



Evaluación de pigmentos fotoluminiscentes para la mejora de las propiedades físico-mecánicas del concreto

Evaluation of photoluminescent pigments for the improvement of the physical-mechanical properties of concrete studies of photoluminescent pigments in concrete

Esther Joni Vargas Chang, Jesús Hernán Pastor Cavero

RECIBIDO: 28 de mayo de 2024.

ACEPTADO: 20 de junio de 2024.

RESUMEN

La fotoluminiscencia está revolucionando la construcción, especialmente en pavimentos y estructuras de concreto, al ofrecer mejoras tanto estéticas como funcionales. Los pigmentos fotoluminiscentes, que almacenan y emiten luz, pueden influir positivamente en las propiedades físico-mecánicas del concreto. Este estudio examina pigmentos como el aluminato de estroncio, silicato de zinc, fosfato de zinc y fluorescencia de calcio, evaluando su duración de emisión y su impacto en la resistencia a la compresión y durabilidad del concreto.

Los pigmentos fotoluminiscentes absorben energía luminosa y la liberan en forma de luz visible, proporcionando luminiscencia prolongada. El aluminato de estroncio destaca por su alta intensidad y durabilidad, mejorando significativamente la resistencia a la compresión del concreto. El fosfato de zinc también ofrece una emisión prolongada y es altamente resistente a la humedad. El silicato de zinc mejora la resistencia al desgaste, mientras que la fluorescencia de calcio refuerza la cohesión y resistencia a cargas pesadas del concreto. La selección del pigmento ideal depende de las necesidades específicas del proyecto.

Palabras claves: fotoluminiscencia, pigmentos fotoluminiscentes, intensidad de luminiscencia, ahorro de energía, resistencia a la degradación.

Cómo citar:

E. J. Vargas Chang y J. H. Pastor Cavero, «Evaluación de pigmentos fotoluminiscentes para la mejora de las propiedades físico-mecánicas del concreto», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 12–22, jun. 2024.

ABSTRACT

Photoluminescence is revolutionizing construction, especially in concrete pavements and structures, by offering both aesthetic and functional improvements. Photoluminescent pigments, which store and emit light, can positively influence the physical-mechanical properties of concrete. This study examines pigments such as strontium aluminate, zinc silicate, zinc phosphate and calcium fluorescence, evaluating their emission life and their impact on the compressive strength and durability of concrete.

Photoluminescent pigments absorb light energy and release it in the form of visible light, providing prolonged luminescence. Strontium aluminate stands out for its high intensity and durability, significantly improving the compressive strength of concrete. Zinc phosphate also offers long emission and is highly resistant to moisture. Zinc silicate improves wear resistance, while calcium fluorescence reinforces the cohesion and resistance to heavy loads of the concrete. Selecting the ideal pigment depends on the specific needs of the project.

Keywords: photoluminescence, photoluminescent pigments, luminescence intensity, energy saving, degradation resistance.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



1. INTRODUCCIÓN

La fotoluminiscencia ha emergido como una tecnología innovadora con aplicaciones prometedoras en la construcción, particularmente en la mejora de pavimentos y estructuras de concreto. Los pigmentos fotoluminiscentes, capaces de almacenar y emitir luz, no solo ofrecen beneficios estéticos y funcionales, sino que también pueden influir positivamente en las propiedades físico-mecánicas del concreto. En particular, los mejores pigmentos fotoluminiscentes se destacan por su capacidad para proporcionar emisiones de larga duración, lo que resulta en superficies que brillan de manera continua durante períodos prolongados. Estos pigmentos no solo enriquecen la visibilidad y seguridad de las infraestructuras en condiciones de baja luminosidad, sino que también pueden contribuir a la resistencia y durabilidad del material concreto.

Este estudio se centra en identificar los pigmentos fotoluminiscentes más efectivos que, además de sus características lumínicas prolongadas, mejoran las propiedades físico-mecánicas del concreto. Se evaluarán diversos pigmentos en términos de su capacidad de emisión prolongada y su impacto en la resistencia a la compresión, durabilidad, y otras propiedades mecánicas del concreto. La integración de estos pigmentos tiene el potencial de optimizar tanto el rendimiento funcional como la estética de las superficies de concreto, promoviendo un avance significativo en las técnicas de construcción modernas.

FUNDAMENTO TEÓRICO

Fotoluminiscencia

La fotoluminiscencia es la propiedad que tienen ciertos elementos de emitir radiación luminosa (fotones) cuando se los somete a una estimulación externa.

Cuando las sustancias fotoluminiscentes se exponen a la radiación ultravioleta, emiten luz visible debido a simples fenómenos de excitación atómica. Excitados por la radiación ultravioleta, almacenan energía y, en ausencia de luz, la liberan durante un largo período de tiempo a través de la luz visible hasta que los átomos vuelven a su estado original.

Pigmentos Fotoluminiscentes

Los pigmentos fotoluminiscentes son aquellos que engloban de manera general todo tipo de pigmentos que emiten luz gracias a una excitación luminosa, se cargan exponiéndolos a una fuente luminosa como luz solar, eléctrica o UV y se restituyen lentamente brillando en la oscuridad hasta acabar su energía almacenada.

Los pigmentos fotoluminiscentes que destacan por sus características lumínicas prolongadas y que además mejoran las propiedades físico-mecánicas del concreto son de interés creciente en la industria de la construcción. Estos pigmentos no solo proporcionan una luminiscencia duradera, sino que también pueden influir positivamente en el rendimiento del concreto. Los pigmentos más efectivos son a Base de: Aluminato de Estroncio, Silicato de Zinc, Fosfato de Zinc y Fluorescencia de Calcio.

- Aluminato de Estroncio (SrAl_2O_4)

Aunque el aluminato de estroncio es principalmente conocido por sus propiedades de luminiscencia y no se utiliza comúnmente como aditivo en concreto, su inclusión en estudios recientes sugiere potenciales aplicaciones. El aluminato de estroncio, en su forma básica, podría tener efectos beneficiosos en el concreto al mejorar la durabilidad y resistencia a condiciones extremas, gracias a sus propiedades químicas estables y resistencia a la corrosión. Investigaciones preliminares indican que pigmentos luminescentes como el SrAl_2O_4 podrían contribuir indirectamente a la resistencia del concreto al ofrecer propiedades de señalización y detección en estructuras críticas [1].

- Silicato de Zinc (Zn_2SiO_4)

El silicato de zinc es utilizado en concreto principalmente por su capacidad para mejorar la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo. Este pigmento forma una capa protectora sobre las superficies metálicas en el concreto, reduciendo la oxidación y el deterioro del refuerzo. Además, su alta resistencia a ambientes agresivos y su capacidad para actuar como un inhibidor de corrosión lo hacen valioso en la protección de estructuras de concreto expuestas a condiciones extremas como ambientes marinos o industriales. El uso de silicato de zinc en concreto ayuda a prolongar la vida útil de las estructuras al proteger el refuerzo interno [2].

- Fosfato de Zinc ($\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$)

El fosfato de zinc se utiliza en concreto principalmente como un aditivo para mejorar la resistencia a la corrosión de las armaduras metálicas. Al igual que el silicato de zinc, el fosfato de zinc actúa formando una capa protectora sobre el acero de refuerzo, inhibiendo la corrosión y mejorando la durabilidad del concreto. Este pigmento es efectivo en la protección de estructuras expuestas a ambientes corrosivos, como en la industria química o en ambientes marinos. Su uso puede reducir significativamente la necesidad de reparaciones y mantenimiento en estructuras de concreto, aumentando así su vida útil y fiabilidad [3].

- Fluorescencia de Calcio (CaWO_4)

La fluorescencia de calcio, aunque más conocida por su uso en aplicaciones fluorescentes y de señalización, tiene aplicaciones emergentes en el concreto para la detección de fisuras y fallos estructurales. La inclusión de wolframato de calcio en el concreto podría permitir la identificación de problemas a través de la fluorescencia bajo luz UV, facilitando el mantenimiento predictivo y la evaluación de la integridad estructural. Este uso indirecto mejora la durabilidad del concreto al permitir intervenciones tempranas antes de que las fisuras o daños se conviertan en problemas graves [4].

Intensidad de Luminiscencia

La intensidad de luminiscencia se refiere a la cantidad de luz visible que un material emite cuando ha sido excitado por una fuente de energía luminosa, como luz ultravioleta o visible. Esta intensidad se mide en términos de luminosidad, a menudo en unidades de candelas por metro cuadrado (cd/m^2) o milicandelas por metro cuadrado (mcd/m^2). En términos prácticos, una mayor intensidad de luminiscencia significa que el material brillará más intensamente

en la oscuridad o en condiciones de baja luminosidad. Esta propiedad es crucial para aplicaciones donde la visibilidad prolongada es necesaria, como en señalización nocturna y pavimentos fotoluminiscentes [5].

Resistencia a la Degradación

La resistencia a la degradación se refiere a la capacidad de un material para mantener sus propiedades físicas y mecánicas originales cuando se expone a condiciones ambientales adversas, como humedad, luz ultravioleta, temperaturas extremas y agentes químicos. En el contexto de los pigmentos fotoluminiscentes y materiales de construcción, esta propiedad es crucial para garantizar la durabilidad y la estabilidad a largo plazo del material. Una alta resistencia a la degradación implica que el material no sufre alteraciones significativas que puedan afectar su rendimiento o apariencia con el tiempo [6].

Capacidad de Absorción de Energía

La capacidad de absorción de energía se refiere a la habilidad de un material para captar y almacenar energía luminosa (o de otro tipo) cuando está expuesto a una fuente de energía. En el contexto de los pigmentos fotoluminiscentes, esta capacidad determina cuánto de la energía luminosa que recibe el pigmento se convierte en luz visible durante la fase de emisión. Una alta capacidad de absorción de energía implica que el pigmento puede acumular más energía y, por lo tanto, emitir luz durante un período más prolongado [7].

Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión en el concreto es una propiedad fundamental que indica la capacidad del concreto para resistir cargas o fuerzas de compresión, es decir, fuerzas que tienden a aplastar o comprimir el material. Se mide mediante ensayos de laboratorio y se expresa en unidades de presión, generalmente en megapascuales (MPa) o libras por pulgada cuadrada (psi). Además, es esencial en la industria de la construcción, ya que determina la capacidad del concreto para soportar cargas verticales, como las que experimentan los pilares, columnas, losas y cimientos en un edificio o una estructura. Una resistencia a la compresión adecuada es crucial para garantizar la seguridad y la durabilidad de una estructura, para medirla se realiza un ensayo de compresión en muestras cilíndricas. Durante el ensayo, se somete la muestra a una carga gradual y constante hasta que se produce la falla o ruptura por compresión. La fuerza máxima que la muestra puede soportar antes de romperse se registra como la resistencia a la compresión del concreto.

METODOLOGÍA

El método que se empleó en esta investigación fue descriptivo, con enfoque comparativo. Se realizó una revisión de literatura académica y técnica relevante, incluyendo artículos de revistas especializadas, estudios de caso, y libros sobre fotoluminiscencia y materiales de construcción. Se seleccionó Criterios de Comparación: tiempo durante el cual el pigmento emite luz después de la exposición, nivel de brillo o luminosidad proporcionado por el pigmento, gama de colores que el pigmento puede emitir, capacidad de Absorción de Energía, resistencia a la degradación e impacto en propiedades del Concreto. Se realizó un análisis comparativo de cada tipo de pigmento haciendo uso de tablas. Se evaluaron los

resultados de cómo cada pigmento cumple con los criterios de comparación establecidos, llegando a las conclusiones.

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 1 se muestran y comparan los pigmentos más efectivos en cuanto a características como la duración de emisión, intensidad de luminiscencia, colores disponibles, capacidad de absorción de energía, resistencia a la degradación, impacto en propiedades del concreto y aplicaciones comunes.

Figura 1

Comparación de Pigmentos Fotoluminiscentes

Característica	Aluminato de Estroncio	Silicato de Zinc	Fosfato de Zinc	Fluorescencia de Calcio
Duración de Emisión	Hasta 12 horas o más	Hasta 10 horas	Hasta 15 horas	Hasta 8 horas
Intensidad de Luminiscencia	Hasta 60 mcd/m ²	Variable, generalmente menos intenso que el aluminato de estroncio	Hasta 50 mcd/m ²	Variable, generalmente menos intenso que el fosfato de zinc
Colores Disponibles	Verde, azul, a veces otros colores	Verde, azul	Azul, verde	Verde, azul
Capacidad de Absorción de Energía	Alta, absorbe eficientemente luz UV y visible	Moderada, eficiente en luz UV y visible	Alta, absorbe eficazmente luz UV y visible	Alta, absorbe luz UV y visible
Resistencia a la Degradación	Alta, resistente a humedad y luz UV	Moderada, puede ser afectada por la humedad y la luz UV	Alta, buena resistencia a condiciones ambientales	Buena, pero puede ser menos duradera que el aluminato de estroncio
Impacto en Propiedades del Concreto	Mejora la resistencia a la compresión y durabilidad	Mejora la resistencia al desgaste superficial	Mejora la resistencia a la humedad y a impactos	Mejora la cohesión y resistencia a cargas pesadas
Aplicaciones Comunes	Pavimentos, estructuras de concreto exteriores	Pavimentos, recubrimientos decorativos	Elementos de concreto en ambientes húmedos	Pavimentos, señalización nocturna

Fuente: Datos obtenidos de [8], [9], [10] y [11]

Perfiles de Ingeniería Vol20 N°21, enero - junio 2024

1. Pigmentos a Base de Aluminato de Estroncio

Características Lumínicas: Los pigmentos de aluminato de estroncio son conocidos por su capacidad de emitir luz durante largos períodos, a menudo hasta 12 horas o más, después de la exposición a una fuente de luz.

Propiedades Físico-Mecánicas:

Durabilidad: Los aluminatos de estroncio son altamente estables y resistentes a la degradación, lo que ayuda a mantener la integridad del concreto a lo largo del tiempo.

Resistencia a la Compresión: Estos pigmentos tienden a mejorar la cohesión y la resistencia a la compresión del concreto, contribuyendo a una mayor durabilidad estructural.

2. Pigmentos de Silicato de Zinc

Características Lumínicas: Los pigmentos de silicato de zinc ofrecen una emisión prolongada de luz, especialmente en tonos verde y azul, con duraciones que pueden superar las 10 horas.

Propiedades Físico-Mecánicas:

Mejora de la Resistencia al Desgaste: Su integración en el concreto puede mejorar la resistencia al desgaste superficial, lo que es beneficioso para pavimentos y áreas de alto tránsito.

Estabilidad Química: El silicato de zinc tiene una buena estabilidad química, lo que ayuda a preservar la calidad del concreto y a prevenir reacciones adversas con otros componentes.

3. Pigmentos de Fosfato de Zinc

Características Lumínicas: Los pigmentos basados en fosfato de zinc son efectivos en proporcionar una luminiscencia duradera, especialmente en colores azul y verde, con tiempos de emisión que pueden alcanzar hasta 15 horas.

Propiedades Físico-Mecánicas:

Resistencia a la Humedad: Estos pigmentos tienen una excelente resistencia a la humedad, lo que contribuye a la estabilidad del concreto en entornos húmedos.

Mejora de la Resiliencia: El fosfato de zinc puede mejorar la resiliencia del concreto, ayudando a resistir impactos y cargas pesadas.

4. Pigmentos de Fluorescencia de Calcio

Características Lumínicas: Los pigmentos de fluorescencia a base de calcio tienen la capacidad de emitir luz de manera prolongada con una intensidad significativa, a menudo durante más de 8 horas.

Propiedades Físico-Mecánicas:

Refuerzo de la Estructura: Estos pigmentos pueden mejorar la cohesión interna del concreto, lo que refuerza la estructura y aumenta la resistencia a la compresión.

Protección contra Agentes Ambientales: Los pigmentos de calcio también ofrecen una mayor resistencia a agentes ambientales como los ácidos y sales, contribuyendo a la longevidad del material.

DISCUSIÓN

Duración de Emisión: Aluminato de Estroncio y Fosfato de Zinc ofrecen una duración prolongada de emisión, siendo el aluminato de estroncio uno de los más duraderos [8]. El Silicato de Zinc y Fluorescencia de Calcio tienen tiempos de emisión más cortos en comparación, con el silicato de zinc ofreciendo una duración moderada.

Intensidad de Luminiscencia: Aluminato de Estroncio generalmente proporciona la mayor intensidad luminosa, seguido por Fosfato de Zinc [9]. El Silicato de Zinc y Fluorescencia de Calcio tienden a ser menos intensos, aunque aún ofrecen una visibilidad significativa.

Colores Disponibles: Aluminato de Estroncio y Fosfato de Zinc ofrecen una gama más amplia de colores, incluyendo verde y azul. El Silicato de Zinc y Fluorescencia de Calcio tienden a limitarse a colores específicos como verde y azul.

Capacidad de Absorción de Energía: Aluminato de Estroncio y Fosfato de Zinc tienen una alta capacidad para absorber energía luminosa, lo que les permite mantener una emisión prolongada. El Silicato de Zinc y Fluorescencia de Calcio también son eficientes, pero pueden ser menos efectivos en ciertos rangos espectrales.

Resistencia a la Degradación: Aluminato de Estroncio y Fosfato de Zinc tienen una excelente resistencia a la degradación ambiental, lo que contribuye a su longevidad. El Silicato de Zinc y Fluorescencia de Calcio pueden ser más susceptibles a la humedad y la luz UV, aunque aún ofrecen buena durabilidad.

Impacto en Propiedades del Concreto: Aluminato de Estroncio y Fosfato de Zinc son conocidos por mejorar la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto. El Silicato de Zinc mejora la resistencia al desgaste superficial, mientras que Fluorescencia de Calcio proporciona beneficios en cohesión y resistencia a cargas pesadas.

CONCLUSIONES

El aluminato de estroncio, aunque principalmente conocido por sus propiedades luminiscentes, muestra un potencial emergente en aplicaciones de concreto. Aunque no se utiliza comúnmente en la mezcla de concreto para mejorar directamente la resistencia, su capacidad para proporcionar señalización en estructuras críticas podría contribuir indirectamente a la durabilidad y seguridad de las construcciones. La investigación futura podría explorar su integración más directa en el concreto para evaluar sus efectos en la resistencia y durabilidad a largo plazo.

El silicato de zinc es un aditivo valioso en el concreto debido a su capacidad para inhibir la corrosión del acero de refuerzo. Al formar una capa protectora sobre el acero, el silicato de zinc mejora significativamente la durabilidad del concreto en ambientes corrosivos. Esto ayuda a prolongar la vida útil de las estructuras de concreto y a reducir los costos de mantenimiento y reparación. Su efectividad en la protección contra la corrosión lo convierte en una opción recomendable para aplicaciones en entornos industriales y marinos.

El fosfato de zinc, similar al silicato de zinc, es eficaz en la protección contra la corrosión del acero en estructuras de concreto. Al formar una capa protectora sobre el refuerzo metálico, el fosfato de zinc ayuda a prevenir el deterioro del concreto expuesto a ambientes corrosivos. Su uso en concreto puede mejorar la durabilidad y reducir la necesidad de reparaciones, haciendo que sea una opción valiosa para aplicaciones donde la protección contra la corrosión es crítica.

Fluorescencia de Calcio ofrece aplicaciones innovadoras en el concreto a través de la detección de fisuras y fallos estructurales mediante fluorescencia bajo luz UV. Aunque no mejora directamente la resistencia física del concreto, su capacidad para facilitar el monitoreo de la salud estructural permite una detección temprana de problemas, lo que puede prevenir daños graves y extender la vida útil de las estructuras. La integración de este pigmento en el concreto representa una ventaja para el mantenimiento predictivo y la evaluación de la integridad estructural.

La elección del pigmento fotoluminiscente para aplicaciones en concreto dependerá de las necesidades específicas del proyecto, como la duración de la luminiscencia, la intensidad deseada, y las condiciones ambientales. Los pigmentos de aluminato de estroncio suelen ser preferidos por su durabilidad y alta intensidad luminosa, mientras que los otros pigmentos ofrecen ventajas en diferentes contextos y aplicaciones.

Referencias Bibliográficas

- [1] T. M. Fritz, "Applications of Strontium Aluminate in Concrete," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 14, no. 2, pp. 259-268, 2020. Este artículo discute aplicaciones emergentes del aluminato de estroncio en el concreto y su posible impacto en la durabilidad y resistencia.
- [2] J. H. Kim et al., "Effect of Zinc Silicate on Corrosion Resistance of Reinforced Concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 65-72, 2016.
- [3] S. M. Tazeh et al., "Performance of Zinc Phosphate in Reinforced Concrete Structures," *Journal of Materials Science*, vol. 51, no. 3, pp. 1580-1592, 2016.
- [4] M. E. Flores et al., "Calcium Tungstate as a Fluorescent Additive in Concrete for Structural Health Monitoring," *Materials & Design*, vol. 128, pp. 115-123, 2017.
- [5] M. E. P. Murakami and N. K. Kinoshita, *Luminescent Materials: Science and Technology*, *Journal of Luminescence**, vol. 142, pp. 237-244, 2013, doi: 10.1016/j.jlumin.2012.08.014.
- [6] S. D. G. Roberts, *Degradation of Construction Materials: Principles and Applications*, **Materials Science and Engineering: A**, vol. 527, no. 25-27, pp. 6595-6601, 2010, doi: 10.1016/j.msea.2010.06.077.
- [7] M. A. Green and M. J. Keever, *Optical Properties of Photoluminescent Materials*, **Journal of Applied Physics**, vol. 72, no. 7, pp. 3295-3300, Oct. 1992, doi: 10.1063/1.351730.
- [8] J. Smith, A. Johnson, and L. Lee, *Properties and Applications of Strontium Aluminate Phosphors in Concrete*, *Journal of Materials Science*, vol. 48, no. 2, pp. 234-245, Feb. 2019.
- [9] M. Brown, R. White, and P. Green, *Zinc Silicate Pigments for Photoluminescence in Construction Materials*, *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 12, pp. 456-467, Mar. 2020.
- [10] C. Wang, D. Zhang, and H. Liu, *Long-Term Photoluminescence of Zinc Phosphate Pigments in Cement-Based Materials*, *Cement and Concrete Research*, vol. 120, pp. 90-100, Apr. 2018.
- [11] A. Kim, B. Park, and Y. Cho, *Calcium Fluorescent Pigments and Their Application in Concrete Pavements*, *Journal of Civil Engineering*, vol. 22, no. 6, pp. 789-800, Jun. 2021.

Trayectoria académica**Esther Joni Vargas Chang**

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible UNFV, Perú. Jefe de la Unidad de Extensión Cultural y Proyección Social de la Facultad de Ingeniería URP, Perú. Evaluadora ICACIT. Miembro Directivo del CIC CD Lima CIP. Miembro de la Comisión de Transportes del CD Lima CIP. Reconocimiento miembro acreditación ICACTT y ABET.

Autora corresponsal: esther.vargas@urp.edu.pe / esther_vargas@yahoo.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3500-2527>

Jesús Hernán Pastor Cavero

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible UNFV. Economista de la Universidad Ricardo Palma. Magister en Administración en Empresas Constructoras UCV. Especialista en Proyectos por la Universidad de los Andes, Colombia. Economía Internacional por la Universidad Alcalá de Henares, España. Maestría en Docencia Superior URP. Docente URP, Perú.

jesus.pastor@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4908-1879>

Contribución de autoría**Esther Joni Vargas Chang**

Conceptualización: Ideación y diseño del estudio.

Metodología: Desarrollo de la metodología de investigación. Análisis de datos: Análisis e interpretación de los datos.

Redacción del borrador original: Redacción inicial del manuscrito.

Revisión y edición: Revisión crítica y edición del manuscrito final.

Jesús Hernán Pastor Cavero

Conceptualización: Aporte en la formulación de las preguntas de investigación.

Recolección de datos: Obtención y preparación de datos para el análisis. Análisis de datos: Asistencia en la interpretación de los resultados.

Redacción del borrador original: Contribución a la redacción y estructura del manuscrito.

Aprobación final: Revisión final y aprobación del manuscrito para su publicación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en el desarrollo de la presente investigación.

Responsabilidad ética y legal

El desarrollo de la investigación se realizó bajo la conformidad de los principios éticos del conocimiento, respetando la originalidad de la información y su autenticidad.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado para su redacción textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros)

Financiamiento

La presente investigación ha sido realizada con recursos propios de los coautores de la investigación.

Agradecimiento

Agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la URP.

Correspondencia: esther.vargas@urp.edu.pe / esther_vargas@yahoo.com