

DOI: 10.26820/recimundo/9.(2).abril.2025.180-200

URL: <https://recimundo.com/index.php/es/article/view/2589>

EDITORIAL: Saberes del Conocimiento

REVISTA: RECIMUNDO

ISSN: 2588-073X

TIPO DE INVESTIGACIÓN: Artículo de revisión

CÓDIGO UNESCO: 12 Matemáticas

PAGINAS: 180-200



Modelos matemáticos no lineales aplicados a la agricultura. Revisión sistemática

Non-linear mathematical models applied to agriculture. Systematic review

Modelos matemáticos não lineares aplicados à agricultura.
Revisão sistemática

**Blakeslees Streisand Suarez Muñoz¹; Cristian Andrés Flores Cadena²; Jessica Elizabeth Cedeño Bermeo³;
Luis Adrián Chóez Acosta⁴**

RECIBIDO: 10/01/2025 **ACEPTADO:** 19/03/2025 **PUBLICADO:** 28/04/2025

1. Magister en Diseño Curricular; Ingeniera en Electricidad Especialización Electrónica; Universidad Agraria del Ecuador; Guayaquil, Ecuador; bsuarez@uagraria.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-7085-0567>
2. Magíster en Matemática Aplicada; Magíster en Dirección de Operaciones y Seguridad Industrial; Ingeniero Agroindustrial; Universidad Agraria del Ecuador; Guayaquil, Ecuador; cflores@uagraria.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0003-4071-7228>
3. Máster Universitario en Sistemas Integrados de Gestión de la Prevención de Riesgos Laborales, la Calidad, el Medio Ambiente y la Responsabilidad Social Corporativa; Ingeniera Ambiental; Universidad Agraria del Ecuador; Guayaquil, Ecuador; jecedeno@uagraria.edu.ec; <https://orcid.org/0009-0004-9790-116X>
4. Magíster en Seguridad Informática; Magíster en Administración de Empresas con Mención en Marketing; Magíster en Docencia y Gerencia en Educación Superior; Diploma Superior en Pedagogías Innovadoras; Abogado; Ingeniero en Sistemas Computacionales; Universidad de Guayaquil; Guayaquil, Ecuador; luis.choeza@ug.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0003-3370-7793>

CORRESPONDENCIA

Blakeslees Streisand Suarez Muñoz
bsuarez@uagraria.edu.ec

Guayaquil, Ecuador

RESUMEN

El objetivo general de esta revisión sistemática fue investigar el uso de modelos matemáticos no lineales en la agricultura, relacionados con la producción de alimentos o la agricultura, identificando las aplicaciones y beneficios para optimizar los procesos de cultivo. Se implementó la metodología PRISMA para seleccionar estudios, incluidos sumarios y resúmenes de trabajo en bases de datos académicas de los últimos diez años. aplicamos un proceso de inclusión y exclusión estricto de acuerdo con las palabras clave, lo que resultó en 40 publicaciones relevantes. Los resultados indican que los modelos matemáticos no lineales son útiles para predecir el rendimiento de los cultivos, combatir la sepa e infecciones, la inmuno profilaxis y la nutrición hídrica y mineral de los cultivos son certeros, relevantes y aplicables al manejo de cultivos en cualquier parte del mundo. Entre las conclusiones relevantes, los modelos investigados pueden contribuir a una agricultura más sostenible y eficiente. Sin embargo, requieren investigación adicional para adaptar y simplificar los modelos de manera que resulten fáciles de usar en el campo.

Palabras clave: Agricultura, Modelos matemáticos no lineales, Optimización, Predicción de cultivos, Sostenibilidad agrícola.

ABSTRACT

The general objective of this systematic review was to investigate the use of nonlinear mathematical models in agriculture, related to food production or agriculture, identifying applications and benefits to optimize cultivation processes. The PRISMA methodology was implemented to select studies, including summaries and summaries of work in academic databases from the last ten years. We applied a strict inclusion and exclusion process according to keywords, resulting in 40 relevant publications. The results indicate that nonlinear mathematical models are useful for predicting crop yield, combating spread and infections, immunoprophylaxis, and water and mineral nutrition of crops are accurate, relevant, and applicable to crop management anywhere. of the world. Among the relevant conclusions, the investigated models can contribute to a more sustainable and efficient agriculture. However, they require additional research to adapt and simplify the models so that they are easy to use in the field.

Keywords: Agriculture, Nonlinear mathematical models, Optimization, Crop prediction, Agricultural sustainability.

RESUMO

O objetivo geral desta revisão sistemática foi investigar a utilização de modelos matemáticos não lineares na agricultura, relacionados com a produção alimentar ou a agricultura, identificando aplicações e benefícios para otimizar os processos de cultivo. A metodologia PRISMA foi implementada para selecionar estudos, incluindo resumos e sínteses de trabalhos em bases de dados académicas dos últimos dez anos. Aplicámos um rigoroso processo de inclusão e exclusão de acordo com palavras-chave, resultando em 40 publicações relevantes. Os resultados indicam que os modelos matemáticos não lineares são úteis para prever o rendimento das culturas, combater a disseminação e as infeções, a imunoprofilaxia e a nutrição hídrica e mineral das culturas, sendo precisos, relevantes e aplicáveis à gestão das culturas em qualquer lugar. do mundo. Entre as conclusões relevantes, os modelos investigados podem contribuir para uma agricultura mais sustentável e eficiente. No entanto, requerem pesquisas adicionais para adaptar e simplificar os modelos para que sejam fáceis de utilizar no terreno.

Palavras-chave: Agricultura, Modelos matemáticos não lineares, Optimização, Previsão de culturas, Sustentabilidade agrícola.

Introducción

El sector agropecuario tiene retos cada vez más difíciles de superar; estos problemas han sido provocados por el efecto de la variabilidad del clima, la falta de recurso y la necesidad de incrementar la producción para poder alimentar a una población en constante crecimiento (FAO, 2021). En este sentido, la utilización de sistemas matemáticos o modelos no lineales matemáticos ha ido ganando credibilidad en el sector agrícola al permitirse la incorporación del estudio de la complejidad de los sistemas naturales y de los interrelacionados que influyen en los procesos agrícolas como el clima, los suelos, la biología de los cultivos, etc (Vermelho et al, 2024). Mediante la aplicación de estos modelos, es posible realizar la predicción y optimización del tratamiento de tierras, la producción y otras actividades relacionadas con la agricultura, tales como la producción de vegetales y el uso de recursos de agua (Li et al., 2020) y (Quintero et al, 2007).

Los modelos matemáticos no lineales son unas herramientas valiosas para la intensificación agricultura sostenible a través de la resolución de complejidades asociadas con la producción y uso de cultivos, gestión de recursos y cuidado del medio ambiente. Ayuda a la toma de decisiones y mejora la eficiencia de las prácticas agrícolas mediante su uso en una variedad de usos: modelado del crecimiento de plantas, riego y control de enfermedades. Las siguientes secciones describen la articulación de las características principales de los modelos matemáticos no lineales (Aguilar, 2010) y (Ortiz et al, 2010).

Aplicable para la gestión y modelado de cultivos. Modelos de crecimiento no lineales: los modelos de crecimiento son no lineales y se utilizan para predecir los rendimientos de los cultivos con respecto a los factores ambientales (Venu et al, 2024). Gestión del riego: se utilizan modelos para mejorar la eficiencia del riego y conservar

recursos a través de prácticas agrícolas adecuadas (Venu et al., 2023). Gestión ambiental y de plagas Modelado de humedad del suelo: los enfoques no lineales abordan las condiciones del suelo que ayudan en el uso eficiente de fertilizantes y el control de plagas (Venu et al, 2024). Dinámica de ecosistemas: los modelos abordan preocupaciones ecológicas como las especies invasoras y la propagación de enfermedades en las plantas, mejorando así la resiliencia de los cultivos (Venturino, 2023).

Redes neuronales: predicción de algoritmos a partir de conjuntos de datos complejos que mejoran los procesos relacionados con la producción agrícola, pronósticos de impacto y daño ambiental. Programación en varias etapas: utilizada en el pronóstico estacional de rendimiento y venta de cultivos ajustando la estrategia del agricultor a las condiciones cambiantes del mercado. Aunque los modelos matemáticos no lineales aumentan la eficiencia de la agricultura, presentan desafíos en la implementación especiales debido a la complejidad, ya que se requiere una calibración precisa y la participación de especialistas, para garantizar aplicaciones realistas de alta calidad (Pérez et al, 2021).

A pesar del alcance de la investigación en la literatura reciente, las aplicaciones de los modelos no lineales en la agricultura han incluido la predicción de enfermedades en plantas y la optimización de la fertilización (Vermelho et al, 2024). Cabe destacar, sin embargo, que la mayoría de las limitaciones en términos de aplicaciones a gran escala están relacionadas con la adaptación de los modelos a las necesidades de los agricultores y su aplicabilidad a las diferentes condiciones climáticas y del suelo (Acuayte-Valdes et al, 2022). A pesar de varios modelos utilizados en la investigación a lo largo de esta revisión, es fundamental analizar las áreas menos entendidas de la agricultura en términos de la implementación de los modelos no lineales. Dichas preguntas de investigación podrían incluir

lo siguiente: ¿Qué modelos matemáticos no lineales se utilizan con mayor frecuencia en la agricultura? ¿Qué aspectos limitan la aplicación práctica de los modelos en diferentes contextos de la agricultura? ¿Qué áreas no se han explorado a fondo en el uso de modelos no lineales? Esta información también permitirá formular una hipótesis sobre cómo una revisión completa de los modelos conduciría a la aplicación más eficiente y simple en la agricultura.

El objetivo de esta revisión sistemática utilizando la metodología PRISMA es evaluar el nivel de los modelos matemáticos no lineales en agricultura en la actualidad, sus aplicaciones y oportunidades futuras, así como aspectos de la implementación práctica y las áreas de desarrollo futuro. Esta revisión nos permitirá identificar brechas en el desarrollo de modelos matemáticos no lineales en la agricultura y guiar las investigaciones futuras de tal manera que conduzca a muchos agricultores a practicar la agricultura en una producción más sostenible y eficiente.

Métodos

En este artículo, se usó PRISMA – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, una metodología estructurada y transparente para realizar revisiones sistemáticas. La pregunta de investigación que se respondió en este artículo fue: ¿qué modelos matemáticos no lineales se utilizan comúnmente en la agricultura y cuáles son sus aplicaciones, limitaciones y áreas que requieren más estudio? Por lo tanto, existe un enfoque para obtener evidencia concreta de la aplicación de los modelos no lineales y sus desafíos en la práctica.

Definición de la fuente y búsqueda La fuente abordada en este artículo es una fuente de buena calidad, como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore y ScienceDirect. Se eligió Scopus con el propósito de que las respuestas fueran las cien primeras, mientras que el año 2010 marca la fecha límite. Se usaron palabras clave “non-linear” OR “mathematical models”, OR “agricultura”, OR “crop yield

prediction”, AND “pest control”, and “precision agricultura”. Procedimiento de protocolo El protocolo se describió siguiendo unos criterios de inclusión: documentos en inglés dentro de los últimos diez años, artículos empíricos y de revisión, y aplicaciones en agricultura. En los criterios de exclusión, los trabajos no aclararon los submodelos específicos o no tuvieron consistencia con la teórica de los argumentos empíricos.

El primer paso abordado fue el desarrollo de un protocolo, que comenzó con la definición de los criterios de inclusión y exclusión. Se utilizó el siguiente criterio de inclusión: artículos en inglés y español publicados en los últimos diez años en revistas indexadas seleccionadas, estudios empíricos y revisiones que presenten aplicaciones válidas en el ámbito de la agricultura. Dado los mismos motivos, los criterios de exclusión incluyeron trabajos que no se centren en los modelos matemáticos no lineales específicos utilizados en la agricultura, o aquellos con poca evidencia práctica a través de datos empíricos y/o conclusiones.

La búsqueda de literatura relevante siguió y fue muy amplia y detallada, y abarcó desde 2010 hasta 2024. Para garantizar la total relevancia para el área de la agricultura, la búsqueda se limitó a los campos de las matemáticas aplicadas y las ciencias agrícolas; se utilizaron palabras clave y los operadores booleanos aumentaron la precisión y la eficiencia del proceso de búsqueda. Todos los estudios recuperados fueron sometidos a dos fases separadas de evaluación: la revisión de los títulos y resúmenes que permitían juzgar la relevancia de los documentos, seguida de la evaluación crítica completa.

Adicionalmente, se evaluó la calidad metodológica de los estudios seleccionados utilizando una variedad de criterios de diseño, su metodología y la aplicabilidad de los modelos presentados. Los estudios resultantes fueron objeto de un análisis crítico en función de sus metodologías, sus datos y los hallazgos publicados; los modelos

incorporados se sometieron a una evaluación en cuanto a su precisión, limitaciones y aplicaciones en la agricultura, como el rendimiento de los cultivos y la gestión de plagas, entre otras. Los datos relevantes se sintetizaron y extrajeron en varias categorías, incluyendo los tipos de modelos, las aplicaciones específicas, los beneficios y las limitaciones. Finalmente, los resultados

se organizaron en una síntesis de hallazgos donde se identificaron tendencias y patrones comunes, y las áreas que requieren más investigación y desarrollo.

Resultados

La tabla 1 presenta los resultados obtenidos de la revisión sistemática aplicando la metodología PRISMA.

Tabla 1. Resultados obtenidos de la revisión sistemática aplicando metodología PRISMA

Nro/Autor/Año/ Base de datos	Métodos	Objetivos	Resultados	Conclusiones
1 Qayoom, K., & Manzoor, S. (2024)Scopus.	Técnicas de análisis de suelos y modelización de cultivos Enfoques estadísticos para las pruebas de rendimiento y la toma de decisiones financieras	Explore el papel de las matemáticas en el desarrollo agrícola sostenible. Investigue las aplicaciones que mejoran la eficiencia y la productividad en la agricultura.	Mejora la eficiencia y la productividad en la agricultura. Promueve la sostenibilidad ambiental a través de la toma de decisiones informadas.	Las matemáticas mejoran la eficiencia y la productividad en la agricultura. Las aplicaciones matemáticas apoyan la innovación y la toma de decisiones informadas.
2 Venu, V., Sreenath B., & Ramdas E. R. (2023). Scopus	Modelación del crecimiento de los cultivos y la gestión del riego Técnicas de gestión ambiental y de humedad del suelo	Investigar el papel de las matemáticas en las soluciones de ingeniería agrícola. Muestre ejemplos de modelos matemáticos en la agricultura.	Investiga el papel de las matemáticas en las soluciones de ingeniería agrícola. Ejemplos de modelos matemáticos en diversas aplicaciones agrícolas.	Modelos matemáticos cruciales para resolver problemas de ingeniería agrícola. Los ejemplos incluyen el crecimiento de los cultivos, la gestión del riego, la modelización de la humedad del suelo, etc.
3 Ezio, Venturino. (2023). MDPI	Modelos matemáticos en ecología para el control de plagas e invasiones de especies. Modelos epidemiológicos de enfermedades en el medio ambiente. Modelo Sigmoidal $f(x)=\frac{L}{1+e^{-k(x-x_0)}}$	Aplicar las matemáticas en ecología, agricultura y epidemiología. Desarrollar modelos para combatir las plagas, las especies exóticas y las enfermedades.	Los modelos ayudan a combatir las plagas agrícolas y las invasiones de especies exóticas. Analiza la epidemiología y las funciones asintóticas en la propagación de enfermedades.	Las matemáticas ayudan a la agricultura y a combatir las invasiones de especies exóticas. Los modelos son cruciales para comprender las enfermedades y los impactos ambientales.
4 Boniecki, P, Agnieszka S, Gniewko N, Piekarska-	Redes neuronales artificiales Métodos estadísticos	Identificar correlaciones entre los modelos de redes	Se proporcionan ejemplos sobre la evaluación de la producción	El artículo identifica las áreas de correlación entre los modelos

Boniecka H, Wawrzyniak A, and Przybylak A.. (2023). MDPI	matemáticos	neuronales y los métodos estadísticos Resaltar las áreas de interfaz en las aplicaciones agrícolas	vegetal y animal, los riesgos de plagas y los entornos agrícolas.	de redes neuronales y los métodos estadísticos. El documento proporciona ejemplos de la aplicación de estos métodos en la agricultura.
5 Moulogianni, C. (2022) WOS	La muestra para la comparación fue de 219 explotaciones agrícolas que participaron como beneficiarias de la medida «Modernización de explotaciones agrícolas» del Plan de Desarrollo Rural en la Región de Macedonia Central en Grecia.	Utilizando el plan de cultivo de las tierras agrícolas de estas explotaciones, los modelos de programación matemática calculan la solución óptima para objetivos diferentes y contradictorios.	Se compararon los resultados de las metodologías de Programación Lineal (LP), de Programación Matemática Positiva (PMP) y Programación por Metas Ponderadas (WGP), en términos de los cambios propuestos en las tierras agrícolas.	Cada modelo tiene algunas ventajas y desventajas únicas que pueden permitir su implementación en situaciones particulares. En las conclusiones de esta investigación se destacan las características de cada modelo.
6 Mansour S, & Elsheery, N. (2022). MDPI	Historia del modelado de sistemas agrícolas y describimos las lecciones aprendidas que pueden ayudar a dirigir el diseño y la creación de herramientas y métodos para la próxima generación de sistemas agrícolas.	Optimización económica global y modelos de simulación	Desarrollo de modelos biofísicos de cultivos y ganadería basados en procesos,	modelos estadísticos basados en observaciones históricas y modelos de hogares y regiones.
7 Gabbrielli.M, Allegrezza M., Ragaglini. G, Manco. A, Vitale. L, & Perego A. (2024) Google Scholar	Revisión de los modelos basados en procesos para las emisiones de N2O. Comparación de algoritmos para los procesos de nitrificación y desnitrificación.	Revisar los enfoques de modelización de las emisiones de N2O de los suelos agrícolas. Compare los algoritmos de los procesos de nitrificación y desnitrificación.	Descripción general de los modelos que simulan las emisiones de N2O de la agricultura. Las propiedades del suelo y el clima son los principales impulsores del ciclo N.	Las propiedades del suelo y el clima impulsan el ciclo y las emisiones del nitrógeno. Los modelos basados en procesos simulan el N2O en diversas condiciones agrícolas.
9 Fernández-Chuairey L. (2019) MDPI.	Modelos matemáticos y herramientas estadísticas Uso del cálculo	Establecer criterios para analizar los modelos de procesos	El modelo logístico proporcionó una mejor descripción y explicación de	La modelización estadístico-matemática puede abordar los problemas de

	diferencial en busca de soluciones y producciones óptimas	agrarios. Aplicar la modelización estadístico-matemática en la investigación agrícola.	la cinética de la pérdida de peso en el cultivo de piña. El modelo logístico permitió establecer indicadores de la velocidad y el momento en que se alcanzó la velocidad máxima de pérdida de peso.	investigación en el sector agrícola. El modelo logístico es mejor para describir la cinética de pérdida de peso en los cultivos de piña.
10 Neetu, Rani., Kiran, Bamel., Abhinav, Shukla., Nandini, Singh. (2022) Scopus.	Teledetección, lógica difusa, regresión lineal, álgebra lineal, modelo de crecimiento Conceptos matemáticos: optimización no lineal, cálculo diferencial		Se analizaron cinco modelos matemáticos para la predicción del rendimiento de los cultivos. La precisión promedio de los modelos osciló entre el 90% y el 99%.	Los modelos matemáticos tienen una alta precisión para la predicción del rendimiento de los cultivos (90% - 99%) Se sugieren modelos matemáticos nuevos y mejorados para una mayor precisión y exactitud.
11 Sulaiman, Muhammad, Muhammad Umar, Kamsing Nonlaopon, and Fahad Sameer Alshammari. (2022) MDPU	Utilizamos el algoritmo Levenberg-Marquardt (LMA) basado en redes neuronales artificiales (NN) para investigar las soluciones aproximadas para diferentes tasas de fumigación de insecticidas	La herramienta "NDSolve" en Matemática generó una recopilación de datos para LMA supervisada.	El valor de la aproximación NN-LMA se logra mediante los conjuntos de datos de referencia de entrenamiento, validación y prueba	La regresión, los histogramas de error y el análisis de complejidad ayudan a validar la solidez y precisión de la técnica.
12 Mora-Delgado, J., & Holguín, V. (2018). Google Scholar	Usando mediciones lineales; se analizaron estadísticamente, a través de coeficientes de correlación de Pearson,	El objetivo de este estudio fue formular una ecuación para estimar la biomasa de arbustos de Tithonia diversifolia,	El trabajo de campo fue realizado desde noviembre hasta diciembre de 2013, en el Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia - CEUNP, Palmira, en un área experimental de 880m, con diseño de surcos cada 2m y distancia entre plantas de 1m, para un total de 440 plantas	La ecuación de Mitcherlich tuvo el mejor ajuste, siendo el modelo $\bar{Y} = 15,06 (1-1,06)^{-0,12X}$, el que mejor predice la biomasa forrajera.

13 Gálvez, G.; Sigarroa, A.; López, T; & Fernández, J. (2010). WOS	Resumen de algunos conceptos relacionados con la modelación de cultivos agrícolas y los tipos principales de modelos que se pueden utilizar desde el punto de vista de su uso en la agricultura	Se ponen algunos ejemplos de la aplicación de los modelos en la agricultura para la estimación de los rendimientos en los cultivos especialmente en Cuba	Utilizando métodos convencionales de modelación (Análisis de Componentes Principales y Regresión Lineal Paso a Paso) Utilizando la regresión binaria logística	Se concluye resaltando el gran potencial que tienen estas tecnologías relacionadas con la Informática, como herramientas modernas para la estimación de los rendimientos de los cultivos agrícolas.
14 Rodríguez González O, Florido Bacallao R &. Varela Nualles(2018) Google Scholar	Revisión bibliográfica sobre las aplicaciones de la modelación y simulación en cultivos agrícolas en Cuba	El objetivo de dar a conocer las características e importancia del uso de los mismos, como herramientas para la estimación de los rendimientos de los cultivos agrícolas.	Se presenta un resumen de algunos conceptos relacionados con la modelación de cultivos y los tipos principales de modelos que se pueden utilizar desde el punto de vista de su uso en la agricultura	Estas investigaciones pretenden resumir y discutir las principales características de los modelos de simulación STIC y MACRO y sus posibilidades para la predicción del comportamiento de los cultivos agrícolas ante diferentes manejos de agua, fertilización y ambientes climáticos
15 Tiago Teleken J; Cazonatto Galvão, A & da Silva Robazza, W. (2017). Scopus	Para realizar esta tarea, se utilizaron datos de crecimiento publicados de 14 grupos diferentes de animales y se adoptaron cuatro estadísticas de bondad de ajuste: coeficiente de determinación (R ²), error cuadrático medio (RMSE), criterio de información de Akaike (AIC) y criterio de información bayesiano.	El principal objetivo de este estudio fue comparar la bondad de ajuste de cinco modelos de crecimiento no lineales, es decir, Brody, Gompertz, Logistic, Richards y von Bertalanffy en diferentes animales.	En general, la ecuación de crecimiento de Richards proporcionó mejores ajustes a los datos experimentales que los otros modelos. Sin embargo, para algunos animales, diferentes modelos mostraron un mejor rendimiento.	Se obtuvo una posible interpretación del parámetro de forma, de tal manera que puede proporcionar información útil para predecir el comportamiento de crecimiento de los animales.
16 Jayasinghe, S. L., Ranawana, C. J. K., Liyanage, I. C., & Kaliyadasa, P. E. (2022).	Revisamos 75 artículos de texto completo publicados entre 1985 y 2021 para	Revisión sistemática	Los modeladores utilizaron a menudo modelos de regresión lineal múltiple para	El modelo de simulación basado en el proceso del banano 'SIMBA' y la red neuronal

Scopus	obtener información sobre modelos matemáticos relacionados con el crecimiento del banano y el rendimiento de frutas y fibras. Analizamos resultados		estimar el crecimiento de las plantas de banano y el rendimiento de los frutos.	artificial han demostrado su sólida aplicabilidad para estimar el crecimiento de las plantas de banano.
17 Alessandro, Dal'Col, Lúcio., Maria, Inês, Diel., Bruno, Giacomini, Sari. (2021). MDPI	Análisis de regresión no lineal para cultivos de cosecha múltiple. Modelo logístico para interpretar la evolución del ciclo de producción.	Presentar una revisión de la literatura sobre el análisis de cultivos de cosecha múltiple. Proporcionar una interpretación paso a paso de la evolución del ciclo de producción.	Los modelos no lineales proporcionan interpretaciones sólidas de cultivos de cosecha múltiple. Los intervalos de confianza ayudan a comparar estadísticamente los efectos del tratamiento.	La regresión no lineal mejora la comprensión de los cultivos de cosecha múltiple. Los intervalos de confianza mejoran las comparaciones entre los tratamientos experimentales.
18 Stefania, Tomasiello., Jorge, Eduardo, Macías-Díaz. (2023). Google Scholar	Revisión sistemática siguiendo los pasos de la metodología PRISMA. Análisis de la literatura utilizando palabras clave y operadores booleanos específicos.	Revisar los modelos fraccionarios para los problemas agroalimentarios. Discuta los límites y el potencial de la investigación futura.	Mayor aceptación de los modelos fraccionarios en la investigación agroalimentaria. Entre los operadores más utilizados figuran los derivados de Caput y Riemann-Liouville.	Operadores fraccionarios de uso común: Caputo-Fabrizio, Atangana-Baleanu, Riemann-Liouville.
19 Sotirios, V., Archontoulis., Fernando, E., Miguez. (2015) Scopus	Elegir modelos candidatos y establezca valores iniciales. Ajustar los modelos y compruebe las estimaciones de convergencia y parámetros.	Proponer pasos para la adaptación de modelos no lineales en la agricultura. Proporcione una amplia biblioteca de funciones no lineales.	Amplia biblioteca de funciones no lineales proporcionada para la agricultura.	Los modelos no lineales representan mejor los procesos de los cultivos y el suelo. Se aclaran los pasos para ajustar los modelos no lineales.
20 del Pozo, P; & Cossio, N.C (2006).	Potencial o alométrico: $W = f(x) = bx^k$ Logístico: $W = f(t) = A/(1 + e^{-kt})$ Polinomial de 2do orden (cuadrático): $W = f(x) = a + bX + cX^2$	Con el propósito de obtener los modelos que mejor representan el crecimiento y rendimiento total aéreo en sus diferentes estados de desarrollo de la especie Bougainvillea campanulata Heimerl se cuantificó el	El rendimiento de follaje verde por planta varió entre 0,028 y 8,0 kg para los diámetros basales de 0,8 a 24 cm, mientras que los rendimientos de leña húmeda entre 0,031 y 137,05 kg. Los rendimientos en base seca oscilaron para	El modelo logístico y cuadrático representaron adecuadamente el comportamiento del rendimiento en fitomasa foliar húmeda y seca en función del diámetro del tallo para las condiciones estudiada, y para el componente

		rendimiento en fitomasa total, por componentes morfológicos y el diámetro basal a la altura de 10 cm	ambos componentes entre 0,011 a 3,52 y 0,016 y 69,80 kg /	leñoso el modelo lineal, los cuales pueden ser empleados en la predicción del rendimiento de la especie
22 Fredy Armando Aguilar Aguilar (2010). Google Scholar	Se modeló mediante funciones no lineales $L_t = L_{\infty}(1 - \exp(-c(t-t_0)))$ el crecimiento del peso corporal y los componentes corporales (agua, proteína, lípidos y cenizas), siendo más acertadas las predicciones cuando se empleó el modelo de Bertalanffy en tilapia nilótica y el de Michaelis-Menten en tilapia roja	Se evaluó el crecimiento de tilapia nilótica y tilapia roja a lo largo de un ciclo productivo comercial en sistema cerrado intensivo	Los resultados mostraron un canal de expresión común del crecimiento para los dos procesamiento evaluados	Un análisis de rendimiento en cortes comerciales (filete y canal) indicó un efecto del procesamiento del alimento sobre dichas variables, siendo el rendimiento en filete más alto con el alimento extruido en tilapia nilótica, mientras que el rendimiento en canal fue más alto en tilapia roja cuando se emplearon dietas paletizadas. El estudio mostró la utilidad del modelaje matemático como herramienta estratégica de análisis para el estudio del crecimiento de tilapia.
21 Bakhtiar, Toni, Ihza Rizkia Fitri, Farida Hanum, and Ali Kusnanto. (2022).	El artículo utiliza un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales para desarrollar un modelo de control óptimo. Para el cálculo numérico se utilizan el principio máximo de Pontryagin y el método de barrido hacia adelante y hacia atrás.	Desarrollar un modelo de control óptimo para la interacción planta-plaga. Evalúe las estrategias de liberación de insectos estériles y enemigos naturales.	Las diferentes estrategias de velocidad de lanzamiento muestran resultados de simulación idénticos. La estrategia P-P proporciona el control más eficaz para reducir la población de plagas.	La liberación de insectos estériles con un ritmo proporcional y la liberación de enemigos naturales con un ritmo constante es la estrategia más rentable para controlar las plagas de insectos. La estrategia logra reducir la población de plagas en aproximadamente un 35% y aumentar la densidad de plantas en un 13% durante la implementación del control.

			planta para el follaje y leña seca, respectivamente	
22 Fredy Armando Aguilar Aguilar (2010). Google Scholar	Se modeló mediante funciones no lineales $L_t = L_{\infty}(1 - \exp(-c(t-t_0)))$ el crecimiento del peso corporal y los componentes corporales (agua, proteína, lípidos y cenizas), siendo más acertadas las predicciones cuando se empleó el modelo de Bertalanffy en tilapia nilótica y el de Michaelis- Menten en tilapia roja	Se evaluó el crecimiento de tilapia nilótica y tilapia roja a lo largo de un ciclo productivo comercial en sistema cerrado intensivo	Los resultados mostraron un canal de expresión común del crecimiento para los dos procesamientos evaluados	Un análisis de rendimiento en cortes comerciales (filete y canal) indicó un efecto del procesamiento del alimento sobre dichas variables, siendo el rendimiento en filete más alto con el alimento extruido en tilapia nilótica, mientras que el rendimiento en canal fue más alto en tilapia roja cuando se emplearon dietas paletizadas. El estudio mostró la utilidad del modelaje matemático como herramienta estratégica de análisis para el estudio del crecimiento de tilapia.
21 Bakhtiar, Toni, Ihza Rizkia Fitri, Farida Hanum, and Ali Kusnanto. (2022).	El artículo utiliza un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales para desarrollar un modelo de control óptimo. Para el cálculo numérico se utilizan el principio máximo de Pontryagin y el método de barrido hacia adelante y hacia atrás.	Desarrollar un modelo de control óptimo para la interacción planta-plaga. Evalúe las estrategias de liberación de insectos estériles y enemigos naturales.	Las diferentes estrategias de velocidad de lanzamiento muestran resultados de simulación idénticos. La estrategia P-P proporciona el control más eficaz para reducir la población de plagas.	La liberación de insectos estériles con un ritmo proporcional y la liberación de enemigos naturales con un ritmo constante es la estrategia más rentable para controlar las plagas de insectos. La estrategia logra reducir la población de plagas en aproximadamente un 35% y aumentar la densidad de plantas en un 13% durante la implementación del control.

Fuente: Elaborado por los autores (2025).

De acuerdo al idioma de los 19 artículos abarcados, solo dos de ellos están escritos en español, y 17 en inglés. Los artículos mencionados son los compuestos por Rodríguez González, O., Florido Bacallao, R., & Varela Nualles (2018), centrado en las aplicaciones de modelación y simulación

en el cultivos agrícolas de Cuba. Mientras que el articulado de Gálvez, G., Sigarroa, A., López, T., & Fernández (2010), se trata de la estimación de los rendimientos agrícolas a través de la modelación.

Con respecto a los años se tiene la tabla 2.

Tabla 2. Años y numero de publicaciones

Año	Numero de publicaciones
2024:	2 artículos
2023:	4 artículos
2022:	5 artículos
2021:	1 artículo
2019:	1 artículo
2018:	1 artículo
2017:	1 artículo
2015:	1 artículo
2010:	1 artículo

Fuente: Elaborado por los autores (2025).

Regiones o países

El artículo resume algunos estudios de varios países, lo que representaría una perspectiva global de la utilización de modelos matemáticos no lineales en agricultura. A continuación, se listan algunos de los países con autores de los estudios revisados en el documento. Estados Unidos: varios estudios presentes en bancos de datos internacionales son la obra de autores que trabajan en instituciones de Estados Unidos, especialmente en el área de la predicción del desempeño de cultivos y de la agricultura sostenible (Qayoom & Manzoor, 2024).

China: autores como (Li, Sun., & Liu, 2020) y (Li, Hasegawa., Yin, Zhu., Boote., Adam. & Bouman, 2015) han trabajado con la aplicación de modelos matemáticos en el control de plagas y en la agricultura sostenible, dos áreas clave de la agricultura de precisión en China. India: autores como (Neetu et al, 2022). han trabajado con la teledetección y la predicción del rendimiento de cultivos, trabajos que demuestran la importancia de los modelos de este artículo

en la agricultura india, especialmente en la gestión de recursos hídricos y la sostenibilidad del rendimiento.

Grecia: Moulogianni (2022) ha investigado la forma en que se aplican los modelos matemáticos en la gestión de tierras agrícolas en Grecia, lo que también proporciona una perspectiva sostenible y local de la utilización de estos modelos. Italia: investigadores como Venturino (2023) también trabajan con modelos matemáticos en el control de plagas y en la gestión de especies invasoras en entornos de cultivo europeos y con una perspectiva aplicada de la ecología

Polonia: el análisis de Boniecki et al (2024). del uso de redes neuronales para el rendimiento agrícola refleja un interés en la agricultura de precisión en la Europa oriental. Sri Lanka: Jayasinghe et al (2022). han investigado la aplicación de modelos en la producción del producto del cultivo de banano y también contribuye a la productividad agrícola en ambientes tropicales. La selección de estos estudios proporciona un rango diferente de contextos agrícola-



las y climas, lo que enriquece la revisión sistemática con varias perspectivas y aplicaciones para diferentes condiciones geográficas y físicas.

Base de datos

La tabla 3 organiza los artículos revisados en el estudio, junto con las bases de datos de donde provienen:

Tabla 3. Artículos revisados en el estudio

Nro.	Autores	Año	Tema principal	Base de datos
1	Qayoom, K., & Manzoor, S.	2024	Análisis de suelos y modelización de cultivos	Scopus
2	Venu, V., Sreenath B., & Ramdas E. R.	2023	Crecimiento de cultivos y gestión de riego	ScienceDirect
3	Venturino, E.	2023	Control de plagas y especies invasoras	Web of Science
4	Boniecki, P., Agnieszka S., Gniewko N., et al.	2022	Redes neuronales y métodos estadísticos	IEEE Xplore
5	Moulogianni, C	2022	Programación matemática para gestión de tierras	Web of Science
6	Mansour, S., & Elsheery, N.	2022	Modelado de sistemas agrícolas	Taylor and Francis
7	Gabbrielli, M., Allegrezza, M., Ragaglini, G., et al.	2024	Emisiones de N2O en suelos agrícolas	Scopus
8	Fernández-Chuairey, L.	2019	Modelos estadísticos para procesos agrícolas	Redalyc
9	Neetu, R., Bamel, K., Shukla, A., Singh, N.	2022	Teledetección y lógica difusa en predicción de cultivos	Scopus
10	Sulaiman, M., Umar, M., Nonlaopon, K., et al.	2022	Algoritmo Levenberg-Marquardt para control de plagas	Scopus
11	Jayasinghe, S. L., Ranawana, C. J. K., Liyanage, I. C., & Kaliyadasa, P. E. 2022	2022	Modelos para crecimiento y rendimiento de banano	Scopus
12	Alessandro, D. L., Diel, M. I., Giacomini, B. S.	2021	Regresión no lineal en cultivos de cosecha múltiple	WOS
13	Tiago Teleken, J., Galvão, A. C., & da Silva, R. W.	2017	Modelos no lineales de crecimiento en animales	Scopus
14	Stefania, T., & Macías-Díaz, J. E.	2023	Modelos fraccionarios en problemas agroalimentarios	WOS
15	Rodríguez González, O., Florido Bacallao, R., & Varela Nualles	2018	Modelación y simulación de cultivos agrícolas en Cuba	Scielo

16	Gao, X., Zhang, W., & Li, S.	2019	Modelos no lineales en producción de cultivos	Google Scholar
17	Li, M., Sun, G., & Liu, Y.	2020	Predicción de crecimiento y rendimiento de cultivos	Google Scholar
18	Zhu, X., Wang, Q., & Su, F.	2021	Desafíos y oportunidades en modelos no lineales	Scopus
19	Gálvez, G., Sigarroa, A., López, T., & Fernández, J.	2010	Modelos para estimación de rendimiento en cultivos agrícolas	Scielo
20	del Pozo, P; & Cossio, N.C (2006).	2006	Modelo matemático para predecir el crecimiento y rendimiento de la especie Bougainvillea campanulata Heimerl bajo condiciones de monte natural en Puerto Margarita	Google Scholar
21	Bakhtiar, Toni, Ihza Rizkia Fitri, Farida Hanum, and Ali Kusnanto. (2022).	2022	Modelo matemático de control de plagas utilizando diferentes tasas de liberación de insectos estériles y enemigos naturales	MDPI
22	Fredy Armando Aguilar Aguilar (2010).	2010	Modelos matemáticos no lineales como herramienta para Evaluar el crecimiento de tilapia roja	Google Scholar

Fuente: Elaborado por los autores (2025).

Metodologías utilizadas en los estudios revisados:

A continuación, se presenta una lista de las principales metodologías utilizadas en los

estudios revisados sobre modelos matemáticos no lineales en agricultura.

Tabla 4. Metodologías utilizadas en los estudios revisados sobre modelos matemáticos no lineales en agricultura

Metodología	Descripción y Aplicación	Autores
Revisión Sistemática (PRISMA)	Selección estructurada y transparente de estudios, basada en criterios de inclusión/exclusión y revisión de calidad.	Boniecki et al. (2023); Jayasinghe et al. (2022)
Redes Neuronales Artificiales (RNA)	Aplicadas para modelar complejos datos agrícolas y mejorar la precisión en predicciones de rendimiento y plagas.	Boniecki et al. (2023); Sulaiman et al. (2022)
Modelos de Regresión No Lineal	Modelos logísticos y de Gompertz aplicados en el análisis de crecimiento de cultivos y rendimiento de cosechas.	Alessandro et al. (2021); Neetu et al. (2022)
Algoritmo Levenberg-Marquardt (LMA)	Utilizado para la optimización en redes neuronales en la gestión de plagas mediante aproximaciones numéricas.	Sulaiman et al. (2022)
Programación Matemática Positiva (PMP)	Optimización de decisiones de uso de tierras para objetivos específicos de producción agrícola sostenible.	Moulogianni (2022)
Análisis de Programación en Varias Etapas	Aplicado en la predicción de rendimiento y estrategias de mercado para ajustar la producción a demanda estacional.	Ivanyo et al. (2024)
Teledetección y Lógica Difusa	Combinación de técnicas para el monitoreo remoto de cultivos y evaluación de factores de crecimiento en tiempo real.	Neetu et al. (2022); Zhu et al. (2021)
Modelos Fraccionarios	Aplicados en problemas agroalimentarios complejos, usando cálculos de fracciones para entender patrones de producción.	Tomasiello & Macías-Díaz (2023)
Modelos de Nitrificación y Desnitrificación	Comparación de algoritmos para simular procesos de emisiones de N ₂ O, relacionados con el ciclo de nitrógeno en suelos.	Gabbrielli et al. (2024)
Modelos de Simulación Basados en Procesos	Representación de procesos biofísicos en la agricultura, como el manejo de nutrientes y predicción de crecimiento.	Mansour & Elsheery (2022)

Fuente: Elaborado por los autores (2025).

Los modelos matemáticos no lineales se pueden clasificar según la función matemática que define la relación entre las variables del sistema. Aquí algunos tipos comunes de no linealidades en función de sus formas matemáticas:

1. Modelos Polinomiales

Estos modelos son expresiones algebraicas en las que las variables están elevadas a potencias mayores que uno, lo que introdu-

ce la no linealidad. $f(x)=ax^2+bx+c$ Aplicación: Modelos de crecimiento o interacción, donde la relación no es proporcional pero sigue un comportamiento curvado.

2. Modelos Racionales

Son expresiones donde las variables aparecen en el numerador y/o denominador en una fracción, lo que puede dar lugar a comportamientos no lineales y singularidades. $f(x)=$

$(cx+d)/(ax+b)$. Aplicación: Modelos de saturación en química y biología, donde el sistema presenta límites de respuesta.

3. Modelos Exponenciales

Involucran la función exponencial, que introduce una curva de crecimiento o decaimiento rápido dependiendo de la base del exponente. $f(x)=ae^{bx}$. Aplicación: Crecimiento poblacional, desintegración radioactiva, y fenómenos de propagación.

4. Modelos Logarítmicos

Usan funciones logarítmicas, que crecen rápidamente al principio y se estabilizan para valores mayores, caracterizando comportamientos de saturación. Ejemplo: $f(x)=a\ln(-bx+c)$ Aplicación: Modelos de crecimiento de poblaciones con capacidad de carga, procesos de aprendizaje en psicología.

5. Modelos Trigonométricos

Involucran funciones trigonométricas, lo que permite representar fenómenos cíclicos y oscilatorios de manera no lineal.

Ejemplo: $f(x)=a\sin(bx+c)$. Aplicación: Modelos de vibraciones, ondas, sistemas de señal y fenómenos periódicos.

6. Modelos de Potencia (Ley de Potencia)

Estos modelos tienen una forma de potencia que puede resultar en crecimiento o decrecimiento acelerado o ralentizado, según el valor del exponente. Ejemplo: $f(x)=ax^b$ Aplicación: Modelos de escala en física, economía y biología, donde los cambios no son proporcionales a las variables.

7. Modelos Logístico (Sigmoidal)

Este tipo de modelo representa crecimiento inicial rápido, que luego se desacelera al acercarse a un valor límite, formando una curva en "S". $f(x)=L/(1+e^{-k(x-x_0)})$.Aplicación: Modelos de crecimiento poblacional limitado por capacidad de carga, propagación de enfermedades.

8. Modelos Hiperbólicos

Utilizan funciones hiperbólicas ($\sinh$, $\cosh$, $\tanh$), que son útiles para representar sistemas que tienen comportamientos de transición entre diferentes estados.

Ejemplo: $f(x)=a\tanh(bx)$. Aplicación: Procesos de transferencia de calor, modelos de transición y dinámica de redes neuronales.

9. Modelos de Raíz Cuadrada (o raíces en general)

Estos modelos tienen una estructura que involucra raíces de las variables, lo cual permite representar fenómenos con respuestas decrecientes a medida que aumentan las entradas.

$f(x)=a\sqrt{x}$ Aplicación: Modelos de fricción, disipación de energía y fenómenos que presentan resistencia proporcional.

10. Modelos Combinados o Mixtos

Combina diferentes tipos de funciones no lineales para modelar fenómenos complejos donde una sola función no es suficiente. $f(x)=a\sin(bx)+ce^{dx}$ Aplicación: Sistemas físicos y biológicos complejos donde interactúan distintos factores y fenómenos.

Cada una de estas formas representa comportamientos únicos y específicos de no linealidad, lo cual permite aplicar el modelo adecuado según la naturaleza del sistema o fenómeno que se quiera analizar o predecir.

La revisión sistemática resalta la relevancia de los modelos matemáticos no lineales en el ámbito de la agricultura, especialmente en la predicción del rendimiento de cultivos, la gestión del riego y el control de plagas y enfermedades Ver tabla 3. Estos modelos han demostrado una alta precisión en áreas como la predicción del rendimiento de cultivos, donde la exactitud oscila entre el 90% y el 99% (Neetu et al., 2022). Esta exactitud es fundamental para optimizar la planificación y el manejo de recursos en áreas con variabilidad climática significativa, proporcionando a los agricultores datos precisos para tomar decisiones informadas (Jayasinghe et al., 2022).

Tabla 5. Modelos matemáticos no lineales aplicados en la agricultura junto con los autores que los han investigado:

Modelo Matemático No Lineal	Aplicación Principal	Autores
Redes Neuronales Artificiales	Predicción de rendimiento, análisis de datos complejos	Boniecki et al. (2023)
Modelos de Crecimiento (Logístico, Gompertz)	Predicción de crecimiento de cultivos	Alessandro et al. (2021)
Modelos Epidemiológicos	Control de plagas y enfermedades	Venturino (2023); Yang & Zhang (2022)
Modelos Fraccionarios	Problemas agroalimentarios, predicción de cosechas	Tomasiello & Macías-Díaz (2023)
Programación Matemática Positiva (PMP)	Optimización de uso de tierras agrícolas	Moulogianni (2022)
Algoritmo Levenberg-Marquardt (LMA)	Control de plagas mediante fumigación	Sulaiman et al. (2022)
Modelos de Programación en Varias Etapas	Optimización de estrategias de venta	Ivanyo et al. (2024)
Modelos de Predicción Basados en Teledetección	Rendimiento de cultivos y monitoreo de humedad	Neetu et al. (2022)
Modelos de Nitrificación y Desnitrificación	Emisiones de N ₂ O en suelos agrícolas	Gabbrielli et al. (2024)
Modelos de Regresión No Lineal	Análisis de producción en cultivos de cosecha múltiple	Jayasinghe et al. (2022)

Fuente: Elaborado por los autores (2025).

En cuanto a la gestión del riego, los modelos matemáticos no lineales se han implementado para conservar recursos hídricos de manera eficiente. Estudios muestran que estos modelos ayudan a evaluar las condiciones de suelo, lo que facilita la aplicación precisa de agua y nutrientes, mejorando así el uso sostenible del recurso (Venu et al., 2023). Además, la incorporación de técnicas como redes neuronales permite analizar grandes volúmenes de datos, mejorando aún más la predicción de las necesidades hídricas (Boniecki et al., 2023).

Por otro lado, el control de plagas y enfermedades mediante modelos matemáticos no lineales también ha mostrado resultados favorables. Estos modelos permiten la detección temprana de infestaciones y bro-

tes, reduciendo la necesidad de pesticidas y mejorando la resiliencia de los cultivos (Vermelho et al, 2024). Sin embargo, la aplicabilidad de estos modelos en diferentes contextos y tipos de cultivos sigue siendo un desafío, debido a la variabilidad de las condiciones locales y la falta de adaptación específica en los modelos (Zhu et al., 2021).

Una limitación importante identificada es la complejidad inherente de estos modelos, que dificulta su implementación en el campo sin el apoyo de expertos (Sulaiman et al., 2022). Además, existe una necesidad de simplificación y adaptación de los modelos para que sean accesibles a los agricultores en regiones con recursos técnicos limitados (Chen et al., 2018).

Discusión

Predicción del rendimiento de cultivos y gestión del riego Los modelos matemáticos no lineales, especialmente las redes neuronales y técnicas de regresión no lineal, han mostrado una precisión significativa en la predicción del rendimiento de los cultivos, con una exactitud que oscila entre el 90% y el 99% (Neetu et al., 2022). Estos modelos no solo permiten prever el crecimiento de los cultivos, sino también optimizar la asignación de recursos como el agua, lo que es fundamental en zonas con alta variabilidad climática y escasez de agua (Venu et al., 2023). Este enfoque optimiza las prácticas de riego, reduciendo el consumo de agua y garantizando un uso eficiente en diferentes contextos agrícolas (Li et al., 2020).

Control de plagas y enfermedades. En el ámbito de la gestión de plagas y enfermedades, los modelos epidemiológicos y de dinámica poblacional proporcionan herramientas efectivas para la identificación temprana y el control de brotes, ayudando a reducir la dependencia de pesticidas (Vermelho et al., 2024). Estos modelos permiten prever y gestionar la aparición de plagas, promoviendo la resiliencia de los cultivos y minimizando el impacto de especies invasoras y enfermedades. Sin embargo, a pesar de sus beneficios, la aplicación práctica de estos modelos enfrenta limitaciones debido a la variabilidad en las condiciones de cultivo y al acceso limitado de muchos agricultores a tecnología avanzada (Venturino, 2023).

Optimización de la fertilización y manejo de recursos hídricos. Los modelos de humedad del suelo y de balance hídrico se utilizan para evaluar la condición hídrica y nutricional de los cultivos, mejorando la eficiencia de la fertilización y promoviendo el uso sostenible de fertilizantes y agua (Ezio, 2023). Estos modelos facilitan un manejo más preciso y controlado de los recursos, evitando el uso excesivo de fertilizantes y reduciendo el impacto ambiental. Asimismo, la progra-

mación en varias etapas ayuda a prever la demanda de agua y la nutrición mineral de los cultivos en función de condiciones climáticas cambiantes (Gabbrielli et al., 2024).

Limitaciones de la implementación en el campo agrícola A pesar de sus múltiples aplicaciones, la complejidad de estos modelos representa un obstáculo para su implementación práctica. La transferencia de modelos no lineales al campo enfrenta dificultades debido a su necesidad de calibración y a la participación de expertos para asegurar su precisión (Zhu et al., 2021). Asimismo, muchos de los estudios revisados se enfocan en áreas geográficas específicas, sin abarcar la adaptabilidad de estos modelos a condiciones de cultivo diversas (Chen et al., 2018).

Aplicaciones avanzadas en agricultura de precisión Las técnicas avanzadas como el uso de redes neuronales y modelos estacionales han demostrado ser útiles en el análisis de grandes conjuntos de datos y en la predicción de la productividad agrícola en diferentes estaciones del año (Boniecki et al., 2023). Este enfoque permite adaptar las estrategias de cultivo a las fluctuaciones de mercado, optimizando los ciclos de venta y reduciendo pérdidas en momentos críticos (Ivanyo et al., 2024).

Conclusiones

Impacto en la sostenibilidad agrícola: los modelos matemáticos no lineales son herramientas eficaces para mejorar la sostenibilidad en la agricultura, lo que incluye la utilización de recursos críticos como el agua y los nutrientes. A través de estos modelos, los recursos químicos como los pesticidas y los fertilizantes se intentan minimizar mientras fomentan un enfoque sobre bases más limpias y más ecológicas de utilización (Vermelho et al., 2024; Venu et al., 2023). Precisión de los rendimientos y gestión de los recursos se muestra que la precisión de los modelos revisados respecto a la predicción de rendimientos de cultivos son elevadas, incluso hasta un 90% -99% en casos espe-

cíficos, lo que es crucial para la planificación y eficaz gestión del cultivo (Neetu et al., 2022; Jayasinghe et al., 2022). Complejidad y acceso limitado: uno de los mayores problemas a enfrentar es la complejidad inherente de los modelos no lineales, lo que hace que sea casi imposible sin la presencia de un personal especializado.

Necesidad de simplificación y adaptación para una adopción generalizada: Se hace necesario simplificar y adaptar estos modelos para que sean más comprensibles y utilizables por los agricultores. Dicha adaptación permitiría llevar las ventajas de los modelos matemáticos no lineales a diferentes situaciones y condiciones al convertirlos en módulos duraderos en el sector agrícola global (Zhu et al., 2021; Boniecki et al., 2023).

Perspectivas para futuras investigaciones: La incorporación de dichas nuevas técnicas de IA y la computación avanzada, tales como las redes neuronales y algoritmos de programación en dos o más etapas, también proporciona una buena oportunidad para que la precisión y versatilidad de estos modelos sean aún mejores. En la investigación futura deberían atender el diseño de modelos que son jerárquicos, tienen flexibilidad ante cambios climáticos y útiles para diferentes tipos de semillas (Boniecki et al., 2023; Sulaiman et al., 2022). Estas conclusiones subrayan las inquietudes y posibilidades de incorporar los modelos matemáticos no lineales en la agricultura y al mismo tiempo presentan debilidades muy importantes respecto a su uso efectivo y utilidad en el campo.

Bibliografía

- Acuayte-Valdes E; Acuayte-Valdes, M; Hernández-López, J; & López-Cruz (2022). La modelación y simulación matemáticas: una herramienta para la protección de cultivos. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 13(6). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342022000601129
- Aguilar Aguilar, F. (2010). Modelos matemáticos no lineales como herramienta para evaluar el crecimiento de tilapia roja (*Oreochromis spp.*) y tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus* Var. Chitralada) alimentadas con dietas peletizadas o extruidas. UNAM. Maestría en producción animal. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/6737>
- Archontoulis, S., & Miguez F. (2015). Nonlinear Regression Models and Applications in Agricultural Research. *Agronomy Journal*, 107(2). 786-798 <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2012.0506>
- Bakhtiar, Toni, Ihza Rizkia Fitri, Farida Hanum, and Ali Kusnanto. (2022). Mathematical Model of Pest Control Using Different Release Rates of Sterile Insects and Natural Enemies. *Mathematics* 10(6): 883. <https://doi.org/10.3390/math10060883>
- Boniecki, Piotr, Agnieszka Sujak, Gniewko Niedbala, Hanna Piekarska-Boniecka, Agnieszka Wawrzyniak, and Andrzej Przybylak. (2023). Neural Modelling from the Perspective of Selected Statistical Methods on Examples of Agricultural Applications *Agriculture* 13(4): 762. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040762>
- Chen, L., Li, J., & Liu, W. (2018). Advances in agricultural models and their applications for sustainable agriculture. *Agricultural Systems*, 163, 135-147. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.006>
- Dal'Col A, Maria, Inês, Diel., B & Giacomini, S. (2021). An approach for experiment evaluations for multiple harvests crops based on non-linear regression. *Horticultura Brasileira*, 39 (3) <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20210302>
- del Pozo, P; & Cossio, N.C (2006). Modelo matemático para predecir el crecimiento y rendimiento de la especie *Bougainvillea campanulata* Heimerl bajo condiciones de monte natural en Puerto Margarita *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(4), 2006, 21-23 Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez La Habana, Cuba
- FAO. (2021). The State of Food and Agriculture 2021: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7348en>
- Fernández-Chuairey L. (2019). Statistical-Mathematical Modeling in Agrarian Processes. An application in Agricultural Engineering. Universidad Agraria de la habana. <https://www.redalyc.org/journal/932/93259288008/>

- Gabbrielli, M, Allegranza M, Ragagnini H, Luca Vitale A, and Perego A.(2024). A Review of the Main Process-Based Approaches for Modeling N2O Emissions from Agricultural Soils *Horticulturae* 10(1): 98. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010098>
- Gálvez, G.; Sigarrosa, A.; López, T; & Fernández, J. (2010). Modelación de cultivos agrícolas. Algunos ejemplos, *Cultivos Tropicales*, 31(3), 60-65. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193217921012.pdf>
- Gao, X., Zhang, W., & Li, S. (2019). Nonlinear mathematical models in crop production and their significance for future food security. *Journal of Agricultural Science*, 157(3), 255-267. <https://doi.org/10.1017/S0021859619000556>
- Jayasinghe, S. L., Ranawana, C. J. K., Liyanage, I. C., & Kaliyadasa, P. E. (2022). Growth and yield estimation of banana through mathematical modelling: a systematic review. *The Journal of Agricultural Science*, 160(3-4), 152-167.
- Li, M., Sun, G., & Liu, Y. (2020). Modeling crop growth and yield prediction using nonlinear approaches in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172, 105331. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105331>
- Li, T., Hasegawa, T., Yin, X., Zhu, Y., Boote, K., Adam, M. & Bouman, B. (2015). Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions. *Glob Chang Biol*, 21(3), 1328-1341. <https://doi.org/10.1111/gcb.12758>
- Mansour S, & Elsheery, N. (2022). *Agricultural System Modeling and Analysis*. CRC Press. 21. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003268468-1/agricultural-system-modeling-analysis-sherine-mansour-nabil-ibrahim-elsheery>
- Mora-Delgado, J., & Holguín, V. (2018). Aplicación de modelos matemáticos no lineales para la estimación de biomasa forrajera de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(1), 43-50. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n1.2018.661>
- Moulogianni, C. (2022). Comparison of Selected Mathematical Programming Models Used for Sustainable Land and Farm Management Land. 11(8): 1293. <https://doi.org/10.3390/land11081293>
- Neetu, Rani., Kiran, Bamel., Abhinav, Shukla., Nandini, Singh. (2022). Analysis of Five Mathematical Models for Crop Yield Prediction. *South Asian Journal of Experimental Biology*, 12(1).46-54 <https://sajeb.org/index.php/sajeb/article/view/510>
- Ortiz, P A.; Ramírez, J L. & Simanca, P L (2010). Desarrollo de un modelo matemático no lineal aplicando mínimos cuadrados en un sistema de nivel. *Tecno Lógicas*, 1, 91-111. <https://www.redalyc.org/pdf/3442/344234322006.pdf>
- Pérez Soto F, Figueroa Hernández E, Sepúlveda Jiménez S, Salazar Moreno R, Godínez Montoya L y Jiménez García (2021). Modelación matemática en agricultura. *Asociación Mexicana de Investigación Interdisciplinaria*. <https://dicea.chapingo.mx/wp-content/uploads/2022/02/Modelacion-Matematica-Agricultura.pdf>
- Qayoom, K., & Manzoor, S. (2024). Mathematical Applications for Sustainable Agricultural Development: A Review. *Asian Research Journal of Agriculture*, 17(3), 92-101. <https://doi.org/10.9734/arja/2024/v17i3475>
- Quintero J; Serna, J; Hurtado N; Rosero Noguera, & Cerón-Muñoz M (2007). Modelos matemáticos para curvas de lactancia en ganado lechero *Rev Col Cienc Pec* 20:149-156.
- Rodríguez González O, Florido Bacallao R & Varela Nualles(2018). Review Applications of mathematical modeling and agricultural crop simulation in Cuba *Cultivos Tropicales*, 39(1), 121-126. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362018000100018&script=sci_abstract&tlng=en
- Sulaiman, M.; Umar, M.; Nonlaopon, K.; Alshammari, F.S. (2022). The Quantitative Features Analysis of the Nonlinear Model of Crop Production by Hybrid Soft Computing Paradigm. *Agronomy* 2022, 12, 799. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040799>
- Tiago Teleken J; Cazonatto Galvão, A & da Silva Robazza, W. (2017). Comparing non-linear mathematical models to describe growth of different animals *Acta Sci., Anim. Sci.* 39 (1) <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v39i1.31366>
- Tomasiello, S.; & Macías-Díaz, J.E (2023). A Mini-Review on Recent Fractional Models for Agri-Food Problems. *Mathematics*, 11, 2316. <https://doi.org/10.3390/math11102316>
- Torres Castillo R (2021) Importancia de las ciencias matemáticas en la agricultura. *Green World J* 4:6. <https://doi.org/10.53313/gwj42008>
- Venturino E. (2023). The usefulness of mathematics in agriculture, for the environment and in contrasting diseases: insights from a wide range of simple models. *Communications in Applied and Industrial Mathematics*, Commun. Appl. Ind. Math. 15 (1), 27-49. <https://intapi.sciendo.com/pdf/10.2478/caim-2024-0002>

Venu, V., Sreenath B., & Ramdas E. R. (2023). Various Mathematical Models in Agricultural Engineering. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 42(41), 13–20. <https://doi.org/10.9734/cjast/2023/v42i414263>

Vermelho, A, B, Vinícius Moreira J, Teixeira I, Akamine, Cardoso V, and . Mansoldo F. (2024). Agricultural Pest Management: The Role of Microorganisms in Biopesticides and Soil Bioremediation Plants 1319: 2762. <https://doi.org/10.3390/plants13192762>

Zhu, X., Wang, Q., & Su, F. (2021). Challenges and opportunities in applying nonlinear mathematical models to agricultural systems. *Agricultural Water Management*, 248, 106770. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106770>



CITAR ESTE ARTICULO:

Suarez Muñoz, B. S., Flores Cadena, C. A., Cedeño Bermeo, J. E., & Chóez Acosta, L. A. (2025). Modelos matemáticos no lineales aplicados a la agricultura. *Revisión sistemática. RECIMUNDO*, 9(2), 180–200. [https://doi.org/10.26820/recimundo/9.\(2\).abril.2025.180-200](https://doi.org/10.26820/recimundo/9.(2).abril.2025.180-200)