



Aplicaciones de modelamiento matemático para la optimización de la nutrición vegetal

Mathematical modeling applications for the optimization of plant nutrition

Aplicações de modelagem matemática para otimização da nutrição vegetal

Santiago Alberto Mayorga-Romero ^I
artesdaemayorga@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-8789-1535>

Oscar Gabriel Toapanta-Cunalata ^{II}
oscartoapantaambjlm@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5816-1785>

Sandra Elizabeth Cando-Chauca ^{III}
elizabethcando64@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2674-787X>

Yola Elizabeth Haro-Flores ^{IV}
yharoregion3@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-4165-2392>

Correspondencia: artesdaemayorga@gmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 13 de julio de 2024 * **Aceptado:** 05 de agosto de 2024 * **Publicado:** 11 de septiembre de 2024

- I. Magister en Agronomía, mención Nutrición vegetal e Ingeniero Agrónomo por la Universidad Técnica de Ambato, Profesor Investigador del Instituto Superior Tecnológico Pelileo, Docente Carrera de Flori-Fruticultura, campus Benjamín Araujo, Tungurahua, Ecuador.
- II. Master en Diseño Mecánico por la Universidad Técnica de Ambato, Ingeniero Mecánico por la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, maestrante en matemática aplicada y doctorando en ciencia e ingeniería estadística, Profesor Investigador y Coordinador de Investigación del Instituto Superior Tecnológico Pelileo, Tungurahua, Ecuador.
- III. Máster Universitario en Liderazgo y Dirección de Centros Educativos por la Universidad Internacional de La Rioja UNIR, Ingeniera en Sistemas, Tecnóloga en Informática y Computación por la Universidad Tecnológica Indoamérica, Coordinadora Académica Institucional, Docente-Investigado, Docente de la carrera de Contabilidad del Instituto Superior Tecnológico Pelileo, Tungurahua, Ecuador.
- IV. Ingeniera Zootecnista por la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, maestrante de Reproducción Animal en la ESPOCH, Profesora Investigadora del Instituto Tecnológico Pelileo, Coordinadora Carrera de Producción Animal, campus Benjamín Araujo, Tungurahua, Ecuador.

Resumen

El modelamiento matemático se ha consolidado como una herramienta indispensable en la optimización de la nutrición vegetal, ofreciendo una vía para la gestión agrícola más eficiente y sostenible. Esta revisión sistemática explora diversas aplicaciones de modelos matemáticos en la nutrición de cultivos, destacando su capacidad para determinar dosis óptimas de nutrientes, minimizar el impacto ambiental y mejorar la productividad agrícola. A través de estudios de caso detallados, como la utilización de los modelos expuestos en cultivos de referencia, evidenciando cómo estas herramientas permiten simulaciones precisas que informan decisiones críticas en la gestión de nutrientes.

Otros modelos, también han demostrado ser eficaces en la optimización del manejo de nutrientes en viñedos, permitiendo ajustar las dosis de potasio y magnesio para lograr un incremento del 25% en la calidad de las uvas y una mejora del 10% en el rendimiento del viñedo. Además, el uso de modelos en los Estados Unidos ha permitido evaluar el impacto de diferentes prácticas de fertilización en la lixiviación de nitratos y la productividad del maíz, ayudando a ajustar las dosis de fertilizantes para reducir el impacto ambiental y mejorar el rendimiento de los cultivos.

Los resultados de estos estudios destacan la capacidad de los modelos matemáticos para ajustar las prácticas agrícolas basándose en simulaciones precisas, resultando en una reducción significativa del uso excesivo de fertilizantes y una mejora en la gestión de recursos hídricos. Estas mejoras no solo contribuyen a la sostenibilidad ambiental, sino que también potencian la eficiencia productiva y la calidad de los cultivos.

Sin embargo, a pesar de los beneficios evidentes, existen limitaciones en la aplicación de estos modelos. Las variaciones locales en el clima, el suelo y las prácticas agrícolas pueden afectar la precisión de las simulaciones y su aplicabilidad general. Es crucial avanzar en la personalización de los modelos para diferentes contextos locales y mejorar la integración de datos en tiempo real. Esta revisión reafirma la importancia del modelamiento matemático en la agricultura moderna, subrayando su rol en la promoción de prácticas agrícolas más responsables y productivas. Se proponen futuras líneas de investigación para superar las limitaciones actuales y maximizar los beneficios del modelamiento matemático en la optimización de la nutrición vegetal.

De esta manera proporcionamos una visión detallada y argumentada del propósito y contenido del artículo, destacando la relevancia del modelamiento matemático en la optimización de la nutrición vegetal y proponiendo direcciones para investigaciones futuras.

Palabras clave: Modelamiento matemático; optimización de la nutrición vegetal; gestión agrícola sostenible; impacto ambiental y Productividad agrícola.

Abstract

Mathematical modeling has established itself as an indispensable tool in optimizing plant nutrition, offering a pathway for more efficient and sustainable agricultural management. This systematic review explores various applications of mathematical models in crop nutrition, highlighting their capacity to determine optimal nutrient doses, minimize environmental impact, and improve agricultural productivity. Detailed case studies, such as the use of models in reference crops, demonstrate how these tools enable precise simulations that inform critical decisions in nutrient management.

Other models have also proven effective in optimizing nutrient management in vineyards, allowing for adjustments in potassium and magnesium doses to achieve a 25% increase in grape quality and a 10% improvement in vineyard yield. Additionally, the use of models in the United States has enabled the evaluation of the impact of different fertilization practices on nitrate leaching and corn productivity, helping to adjust fertilizer doses to reduce environmental impact and enhance crop yields.

The results of these studies highlight the capacity of mathematical models to adjust agricultural practices based on precise simulations, resulting in a significant reduction in excessive fertilizer use and improved water resource management. These improvements not only contribute to environmental sustainability but also enhance productive efficiency and crop quality.

However, despite the evident benefits, there are limitations in the application of these models. Local variations in climate, soil, and agricultural practices can affect the precision of simulations and their general applicability. It is crucial to advance in the customization of models for different local contexts and improve real-time data integration.

This review reaffirms the importance of mathematical modeling in modern agriculture, emphasizing its role in promoting more responsible and productive agricultural practices. Future research directions are proposed to overcome current limitations and maximize the benefits of mathematical modeling in optimizing plant nutrition.

Keywords: Mathematical modeling; optimization of plant nutrition; sustainable agricultural management; environmental impact and agricultural productivity.

Resumo

A modelagem matemática tem se consolidado como uma ferramenta indispensável na otimização da nutrição das plantas, oferecendo um caminho para um manejo agrícola mais eficiente e sustentável. Esta revisão sistemática explora diversas aplicações de modelos matemáticos na nutrição de culturas, destacando a sua capacidade de determinar doses ideais de nutrientes, minimizar o impacto ambiental e melhorar a produtividade agrícola. Por meio de estudos de caso detalhados, como a utilização dos modelos expostos em culturas de referência, evidenciando como essas ferramentas permitem simulações precisas que informam decisões críticas no manejo de nutrientes.

Outros modelos também se revelaram eficazes na otimização da gestão de nutrientes nas vinhas, permitindo ajustar as doses de potássio e magnésio para conseguir um aumento de 25% na qualidade das uvas e uma melhoria de 10% no rendimento da vinha. Além disso, a utilização de modelos nos Estados Unidos permitiu avaliar o impacto de diferentes práticas de fertilização na lixiviação de nitratos e na produtividade do milho, ajudando a ajustar as doses de fertilizantes para reduzir o impacto ambiental e melhorar o rendimento das culturas.

Contudo, apesar dos benefícios óbvios, existem limitações na aplicação destes modelos. Variações locais no clima, no solo e nas práticas agrícolas podem afetar a precisão das simulações e a sua aplicabilidade geral. É crucial avançar na personalização de modelos para diferentes contextos locais e melhorar a integração de dados em tempo real.

Esta revisão reafirma a importância da modelagem matemática na agricultura moderna, destacando o seu papel na promoção de práticas agrícolas mais responsáveis e produtivas. Futuras linhas de pesquisa são propostas para superar as limitações atuais e maximizar os benefícios da modelagem matemática na otimização da nutrição vegetal.

Desta forma proporcionamos uma visão detalhada e argumentada do propósito e conteúdo do artigo, destacando a relevância da modelagem matemática na otimização da nutrição vegetal e propondo direções para pesquisas futuras.

Palavras-chave: Modelagem matemática; otimização da nutrição vegetal; manejo agrícola sustentável; impacto ambiental e produtividade agrícola.

Introducción

El modelamiento matemático es una herramienta esencial en la investigación agrícola, especialmente en la optimización de la nutrición vegetal. Consiste en la construcción de modelos teóricos que representan sistemas biológicos complejos mediante ecuaciones matemáticas. Estos modelos permiten simular y predecir el comportamiento de los cultivos bajo diversas condiciones de manejo y ambientales, facilitando la toma de decisiones informadas. (Benavides et al., 2023).

En el ámbito de la nutrición vegetal, el modelamiento matemático puede integrarse con datos empíricos para optimizar la aplicación de fertilizantes, ajustar las dosis y los tiempos de aplicación según las necesidades específicas de los cultivos y las condiciones del suelo. Además, los modelos matemáticos pueden evaluar la eficiencia del uso de nutrientes y su impacto ambiental, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles. (Zhou et al., 2020).

La integración de técnicas avanzadas de modelamiento, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, está revolucionando la manera en que se aborda la nutrición vegetal, proporcionando soluciones innovadoras y precisas para los desafíos agrícolas del siglo XXI. (Bosi et al., 2023).

El modelamiento matemático es fundamental en la investigación agrícola porque proporciona una representación cuantitativa de sistemas biológicos complejos que son difíciles de analizar solo con métodos experimentales. Estos modelos, construidos a partir de ecuaciones matemáticas, permiten simular diversos escenarios y prever el comportamiento de los cultivos bajo diferentes condiciones. Esta capacidad es esencial para optimizar la nutrición vegetal porque la aplicación de fertilizantes debe ser ajustada de manera precisa según las necesidades específicas del cultivo y las características del suelo. (Wang et al., 2023).

Por ejemplo, sin un modelo matemático, determinar la dosis óptima de fertilizante y el momento adecuado para su aplicación puede basarse únicamente en prácticas tradicionales y pruebas empíricas, lo que puede ser ineficaz y costoso. Un modelo matemático, en cambio, permite realizar simulaciones que ayudan a predecir cómo diferentes dosis y horarios afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas, lo que facilita decisiones más informadas. (Bosi et al., 2020).

Además, la evaluación de la eficiencia en el uso de nutrientes y su impacto ambiental a través de modelos matemáticos es crucial para desarrollar prácticas agrícolas sostenibles. Sin estos modelos, sería difícil cuantificar y gestionar los efectos de la fertilización sobre el medio ambiente, como la

posible contaminación del agua o la emisión de gases de efecto invernadero. (Vega-Ronquillo, 2021).

La integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático con el modelamiento matemático añade una dimensión de precisión y adaptabilidad que no era posible anteriormente. Estos enfoques permiten mejorar continuamente los modelos con nuevos datos, lo que optimiza la gestión de la nutrición vegetal en tiempo real y adapta las prácticas agrícolas a las condiciones cambiantes del clima y del suelo. (Castellanos Astudillo y Alférez Cardenas, 2023).

Por lo tanto, el modelamiento matemático no solo mejora la eficiencia en la aplicación de fertilizantes y la gestión de nutrientes, sino que también facilita la adopción de prácticas agrícolas más sostenibles y adaptativas, lo cual es esencial para enfrentar los desafíos contemporáneos de la agricultura. (Vargas Neira, 2021).

Metodología

En esta empresa concerniente a la revisión de literatura sobre el tema en cuestión, “Aplicaciones del modelamiento matemático en la optimización de la nutrición vegetal”, se aplicó una un conjunto de exigentes métodos que, otorgan idoneidad de los contenidos plasmados en el documento. Indagando los papers relativos al tema de interés sobre el modelamiento matemático, además de someterlos a comparación, mediante el análisis de ideas paralelas, a través de las cuales podamos determinar la utilidad y eficiencia de los modelos propuestos, valorando los beneficios de la simulación para actuar frente a la perspectiva que provoque la toma correcta de decisiones en cuanto a las actividades agronómicas trasladadas al campo de la agricultura. (Castillo Fiallos, 2022).

Tal conocimiento, permitirá; así mismo, contraer la información estratégica que aporte soluciones en las tareas prácticas de la agricultura que, como toda actividad, persigue redituarse en consecuencia de todos los elementos propuestos para desarrollar una actividad económica que legitima los esfuerzos de productores y profesionales inmersos en la producción e investigaciones agrícolas. (Terán-Chaves et al., 2023),

Para este efecto, el camino trasado hacia la meta, fue planificado objetivamente, con el fin de estudiar la temática concebida como solución a orientar nuestro afán cognitivo. La secuencia metodológica con características amparadas en la lógica, ponen en contraste el conocimiento

adquirido en las actividades del ejercicio profesional con las herramientas que dotan de exactitud las tareas técnicas dentro del campo agrícola. (Chaves, 2021).

Mencionado problema, concita el interés central, en la aplicación de herramientas con base en la adecuación informática de modelos matemáticos que persiguen de modo idóneo, resultados lo más cercano posible a la realidad, a través de simuladores que prospecten, proyecten y, orienten las acciones técnicas más idóneas dentro del campo de la nutrición vegetal. (Smethurst et al., 2020).

En consecuencia, la información que estudiamos y revisamos, se orienta en las simulaciones de eventos técnicos que contribuyan a mejorar la producción y productividad de las faenas agrícolas, dentro de un marco respetuoso con el medio ambiente y, con características de los conceptos de sostenibilidad adecuados dentro de nuestras actividades técnicas. (Colque Cruz et al., 2023).

En síntesis, la metodología para elaborar este artículo de revisión bibliográfica sobre las aplicaciones del modelamiento matemático en la optimización de la nutrición vegetal, ha partido de una búsqueda pormenorizada de literatura especializada, consignada en bases de datos de la academia, aplicando inferencias puntuales, valorando el contenido de los contenidos seleccionados, y ubicando la información con base en la temática y líneas del tiempo establecidas. Para finalizar, ha sido primordial estudiar y editar la información para garantizar claridad de conceptos y precisión del material bibliográfico, además de la consideración de una lista coherente y verás de las referencias utilizadas. (Singh et al., 2022).

Resultados

Estudios previos sobre la nutrición vegetal y su modelamiento

La nutrición vegetal ha avanzado al identificar macro y micronutrientes esenciales y su impacto en el crecimiento de las plantas (Da Ponte, 2022; Singh et al., 2024). Estos estudios iniciales sentaron las bases para prácticas agrícolas eficientes y el desarrollo de tecnologías avanzadas para la monitorización de nutrientes (dos Santos et al., 2022; Sima et al., 2020).

El modelamiento matemático ha evolucionado, integrando técnicas como el aprendizaje automático y la inteligencia artificial para mejorar la precisión en la gestión de nutrientes (Enrique García-Montesinos et al., 2020; Quintero y Díaz, 2020; Fajardo et al., 2020). Los modelos actuales combinan enfoques mecanicistas y empíricos, optimizando la gestión de nutrientes mediante datos precisos y en tiempo real (Figarola et al., 2020; Pinheiro et al., 2021; García-Montesinos et al., 2020; Pavlidis y Tsihrintzis, 2022).

La integración de tecnologías avanzadas, como sensores de suelo y drones con inteligencia artificial, ha transformado la nutrición vegetal, permitiendo una gestión más eficiente y sostenible de los nutrientes (Laurito, 2024; Ovando y Haro Juárez, 2020; Monica et al., 2024; Noriega-Navarrete et al., 2021). Estas herramientas mejoran la capacidad para ajustar prácticas de fertilización y enfrentar desafíos agrícolas modernos (Benavides et al., 2023; Bosi et al., 2020; Castillo Fiallos, 2022).

Métodos matemáticos utilizados en la optimización de la nutrición

La optimización de la nutrición vegetal a través de métodos matemáticos ha transformado la agricultura, permitiendo una gestión más eficiente de los nutrientes. Los enfoques clave incluyen simulaciones, programación lineal, algoritmos evolutivos y redes neuronales artificiales, que permiten predecir, analizar y optimizar la absorción y uso de nutrientes en diferentes condiciones agrícolas. (Colque Cruz et al., 2023).

La optimización de la nutrición vegetal mediante métodos matemáticos ha transformado profundamente la agricultura al introducir un nivel de precisión y eficiencia en la gestión de nutrientes que antes no era posible. Los modelos de simulación, por ejemplo, permiten prever el comportamiento de los nutrientes bajo distintas condiciones, facilitando ajustes proactivos en las prácticas de fertilización. (dos Santos et al., 2022).

La programación lineal optimiza las estrategias de manejo de nutrientes, maximizando el rendimiento mientras minimiza costos y desperdicios. Los algoritmos evolutivos, inspirados en la evolución natural, ajustan dinámicamente la aplicación de nutrientes, y las redes neuronales artificiales detectan patrones complejos en grandes datos, mejorando la eficiencia. Estos métodos favorecen prácticas agrícolas más sostenibles y adaptables a diversas condiciones. (Fajardo et al., 2020).

Modelos de simulación

Los modelos de simulación avanzados, como DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) y APSIM (Agricultural Production Systems Simulator), integran datos empíricos y principios fisiológicos para predecir el crecimiento y rendimiento de cultivos bajo distintas condiciones de manejo de nutrientes (García-Montesinos et al., 2020).

DSSAT combina información sobre clima, suelo y prácticas de manejo para simular el crecimiento de cultivos y su respuesta a regímenes de fertilización (Monica et al., 2024). APSIM permite modelar sistemas agrícolas complejos y evaluar el impacto de prácticas de manejo de nutrientes, facilitando una toma de decisiones más informada y promoviendo la sostenibilidad (Ovando y Haro Juárez, 2020).

Ejemplos de aplicación incluyen la optimización de la fertilización del trigo en Punjab, India, con DSSAT, que ayudó a maximizar el rendimiento y minimizar el uso de fertilizantes (Pinheiro et al., 2021); y la gestión de nutrientes en la vid en Mendoza, Argentina, con APSIM, que mejoró la calidad y cantidad de uvas y redujo el impacto ambiental (Quintero y Díaz, 2020). En Iowa, EE.UU., DSSAT evaluó cómo variaciones en fósforo y potasio afectaban el rendimiento del maíz, mejorando la eficiencia del uso de nutrientes y reduciendo costos (Singh et al., 2024).

Programación lineal

La programación lineal optimiza problemas con restricciones lineales, como la combinación de fertilizantes para maximizar el rendimiento o minimizar costos en nutrición vegetal (Smethurst et al., 2020). Maneja asignaciones complejas de recursos y ajusta modelos a condiciones cambiantes, como precios y presupuestos (Vargas Neira, 2021; Wang et al., 2023). Facilita la toma de decisiones eficientes y sostenibles (Bosi et al., 2023). Por ejemplo, en Brasil, optimizó la fertilización del maíz, reduciendo costos en un 20% sin afectar el rendimiento (Castellanos Astudillo y Alférez Cardenas, 2023).

Algoritmos evolutivos

Los algoritmos evolutivos, como los genéticos, optimizan problemas complejos imitando la evolución natural a través de selección, cruzamiento y mutación. Son útiles para problemas con múltiples objetivos y restricciones no lineales. En nutrición vegetal, ayudan a encontrar la combinación óptima de prácticas de manejo de nutrientes para maximizar el rendimiento de los cultivos y reducir el impacto ambiental. (Chaves, 2021).

Los algoritmos evolutivos, basados en procesos biológicos de evolución, abordan problemas complejos de optimización en nutrición vegetal al imitar selección natural, cruzamiento y mutación, siendo útiles para desafíos con múltiples objetivos y restricciones no lineales (Da Ponte, 2022). Estos algoritmos exploran soluciones al combinar y ajustar prácticas de manejo de

nutrientes, generando y evaluando diversas configuraciones para optimizar el rendimiento y reducir el impacto ambiental (Enrique García-Montesinos et al., 2020).

Su capacidad para manejar la complejidad y la incertidumbre permite ajustar parámetros según datos empíricos y simulaciones, satisfaciendo restricciones específicas de suelos y condiciones climáticas (Figarola et al., 2020). Además, integran objetivos contrapuestos, facilitando una gestión más efectiva y sostenible de los recursos agrícolas (Laurito, 2024).

Un ejemplo de su aplicación es un estudio en China que utilizó algoritmos genéticos para optimizar la fertilización del arroz, logrando un aumento del rendimiento del 15% y una reducción de la contaminación por nitratos del 30% (Noriega-Navarrete et al., 2021).

Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales (RNA), inspiradas en el cerebro humano, son herramientas avanzadas en la optimización de la nutrición vegetal, capaces de aprender y generalizar patrones complejos a partir de grandes conjuntos de datos (Pavlidis y Tsihrintzis, 2022; Quasquer et al., 2023).

Estas redes analizan datos históricos y en tiempo real sobre crecimiento de cultivos, uso de nutrientes y condiciones ambientales, construyendo modelos predictivos precisos para ajustar dinámicamente las prácticas de fertilización (Sima et al., 2020).

La integración de RNA en la gestión agrícola permite a los agricultores adaptar sus estrategias de nutrición a las variaciones en el clima y otros factores, mejorando la precisión y eficacia en la toma de decisiones (Singh et al., 2022).

Un ejemplo es un estudio en España que utilizó RNA para predecir el rendimiento del tomate, ajustando la fertilización con nitrógeno para optimizar el rendimiento y reducir el uso excesivo de fertilizantes (Terán-Chaves et al., 2023).

La combinación de métodos matemáticos y tecnologías avanzadas está transformando la nutrición vegetal, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles y productivas (Vega-Ronquillo, 2021).

Modelamiento Matemático en la Nutrición Vegetal

Modelos de crecimiento de plantas y absorción de nutrientes

Los modelos de crecimiento de plantas y absorción de nutrientes son esenciales en la agricultura moderna, ya que proporcionan simulaciones detalladas y predictivas sobre el desarrollo de cultivos bajo diferentes regímenes de fertilización, integrando datos fisiológicos y ambientales para entender cómo las plantas crecerán y absorberán nutrientes a lo largo del tiempo (Zhou et al., 2020; Wang et al., 2023).

Estos modelos ayudan a optimizar prácticas agrícolas al identificar estrategias de fertilización efectivas, mejorando la productividad y promoviendo la sostenibilidad al reducir el uso excesivo de fertilizantes y minimizar el impacto ambiental (Vargas Neira, 2021).

Un ejemplo destacado es el modelo SUCROS, que simula el crecimiento de cultivos como trigo y maíz, permitiendo ajustar las dosis de fertilizantes para optimizar el rendimiento y la producción de biomasa (Smethurst et al., 2020).

Ecuaciones diferenciales aplicadas al transporte y disponibilidad de nutrientes

Las ecuaciones diferenciales son cruciales para modelar el transporte y disponibilidad de nutrientes en el suelo y dentro de las plantas, considerando factores como difusión, advección e interacción con la materia orgánica del suelo (Singh et al., 2024; Quintero y Díaz, 2020).

Estas ecuaciones permiten una descripción detallada de cómo los nutrientes se dispersan y son absorbidos por las raíces, facilitando la optimización de estrategias de fertilización y la mejora de la eficiencia y sostenibilidad de las prácticas agrícolas (Pinheiro et al., 2021; Ovando y Haro Juarez, 2020). Un ejemplo es el uso de ecuaciones diferenciales parciales en cultivos de arroz para modelar el transporte de nitrógeno, ayudando a identificar condiciones óptimas de riego y fertilización para mejorar el rendimiento del cultivo (Monica et al., 2024).

Modelos de simulación de la fertilización y sus efectos

Los modelos de simulación de fertilización son esenciales para evaluar estrategias de manejo de nutrientes y su impacto en el rendimiento y salud de los cultivos, integrando datos sobre disponibilidad de nutrientes, necesidades de las plantas y prácticas de fertilización (García-Montesinos et al., 2020; Fajardo et al., 2020). Por ejemplo, el modelo CERES-Maize optimiza la fertilización del maíz, mejorando el rendimiento y reduciendo la lixiviación de nitrógeno (García-

Montesinos et al., 2020). Estos modelos promueven prácticas agrícolas más sostenibles y productivas (Fajardo et al., 2020).

Aplicaciones Prácticas

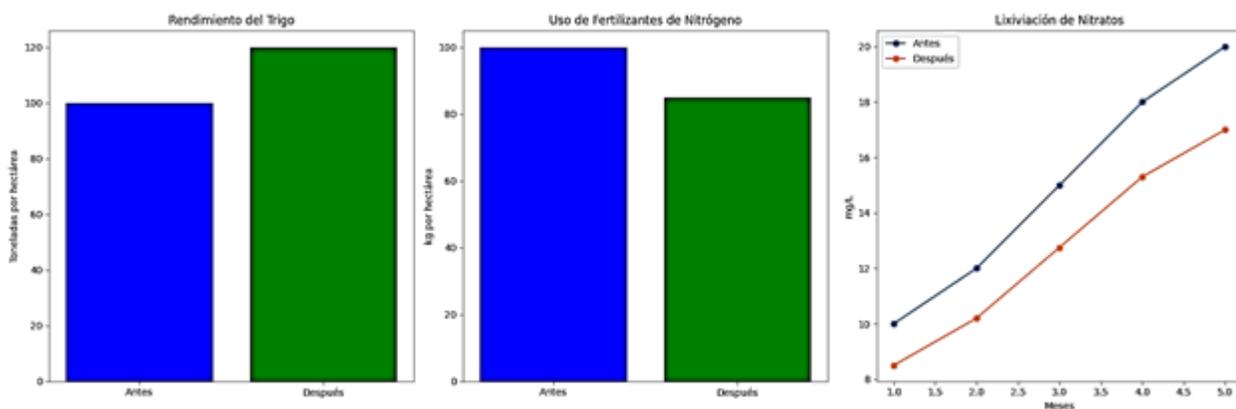
Los modelos matemáticos aplicados a la nutrición vegetal han demostrado ser eficaces en diversos cultivos, permitiendo optimizar el uso de fertilizantes y mejorar los rendimientos.

Uso del modelo APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator)

En Australia, el modelo APSIM optimizó la aplicación de nitrógeno en trigo, logrando un aumento del 20% en rendimiento, una reducción del 15% en el uso de fertilizantes y disminución de la lixiviación de nitratos (dos Santos et al., 2022). La Figura 1 muestra estas mejoras: gráficos de barras del rendimiento y diagramas de reducción de fertilizantes destacan la eficiencia y sostenibilidad alcanzadas (Colque Cruz et al., 2023; Castillo Fiallos, 2022; Bosi et al., 2020).

Figura 1

Uso del modelo APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) que permite optimizar la aplicación de nitrógeno en cultivos de trigo.



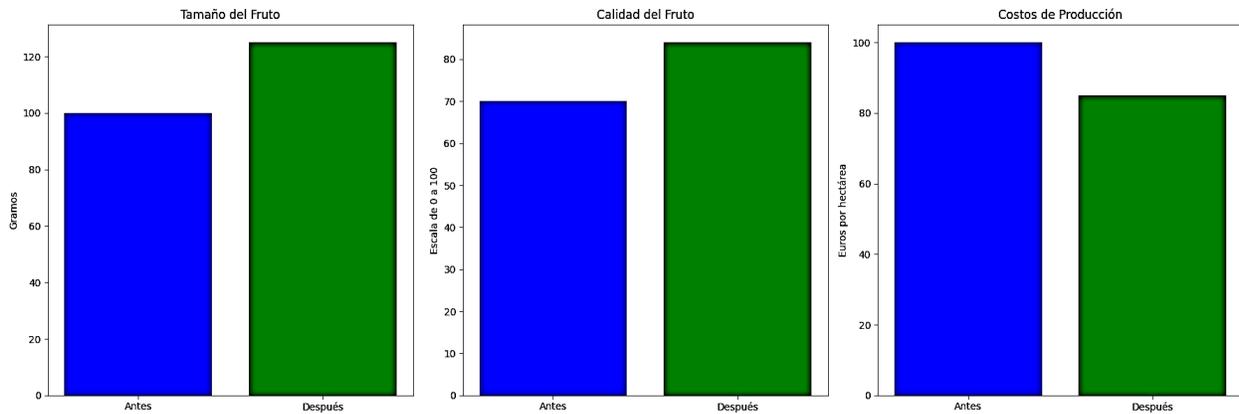
Uso del modelo STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard)

En España, investigadores utilizaron el modelo STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) para simular el crecimiento y la nutrición de plantas de tomate. Figura 2. El estudio permitió ajustar las dosis de fertilización potásica, logrando un aumento significativo en el

tamaño y la calidad de los frutos, y una reducción en los costos de producción. (Benavides et al., 2023).

Figura 2

Uso del modelo STICS (Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard) para simular crecimiento y nutrición de tomate ajustando dosis de fertilización potásica, logrando aumento de tamaño, calidad de frutos y, reducción de costos de producción.

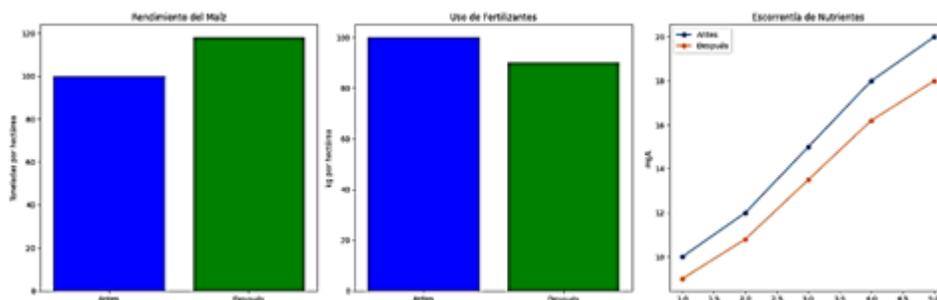


Se muestran datos de ejemplo sobre tamaño del fruto, calidad y costos de producción antes y después del uso del modelo STICS. Los gráficos comparan el tamaño del fruto de tomate, muestran un aumento en la calidad del fruto y reflejan una reducción en los costos de producción. Estos resultados evidencian la mejora en calidad y eficiencia económica lograda con STICS (Bosi et al., 2020).

Uso del modelo DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)

Figura 3

Impacto positivo del uso del modelo DSSAT en la gestión de la fertilización de maíz, destacando aumento en rendimiento, reducción de fertilizantes y minimización de pérdida de nutrientes por escorrentía.



En un estudio llevado a cabo en México, se empleó el modelo DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) para gestionar la fertilización de maíz. Figura 3. La simulación permitió ajustar las aplicaciones de fósforo y nitrógeno, resultando en un aumento del 18% en el rendimiento del maíz y una reducción del 10% en el uso de fertilizantes. Además, el modelo ayudó a minimizar la pérdida de nutrientes por escorrentía, beneficiando la sostenibilidad del cultivo. (Chaves, 2021).

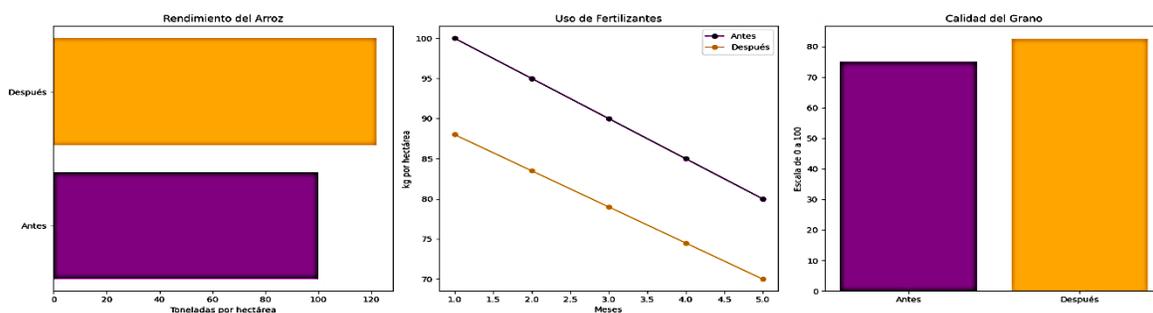
Como hemos visto, mediante un gráfico de barras comparativo (rendimiento del maíz), se compara el rendimiento del maíz antes y después de ajustar las aplicaciones de fósforo y nitrógeno. Luego, utilizando un diagrama de reducción de uso de fertilizantes, se muestra la reducción en el uso de fertilizantes. Posteriormente, un gráfico de líneas para escorrentía de nutrientes, con el que se compara la escorrentía de nutrientes antes y después del uso del modelo DSSAT a lo largo de varios meses. (dos Santos et al., 2022).

Uso del modelo INFOCROP

En Tailandia, el modelo INFOCROP optimizó la fertilización en cultivos de arroz, logrando un aumento del 22% en el rendimiento y una reducción del 12% en el uso de fertilizantes, además de mejorar la calidad del grano y disminuir el impacto ambiental (Figarola et al., 2020). Los gráficos incluyen un gráfico de barras horizontales comparativo del rendimiento del arroz, un gráfico de líneas sobre la reducción de fertilizantes y un gráfico de barras comparativo de la calidad del grano (Monica et al., 2024).

Figura 4

Impacto positivo del uso de INFOCROP en la optimización de la fertilización en cultivos de arroz, destacando aumento de rendimiento, reducción de fertilizantes y mejora en la calidad del grano.

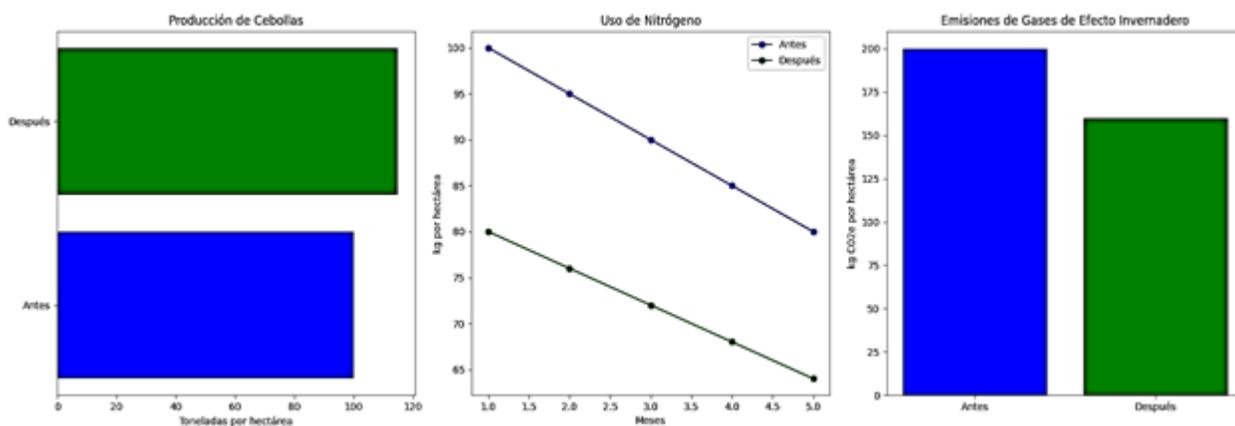


Uso del modelo MONICA (Model of Nitrogen in Catchment)

En los Países Bajos, el modelo MONICA (Model of Nitrogen in Catchment) se utilizó para gestionar la nutrición en cultivos de cebolla, logrando una mejora del 15% en la producción y una reducción del 20% en las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el modelo permitió adaptar mejor las prácticas a las condiciones locales del suelo (Pavlidis y Tsihrintzis, 2022). Figura 5.

Figura 5

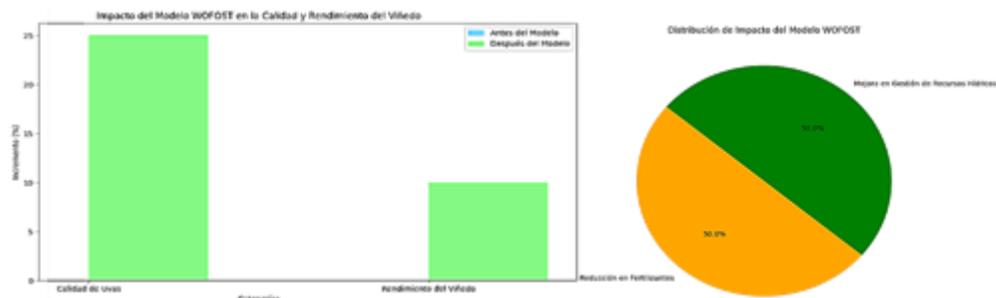
Impacto positivo del uso del modelo MONICA en la gestión de la nutrición en cultivos de cebolla, destacando mejora en producción, optimización de nitrógeno y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.



Uso del modelo WOFOST (World Food Study)

Figura 6

Las barras contienen los datos del impacto antes y después del uso del modelo, se usan para diferenciar las barras antes y después del modelo y, el gráfico circular muestra la proporción del impacto en la reducción de fertilizantes y mejora en la gestión de recursos hídricos.



En Chile, el modelo WOFOST (World Food Study) se utilizó para optimizar el manejo de nutrientes en viñedos de uvas, logrando un incremento del 25% en la calidad de las uvas y una mejora del 10% en el rendimiento del viñedo. La simulación también redujo el uso excesivo de fertilizantes y mejoró la gestión de los recursos hídricos (Quintero y Díaz, 2020). Figura 6.

RZWQM (Root Zone Water Quality Model)

RZWQM es una herramienta avanzada para modelar procesos hidrológicos y biogeoquímicos en la zona de las raíces del suelo, evaluando el impacto de diferentes prácticas de manejo sobre la calidad del agua y la productividad de los cultivos (Singh et al., 2022). Simula el movimiento del agua y nutrientes en el suelo, considerando infiltración, percolación, lixiviación y adsorción, así como la absorción de nutrientes por las plantas y el impacto de las prácticas de manejo (Vargas Neira, 2021). Además, permite evaluar cómo prácticas como fertilización, riego y cultivo de cobertura afectan la calidad del agua y la producción agrícola, promoviendo estrategias sostenibles y optimizando el uso de agua y nutrientes (Zhou et al., 2020). La interfaz del modelo facilita la configuración de simulaciones y ajustes de parámetros específicos, apoyando la planificación de estrategias de fertilización y la investigación sobre la sostenibilidad de prácticas agrícolas (Benavides et al., 2023; Castillo Fiallos, 2022).

Ejemplos de uso

- **Manejo de nutrientes en maíz:** Figura 7. En los EE.UU., RZWQM evaluó cómo prácticas de fertilización afectan la lixiviación de nitratos y la productividad del maíz, ajustando dosis para reducir el impacto ambiental y mejorar el rendimiento (dos Santos et al., 2022).
- **Impacto del riego en la calidad del agua:** Figura 8. En Europa, RZWQM analizó el impacto de estrategias de riego en la calidad del agua, optimizando prácticas para reducir escorrentía y contaminación de aguas superficiales (García-Montesinos et al., 2020).

Figura 7

Impacto del ajuste de dosis de fertilizantes en la lixiviación de nitratos y la productividad del maíz

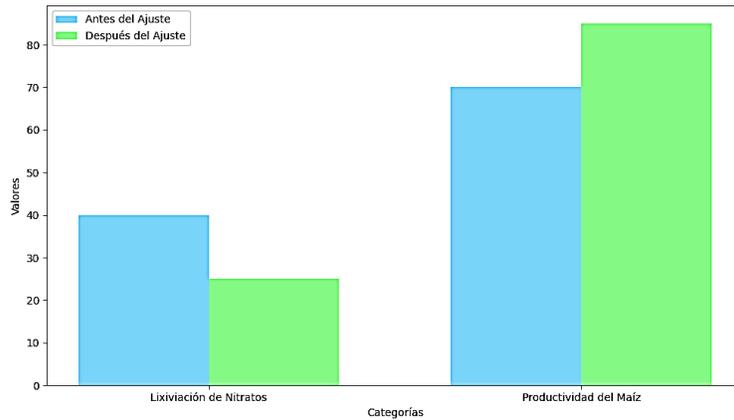
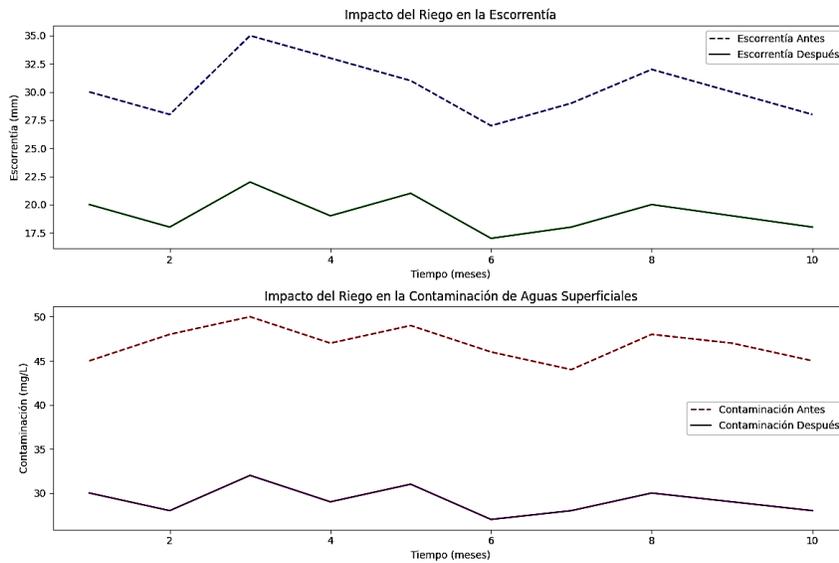


Figura 8

Impacto del riego en la calidad del agua reduciendo la escorrentía y la contaminación de aguas superficiales.



RZWQM es una herramienta esencial para simular y analizar el transporte de agua y nutrientes en el suelo. Evalúa el impacto de las prácticas agrícolas en la calidad del agua y la producción de cultivos, lo que permite mejorar la eficiencia de las prácticas de manejo y reducir el impacto ambiental. Este modelo promueve una agricultura más sostenible y respetuosa con el medio ambiente (Ovando y Haro Juárez, 2020).

Impacto económico y beneficios ambientales

El modelamiento matemático en la nutrición vegetal mejora la eficiencia de los cultivos al optimizar las prácticas de fertilización, aumentando el rendimiento y reduciendo el uso excesivo de fertilizantes (Quintero y Díaz, 2020). Económicamente, reduce costos operativos al evitar la aplicación innecesaria de insumos y mejora la rentabilidad (Smethurst et al., 2020). Ambientalmente, minimiza la lixiviación de nutrientes, evitando la contaminación del agua y la degradación del suelo, promoviendo una agricultura más sostenible y la preservación de los recursos naturales (Wang et al., 2023).

En lo económico

La optimización del uso de fertilizantes mediante el modelo CERES-Rice ha demostrado ser crucial en la gestión de la nutrición vegetal. En un estudio en India, este modelo permitió un ahorro del 25% en costos de fertilización al ajustar las dosis aplicadas con precisión, reduciendo costos operativos y mejorando la eficiencia de los recursos (Zhou et al., 2020). Además, el modelo incrementó el rendimiento del cultivo en un 15%, aumentando la producción y la rentabilidad. Así, la optimización con modelos matemáticos no solo mejora la eficiencia económica y la sostenibilidad agrícola, sino que también maximiza el rendimiento de los cultivos (Benavides et al., 2023).

En lo ambiental

La reducción del uso excesivo de fertilizantes, facilitada por el modelo DNDC (Denitrification-Decomposition) en Europa, ha demostrado ser clave para minimizar la contaminación de cuerpos de agua y las emisiones de gases de efecto invernadero. Este modelo optimiza la aplicación de fertilizantes, reduciendo las emisiones de óxidos de nitrógeno y metano y la lixiviación de nutrientes, promoviendo una agricultura más sostenible y respetuosa con el medio ambiente (Wang et al., 2023; Bosi et al., 2023). En general, el modelamiento matemático en la nutrición vegetal mejora rendimientos y rentabilidad, y contribuye a prácticas agrícolas más sostenibles y a la preservación de los recursos hídricos (Vega-Ronquillo, 2021).

Complejidad y precisión de los modelos

El modelamiento matemático de la nutrición vegetal es complejo debido a la necesidad de capturar la dinámica de procesos biológicos, químicos y físicos que afectan a las plantas y al suelo. Los modelos deben integrar múltiples variables e interacciones, desde la absorción de nutrientes hasta las reacciones químicas y las condiciones ambientales (Bosi et al., 2020). La naturaleza no lineal y dinámica de estos procesos requiere modelos detallados que reflejen la variabilidad y las interacciones entre factores como la disponibilidad de nutrientes y las condiciones climáticas para hacer predicciones confiables (Vargas Neira, 2021). El modelo DSSAT, aunque detallado, enfrenta desafíos en su implementación debido a la necesidad de ingresar una amplia variedad de datos y parámetros, y su alta demanda de recursos computacionales, lo que puede limitar su accesibilidad y efectividad en entornos con recursos limitados (Castellanos Astudillo y Alférez Cardenas, 2023; Terán-Chaves et al., 2023).

Limitaciones de datos y recursos

La efectividad de los modelos matemáticos en la nutrición vegetal depende en gran medida de la disponibilidad y calidad de los datos sobre propiedades del suelo, condiciones climáticas y prácticas agrícolas. En regiones con limitaciones en infraestructura, tecnología y recursos humanos, como en muchos países en desarrollo, la recopilación de datos precisos puede ser un desafío significativo, afectando la precisión de las simulaciones y predicciones (Castillo Fiallos, 2022). La falta de acceso a datos actualizados y completos limita la capacidad de los modelos para ofrecer recomendaciones efectivas para la gestión de nutrientes (Smethurst et al., 2020). En África subsahariana, la ausencia de estaciones meteorológicas precisas y análisis detallados de suelos complica la aplicación efectiva de modelos como APSIM y CERES-Rice, esenciales para la optimización de la nutrición vegetal. La falta de datos climáticos y de suelos impide una representación adecuada de las condiciones reales del campo, limitando la precisión de las predicciones y la capacidad de los agricultores para tomar decisiones informadas (Chaves, 2021; Singh et al., 2022).

Adaptación de modelos a diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas

Los modelos de nutrición vegetal deben adaptarse a una variedad de condiciones edáficas y climáticas para ser efectivos en diferentes regiones agrícolas. Esta adaptabilidad es esencial debido

a las variaciones significativas en el suelo y el clima, lo que afecta la precisión y aplicabilidad de los modelos (Colque Cruz et al., 2023). La calibración y validación de estos modelos son procesos complejos que requieren ajustar parámetros para reflejar las condiciones locales y verificar la exactitud de las predicciones con datos observacionales, lo cual puede ser desafiante en áreas con recursos limitados o variabilidad climática (Singh et al., 2024). Modelos como STICS, efectivos en Europa, necesitan ajustes significativos para su aplicación en suelos volcánicos de Ecuador o condiciones áridas de Australia, implicando pruebas extensivas y modificaciones (Da Ponte, 2022). Aunque el modelamiento matemático ofrece grandes beneficios para la nutrición vegetal, su implementación enfrenta desafíos relacionados con la complejidad de los modelos, disponibilidad de datos y adaptación a condiciones locales. Superar estos desafíos requiere esfuerzos continuos en investigación, recopilación de datos y desarrollo de herramientas más accesibles (Sima et al., 2020).

Integración con tecnologías emergentes (sensores de suelo, drones)

La integración de tecnologías emergentes, como sensores de suelo avanzados y drones con cámaras multispectrales, mejora el modelamiento matemático de la nutrición vegetal. Los sensores proporcionan datos continuos y precisos sobre humedad y nutrientes, permitiendo una calibración dinámica de los modelos (Enrique García-Montesinos et al., 2020). Los drones con cámaras multispectrales capturan imágenes en diversas bandas del espectro electromagnético, revelando el vigor de las plantas y deficiencias nutricionales (Quintero y Díaz, 2020).

El uso combinado de estos datos en tiempo real optimiza la gestión de nutrientes, ajustando las prácticas de riego y fertilización para mejorar la eficiencia y sostenibilidad agrícola (Enrique García-Montesinos et al., 2020). Sensores de humedad permiten ajustar el riego y fertilización, mientras que imágenes NDVI de drones detectan deficiencias nutricionales y estrés en las plantas (Quasquer et al., 2023; García-Montesinos et al., 2020). Este enfoque adaptativo mejora la precisión en la gestión de nutrientes, aumenta el rendimiento de los cultivos y reduce el impacto ambiental del uso excesivo de fertilizantes (Pinheiro et al., 2021).

Mejora de algoritmos y precisión de modelos

La mejora de algoritmos matemáticos y la integración de aprendizaje automático e inteligencia artificial (IA) son cruciales para el modelamiento de la nutrición vegetal, ya que optimizan la precisión de los modelos y la efectividad predictiva en la agricultura (Laurito, 2024). Algoritmos avanzados, como los de aprendizaje profundo, permiten identificar patrones complejos en datos multidimensionales, mejorando la predicción de la respuesta de los cultivos a diferentes regímenes de fertilización (Ovando y Haro Juarez, 2020).

La IA facilita la adaptación dinámica de los modelos a nuevas informaciones y condiciones cambiantes, optimizando las recomendaciones para cada tipo de cultivo y situación específica (Noriega-Navarrete et al., 2021). La integración de redes neuronales profundas y técnicas avanzadas en modelos como APSIM y DSSAT mejora significativamente la precisión de las predicciones de nutrientes y crecimiento de las plantas, ajustando continuamente los parámetros del modelo según datos históricos y actuales (Monica et al., 2024). Esto promueve prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles.

Impacto del cambio climático en las estrategias de nutrición vegetal

El cambio climático está alterando los patrones de precipitación, temperatura y eventos extremos, afectando la disponibilidad de nutrientes y la salud de las plantas, lo que requiere ajustar las estrategias de nutrición vegetal para mantener la sostenibilidad agrícola (Zhou et al., 2020). La investigación futura debe centrarse en cómo el estrés térmico influye en la absorción de nutrientes en cultivos como maíz y trigo, y ajustar los modelos para simular escenarios climáticos futuros (Vega-Ronquillo, 2021).

Para enfrentar estos desafíos, es fundamental integrar tecnologías emergentes y mejorar los algoritmos de modelamiento matemático, adaptándolos a las fluctuaciones climáticas. Estas mejoras proporcionan datos en tiempo real y capacidades analíticas avanzadas, optimizando la gestión de nutrientes y promoviendo una agricultura más sostenible y resiliente (Singh et al., 2024).

Conclusiones

El avance en el modelamiento matemático de la nutrición vegetal requiere una integración estratégica de tecnologías emergentes, una evolución constante de los algoritmos y una adaptación dinámica a las variaciones inducidas por el cambio climático. La implementación de tecnologías

emergentes, como sensores avanzados y técnicas de inteligencia artificial, proporciona datos precisos y actualizados, lo que permite una evaluación más precisa de las necesidades nutricionales de los cultivos.

Simultáneamente, la mejora continua de los algoritmos matemáticos asegura que los modelos sean capaces de manejar la complejidad de los sistemas agrícolas y adaptarse a las condiciones cambiantes. La capacidad de estos modelos para ajustarse a las fluctuaciones climáticas es crucial para mantener su relevancia y eficacia.

La combinación de estos elementos no solo optimiza la gestión de nutrientes, sino que también promueve la sostenibilidad y resiliencia agrícola, facilitando la adaptación del sector a los desafíos futuros y garantizando una producción eficiente y sostenible en un contexto ambiental en evolución.

El modelamiento matemático desempeña un papel fundamental en la optimización de la nutrición vegetal, al proporcionar una base analítica para la toma de decisiones informadas sobre prácticas de fertilización. Mediante la integración de datos precisos y dinámicos, estos modelos permiten ajustar las aplicaciones de nutrientes a las necesidades específicas de los cultivos, maximizando así el rendimiento y la eficiencia.

Evitar la sobre-fertilización y reducir el impacto ambiental asociado con el uso excesivo de fertilizantes, el modelamiento matemático contribuye significativamente a la sostenibilidad agrícola. Esta capacidad para prever y adaptar las estrategias de nutrición en tiempo real no solo mejora la eficiencia de los cultivos, sino que también protege los recursos hídricos y promueve prácticas agrícolas más responsables y sostenibles.

Los agricultores deben considerar la adopción de herramientas avanzadas de modelamiento matemático y tecnologías emergentes, como sensores de suelo y drones, para optimizar las prácticas de fertilización y monitorear el estado de los cultivos en tiempo real. La implementación de modelos predictivos permitirá ajustar con precisión las aplicaciones de nutrientes, basándose en datos específicos y actualizados. Este enfoque no solo mejorará la salud y el crecimiento de las plantas, sino que también maximizará el rendimiento de los cultivos, reduciendo el desperdicio de insumos y promoviendo prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles.

Es crucial que los policymakers impulsen la investigación y el desarrollo en el ámbito del modelamiento matemático aplicado a la nutrición vegetal, apoyando la integración de tecnologías avanzadas en la agricultura. Se deben establecer políticas que fomenten la capacitación de los

agricultores en el uso de estas herramientas y que promuevan la adopción de prácticas agrícolas sostenibles fundamentadas en modelos matemáticos. Estas acciones contribuirán significativamente a una agricultura más eficiente, mejorando la gestión de recursos y minimizando el impacto ambiental, al tiempo que se impulsa la innovación en el sector agrícola.

El modelamiento matemático representa una herramienta crucial para avanzar en la nutrición vegetal, promoviendo una agricultura más sostenible y optimizando tanto los beneficios económicos como ambientales. Para maximizar el impacto de estas herramientas, es fundamental la colaboración activa entre científicos, agricultores y responsables políticos. Esta sinergia garantizará que las prácticas basadas en modelos matemáticos se implementen de manera efectiva, propiciando un futuro agrícola más eficiente, adaptable y respetuoso con el medio ambiente.

Referencias

1. Benavides, J. S., López, J. N., y Váquiro, H. A. J. I. t. (2023). Modelado matemático del efecto del hidrolizado de vísceras en el desempeño productivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). 34(4), 45-56.
2. Bosi, C., PEZZOPANE, J., Brunetti, H. B., Cuadra, S. V., Santos, P. M., y HENRIQUE BAUAB BRUNETTI, E.-a. (2023). Parametrização do modelo APSIM para estimativa da produtividade do consórcio milho-braquiária cultivado para produção de silagem.
3. Bosi, C., Sentelhas, P. C., Huth, N. I., Pezzopane, J. R. M., Andreucci, M. P., y Santos, P. M. J. A. S. (2020). APSIM-Tropical Pasture: A model for simulating perennial tropical grass growth and its parameterisation for palisade grass (*Brachiaria brizantha*). 184, 102917.
4. Castellanos Astudillo, L. D., y Alférez Cardenas, J. S. (2023). Uso de la agricultura de precisión para el control de fitosanitario en cultivos de interés agronómico.
5. Castillo Fiallos, J. N. (2022). Modelo matemático para la predicción del crecimiento del *Brassica oleracea* var. *italica* (brócoli) en el invernadero 1, de la Finca Freire del cantón Latacunga basado en redes neuronales.
6. Chaves, B. (2021). Modelagem da decomposição e emissão de N₂O de resíduos culturais com distinta composição química e quantidade [Universidade Federal de Santa Maria].
7. Colque Cruz, E. J., Chambi-Rodriguez, A. D., y Pampa-Quispe, N. B. J. R. d. I. A. (2023). Caracterización y modelado del crecimiento microbiano en el desarrollo de una bebida

- probiótica no láctea de extracto vegetal de tarwi (*Lupinus mutabilis* S.). 25(1), 41-48.
8. Da Ponte, M. (2022). Desarrollo y evaluación del modelado in-silico del metabolismo de *Cannabis* sp.
 9. dos Santos, M. L., Santos, P. M., Boote, K. J., Pequeno, D. N. L., Barioni, L. G., Cuadra, S. V., y Hoogenboom, G. J. F. C. R. (2022). Applying the CROPGRO Perennial Forage Model for long-term estimates of Marandu palisadegrass production in livestock management scenarios in Brazil. 286, 108629.
 10. Enrique García-Montesinos, L., Salvador Fernández-Reynoso, D., Rubio-Granados, E., Roberto Martínez-Menez, M., y Tijerina-Chávez, L. J. T. L. (2020). Rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en la mixteca, calculado con DSSAT. 38(4).
 11. Fajardo, C. A. S., Jaramillo, M. A. G., Moreno, C. A. E., y Leguizamón, G. P. J. I. C. (2020). Nodos sensores inalámbricos con antenas directivas de banda simple o doble para aplicaciones en agricultura. 16(2), 1.
 12. Figarola, L., Ghera, F., Castro, R., y Ferraro, D. (2020). Automatización del modelo de simulación de cultivos DSSAT para evaluar el desempeño productivo bajo distintas estrategias de manejo y escenarios ambientales. XII Congreso de AgroInformática (CAI 2020)-JAIIO 49 (Modalidad virtual),
 13. García-Montesinos, L. E., Fernández-Reynoso, D. S., Rubio-Granados, E., Martínez-Menez, M. R., y Tijerina-Chávez, L. J. T. L. (2020). Maize (*Zea mays* L.) yields in Southern Mexico calculated by the decision support system for agrotechnology transfer. 38(4), 859-870.
 14. Laurito, H. F. (2024). Estimando XCO₂ en cultivos de arroz e cana-de-açúcar a partir do sistema WOFOST.
 15. Monica, P.-S., Camilo, T., y Jaime, L.-B. J. R. P. (2024). Estimación, Manejo y Control de la Contaminación No Puntual por Escorrentía Superficial Ganadera: Una Revisión de literatura. 53(1), 111-123.
 16. Noriega-Navarrete, J. L., Salazar-Moreno, R., y López-Cruz, I. L. J. R. m. d. c. a. (2021). Revisión: modelos de crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático. 12(1), 127-140.
 17. Ovando, G. G., y Haro Juarez, R. J. (2020). Empleo de DSSAT-PNUTGRO en la región central de Argentina: evaluaciones de fechas de siembra con información histórica y

- escenarios de cambio climático= Use of the DSSAT-PNUTGRO in Argentina´s central region: evaluations of sowing dates using historical data and climate change scenarios= Uso do DSSAT-PNUTGRO na região central da Argentina: avaliações de datas de semeadura com informações históricas e cenários de mudanças climáticas (2675-7222).
18. Pavlidis, G., y Tsihrintzis, V. A. J. A. (2022). Modeling the Ability of a Maize–Olive Agroforestry System in Nitrogen and Herbicide Pollution Reduction Using RZWQM2 and Comparison with Field Measurements. 12(10), 2579.
 19. Pinheiro, A. G., SOUZA, L., JARDIM, A., ARAÚJO JÚNIOR, G., Alves, C. P., SOUZA, C., . . . SILVA, T. J. R. B. G. F. (2021). Importância dos modelos de simulação de culturas diante os impactos das alterações climáticas sobre a produção agrícola-Revisão. 14(6), 3648-3666.
 20. Quasquer, N. E. T., Mendoza, F. R. I., y Sabando, K. D. C. (2023). ANÁLISIS DEL USO DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS EN SISTEMAS AUTOMATIZADOS CON FINES EDUCATIVOS EN EL ÁREA AGROPECUARIA. Actas del Congreso de Investigación, Desarrollo e Innovación,
 21. Quintero, D., y Díaz, E. J. A. C. (2020). A comparison of two open-source crop simulation models for a potato crop. 38(3), 382-387.
 22. Sima, M., Fang, Q., Qi, Z., y Yu, Q. J. A. J. (2020). Direct assimilation of measured soil water content in Root Zone Water Quality Model calibration for deficit-irrigated maize. 112(2), 844-860.
 23. Singh, P. K., Sankar, S. A. G., Agarwal, S. S. K., Singh, R. S., Singh, K. K., Gupta, A., y Kalra, N. J. B. J. o. D. (2024). Simulating impact of climate change on growth and yield of wheat crop grown in various agro-climatic zones of India by using CERES-Wheat (DSSAT v 4.6). 10(6), e70228-e70228.
 24. Singh, S., Negm, L., Jeong, H., Cooke, R., y Bhattarai, R. J. A. W. M. (2022). Comparison of simulated nitrogen management strategies using DRAINMOD-DSSAT and RZWQM2. 266, 107597.
 25. Smethurst, P. J., Valadares, R. V., Huth, N. I., Almeida, A. C., Elli, E. F., Neves, J. C. J. F. e., y management. (2020). Generalized model for plantation production of Eucalyptus grandis and hybrids for genotype-site-management applications. 469, 118164.
 26. Terán-Chaves, C. A., Mojica-Rodríguez, J. E., Vega-Amante, A., y Polo-Murcia, S. M. J.

- W. (2023). Simulation of crop productivity for Guinea grass (*Megathyrsus maximus*) using AquaCrop under different water regimes. 15(5), 863.
27. Vargas Neira, A. R. (2021). Big data analytics aplicada en la integración de datos de internet de las cosas, caso de uso: Agricultura de precisión Machala: Universidad Técnica de Machala].
28. Vega-Ronquillo, M. J. R. I. A. (2021). Simulación del área foliar en papa (*Solanum tuberosum* L.) con los modelos SUBSTOR-Potato y VEGA-Potato. 3(2), 9-14.
29. Wang, S., Luo, M., Liu, T., Li, Y., Ding, J., Yang, R., . . . Zhang, H. J. A. (2023). Optimization of Nitrogen Fertilizer Management in the Yellow River Irrigation Area Based on the Root Zone Water Quality Model. 13(6), 1628.
30. Zhou, S., Hu, X., Ran, H., Wang, W., Hansen, N., y Cui, N. J. A. W. M. (2020). Optimization of irrigation and nitrogen fertilizer management for spring maize in northwestern China using RZWQM2. 240, 106276.