases.

Desde una perspectiva ética, los desafíos se agrupan en cuatro aspectos primordiales. Primero, datos y derechos, es decir, la procedencia y licenciamiento de los datos, la protección de datos personales y biométricos, y el respeto por la privacidad.

El uso de contenidos de terceros sin trazabilidad suficiente dificulta la atribución y puede afectar los incentivos económicos de autoras y autores; además, la ausencia de gobernanza de datos incrementa el riesgo de filtraciones o de uso no autorizado. Segundo, sesgo y equidad, conjuntos de datos no representativos o procesos de entrenamiento mal controlados pueden producir resultados discriminatorios, especialmente contra poblaciones históricamente marginadas.

La ética exige validar el desempeño de los sistemas de manera desagregada y corregir sesgos detectados antes y durante su operación. Tercero, transparencia y justificación, ya que, aunque no siempre es factible explicar cada parámetro, sí es posible exigir niveles de trazabilidad, documentación y explicación proporcionados al riesgo del uso, de modo que los afectados comprendan el alcance y límites del sistema. Cuarto, responsabilidad profesional y gobernanza; en contextos de alto impacto se requiere supervisión humana significativa, criterios claros de uso y no uso, registro de decisiones y mecanismos de auditoría que permitan atribuir responsabilidades.

Estos fundamentos preparan el terreno para el análisis regulatorio. La regulación no sustituye a la ética, por lo cual la estandarización de la ética busca regular procesos y establecer límites de los cuales no se puede pasar respetando los derechos fundamentales de las personas, restricciones aplicadas tanto a desarrolla-

dores como directamente a los modelos surgentes y existentes. La clasificación de riesgos, requisitos de gestión y calidad de datos, documentación, pruebas previas al despliegue y transparencia hacia los usuarios son algunos de los estándares mesurables.

En consecuencia, un enfoque responsable de la IA exige alinear el diseño y la operación de los sistemas con principios éticos y, al mismo tiempo, con obligaciones regulatorias proporcionales a los riesgos, especialmente cuando están en juego derechos fundamentales y la confianza pública en un sistema incapaz (hasta ahora) de sentir y empatizar con las necesidades y limitaciones humanas.

Regulación Europea

La Unión Europea, en un esfuerzo por gobernar el desarrollo y uso de la inteligencia artificial, aprobó en 2024 el Reglamento (UE) 2024/1689 del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen normas armonizadas sobre inteligencia artificial (Ley de Inteligencia Artificial o “AI Act”). Su innovación central radica en la implementación de un enfoque basado en el riesgo, que categoriza los sistemas de IA y aplica obligaciones estrictas y proporcionales al nivel de riesgo que presentan.

Categorías de Riesgo y Obligaciones Correspondientes

Riesgo Inadmisibles

Sistemas cuyo uso se considera una amenaza clara para la seguridad, los medios de vida y los derechos fundamentales de las personas. Estas aplicaciones están prohibidas en territorio de la UE. Entre ellos se puede catalogar los sistemas de pun-

tuación social (especialmente gobiernos), manipulación subliminal, explotación de vulnerabilidades de grupos específicos e identificación biométrica en tiempo real en espacios de acceso público que no entren en las excepciones estrictamente supervisadas.

Alto Riesgo

Son sistemas de inteligencia artificial integrados en productos o utilizados en sectores críticos donde los fallos pueden causar daños significativos a la salud, seguridad o derechos fundamentales.

Estos sistemas están permitidos pero sujetos a un conjunto estricto de requisitos previos a su comercialización y durante su uso; por un lado, los productos de seguridad como, por ejemplo, juguetes, aviones, vehículos, equipos médicos y por otro lado los productos específicos como la gestión de infraestructuras críticas, educación y formación vocacional, etc.

Obligaciones para sistemas de Alto Riesgo

Evaluaciones de conformidad, sistemas de gestión de riesgos robustos, uso de datos de entrenamiento de alta calidad, registro de actividad, documentación técnica detallada, supervisión humana efectiva, requisitos de ciberseguridad, transparencia e información clara al usuario.

Riesgo Limitado

Corresponde principalmente a sistemas que interactúan con humanos. El AI Act impone obligaciones específicas de transparencia, como por ejemplo chatbots y sistemas de IA generativa los cuales deben informar a los usuarios que están interactuando con una máquina, permitiendo una decisión informada.

Riesgo Mínimo o Nulo

La gran mayoría de los sistemas de IA, como los filtros de spam o las recomendaciones de video, caen en esta categoría. El reglamento no impone obligaciones obligatorias, fomentando la adopción voluntaria de códigos de conducta. Esto busca no obstaculizar la innovación en áreas de bajo riesgo.

Gobernanza y Cumplimiento

El AI Act establece una estructura de gobernanza con una Autoridad Europea de Inteligencia Artificial para supervisar las normas armonizadas y los modelos fundacionales de alto impacto. A nivel nacional, cada estado miembro designará una o más autoridades supervisoras y las sanciones por incumplimiento representan sanciones severas específicamente para las infracciones catalogadas como inadmisibles y de alto riesgo.

Proyecto de Marco Regulatorio en Colombia

Este proyecto de marco legislativo tiene como objetivo regular el uso de la inteligencia artificial con el fin de preservar la vida y dignidad de los usuarios de estos sistemas, a lo largo de la propuesta se exponen casos de mal uso y falta de responsabilidad social y profesional de sistemas de inteligencia artificial demostrando el uso psicológico y emocional que dan usuarios a lo largo del planeta y como la ausencia de supervisión psicológica profesional puede cobrar vidas humanas.

Es por ello que se propone garantizar la constante supervisión de las respuestas de estos algoritmos, priorizando al individuo humano como elemento primordial para el avance y cuidado, manteniendo al usua-

rio informado de la trazabilidad de su información personal, y conversaciones con los Chatbots siendo informado del uso de sus datos con previo consentimiento y los posibles usos e impactos del tratamiento de sus datos.

También prima el esparcimiento de conocimiento y la equidad de conocimientos, proponiendo espacios de capacitación y actualización de herramientas surgentes y sistemas de inteligencia artificial asegurando el conocimiento de profesionales y personas que realicen uso de estos sistemas en sus tareas cotidianas sin afectar sus labores, estudios ni dignidad por el uso de estas herramientas, por el contrario promoviendo su uso ético, es decir que no busque hacer daño de ninguna manera a un sistema, organización, comunidad ni persona.

Estos sistemas deben ser usados como una herramienta que acelere procesos de capacitación y procedimientos profesionales de baja y media sensibilidad, es decir, que no comprometa la vida ni la calidad de vida de nadie.

Es por ello que también se propone la conscientización no solo para los usuarios de la inteligencia artificial sino para los desarrolladores y empresas desarrolladoras e impulsoras de estas tecnologías con el fin de sensibilizar el uso y restringir malas prácticas derivadas de usos erróneos o imperminentes de las herramientas existentes, imponiendo el pensamiento crítico sobre cualquier juicio realizado por la inteligencia artificial.

ANÁLISIS COMPARATIVO

Las dos legislaciones observadas a lo largo de este ensayo tocan temas de vital importancia como lo son el uso efectivo de

la inteligencia artificial en beneficio de la humanidad, el uso asertivo y ético a nivel profesional en áreas como la educación, la economía y la medicina, el respeto por la vida y los derechos fundamentales del ser humano. Aun así, ambos textos carecen de algunas cosas y son fuertes en aspectos directamente complementarios la una a la otra.

Por ejemplo, la legislación colombiana no posee una estructura rigurosa, o un alcance bien definido ya que pese a dar las pautas para llevar a cabo la implementación a nivel industrial de la inteligencia artificial en el país, no se delimitan bien los actores reguladores del cumplimiento de uso ético de la inteligencia artificial. Además, no aborda los enfoques críticos ni los mecanismos de control.

A su vez, el “AI Act” resulta en un mecanismo de control robusto difícilmente aplicable a microempresas, empresas en reestructuración y pymes. Dado a la complejidad técnica y los altos costos de implementación, esta legislación resulta difícilmente alcanzable para empresas que no poseen un gran poder capital; adicionando su rigidez lo cual puede perjudicar la innovación de empresas.

Por otro lado, de los puntos fuertes del proyecto de ley colombiano resaltan la humanística, es decir, el ser humano como enfoque de interés, primando la dignidad, y los derechos fundamentales del ser humano por encima de todo.

La responsabilidad social es otro aspecto donde no se ve a la inteligencia artificial y sus usuarios como principal enfoque del problema, sino al desarrollador como engranaje fundamental para el funcionamiento y mantenimiento de los modelos de inteligencia artificial y sus aplicaciones;

también resalta la aplicabilidad y su flexibilidad ya que la propuesta se adapta desde el uso común de la inteligencia artificial hasta aplicaciones críticas como decisiones profesionales.

Desde la perspectiva de los marcos normativos vigentes a la fecha en Colombia, se identifican elementos complementarios que fortalecen la propuesta regulatoria. La dimensión estratégica, reflejada en el CONPES 4144, posiciona la inteligencia artificial como motor de transformación digital, colocando la competitividad y el bienestar ciudadano como objetivos primordiales de toda implementación tecnológica. El componente de protección de datos surge como otro elemento diferenciador donde documentos como la Ley 1581 y el Decreto 1377 no consideran únicamente la tecnología como problema regulatorio, sino que responsabiliza directamente a los controladores y encargados del tratamiento como responsables del cumplimiento normativo; igualmente sobresale la adaptabilidad internacional ya que los referentes OCDE ofrecen un marco que se ajusta desde principios generales hasta directrices específicas para la implementación ética en diversos contextos nacionales como por ejemplo las responsabilidades de cada uno de los actores involucrados en el ciclo de vida de los procesos hechos por la inteligencia artificial, la centralización del humano y la transparencia y trazabilidad de los datos y el tratamiento que se le dan a estos.

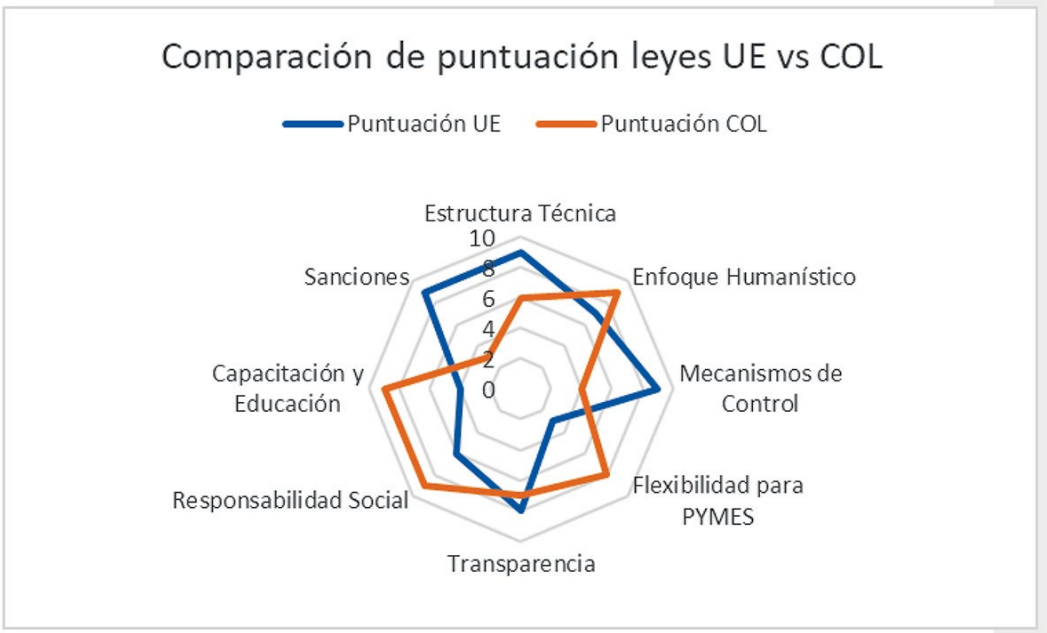
La legislación europea destaca por su estructura técnica, y su enfoque basado en evidencias científicas, además de la robusta definición de alcances, separando los riesgos en categorías e implementando mecanismos de control, acción, cumplimiento y supervisión claros a lo largo del documento.

Tabla 1.
Cuadro comparativo de normativas entre proyecto de ley Colombiano y el AI Act Europeo

Característica	Unión Europea (AI Act)	Colombia (Proyecto PL 098/2025)	Puntuación UE	Puntuación COL
Estructura Técnica	Marco robusto basado en riesgo con 4 categorías claramente definidas.	Estructura flexible pero menos técnica.	9	6
Enfoque Humanístico	Protección de derechos fundamentales.	Fuerte enfoque humanístico priorizando la salud psicosocial.	7	9
Mecanismos de Control	Autoridades supervisoras, evaluaciones de conformidad.	Supervisión pobremente definida.	9	4
Flexibilidad para PYMES	Requisitos costosos y complejos.	Marco adaptable para diferentes tamaños de empresa.	3	8
Transparencia	Requisitos claros de documentación y explicabilidad.	Enfoque en consentimiento informado.	8	7
Responsabilidad Social	Enfoque en cumplimiento regulatorio.	Fuerte énfasis en responsabilidad del desarrollador.	6	9
Capacitación y Educación	No aborda específicamente.	Enfoque fuerte en capacitación y equidad digital.	4	9
Sanciones	Multas severas de hasta €35M o 7% de facturación.	No especifica claramente el régimen sancionatorio.	9	3

Elaboración propia

Ilustración 1.
Gráfico radial de la comparativa entre las normativas (Elaboración propia)



CONCLUSIÓN

Ambos documentos exponen ideas variadas en cuanto al uso efectivo y ético de las tecnologías basadas en inteligencia artificial para avances en la humanidad, así como buscan implementar mecanismos de control y supervisión para controlar el alcance de implementación de la misma.

Se observan carencias en ambos documentos, por lo cual se destaca la necesidad de un marco híbrido que junte el sentido humanista que ya posee el documento colombiano junto a su flexibilidad y adaptabilidad para todo tipo de empresa y usuario de inteligencia artificial, uniendo la estructura robusta de mecanismos de control y entes supervisores que garanticen el cumplimiento de este marco.

También es importante recalcar que tanto Europa como Colombia no destacan por tener desarrollos sobresalientes relacionados a la inteligencia artificial, pese a esto se preparan con regulaciones y prohibiciones previas con el fin de normativizar el desa-

rollo de los modelos y prevenir violaciones que puedan perjudicar a la sociedad. Esta visión preventiva es vital para la implementación de procedimientos estrictamente delimitados con el fin de obtener productos estandarizados y listos para la puesta en producción mucho más controlada. Pese a esto se propone la poca limitación a la hora de desarrollar dado a que como se observó anteriormente en otros estudios el miedo al avance es el detonante de pobreza y atraso tecnológico de los países y continentes de tercer mundo.

Este enfoque permitiría que pequeñas y medianas empresas se capaciten y realicen una implementación pertinente de TIC's de quinta generación optimizando procesos, reduciendo costos y tiempos en procesos vitales y accediendo a otros nichos de mercado poco explorados debido a la poca o nula explotación de tecnologías del siglo XXI bien sea por el miedo generalizado al avance o el desconocimiento del potencial de avance que tienen estas herramientas junto a una supervisión exhaustiva para su implementación ética.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agüero, E., & Dávila, C. (05 de 2023). Desafíos éticos de la inteligencia artificial: implicaciones para la sociedad y la economía. *Desafíos éticos de la inteligencia artificial: implicaciones para la sociedad y la economía*. Cienfuegos, Cuba: Revista Conrado. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-86442023000500137
- [2] Allen, K., Cowling, M., & Crawford, J. (2023). *Leadership is needed for ethical ChatGPT: Character, assessment, and learning using artificial intelligence (AI)*. Leadership is needed for ethical ChatGPT: Character, assessment, and learning using artificial intelligence (AI). Journal of University Teaching & Learning Practice. doi:<https://doi.org/10.53761/1.20.3.02>
- [3] Bryson, J. (2018). *Patience is not a virtue: The design of intelligent systems and systems of ethics*. Patience is not a virtue: The design of intelligent systems and systems of ethics. Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/s10676-018-9448-6>
- [4] Cámara de Representantes de Colombia. (08 de 2025). *Proyecto de Ley 098 de 2025: Marco Regulatorio de Inteligencia Artificial para Protección Psicosocial y Equidad Digital*. Proyecto de Ley 098 de 2025: Marco Regulatorio de Inteligencia Artificial para Protección Psicosocial y Equidad Digital. Bogotá, Bogotá, Colombia: Cámara de Representantes de Colombia. Obtenido de <https://www.camara.gov.co/sites/default/files/2025-08/P.L.098-2025SC%20%28MARCO%20REGULATORIO%20DE%20INTELIGENCIA%20ARTIFICIAL%29.pdf>
- [5] Chipuxi Fajardo, L., & Guaña Moya, J. (01 de 2023). *Impacto de la inteligencia artificial en la ética y la privacidad de los datos*. Impacto de la inteligencia artificial en la ética y la privacidad de los datos. doi:[https://doi.org/10.26820/reciamuc/7.\(1\).enero.2023.923-930](https://doi.org/10.26820/reciamuc/7.(1).enero.2023.923-930)
- [6] Comisión Europea. (04 de 2021). Proposal for a Regulation laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act). Comisión Europea. Obtenido de <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/proposal-regulation-laying-down-harmonised-rules-artificial-intelligence>
- [7] Cortina Orts, D. A. (01 de 2019). *ÉTICA DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL*. ÉTICA DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL. Obtenido de https://www.boe.es/biblioteca_juridica/anuarios_derecho/abrir_pdf.php?id=ANU-M-2019-10037900394
- [8] Departamento Nacional de Planeación de Colombia. (2022). *Política Nacional de Inteligencia Artificial*. Política Nacional de Inteligencia Artificial. Departamento Nacional de Planeación. Obtenido de <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/proposal-regulation-laying-down-harmonised-rules-artificial-intelligence>
- [9] Floridi, L. (2018). *Soft Ethics and the Governance of Digital Technologies*. Soft Ethics and the Governance of Digital Technologies. doi:<https://doi.org/10.1007/s13347-018-0303-9>
- [10] Floridi, L., & Taddeo, M. (08 de 2021). *How AI can be a force for good*. How AI can be a force for good. American Association for the Advancement of Science (AAAS). doi:<https://doi.org/10.1126/science.aat5991>
- [11] Fundación Karisma. (2023). *Inteligencia Artificial en Colombia: Retos Éticos y Regulatorios*. Inteligencia Artificial en Colombia: Retos Éticos y Regulatorios. Bogotá, Bogotá, Colombia: Fundación Karisma. Obtenido de <https://karisma.org.co/>
- [12] IEEE Global Initiative. (2019). *Ethically Aligned Design: A Vision for Prioritizing Human Well-being with Autonomous and Intelligent Systems*. Ethically Aligned Design: A Vision for Prioritizing Human Well-being with Autonomous and Intelligent Systems. IEEE. Obtenido de <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/proposal-regulation-laying-down-harmonised-rules-artificial-intelligence>
- [13] Jiménez Abad, D., Paguay Simbaña, Y. M., Quiliguango Lanchimba, V. F., Maynaguez Canacuan, M. P., Coello García, C. d., & Coello Ortiz, S. M. (2024). *La ética en el uso de la inteligencia artificial en los procesos educativos*. La ética en el uso de la inteligencia artificial en los procesos educativos. Revista Científica Retos de la Ciencia. doi:<https://doi.org/10.53877/rc.8.19e.202409.12>
- [14] Lazcoz Moratinos, G. (2020). *Análisis de la propuesta de Reglamento sobre los prin-*

cipios éticos para el desarrollo, el despliegue y el uso de la inteligencia artificial, la robótica y las tecnologías conexas. Análisis de la propuesta de Reglamento sobre los principios éticos para el desarrollo, el despliegue y el uso de la inteligencia artificial, la robótica y las tecnologías conexas. IUS ET SCIENTIA. doi:<https://doi.org/10.12795/IUS-SCIENTIA.2020.i02.03>

- [15] Mancilla Pavía, M. F. (2023). *Pánico artificial: El avance de la Inteligencia Artificial y el miedo al reemplazo de la humanidad*. Pánico artificial: El avance de la Inteligencia Artificial y el miedo al reemplazo de la humanidad. Obtenido de <https://rei.iteso.mx/server/api/core/bitstreams/18ebcac0-9fe3-49f9-8046-cd39fecf70a8/content>
- [16] Marín García, S. (2019). *Ética e inteligencia artificial*. Ética e inteligencia artificial. doi:<https://doi.org/10.15581/018.ST-522>
- [17] Mittelstadt, B. D., Allo, P., Taddeo, M., Wachter, S., & Floridi, L. (12 de 2016). *The ethics of algorithms: Mapping the debate*. The ethics of algorithms: Mapping the debate. SAGE Publications. doi:<https://doi.org/10.1177/2053951716679679>
- [18] Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2024). *Ética de la inteligencia artificial. La Recomendación*. Ética de la inteligencia artificial. La Recomendación. París: UNESCO. Obtenido de <https://www.unesco.org/es/artificial-intelligence/recommendation-ethics>
- [19] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2024). *Regulation (EU) 2024/1689*

on harmonised rules on Artificial Intelligence (AI Act). Regulation (EU) 2024/1689 on harmonised rules on Artificial Intelligence (AI Act). Official Journal of the European Union. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1689>

- [20] Urosa, B., Santaolalla, E., & Martín, Ó. (2019). Inteligencias múltiples y su relación con las competencias clave en la etapa de Educación Primaria. *Innovación Educativa en la Sociedad Digital*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7648359>
- [21] Vayena, E., Ienca, M., & Jobin, A. (2019). *The global landscape of AI ethics guidelines*. The global landscape of AI ethics guidelines. Springer Nature. doi:<https://doi.org/10.1038/s42256-019-0088-2>
- [22] Velásquez Nieto, O. L., Rodríguez Valencia, G. L., & Castellanos Hernández, W. (20 de 07 de 2025). *Proyecto de Ley de Inteligencia Artificial para Protección Psicosocial y la Equidad Digital*. Proyecto de Ley de Inteligencia Artificial para Protección Psicosocial y la Equidad Digital. Bogotá, Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://www.camara.gov.co/sites/default/files/2025-08/P.L.098-2025SC%20%28MARCO%20REGULATORIO%20DE%20INTELIGENCIA%20ARTIFICIAL%29.pdf>
- [23] World Economic Forum. (2020). *Responsible Limits on Facial Recognition: Use Case Guide*. Responsible Limits on Facial Recognition: Use Case Guide. Obtenido de <https://www.weforum.org/reports/responsible-limits-on-facial-recognition-use-case-guide>

DISEÑO DE UN MODELO DE MACHINE LEARNING PARA LA LECTURA DEL CLIMA EN EL HUMEDAL EL SALITRE DE BOGOTÁ

Design of a neural network for reading the climate
in the El Salitre wetland of Bogotá

Juan Pablo Abril Serna¹
Natalia Andrea Díaz Roa²

¹Universidad Libre, Bogotá, Colombia,
juanp-abrils@unilibre.edu.co

²Universidad Libre, Bogotá, Colombia,
nataliaa-diazr@unilibre.edu.co

RESUMEN

A partir del proyecto de virtualización del Humedal el Salitre de Bogotá trabajado desde la vertical de Realidad Virtual del semillero de investigación Sensorama, el cual culminó su primera fase en el 2024 con la publicación en la Revista Ingenio Libre del artículo “HUMEDAL EL SALITRE MODELADO EN UNITY: PROPUESTA INTERACTIVA PARA LA EDUCACIÓN AMBIENTAL” se da continuidad al proyecto dando inicio a su segunda fase cuyo objetivo principal es diseñar un modelo de Machine Learning que haga la lectura del clima a partir de datos obtenidos en la zona para predecir el nivel del agua para que posteriormente se implemente en la herramienta de realidad virtual entregada en la primera fase.

Palabras clave: Clima, Humedal, Machine Learning, Nivel de Agua.

ABSTRACT

As part of the virtual reality project of the El Salitre Wetland in Bogotá, developed under the Virtual Reality division of the Sensorama research group, the first phase concluded in 2024 with the publication of the article “EL SALITRE WETLAND MODELED IN UNITY: AN INTERACTIVE PROPOSAL FOR ENVIRONMENTAL EDUCATION” in the Ingenio Libre journal. The project now continues into its second phase, whose main objective is to design a Machine Learning model capable of interpreting climate data collected from the area in order to predict the wetland’s water level. This model will later be integrated into the virtual reality tool delivered during the first phase.

Keywords: Climate, Wetland, Machine Learning, Water Level

1. INTRODUCCIÓN

Tras la culminación de la primera fase del modelado en Unity del Humedal El Salitre de Bogotá, se identificó la oportunidad de mejorar la experiencia interactiva del usuario mediante la incorporación de nuevas herramientas. Como se planteó en la fase inicial del proyecto: “En una segunda fase del proyecto se buscará incluir actividades interactivas durante el recorrido que aporten al aprendizaje...”. [1]

Uno de los aspectos más relevantes identificados con el cierre de la fase inicial fue que el prototipo dejaba grandes oportunidades para que a futuro se pudieran implementar funcionalidades y herramientas adicionales con el fin de poder enriquecerlo y orientarlo de manera que aporte cada vez más al aprendizaje académico.

Con los resultados con los que se culminó la primera fase, el modelo en Unity del humedal El Salitre ya proporcionaba una alternativa a los estudiantes que por alguna razón no pudieran visitar de forma presencial el humedal y de la mano podrían incluirse múltiples bondades a la herramienta para que además le permita a quien la utilice generar estudios más completos que permitan identificar cambios en el entorno, captura de información o incluso aportar en la toma de decisiones referentes a este espacio.

Tras revisar internamente con el equipo los posibles pasos a seguir y luego de consultar con estudiantes de Ingeniería Ambiental sus opiniones respecto a la primera versión del modelo en Unity, se tomaron en cuenta varias ideas según sus necesidades, la principal de ellas fue evaluar la posibilidad de incluir en el modelo la variación climática para identificar las

afectaciones que podrían presentarse en el humedal bajo las diferentes condiciones meteorológicas desde sequías hasta inundaciones.

Al estar el humedal ubicado en una zona donde el estado del clima es altamente dinámico y es influenciado por fenómenos como el de la Niña y el Niño su impacto es bastante significativo. Según investigaciones previas “Los humedales pierden su estructura ecológica, y su aporte a la mitigación del cambio climático se ve seriamente limitado, y por el contrario los fenómenos de variabilidad climática, como el fenómeno del niño y la niña, golpean seriamente las zonas ocupadas por estos ecosistemas, trayendo graves inundaciones en época de lluvias y sequías en épocas de estiaje”. [2]

Ante esta problemática identificada, se planteó el desarrollo de un modelo de Machine Learning que tuviera la capacidad de procesar datos del clima de la zona y que asimismo posteriormente los transmitiera al modelo virtual en Unity con la representación de precipitaciones y cambios en el nivel del espejo de agua para que pudieran verse reflejados acordes al estado meteorológico en tiempo real.

Este enfoque propone orientar la segunda fase del proyecto hacia una experiencia más inmersiva e informativa para el usuario, además de ofrecer una herramienta de aprendizaje que fomente sensibilización sobre la importancia de la conservación ambiental en ecosistemas vulnerables ante los fenómenos de cambio climático.

Con este objetivo en mente, se inició una revisión de antecedentes relacionados a la aplicación de un modelos de Machine Learning (ML) en el campo de la Ingeniería Ambiental; a través del estado del arte

se identificó que mediante el ML se ha contribuido significativamente a la toma de decisiones basada en datos dentro del ámbito de la conservación medioambiental, sin embargo, aún existen amplias oportunidades para su aplicación, como lo señalan algunos autores “Las técnicas de Inteligencia Artificial y en particular el aprendizaje automático, han tenido un gran auge en el mundo de aplicaciones a problemas complejos, que involucran una gran cantidad de datos y procesamiento logístico, aunque en sectores que se benefician del manejo integrado de los recursos naturales, todavía es amplio el horizonte.” [3]

Otro de los estudios relevantes para el proyecto fue el de Predicción de las precipitaciones para la temporada lluviosa en Cuba publicado en la Revista Cubana de Meteorología, Vol. 30, No. 2 donde se muestra la comparativa de los resultados obtenidos con diferentes modelos de regresión:

“Para darle solución a este problema se recurre al aprendizaje automático, haciendo uso de modelos de regresión capaces de realizar la predicción de los meses lluviosos. [...] Entre los modelos de regresión se encuentran la regresión lineal, árbol de regresión, k-vecinos más cercanos, regresión directa, regresión encadenada y el MLP.” [4]. Esto evidenció la necesidad de evaluar cuál modelo de regresión debía aplicarse al modelo de acuerdo con las necesidades que se deseaban cubrir.

Fue así como a partir del resultado obtenido en la primera fase del modelo digital en Unity del humedal El Salitre, se dio continuidad a la investigación orientándola hacia las posibilidades de potenciar esta herramienta de realidad virtual integrando un modelo de ML capaz de analizar y

representar dinámicamente las condiciones climáticas de la zona.

La idea de integrar el aprendizaje automático y la simulación del humedal en Unity podría ser una estrategia efectiva para mejorar la experiencia de realidad virtual, de hecho, se encontró que Unity maneja un paquete llamado ML_Agents el cual permite hacer la integración de manera nativa para entrenar y controlar comportamientos de agentes inteligentes dentro del entorno virtual.

Como señala Unity Technologies, “el paquete permite convertir cualquier escena de Unity en un entorno de aprendizaje y entrenar comportamientos de personajes utilizando una variedad de algoritmos de aprendizaje automático” [5]. Esto puede incluso tenerse en cuenta para una próxima versión en la que se incluyan agentes inteligentes dentro del entorno virtual.

A partir de este primer objetivo, se inició la segunda fase del proyecto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

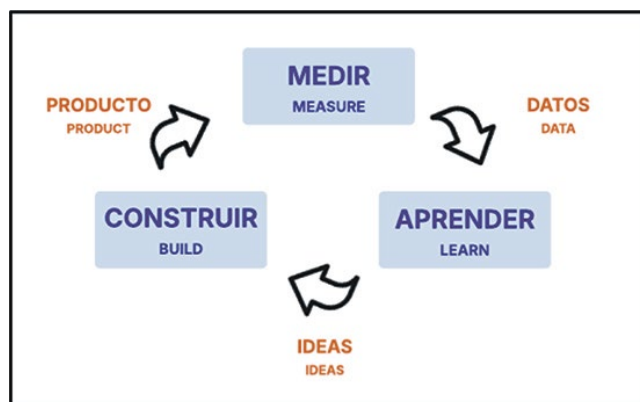
Para llegar a la etapa de desarrollo del modelo de Machine Learning previamente tuvieron lugar diferentes espacios de discusión en los que tanto a nivel interno del equipo como con colaboradores del programa de Ingeniería Ambiental se revisaron los puntos a resaltar y las observaciones del primer prototipo del modelo en Unity que fue entregado en la primera fase. A partir del intercambio de puntos de vista se generó una lluvia de ideas sobre las necesidades adicionales que podrían cubrirse y de qué forma podría mejorarse la experiencia del usuario.

A nivel general, la estrategia metodológica por la cual se rige el proyecto a partir de

la segunda fase adopta la metodología de Lean Startup de Eric Ries [6] la cual consiste en un proceso cíclico de construir, medir y aprender a partir de los datos obtenidos de las diferentes versiones del producto que se esté desarrollando con el fin de mantener una innovación y mejora continua que se alimenta de las ideas que surjan en cada revisión. [Ilustración 1].

Ilustración 1.

Metodología Lean Startup Eric Ries.



Elaboración Propia.

El tener el proyecto regido por esta metodología propició un entorno de mejora constante ya que permitía evaluar en cada avance si los resultados de acercaban a los objetivos planteados y si era necesario poder reestructurar y replantear los procesos que se estaban llevando a cabo.

Puntualmente, se evidenció la eficacia de esta metodología aplicada al proyecto cuando se realizó la primera prueba del modelo de Machine learning.

Los datos empleados fueron tomados de la Información Hidrometeorológica del Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio climático de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. [7], en donde se filtraron los datos meteorológicos desde el mes de

enero del año 2022 hasta el mes de abril del año 2025. [Ilustración 2].

Ilustración 2.

Toma de datos en SAB.

Captura de pantalla.

Para el desarrollo de los modelos se utilizó el lenguaje de programación Python, en el entorno de programación Google Colab por su versatilidad de estar en nube y ser compatible con el lenguaje, para esto se creó un nuevo notebook, en el cual se le importan las librerías requeridas:

- Pandas, sirve para la manipulación de los datos.
- Numpy, funciona para operaciones matemáticas de manera eficiente.
- Matplotlib, para la generación de gráficos exploratorios.
- Seaborn, para la generación de gráficos exploratorios.
- Sklearn, cuenta con algoritmos para el aprendizaje automático como la regresión.
- Google, funciona para sincronizar Google Drive y leer la base alojada en ella.

Con estas librerías, se dio inicio al desarrollo del modelo de Machine Learning, [Ilustración 3].

Ilustración 3.

Cargue de librerías necesarias.

```
[ ] import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score

[ ] from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
file_path = '/content/drive/MyDrive/MLHumedal/DataSet/SalitreDataSet.csv'
df_humedal = pd.read_csv(file_path)
```

Elaboración Propia.

Para realizar correctamente la manipulación de los datos, se utilizó la función `datetime` de la librería de Pandas, con el fin de asegurar que el valor de fecha en la base sea consistente y estandarizada para las futuras operaciones que requieran cálculos de temporalidad. Adicional a esto, se realiza una limpieza a los datos, haciendo una revisión para eliminar los valores nulos en la base, utilizando `.isnull()` y `.dropna()`, ambas funciones propias de Pandas.

Ilustración 4.

Manipulación y limpieza de datos.

```
df_humedal['fecha'] = pd.to_datetime(df_humedal['fecha'])
print(df_humedal.isnull().sum())
df_humedal.dropna(inplace=True)
```

fecha	0
precipitacion_mm	0
evaporacion_mm	0
nivel_agua_m	0
flujo_entrada_m3	0
flujo_salida_m3	0
dtype:	int64

Elaboración Propia.

Con los datos limpios, se dio continuidad pasando a la selección de las variables predictoras y el entrenamiento del modelo de ML.

2.1. Linear regression

Para el modelo de regresión lineal, se seleccionaron las variables predictoras Precipitación y Evaporación y como variable

objetivo se establece el Nivel del Agua, con esto, fue posible dividir la base de datos en una proporción de 80/20, donde 80 es el 80% de los datos para entrenamiento y 20 es el 20% de los datos para validar.

Ilustración 5.

Selección de variables, creación y entrenamiento Regresión Lineal.

```
X = df_humedal[['precipitacion_mm', 'evaporacion_mm']]
y = df_humedal['nivel_agua_m']

# Dividir en datos de entrenamiento y prueba (80% - 20%)
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Crear y entrenar modelo de regresión lineal
modelo = LinearRegression()
modelo.fit(X_train, y_train)
```

Elaboración Propia.

Al evaluar el modelo, se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) no favorable

Ilustración 6.

Evaluación del modelo Regresión Lineal.

```
y_pred = modelo.predict(X_test)
# Evaluar el modelo
print("Coeficientes:", modelo.coef_)
print("Intercepto:", modelo.intercept_)
print("Error cuadrático medio (MSE):", mean_squared_error(y_test, y_pred))
print("R^2 score:", r2_score(y_test, y_pred))
```

Coeficientes: [0.00014291 -0.0014013]
Intercepto: 1.2711150728102512
Error cuadrático medio (MSE): 0.01514034973375858
R^2 score: -0.19983108319914833

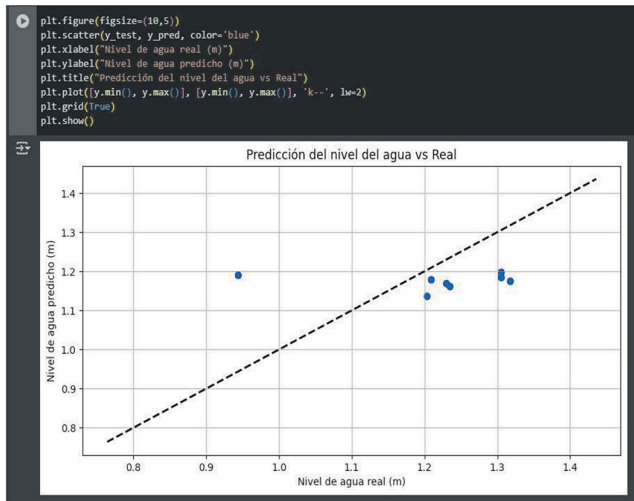
Elaboración Propia.

Al realizar la visualización de la regresión lineal, para entender el resultado desfavorable, Se observó que los puntos azules de la gráfica a continuación se encontraban alejados de la línea de referencia, lo que visualmente indica el bajo desempeño del modelo, ya que está sobrevaluando los niveles del agua.

Con estos resultados, se observó que no era óptimo el uso de este modelo, por lo tanto, se plantea otro modelo para mejorar su precisión.

Ilustración 7.

Visualización de la Regresión Lineal.



Elaboración Propia.

2.2. Random Forest Regression

Tras los resultados del modelo de regresión lineal y entender que la relación entre las variables era mucho más compleja, el segundo modelo elegido fue de tipo Random Forest Regression por su funcionamiento para las relaciones no lineales y efectos retardados, es por esto por lo que se tuvo la necesidad de implementar variables rezagadas como:

- Nivel del agua del mes anterior
- Precipitación del mes anterior
- Evaporación del mes anterior

Estas variables rezagadas se generaron a partir de una característica que trae la librería de Pandas en Python, "Shift", la cual funciona desplazando el índice el número de periodos deseados, gracias a esto, es posible que el modelo capte la inercia de las condiciones climáticas del mes anterior para conseguir una predicción más precisa al capturar el valor del mes anterior y guardarlo para el siguiente.

Ilustración 8.

Definición de variables rezagadas.

```
# Crear variables rezagadas
df_humedal['nivel_agua_m_lag1'] = df_humedal['nivel_agua_m'].shift(1)
df_humedal['precipitacion_lag1'] = df_humedal['precipitacion_mm'].shift(1)
df_humedal['evaporacion_lag1'] = df_humedal['evaporacion_mm'].shift(1)
```

Elaboración Propia.

Una vez definidas estas variables, se declara cuáles serán las variables independientes y dependientes (X, Y).

Variables independientes: Precipitación, evaporación y las tres variables rezagadas creadas (Nivel del agua del mes anterior, Precipitación del mes anterior y Evaporación del mes anterior).

Variable dependiente: Nivel del agua.

Ilustración 9.

Selección de variables.

```
# Definir variables independientes y dependiente
X = df_humedal[['precipitacion_mm', 'evaporacion_mm',
                 'nivel_agua_m_lag1', 'precipitacion_lag1', 'evaporacion_lag1']]
y = df_humedal['nivel_agua_m']
```

Elaboración Propia.

Una vez definidas las variables, se divide la base de datos en una proporción de 80/20, en la que 80% serán los datos de entrenamiento y 20% para validar el resultado. Se configura el Random Forest Regression en 100 árboles lo cual ofrece un equilibrio entre la precisión y el tiempo de procesamiento.

Ilustración 10.

Definición y entrenamiento Random Forest Regression.

```
# Dividir datos
from sklearn.model_selection import train_test_split
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Entrenar modelo Random Forest
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
modelo_rf = RandomForestRegressor(n_estimators=100, random_state=42)
modelo_rf.fit(X_train, y_train)
```

Elaboración Propia.

Una vez entrenado el modelo, se valida el resultado, el cual se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0.83, el cual es un resultado favorable y de buena precisión.

Ilustración 11.

Validación Random Forest Regression.

```
[ ] # Predicción y evaluación
y_pred = modelo_rf.predict(X_test)

from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score
print("MSE:", mean_squared_error(y_test, y_pred))
print("R² Score:", r2_score(y_test, y_pred))
```

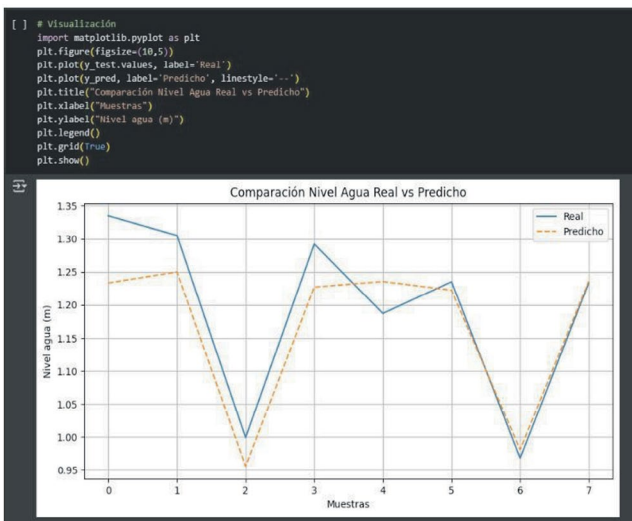
MSE: 0.002773406300000052
R² Score: 0.8346178901664059

Elaboración Propia.

Para entender mejor el resultado de forma visual se genera la siguiente gráfica en la que la línea azul representa el nivel del agua en la base de datos y la línea naranja punteada representa el valor predicho por el modelo, la cual permite observar que las predicciones son suficientemente precisas para observar la tendencia y el comportamiento real, confirmando el valor de R^2 de 83% de precisión.

Ilustración 12.

Visualización Random Forest Regression.



Elaboración Propia.

3. RESULTADOS

La primera hipótesis planteada consistía en la posibilidad de que existiera una relación de tipo lineal entre la Precipitación y Evaporación (variables independientes) frente al nivel del agua (variable dependiente), por lo cual se dio inicio al primer modelo con Regresión Lineal, sin embargo, se obtuvo un R^2 (Coeficiente de determinación) negativo, aproximadamente -0.20 , lo que indicaba que el resultado era mucho menos preciso que intentar predecir el nivel del agua calculando un promedio, entendiendo así que, el nivel del agua del Humedal el Salitre, no sigue una relación simple, sino que se rige por una interacción más compleja y no lineal, es por esto que se realizó un segundo modelo, mediante un Random Forest Regression, dado que es un modelo que funciona para relaciones de tipo no lineal con interacciones entre las variables y efectos retardados, que en este caso es acorde a la memoria hídrica del humedal generada por lo ocurrido en el ecosistema en meses anteriores, puesto que los datos están acumulados mes a mes.

Para poder obtener la dependencia temporal, se implementaron variables rezagadas donde se capturó el nivel del agua, precipitación y evaporación de meses anteriores.

Las variables rezagadas se generaron a partir de una característica que trae la librería de Pandas en Python, "Shift", la cual funciona desplazando el índice el número de periodos deseados, gracias a esto, es posible que el modelo capte la inercia de las condiciones climáticas del mes anterior para conseguir una predicción más precisa, la cual está en un R^2 (Coeficiente de determinación) de 0.83, siendo este significativamente más óptimo que el coeficiente obtenido en la regresión lineal.

Tabla 1.

Resultados de los modelos ML.

Modelo Machine Learning	Resultado (R^2)
Linear regression	-0.20
Random Forest Regression	0.83

Elaboración Propia.

4. DISCUSIÓN

El desempeño del modelo de tipo Random Forest se dio de esa manera debido a que efectivamente los ecosistemas hídricos urbanos cuentan con una complejidad dada por los múltiples factores del entorno.

Estos resultados refuerzan la importancia de considerar modelos no lineales y con componentes temporales al analizar sistemas ecológicos complejos tal como se evidenció en varios de los proyectos revisados en la fase de investigación de antecedentes.

Esta primera estructuración del modelo deja vía libre para seguirlo acondicionando y mejorando con miras a que en el momento en el que sea implementado al modelo de realidad virtual de Unity realmente brinde valor al producto diseñado y pueda optimizar la herramienta para quien la utilice.

5. CONCLUSIONES

1. La regresión lineal no fue adecuada para modelar el nivel del agua en el Humedal El Salitre, debido a la complejidad y no linealidad de las relaciones entre las variables climáticas y la respuesta hidrológica del ecosistema.
2. El uso del modelo Random Forest Regression, junto con la incorporación de variables rezagadas, permitió capturar de forma más precisa la dinámica del humedal, alcanzando un coeficiente de determinación de 83%, significativamente superior al obtenido con el modelo lineal.
3. En estudios de predicción ambiental, es fundamental utilizar enfoques que consideren tanto la no linealidad como la dependencia temporal, especialmente en ecosistemas urbanos donde múltiples factores interactúan de manera compleja.
4. Con un entrenamiento superior y revisión más detallada de los datos será oportuno realizar la implementación del modelo de Machine Learning en el entorno de realidad virtual modelado en Unity con el fin de que se vea afectado el nivel del agua a partir de las predicciones de las condiciones meteorológicas de la zona.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. A. Díaz y N. Martín, «Humedal El Salitre Modelado en Unity: Propuesta Interactiva para la Educación Ambiental», *Ingenio Libre*, vol. 14, pp. 83-94, jul. 2024, Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ingenio_libre/article/view/11905
- [2] M. Roa y M. Ascencio, «Determinación De Los Principales Efectos Ambientales En Humedales Debido A La Variación Climática En La Ciudad De Bogotá D.C. Como Un Análisis Del Cambio Climático», 2012. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/items/5c964e36-c0b0-4a63-87ef-5d0b1786210a>
- [3] J. Quintana, «Aprendizaje automático como herramienta para el manejo integrado de recursos naturales en un contexto de cambio climático», jun. 2022, Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://rctd.uic.cu/rctd/article/view/170>
- [4] R. Julio, B. Beatriz, y M. Aldo, «Predicción de las precipitaciones para la temporada lluviosa en Cuba», jun. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cuid.com/2377/v30n2e02>
- [5] Unity Technologies, «Unity Machine Learning Agents Toolkit (MLAgents)», 2023. [En línea]. Disponible en: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.mlagents%403.0/manual/index.html>
- [6] E. Ries, «El método Lean Startup», 2012.
- [7] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., «Sistema de Alerta Bogotá SAB - Información Hidrometeorológica», <https://www.sire.gov.co/web/sab/informacion-hidrometeorologica>. Accedido: 11 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sire.gov.co/web/sab/informacion-hidrometeorologica>
- [8] W. J. Mitsch y J. G. Gossilink, «The value of wetlands: importance of scale and landscape setting», *Ecological Economics*, vol. 35, n.o 1, pp. 25-33, oct. 2000, doi: 10.1016/S0921-8009(00)00165-8.
- [9] M. Reichstein et al., «Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science», *Nature*, vol. 566, p. 195, feb. 2019, doi: 10.1038/s41586-019-0912-1.
- [10] A. Hamdan, K. Ibekwe, E. Etukudoh, A. Umoh, y V. Ilojiyanya, «AI and machine learning in climate change research: A review of predictive models and environmental impact», *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 21, n.o 1, pp. 1999-2008, ene. 2024, doi: 10.30574/wjarr.2024.21.1.0257.
- [11] L. Chen et al., «Artificial intelligence-based solutions for climate change: a review», 1 de octubre de 2023, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi: 10.1007/s10311023-01617-y.
- [12] W. S. Vargas-Crispin, E. MontesRaymundo, M. Castrejón-Valdez, y R. A. Hinojosa-Benavides, «Machine Learning como Herramienta para Determinar la Variación de los Recursos Hídricos», *Scientific Research Journal CIDI*, vol. 1, n.o 1, pp. 56-69, jul. 2021, doi: 10.53942/srjcdi.v1i1.46.
- [13] Znanye, «Use of Machine Learning in Virtual Reality: Improving Interaction and Locomotion», 2023, [En línea]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/usemachine-learning-vr-possibly-improvinginteraction-locomotion>
- [14] P. Pun, «Enhancing Your AI Using Unity Machine Learning Agents», 2023, [En línea]. Disponible en: <https://medium.com/mighty-beargames/enhancing-your-ai-using-unity-machine-learning-agents-bdb7457903ad>
- [15] A. Yadav, «A Beginner's Guide to Machine Learning with Unity», 2023, [En línea]. Disponible en: <https://medium.com/biasedalgorithms/a-beginners-guide-to-machine-learning-with-unity9cdb-c889d728>
- [16] W. J. Mitsch y J. G. Gosselink, «Wetlands and Climate Change: Impacts and Mitigation Strategies», *Environmental Science*, 2015.
- [17] M. F. Shahzad, S. Xu, W. M. Lim, X. Yang, y Q. R. Khan, «Artificial intelligence and social media on academic performance and mental well-being: Student perceptions of positive impact in the age of smart learning», *Heliyon*, vol. 10, n.o 8, abr. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29523.

COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE PROBETAS DE RESINA POLIÉSTER REFORZADAS CON FIBRAS DE VIDRIO, FIQUE Y PITA BAJO ENSAYOS DE TRACCIÓN

Mechanical property comparison of polyester resin specimens reinforced with glass, fique, and pita fibers under tensile loading

Álex Arturo Acosta López¹
María Camila Veloza Loaiza²
Edwin Alberto Bulla Pereira³

³<https://orcid.org/0000-0001-7244-8929>. Universidad Libre, Bogotá, Colombia.
edwina.bullap@unilibre.edu.co

RESUMEN

Los materiales compuestos de resina poliéster reforzada con fibras han despertado un creciente interés en diversas aplicaciones industriales debido a su favorable relación entre las propiedades mecánicas - peso. El presente estudio se centra en investigar las propiedades mecánicas de un compuesto de resina poliéster reforzado con fibras de vidrio, fique y pita. Se realizó una caracterización exhaustiva de las propiedades mecánicas tanto de la matriz de resina poliéster como de cada refuerzo por separado. Posteriormente, se fabricaron veinte probetas del material compuesto, con fibras orientadas al azar y una fracción volumétrica de refuerzo. Se realizaron a cabo pruebas de tensión para evaluar el comportamiento mecánico de las probetas y analizar parámetros como la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la deformación máxima. Los resultados obtenidos permiten comparar el rendimiento de los diferentes refuerzos y determinar la influencia de la orientación de las fibras en las propiedades del material compuesto final. Este estudio contribuye al conocimiento sobre el uso de las fibras naturales como refuerzo en los materiales compuestos y ofrece información relevante para la selección y el diseño de materiales en diversas aplicaciones industriales.

Palabras clave: Materiales compuestos, fibra de vidrio, pita, fique, resina poliéster y propiedades mecánicas.

ABSTRACT

Fibre-reinforced polyester resin composites have attracted increasing interest for use in various industrial applications due to their favourable strength-to-weight ratio. This study focuses on investigating the mechanical properties of polyester resin composites reinforced with glass, fique and pita fibres. An exhaustive characterisation of the mechanical properties of the resin matrix and each reinforcement fibre was carried out separately. Twenty specimens of the composite material with randomly oriented fibres and a volume fraction of reinforcement were fabricated. Tensile tests were performed on the specimens to evaluate their mechanical behaviour and analyse parameters such as tensile strength, modulus of elasticity, and maximum deformation. The results obtained enable the performance of the different reinforcements to be compared and the influence of fibre orientation on the properties of the final composite material to be determined. This study contributes to our understanding of using natural fibres as reinforcement in composite materials, providing relevant information for selecting and designing materials for various industrial applications.

Keywords: Composite materials, fiberglass, pita, fique, polyester resin and mechanical properties.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de materiales compuestos ha experimentado un notable crecimiento en diversas aplicaciones industriales, ya que ofrecen excelentes propiedades mecánicas y permiten combinar características de distintos componentes. En particular, los compuestos de resina poliéster reforzados con fibras, como la fibra de vidrio, se han consolidado como una opción eficiente para la fabricación de productos ligeros y resistentes [1], [2].

Estos materiales se emplean ampliamente en sectores como la automoción, la construcción y la industria aeroespacial, donde la relación entre resistencia y peso es un factor crucial [3]. No obstante, la búsqueda de alternativas más sostenibles ha impulsado el interés por el desarrollo de compuestos que integren fibras naturales, como el fique y la pita, que

ofrecen soluciones que no solo compiten con los materiales tradicionales, sino que también contribuyen a la sostenibilidad económica y medioambiental [4].

Gopinath et al., han destacado su alta resistencia a la tracción, lo que la hace ideal para aplicaciones estructurales; sin embargo, también han señalado su alto coste y su impacto ambiental como limitaciones [5]. Por otro lado, estudios sobre fibras naturales, como el fique y la pita, realizados por Sarasini et al. y Amico et al., han demostrado que estas fibras tienen una buena relación resistencia-peso y son más sostenibles, aunque presentan propiedades mecánicas inferiores y una mayor variabilidad en su rendimiento [6], [7].

Además, Pickering et al. compararon fibras sintéticas y naturales y concluyeron que las naturales son una opción viable en términos de sostenibilidad, aunque aún

están limitadas en aplicaciones de alta demanda debido a su menor resistencia y durabilidad. Este estudio aborda la falta de comparaciones directas y sistemáticas entre estos tipos de fibras, lo que permitirá determinar su viabilidad para diferentes aplicaciones industriales.

Diversas investigaciones han explorado las propiedades mecánicas de compuestos de resina poliéster reforzados con fibra de vidrio, demostrando que estos presentan alta resistencia a la tracción y durabilidad, características ideales para entornos industriales exigentes [7]. Sin embargo, uno de los desafíos clave reside en el elevado costo y el impacto ambiental que generan los materiales sintéticos, como la fibra de vidrio.

En respuesta a estas limitaciones, estudios recientes han investigado el uso de fibras naturales, como el fique y la pita, por sus propiedades biodegradables y renovables. A pesar de los resultados prometedores en cuanto a la mejora de las propiedades mecánicas de los compuestos con fibras naturales, persisten desafíos relacionados con la variabilidad de las propiedades de dichas fibras y su interacción con las fibras sintéticas en compuestos híbridos.

En investigaciones recientes, Ponce et al. evaluó el rendimiento mecánico de las resinas epoxi reforzadas con fibras naturales, como la cabuya y la caña de azúcar, y destacó que estos materiales no solo son una alternativa ecológica, sino que también mejoran las propiedades mecánicas en condiciones específicas [4]. Así mismo, Torres et al. optimizaron combinaciones de fibras de vidrio, cabuya y abacá en matrices de epoxi utilizando el diseño de experimentos (DOE) para identificar configuraciones óptimas que maximizaran la resistencia a la tracción, la flexión y el impacto [8].

Si bien investigaciones previas, han evaluado los refuerzos de manera individual, existe una carencia de información respecto a su interacción y el impacto que esta tiene en las propiedades del material final [2]. El propósito de este estudio es abordar una brecha de conocimiento fundamental en el ámbito de la investigación de las propiedades mecánicas de un material compuesto de resina poliéster reforzada con una combinación de fibras sintéticas (fibra de vidrio) y naturales (fique y pita). Además, el objetivo principal de esta investigación es comprender de manera más profunda el efecto de la orientación de las fibras y la fracción volumétrica sobre el comportamiento mecánico de estos compuestos híbridos.

2. METODOLOGÍA

El enfoque general del artículo es cuantitativo y experimental, ya que se centra en la medición y el análisis de las propiedades mecánicas de las probetas fabricadas con diferentes materiales compuestos. El propósito de la investigación es la obtención de datos precisos y reproducibles mediante ensayos de tracción, lo que permite evaluar el comportamiento mecánico de cada material en condiciones controladas.

El procedimiento de manufactura de las probetas fue ejecutado mediante la utilización de materiales seleccionados meticulosamente, tomando en consideración sus propiedades mecánicas y su compatibilidad con el proceso de producción. Los materiales empleados en el estudio fueron la resina de poliéster PP-220 TIX, un producto ampliamente utilizado en la industria debido a su adecuada viscosidad y capacidad de impregnación de fibras de refuerzo. En el presente estudio, se ha empleado el peróxido de metiletilcetona (MEK) como agente catalizador, el cual actúa como iniciador del proceso de curado.

Las fibras de refuerzo empleadas en el estudio fueron la fibra de vidrio, el fique y la pita, seleccionadas por sus características mecánicas y su capacidad para incrementar la resistencia estructural del material compuesto. La correlación entre las cantidades y porcentajes de resina poliéster, MEK y fibras de refuerzo se determinó mediante la aplicación de parámetros previamente definidos en la Tabla 1. Este aspecto posibilita la instauración de una homogeneidad y reproducibilidad de las probetas, garantizando de este modo el cumplimiento de las especificaciones requeridas para su posterior caracterización mecánica.

Tabla 1.
Composición de las probetas.

Probetas	Resina (gr)	Catalizador (gr)	% peso de Fibra (p/p)
Resina poliéster	30	1.5	0
Vidrio	30	1.5	15%
Fique	30	1.5	15%
Pita	30	1.5	15%

Se implementó un molde de caucho siliconado que facilitara la producción precisa de las piezas, garantizando así la consistencia y precisión en la fabricación de cada una de las probetas. Para ello, se siguió un protocolo estandarizado, el cual fue meticulosamente diseñado para cada tipo de probeta, con dimensiones específicas de 147 mm de largo, 60 mm de ancho y un espesor de 4 mm. Es importante destacar que cada probeta poseía las mismas dimensiones, como se muestra en la figura 1.

Figura 1.
Molde de caucho siliconado



El procedimiento de manufactura dio inicio con cuantificación de 30 gramos (gr) de resina de poliéster, a los cuales se les incorporó 1,5 gr de catalizador. Para ello, se procedió a la agitación de la mezcla con el propósito de alcanzar una homogenización uniforme del catalizador y prevenir posibles variaciones en el proceso de curado. Posteriormente, se procedió a la incorporación de la fibra en aquellas probetas que requerían su inclusión.

La cantidad de fibra utilizada correspondió a un 15 p/p de la mezcla de resina y catalizador. La adición de 4,725 gr de fibra de vidrio ó fique ó pita, dependiendo del tipo de probeta. Para asegurar una impregnación óptima de la resina en la fibra, el procedimiento de mezcla se llevó a cabo con extrema meticulosidad, garantizando la ausencia de áreas secas o acumulaciones irregulares de material. Estas condiciones son fundamentales para preservar las propiedades mecánicas de la muestra final y evitar cualquier posible afectación a su integridad.

Una vez obtenida la mezcla homogénea, esta fue vertida en el molde previamente acondicionado. Con el propósito de facilitar el proceso de extracción de las probetas, el molde fue tratado con un agente desmoldante que evitara la adherencia de la resina a las paredes del recipiente. Se prestó especial atención a la eliminación de burbujas de aire atrapadas en el material, ya que la presencia de vacíos estructurales podría comprometer la resistencia de las probetas.

El procedimiento de curado se efectuó a temperatura ambiente, permitiendo que la resina experimentara un proceso de secado completo. El tiempo de curado experimentó variaciones en función de las condiciones ambientales y la formulación

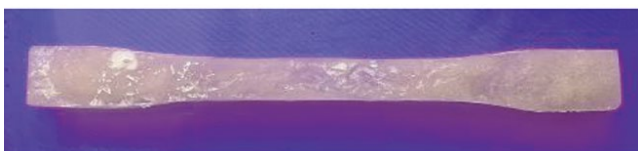
específica de la resina utilizada, oscilando generalmente entre una y dos horas. Durante este período, la resina experimentó una transformación química que le otorgó su rigidez y resistencia finales.

Una vez concluido el tiempo de curado, se procedió a la extracción de las probetas del molde. Este procedimiento se efectuó meticulosamente con el propósito de prevenir cualquier posible deterioro en la integridad estructural de las muestras. Posteriormente, se procedió a la inspección de cada probeta con el propósito de evaluar la calidad del curado y la integridad del material.

En algunos casos se implementó un proceso de acabado, en las partes laterales de la probeta, con el propósito de eliminar imperfecciones y obtener una geometría homogénea como se puede observar en la figura 2. Para la fabricación de probetas únicamente por resina de poliéster, se implementó el mismo procedimiento, omitiendo la adición de fibras.

Figura 2.

Probeta resina poliéster PP-220TX desmoldeada.



Las probetas se sometieron a ensayos de tracción con la máquina de ensayos universal para plásticos WDW-10 (ver figura 3), en condiciones específicas de prueba, con una velocidad de aplicación de carga de 2 mm/min y con las dimensiones determinadas según la norma ASTM D638. Esta configuración se seleccionó para garantizar resultados comparables entre las diferentes composiciones de material.

Figure 3.

Máquina universal de ensayos para plásticos referencia WDW – 10.



Durante el ensayo, cada probeta se fijó en la máquina de manera que la carga se aplicara axialmente y se evitaran concentraciones de esfuerzo que pudieran afectar a la medición de las propiedades mecánicas. A medida que se aumentaba progresivamente la fuerza de tracción, se registraban parámetros clave como la resistencia máxima a la tracción, el alargamiento y el módulo de elasticidad. Estos valores permitieron evaluar el comportamiento mecánico de cada material y determinar su capacidad para soportar esfuerzos sin fracturarse y su grado de deformación ante la aplicación de carga.

Los datos obtenidos en las pruebas proporcionaron información fundamental para caracterizar la resistencia a la tracción de cada tipo de probeta, así como su módulo de elasticidad y deformación máxima antes de la rotura. A partir de estos resultados, fue posible realizar una comparación cuantitativa entre los distintos compuestos utilizados en la fabricación de las probetas e identificar cuál de ellos presentaba un mejor rendimiento mecánico en términos de resistencia.

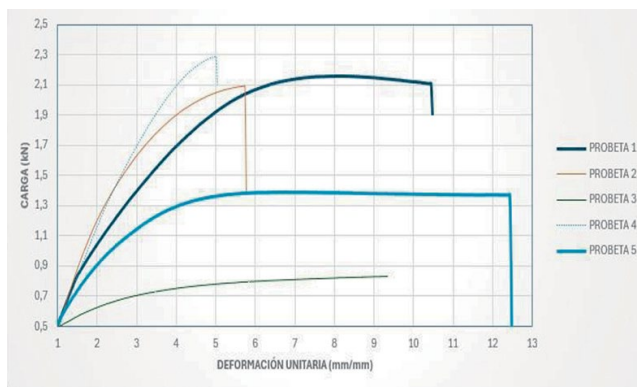
Los artículos cuyo concepto sea pendiente con observaciones podrán ser reajustados por sus autores y remitidos nuevamente para una nueva revisión por parte de los pares evaluadores. Los miembros del comité editorial de la revista podrán realizar sugerencias a los artículos con el fin de mejorar y/o ajustar su presentación de acuerdo con las exigencias de la revista.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las gráficas de esfuerzo-deformación que se muestran a continuación ofrecen una representación visual del comportamiento de los materiales sometidos a pruebas de tensión. Al analizarlas, se pueden extraer varias conclusiones clave relacionadas con la resistencia a la tracción, la rigidez, la deformación antes de la rotura y la capacidad de absorción de energía de cada compuesto. El esfuerzo (o carga) se refiere a la fuerza aplicada a la muestra, mientras que la deformación unitaria es la elongación relativa de esta, lo que indica cuánto se ha deformado el material en relación con su longitud original. A continuación, se muestra la figura 4, grafica de esfuerzo-deformación de la resina poliéster (matriz) con 5 p/p de MEK

Figura 4.

Grafica esfuerzo vs deformación resina poliéster referencia PP-220TX.



En el caso de la resina, la gráfica muestra que la relación entre carga y deformación unitaria es lineal al principio, lo que indica que el material se comporta de manera elástica en la fase inicial. Sin embargo, una vez superado un determinado punto de deformación, la curva se aplana considerablemente, lo que indica que el material ha alcanzado su límite elástico y comienza a comportarse de manera plástica. La caída brusca de la carga después de la rotura es característica de un material frágil que no puede deformarse significativamente antes de romperse.

La curva media de la resina muestra que este material no puede soportar grandes deformaciones, lo que limita su uso en aplicaciones que requieran una alta resistencia a la tracción o la capacidad de absorber energía. Este comportamiento pone de manifiesto la fragilidad del material y su baja capacidad de deformación antes de la rotura, lo que lo hace inadecuado para aplicaciones estructurales que impliquen cargas dinámicas o deformaciones significativas.

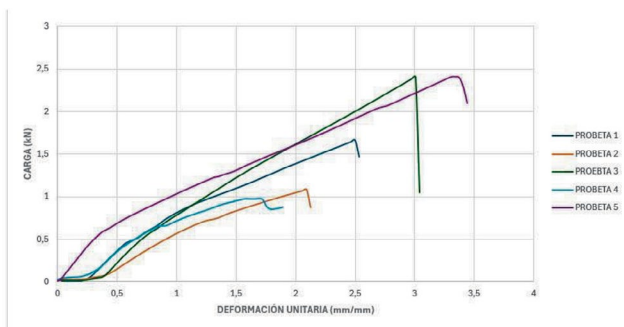
En cambio, la resina con fibra de vidrio muestra una mejora considerable en la relación cargadeformación. La curva es más pronunciada y presenta una pendiente más alta, lo que indica que el material es mucho más rígido y tiene una mayor capacidad de carga que la resina pura. La curva media de este compuesto, al ser más alta en carga máxima, refleja una mayor resistencia a la tracción y una mayor capacidad para soportar tensiones antes de romperse como se puede observar en la figura 5.

Sin embargo, aunque la fibra de vidrio mejora la capacidad de carga, la curva muestra una caída repentina tras alcanzar la máxima deformación, lo que indica que, al igual que la resina pura, el compuesto

presenta un comportamiento frágil ante altas deformaciones. Este fenómeno de ruptura súbita indica que la fibra de vidrio es adecuada para aplicaciones que requieren alta rigidez y resistencia a la tracción, pero su falta de flexibilidad y su comportamiento frágil a altas deformaciones limitan su uso en aplicaciones que impliquen una deformación significativa o cargas.

Figura 5.

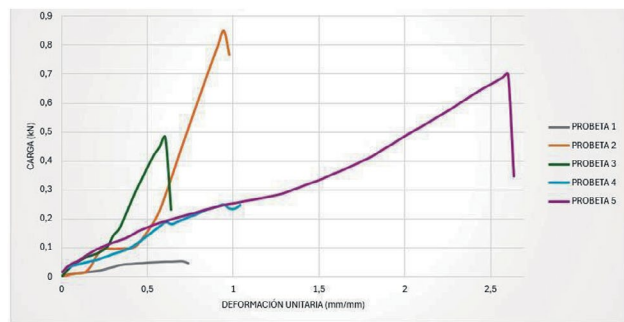
Grafica esfuerzo vs deformación resina poliéster referencia PP-220TX – 15 p/p de fibra de vidrio.



Por otra parte, la curva de esfuerzo de deformación del material compuesto de resina poliéster con fibras de fique muestra un comportamiento distinto. Su pendiente es más baja, lo que indica que el material es menos rígido y permite una mayor deformación antes de romperse. Ver figura 6.

Figura 6.

Grafica esfuerzo vs deformación resina poliéster referencia PP-220TX – 15 p/p de fibra de fique.



A medida que aumenta la carga, la curva se mantiene más suave, lo que significa que el compuesto tiene una gran capacidad de deformación antes de fallar. La curva media refleja que la resina con fique es más flexible y tiene una mayor capacidad de absorción de energía que los otros compuestos.

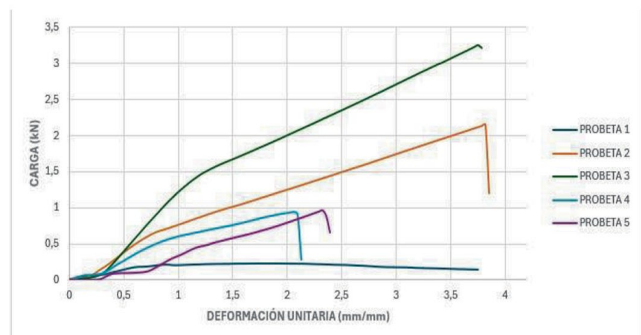
Sin embargo, su capacidad de carga máxima es significativamente más baja, lo que sugiere que este material es adecuado para aplicaciones que requieran flexibilidad y resiliencia, pero no para aquellas que demanden una alta resistencia estructural o cargas elevadas.

La resina con fique, aunque tiene una buena capacidad de absorción de energía, es más adecuada para productos en los que la flexibilidad y la capacidad de deformación sean más importantes que la rigidez y la resistencia a la carga máxima.

Por último, las pruebas realizadas al material compuesto de resina poliéster con fibras de pita al azar presentan una relación carga de deformación similar a la de la resina con fibras de fique, pero con una mayor capacidad de carga, como se puede observar en la figura 7.

Figura 7.

Grafica esfuerzo vs deformación resina poliéster referencia PP-220TX – 15 p/p de fibra de pita.



La curva media muestra que la fibra de pita ofrece una mayor resistencia a la carga que la fibra de fique, por lo que el material es más adecuado para aplicaciones que requieren un equilibrio entre flexibilidad y resistencia a la tracción. La fibra de pita mejora la capacidad de carga con respecto al fique, pero sigue siendo más flexible que la fibra de vidrio.

Esta mejora en la resistencia sugiere que la fibra de pita es una opción más adecuada para aplicaciones que requieren un rendimiento intermedio entre la flexibilidad del fique y la rigidez de la fibra de vidrio. La curva de carga, aunque no es tan alta como la de la fibra de vidrio, indica que este material tiene un mejor rendimiento que el fique, ya que ofrece un equilibrio entre resistencia y deformación.

El análisis comparativo de las curvas medias de los materiales compuestos propuesto muestra que el compuesto con fibra de vidrio es el más adecuado para aplicaciones estructurales que requieren una alta rigidez y resistencia a la carga, aunque presenta el inconveniente de un comportamiento frágil ante altas deformaciones. Por otro lado, los compuestos con fibras naturales, como el fique y la pita, presentan un comportamiento más flexible y una buena capacidad de absorción de energía, aunque su resistencia máxima es menor.

4. CONCLUSIONES

Este estudio comparativo ha permitido evaluar y comprender de manera integral el comportamiento de tres compuestos de resina poliéster reforzados con fibra de vidrio, fibra de fique y fibra de pita frente a pruebas de tracción y deformación. Tras analizar exhaustivamente las curvas esfuerzo-deformación y la curva media de

cada material, se observa que la fibra de vidrio ofrece la mayor resistencia a la tracción y rigidez, mientras que los compuestos con fibra de fique y fibra de pita presentan una mayor flexibilidad y capacidad de absorción de energía, aunque con una menor capacidad de carga.

Los resultados obtenidos sugieren que, en aplicaciones que requieran alta rigidez y resistencia estructural, el compuesto con fibra de vidrio será la opción más adecuada. Por otro lado, los compuestos con fibras naturales, como el fique y la pita, son más recomendables en contextos en los que la flexibilidad, la absorción de impactos y la resiliencia sean prioritarias, aunque su capacidad de carga es menor.

Este estudio contribuye al conocimiento de los materiales compuestos al ofrecer una comparación detallada de las propiedades mecánicas de distintas combinaciones de resina y fibra, y al destacar las ventajas y limitaciones de cada una de ellas. Además, destaca la importancia de utilizar fibras naturales en aplicaciones en las que la sostenibilidad y el bajo coste sean factores clave, a pesar de sus limitaciones en cuanto a capacidad de carga.

En el futuro, sería interesante investigar el impacto de los tratamientos superficiales en las fibras naturales para mejorar su adhesión a la matriz de resina, así como estudiar el comportamiento de estos compuestos en condiciones dinámicas y de fatiga. Esto podría ampliar su aplicación en sectores industriales como el automovilístico y el de la construcción.

También sería interesante investigar combinaciones de fibra natural y sintética para lograr un equilibrio óptimo entre resistencia y flexibilidad, maximizando así los beneficios de la sostenibilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Jorge. Ramos, Comportamiento mecánico de resinas fibro-reforzadas. Universidad Autónoma de Occidente, 2012.
- [2] Montufar-Marcalla Alexander and RemacheCoyago Abel, "Materiales compuestos de polímero reforzado con fibra de cabuya y coco aplicado al sector automotriz," Revista científica dominio de las ciencias, pp. 1–30, Jun. 2021.
- [3] Moreno Montoya Luis Edgar, J. D. Florez C, and Hernández A Byron Daniel, "Caracterización mecánica de compuestos poliéster/fibra de guadua y poliéster/fibra de guadua-vidrio," Scientia et Technica, pp. 1–5, 2018.
- [4] L. S. Ponce Tobar., "Resina epóxica reforzado con fibra de cabuya comparado con la misma resina reforzado con fibra de caña de azúcar," Universidad Técnica del Norte, Ibarra Ecuador, 2020. Accessed: Jul. 08, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10299>
- [5] A. Gopinath, M. Senthil Kumar, and A. Elayaperumal, "Experimental investigations on mechanical properties of jute fiber reinforced composites with polyester and epoxy resin matrices," in Procedia Engineering, Elsevier Ltd, 2014, pp. 2052–2063. doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.448.
- [6] F. Sarasini et al., "Hybrid composites based on aramid and basalt woven fabrics: Impact damage modes and residual flexural properties," Mater Des, vol. 49, pp. 290–302, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.01.010.
- [7] S. C. Amico, C. C. Angrizani, and M. L. Drummond, "Influence of the stacking sequence on the mechanical properties of glass/sisal hybrid composites," Journal of Reinforced Plastics and Composites, vol. 29, no. 2, pp. 179–189, Jan. 2010, doi: 10.1177/0731684408096430.
- [8] Torres Mesias David Esteban, "Optimización (doe-mezclas) del material híbrido con refuerzos de fibra de abacá, fibra de cabuya y fibra de vidrio de matriz de resina epóxica y su incidencia sobre las propiedades mecánicas a flexión, tracción e impacto," monografía, Universidad Técnica de Ambato, Ambato - Ecuador, 2020.