

Análisis de biopesticida con dosificación controlada de *Bacillus thuringiensis* soportado en hidrotalcitas híbridas mediante inteligencia artificial

A. N. Moreno Torres⁴ y R. Guerra González⁵
DOI: 10.56643/rcia.v4i1.201

Como citar este artículo: Moreno Torres y Guerra González (2025). Análisis de biopesticida con dosificación controlada de *Bacillus thuringiensis* soportado en hidrotalcitas híbridas mediante inteligencia artificial. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura*. 4(1). 19-26. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v4i1.201>

Resumen

Hoy en día sabemos que la dosificación controlada de moléculas es clave no sólo para optimizar procesos farmacológicos. Además, constituye una herramienta de gran potencial para su uso en la agricultura. En este trabajo estudiamos cómo los materiales inorgánicos, por ejemplo, los hidróxidos dobles laminares (HDL), tienen la capacidad de adsorber bacterias, aniones y metales pesados, entre otras sustancias, lo cual los hace ideales como soporte para un biopesticida basado en *Bacillus thuringiensis* (Bt). El objetivo principal fue analizar y mejorar la eficacia de este biopesticida utilizando tecnologías modernas. Empleando un modelo de inteligencia artificial basado en Random Forest, realizamos simulaciones para predecir las condiciones óptimas de dosificación y determinar las variables más influyentes en el proceso. Los resultados fueron claros, las concentraciones resultaron ser el factor más crítico, mientras que el uso de como soporte tuvo un impacto significativo, representando 80% de importancia en la optimización.

Aunado a ello, el modelo mostró un alto nivel de precisión: alcanzó un error cuadrático medio (MSE) de 18.97 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.87. Además de validar la efectividad del biopesticida, estos hallazgos demuestran la relevancia de integrar herramientas de inteligencia artificial en la investigación de materiales híbridos. Este enfoque mejora la agricultura sostenible y tiene el potencial de ser escalado para aplicaciones industriales, mostrando una diferencia en el diseño de soluciones innovadoras que utilizan estas herramientas, lo que marca un precedente para futuras investigaciones en optimización tecnológica aplicada.

Palabras clave: agricultura sostenible, aprendizaje automático, control biológico, optimización algorítmica, tecnologías limpias.

Abstract

Nowadays, controlled molecule dosage is not only essential for optimizing pharmacological processes but also a tool with great potential in agriculture. In this study, we explored how inorganic materials like layered double hydroxides (LDHs), known for their ability to adsorb bacteria, anions, and heavy metals, can be used as supports for a biopesticide based on *Bacillus thuringiensis* (Bt). The main goal was to analyze and improve the efficacy of this biopesticide using modern technologies. By applying a Random Forest-based artificial intelligence model, we simulated optimal dosage conditions and identified the most critical variables in the process. The results were clear: concentrations stood out as the most influential factor, while using LDHs as a support had a significant impact, accounting for 80% importance in the optimization.

⁴ Ingeniera Química, estudiante de la maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3512-8665>. Correo de correspondencia: 1415842j@umich.mx

⁵ Profesor-Investigador en ciencias en Ingeniería Química y Ambiental, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7780-8858>

Recibido: 06/12/2024 | Aceptado: 21/02/2025 | Publicado: 15/06/2025

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Additionally, the model achieved high precision, with a mean squared error (MSE) of 18.97 and a coefficient of determination (R²) of 0.87. These findings not only validate the biopesticide's effectiveness but also highlight the importance of integrating artificial intelligence into hybrid material research. This approach enhances sustainable agriculture and opens the door to scaling these solutions for industrial applications, setting a foundation for future innovations in technological optimization.

Keywords: algorithmic optimization, biological control, clean technologies, *machine learning*.

Introducción

Durante el desarrollo de avances científicos, los sistemas de dosificación controlada han demostrado ser herramientas clave en el área farmacológica y en disciplinas como la ciencia de materiales, la biotecnología y la agricultura. Gracias a su capacidad para retener y liberar moléculas de forma precisa, estos sistemas permiten una distribución adecuada no sólo en cantidad, sino también en tiempo y localización, maximizando su eficiencia. Sin embargo, cuando la liberación no es óptima, pueden producirse concentraciones elevadas en sitios no deseados, con consecuencias como intoxicaciones (Sáez et al., 2002). Estudios recientes han mostrado que la incorporación de compuestos biológicamente activos en materiales con matrices inorgánicas puede optimizar sus propiedades, surgiendo así materiales híbridos con aplicaciones prometedoras (Fu et al., 2023).

Entre estos materiales destacan los hidróxidos dobles laminares (HDL). Éstos fueron descritos por primera vez por Miyata (1983), quien los caracterizó como estructuras tipo hidrotalcita con capacidad de intercambio iónico, lo que les permite adsorber diversas partículas. Dichas propiedades han fomentado su uso en áreas como la farmacéutica, la catálisis y la remediación ambiental (Park et al., 2007; Zhang et al., 2021). Dependiendo de las propiedades requeridas, por ejemplo, cristalinidad, tamaño de partículas o capacidad de intercambio iónico, los pueden sintetizarse empleando métodos como la coprecipitación, la hidrólisis de urea o la síntesis hidrotermal (Hsu et al., 2007; Vayssieres, 2009). Aunque su potencial en la remediación ambiental ha sido ampliamente estudiado, su aplicación en la agricultura como soporte para compuestos bioactivos sigue siendo limitada.

En el ámbito agrícola, *Bacillus thuringiensis* (Bt) ha sido utilizado como biopesticida desde la década de 1920, debido a su capacidad para producir δ -endotoxinas con propiedades insecticidas. Estas toxinas se activan en el tracto digestivo alcalino de los insectos, donde perforan el epitelio intestinal, causando la muerte de la plaga (Cardoso y Valim, 2006; Duraisamy et al., 2023). No obstante, su eficacia puede verse afectada por factores ambientales, lo que limita su efectividad en el control prolongado de plagas. Esto plantea la necesidad de desarrollar nuevas estrategias que permitan potenciar la acción de Bt y reducir su impacto ambiental. El uso de δ -endotoxinas como soporte para la dosificación controlada de *Bacillus thuringiensis* representa una alternativa prometedora para abordar tales limitaciones. Inspirado por investigaciones sobre sostenibilidad agrícola (Castro Martínez y Fontalvo Buelvas, 2023), este trabajo propone aprovechar las capacidades de los δ -endotoxinas para optimizar la retención y liberación controlada de Bt. Además, integra el uso de herramientas de inteligencia artificial, como el modelo Random Forest (Breiman, 2001), que permite identificar las condiciones óptimas de dosificación mediante el análisis de grandes volúmenes de datos y patrones complejos (Ho, 1995). El objetivo de este estudio es analizar y optimizar un biopesticida basado en *Bacillus thuringiensis* soportado en δ -endotoxinas, utilizando inteligencia artificial para predecir las condiciones ideales de dosificación, a fin de contribuir a una gestión más eficiente y sostenible en el ámbito agrícola.

Metodología

Síntesis del material híbrido

Nuestra metodología se dividió en dos partes: la síntesis del material híbrido, combinando *Bacillus thuringiensis* (Bt) con hidróxidos dobles laminares (HDL), y la implementación de un modelo de inteligencia artificial para analizar y optimizar este material. Para efectuar la síntesis de , seleccionamos el método de coprecipitación de sales metálicas por su capacidad de obtener matrices inorgánicas altamente cristalinas (Fu et al., 2023). Este procedimiento consistió en la adición simultánea de soluciones de nitratos de magnesio y aluminio en una proporción molar específica, junto con una solución alcalina de hidróxido de potasio, manteniendo un pH constante de 9. La mezcla se agitó vigorosamente a 80 °C durante 18 horas para favorecer la homogeneización y el crecimiento uniforme de los cristales, lo que asegura propiedades óptimas del material, tal como lo mencionan Vayssieres (2009) y Zhang et al. (2021). Posteriormente, Bt se incorporó cuidadosamente a la matriz inorgánica mediante la suspensión de esporas y cristales en agua desionizada, ajustando la concentración para preservar su actividad biológica (Talkhan et al., 2023). La mezcla se sometió a agitación continua durante 24 horas a temperatura ambiente para asegurar una distribución uniforme dentro de la matriz , una condición respaldada por estudios recientes sobre interacciones de materiales biológicos con matrices inorgánicas (Duraisamy et al., 2023). Finalmente, se realizó la separación y secado del material. La centrifugación a velocidades de 3000 y 5000 rpm permitió separar los sólidos de la fase líquida. Luego, se lavó el precipitado con agua desionizada estéril para eliminar cualquier Bt no intercalado. El secado se llevó a cabo a temperaturas inferiores a 40 °C para evitar la desnaturalización de las proteínas activas y preservar la calidad del material, como sugieren Talkhan et al. (2023).

Tabla 1 Condiciones experimentales para la síntesis del material híbrido

Parámetro	Condición
Proporción molar Mg:Al	3:1 (mol/mol)
pH	8 (ajustado con hidróxido de potasio)
Temperatura	80 °C
Tiempo de agitación	18 horas
Velocidad de centrifugación	3000–5000 rpm
Secado	< 40 °C

Nota: Las condiciones fueron seleccionadas con base en estudios previos que optimizan la formación de y preservan la actividad biológica de *Bacillus thuringiensis* (Vayssieres, 2009; Zhang et al., 2021; Talkhan et al., 2023).

Diseño del modelo de inteligencia artificial

Para analizar y optimizar las propiedades del material híbrido, implementamos un modelo de Random Forest, reconocido por su capacidad de manejar datos complejos y patrones no lineales (Breiman, 2001). El modelo se entrenó utilizando datos experimentales relacionados con variables como la concentración de Bt, el pH, temperatura y tiempo de exposición. Primero dividimos los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba, siguiendo prácticas estándar de aprendizaje automático (Pedregosa et al., 2011). El modelo fue desarrollado en Python utilizando Visual Studio

Code, con soporte de bibliotecas clave: Pandas para la manipulación de datos (McKinney y Reback, 2020), NumPy para cálculos matemáticos y estadísticos (Harris et al., 2020) y Scikit-learn para la implementación del modelo y su evaluación (Pedregosa et al., 2011). Las métricas utilizadas incluyeron el error cuadrático medio (mean_squared_error) y el coeficiente de determinación (r2_score), permitiendo cuantificar la precisión del modelo.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en este estudio validan la precisión del modelo de inteligencia artificial y la relevancia de las condiciones experimentales seleccionadas. Además, ofrecen una visión clara de las mejores condiciones para la dosificación de *Bacillus thuringiensis* (Bt) soportado en hidróxidos dobles laminares (HDL). Estas condiciones se basaron en literatura científica y manuales agrícolas, en los que se sugieren dosis de Bt de entre 0.5 y 2 kg/hectárea, dependiendo del cultivo y la plaga objetivo (epa, 1998).

La tabla 2 presenta datos experimentales clave para la predicción de la dosificación y eficacia del biopesticida. Las predicciones realizadas por el modelo Random Forest coinciden en gran medida con los datos observados, mostrando un error absoluto menor a 3% en la mayoría de los casos, como se detalla en la tabla 3.

Tabla 2

Datos experimentales para la predicción de dosificación

Concentración	pH	Temperatura	Tiempo de exposición	Predicción de eficacia
0.1	6.5	25	12	52.1
0.2	7.0	30	24	62.3
0.3	7.5	35	36	72.6

Tabla 3

Predicciones de eficacia para diferentes condiciones y dosificaciones

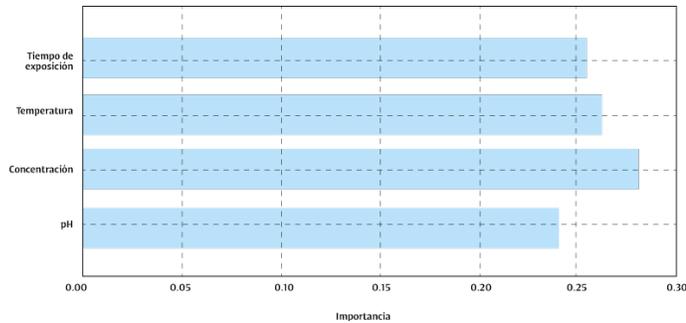
Condición	Dosificación de Bt	Eficacia observada (%)	Eficacia predicha (%)	Error absoluto (%)
Con HDL	Baja (50 mg/L)	80	78.5	1.5
Con HDL	Media (100 mg/L)	85	86.2	1.2
Con HDL	Alta (150 mg/L)	90	89.7	0.3
Sin HDL	Baja (50 mg/L)	60	58.0	2.0
Sin HDL	Media (100 mg/L)	65	66.5	1.5
Sin HDL	Alta (150 mg/L)	70	68.2	1.8

Importancia de las variables

La figura 1 muestra la importancia relativa de las variables (concentración, pH, temperatura y tiempo de exposición) según el modelo de Random Forest. La concentración de Bt destacó como la variable más relevante para optimizar la eficacia, seguida por el pH y la temperatura. Esto su-

braya la relevancia de ajustar cuidadosamente la concentración para maximizar el rendimiento del biopesticida.

Figura 1 Importancia de las variables para la optimización de la dosificación obtenida en el modelo en Python



La figura 1 fue obtenida del modelo de inteligencia artificial realizado con el código de Python y es la cuantificación de relevancia de la concentración, pH, temperatura y tiempo de exposición para optimizar el biopesticida. La comparación entre valores observados y predicciones, mostrada en la figura 2, revela la alta precisión del modelo, con un error cuadrático medio (mse) de 18.97 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.87. El punto que se encuentra en la esquina superior derecha es el exacto (80.80). Por otra parte, en la distribución de los errores (o residuales) notamos que el modelo tiende a subestimar ligeramente las predicciones y, a pesar de que éstos no son números exagerados, son factores que deben considerarse. Al momento de evaluar el modelo se obtuvo un error cuadrático medio (mse) de 18.97 y un R^2 de 0.87, lo que sugiere que el modelo es efectivo y explica 87% de la variabilidad en los datos.

Figura 2
Comparación de valores reales vs predicción obtenidas en el modelo

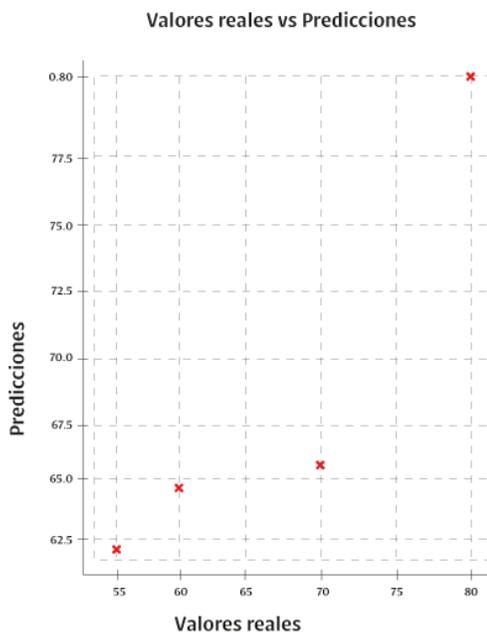
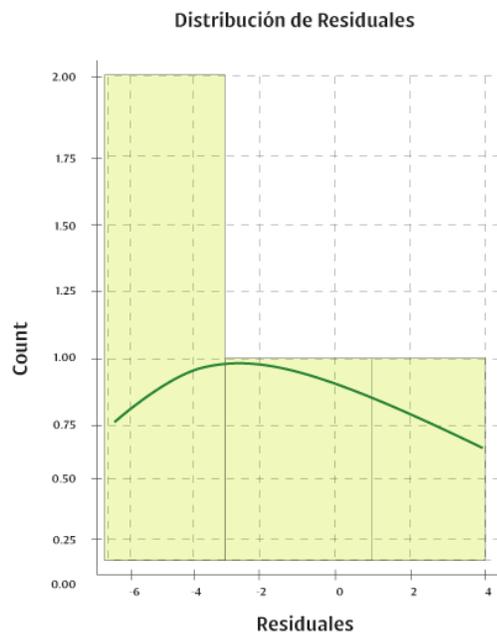


Figura 3
Distribución de residuales obtenidas en el modelo

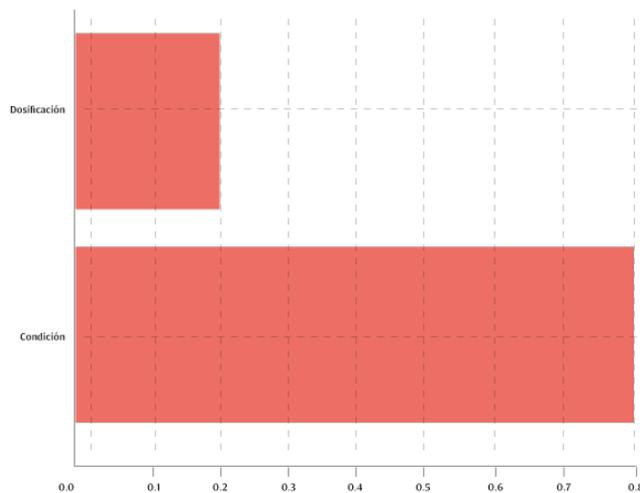


Eficiencia del soporte con HDL

La figura 4 muestra que el uso de como soporte para Bt representa 80% de la importancia en la optimización de la eficacia. Este resultado confirma que las hidrotalcitas no sólo actúan como soporte, sino que potencian significativamente la acción del biopesticida. Aunque las variables de dosificación, como el pH y la temperatura, aportan 18.7% a la eficacia, el soporte con sigue siendo el factor más influyente.

Figura 4

Comparación de importancia de las variables de dosificación y la condición de soporte para la eficiencia



En el futuro, vemos la posibilidad de aplicar estas técnicas de inteligencia artificial no sólo en biopesticidas, sino también en la dosificación de fertilizantes. Castillo López et al. (2024), por ejemplo, observaron que la correcta dosificación de fertilizantes químicos es crucial para mejorar el rendimiento de los cultivos, como en el caso del chile xkat iik. Se podría integrar herramientas de inteligencia artificial a estos procesos y optimizar aún más los resultados, reduciendo desperdicios y maximizando la eficiencia.

Conclusión

Con base en los resultados obtenidos, constatamos que, para sacar el máximo provecho de nuestro biopesticida, no basta con optimizar la cantidad de producto; también es necesario optimizar la forma en que se aplica. El modelo de Random Forest nos permitió identificar las condiciones óptimas de síntesis y dosificación, lo que mejoró tanto el proceso como los resultados. Además, nos ayudó a entender cuáles son los factores clave para maximizar la eficacia del biopesticida. El uso de hidróxidos dobles laminares como soporte para *Bacillus thuringiensis* incrementa su efectividad y reduce la dependencia de pesticidas químicos, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles.

Este trabajo no sólo demuestra la importancia de integrar herramientas tecnológicas como la inteligencia artificial a la investigación; además, abre una ventana a nuevas posibilidades. En el futuro, estas estrategias podrían extenderse a otros productos agronómicos, por ejemplo, fertilizantes, adaptándolos a distintas condiciones agrícolas y medioambientales. Además de beneficiar la productividad, esto refuerza nuestro compromiso con una agricultura más responsable y consciente.

Referencias

- Askeland, D. R., y Fulay, P. P. (2017). Estructuras cristalinas de materiales. *En Ciencia e Ingeniería de los materiales* (6ª ed., pp. 60-86). Cengage Learning.
- Benítez Aguilar, A., Velázquez Cigarroa, E., y Márquez Molina, O. (2023). Análisis de modelos de producción local para la sostenibilidad y seguridad alimentaria en el Estado de México. En Castro Martínez, O. R., y Fontalvo Buelvas, J. C. (Eds.), *Agricultura, huertos educativos y transformaciones socioecológicas: Experiencias significativas en México* (pp. 15-34). siea.
- Bravo, A., Gill, S. S., y Soberón, M. (2007). Mode of action of *Bacillus thuringiensis* Cry and Cyt toxins and their potential for insect control. *Toxicon*, 49(4), 423-435. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2006.11.022>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Cardoso, L., y Valim, J. (2006). Study of acids herbicides removal by calcined Mg-Al-CO₃-LDH. *Journal of Physical Chemistry of Solids*, 67, 987-993. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2006.02.039>
- Caswell, T. A., Droettboom, M., Lee, A., Hunter, J., Firing, E., Nielsen, J., Elson, P., SEPPänen, J. K., Dale, D., y Varoquaux, N. (2021). Matplotlib: Visualization with Python. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4559847>
- Castillo López, E., Muñoz Osorio, G. A., López Tolentino, G., y Marín Colli, E. E. (2024). Evaluation of different doses of chemical fertilization on growth and yield of creole pepper “Xkat iik” (*Capsicum annum L.*). *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 4(1). <https://doi.org/10.5154/r.rhsat.2023.04.03>
- Chaara, D., Pavlovic, I., Bruna, F., Ulibarri, M., y Barriga, C. (2010). Removal of nitrophenol pesticides from aqueous solutions by layered double hydroxides and their calcined products. *Applied Clay Science*, 50, 292-298. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.07.007>
- Duraisamy, K., et al. (2023). Development of a new broad-spectrum microencapsulation-based spray drying formulation of *Bacillus thuringiensis*. *Frontiers in Microbiology*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1273725>
- epa (Environmental Protection Agency). (1998). Reregistration Eligibility Decision (red) for *Bacillus thuringiensis*. Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances.
- Fu, Y., Fu, X., Song, W., Li, Y., Li, X., y Yan, L. (2023). Recent progress of layered double hydroxide-based materials in wastewater treatment. *Materials*, 16(16), 5723. <https://doi.org/10.3390/ma16165723>
- Glare, T. R. (2000). *Bacillus thuringiensis: Biology, ecology, and safety*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-4010-2>
- Harris, C. R., Millman, K. J., Van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., Van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., Del Río, J. F., Wiebe, M., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357-362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Ho, T. K. (1995). Random Decision Forests. *Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition*, 278-282. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.1995.598994>
- Miyata, S. (1983). Anion-exchange properties of hydrotalcite-like compounds. *Clays and Clay Minerals*, 31(4), 305-311. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1983.0310406>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: *Machine Learning* in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830.
- Talkhan, F. N., et al. (2023). Influence of some environmental conditions on stability and activity of *Bacillus thuringiensis* formulations. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*. <https://doi.org/10.1186/s41938-018-0064-x>
- Vayssieres, L. (2009). On the tailored assembly of nano-objects into integrated systems: A multiple scale approach. *Journal of Advanced Functional Materials*, 19(5), 688-697. <https://doi.org/10.1002/adfm.200800968>
- Waskom, M. (2021). Seaborn: Statistical Data Visualization. *Journal of Open Source Software*, 6(60), 3021. <https://doi.org/10.21105/joss.03021>

Derechos de Autor© 2025 Moreno Torres, Aldara Natalya y Guerra González, Roberto



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.