

Compensación del déficit de nutrientes en sistema hidropónico tipo NFT

Compensation for nutrient deficit in NFT hydroponic systems

Pablo Catota¹  , Paúl Astudillo¹  , Diego Pichoasamin¹  , Cesar Minaya¹  

¹Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui, Sangolquí – Ecuador

Correo de correspondencia: pablo.catota@ister.edu.ec

Información del artículo

Tipo de artículo:
Artículo original

Recibido:
14/10/2025

Aceptado:
20/11/2025

Publicado:
17/12/2025

Revista:
DATEH



Resumen

El análisis del déficit de nutrientes en un sistema hidropónico tipo NFT es esencial para el correcto desarrollo del cultivo. Dado que la disponibilidad de nutrientes es fundamental para garantizar que las plantas cuenten con los nutrientes necesarios para su crecimiento, por esto el implementar estrategias que permitan su gestión eficiente y en tiempo real el control de las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), así como del suministro de agua, para compensar los déficits de nutrientes. Para dosificar el déficit se implementó un sistema de control ON-OFF, el cual se acciona en base al nivel del déficit máximo fijado por el usuario. Por medio de sensores se verifica continuamente los niveles de pH de la solución circulante y el nivel en el reservorio, esto con el fin de que el sistema se accione al detectar el nivel mínimo para compensar las cantidades faltantes de nutrientes y agua, por medio de sensores de flujo y electroválvula que permiten el paso de las soluciones y agua. El sistema cuenta con un sistema de monitoreo que permite verificar el estado del cultivo para que el usuario tome las acciones correctivas en caso de alguna falla en el sistema. Por otra parte, los datos guardados en una tarjeta microSD permitieron determinar por medio de un análisis estadístico que las cantidades dosificadas difieren en un 5% debido a las limitaciones de los sensores utilizados, pero en comparación un sistema sin regulación automática se encontró que las concentraciones de N, P y K fueron más estables, lo que favoreció el crecimiento de las lechugas y disminuyó el desperdicio de recursos.

Palabras clave: hidropónico, dosificación, eficiente, nutrientes, sistema de monitoreo

Abstract

The analysis of nutrient deficiencies in an NFT hydroponic system is essential for proper crop development. Since nutrient availability is crucial to ensuring that plants receive the necessary nutrients for their growth, it is important to implement strategies that allow efficient management and real-time control of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) concentrations, as well as water supply, to compensate for nutrient deficiencies. To dose the deficit, an ON-OFF control system was implemented, which is activated based on the maximum deficit level set by the user. Sensors continuously monitor the pH levels of the circulating solution and the reservoir level to ensure that the system activates upon detecting the minimum threshold, compensating for the missing amounts of nutrients and water through flow sensors and solenoid valves that regulate the passage of solutions and water. The system includes a monitoring mechanism that allows users to check the crop's status and take corrective actions in case of any system failure. Additionally, the data stored on a microSD card enabled a statistical analysis, which determined that the dosed amounts differed by 5% due to the limitations of the sensors used. However, compared to a system without automatic regulation, it was found that N, P, and K concentrations remained more stable, which favored lettuce growth and reduced resource waste.

Keywords: hydroponic, dosing, efficient, nutrients, monitoring system

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la implementación de tecnologías inteligentes en la agricultura ha cobrado relevancia, mejorando la eficiencia en la gestión de recursos y optimizando la producción de cultivos. Estos avances se han centrado principalmente en el monitoreo ambiental y la automatización de procesos, utilizando sistemas como el Internet de las Cosas (IoT) para mejorar la calidad del

producto agrícola y la sostenibilidad de los cultivos. Khandare et al. (2019) describe un sistema de monitoreo ambiental aplicado al sector agrícola, que integra sensores de temperatura, humedad del suelo y lluvia para detectar posibles enfermedades en los cultivos, todo ello a través de un prototipo que utiliza Wi-Fi para enviar datos a la nube y proporcionar información en tiempo real a los agricultores mediante mensajes MMS. Este sistema

permite una gestión más precisa del agua y la protección de los cultivos.

Por otro lado, Domingues et al. (2012) presenta un sistema automatizado para el monitoreo de conductividad y pH en el cultivo de lechugas, tanto en hidroponía como en cultivo convencional en suelo. Utilizando sensores y electrodos, el sistema ajusta automáticamente la acidez y la solución nutritiva, garantizando que las condiciones sean óptimas para el crecimiento de las plantas. Los resultados de este estudio demuestran que, a pesar de algunas diferencias en el tamaño de las plantas, la cosecha de lechugas hidropónicas fue más rápida que la cultivada en suelo, mostrando la ventaja de este sistema en términos de precocidad en el crecimiento.

En un enfoque similar, Manav et al. (2018) propuso un sistema hidropónico inteligente basado en IoT, utilizando redes neuronales profundas para ajustar en tiempo real variables como pH, temperatura, humedad, luz e intensidad del agua. El sistema, implementado en una Raspberry Pi3 y controlado por un Arduino, mostró una precisión del 88,5%, evidenciando el potencial de la inteligencia artificial para optimizar el control de los parámetros ambientales en la agricultura.

A la par de estos desarrollos, Rashid et al. (2021) presenta un sistema de riego automatizado en Senegal que integra controladores lógicos programables y una interfaz SCADA, permitiendo un monitoreo eficiente de la humedad, temperatura y velocidad del viento. Este sistema no solo mejora el uso del agua, reduciendo su consumo en un 30%, sino que también aumenta el rendimiento de los cultivos en un 20%, demostrando la efectividad de la automatización en la agricultura.

Otros estudios, como el de Suchitrarani et al. (2024), se han centrado en la mejora de la producción de fresas mediante el control de variables eléctricas y el uso de tecnologías como las bombas sumergibles y lámparas LED en sistemas hidropónicos. Los resultados muestran un incremento significativo en el rendimiento de los cultivos, destacando la importancia de un control preciso del entorno de cultivo.

En el ámbito de la fertirrigación, Pandey et al. (2023) describe un sistema que monitorea las variables de pH, EC, temperatura y humedad para optimizar el uso de nutrientes y agua en el cultivo de pepinos. La implementación de un PLC y un HMI permitió ajustar de manera eficiente el ciclo de nutrientes, resultando en un ahorro de agua de hasta un 30% y un incremento en el rendimiento de los cultivos.

Finalmente, estudios más recientes como el de Sanjuan-Delmás et al. (2020) en Barcelona, subrayan la importancia de la eficiencia en el uso de nutrientes y agua en sistemas hidropónicos, destacando mejoras en la productividad de cultivos de tomate y la reducción del consumo de recursos. Igualmente, el trabajo de Nicol y van Rooyen (2022) sobre el control de la concentración de fosfato en soluciones nutritivas también muestra cómo la tecnología puede contribuir a la sostenibilidad y la precisión en la agricultura.

Este artículo revisa diversas aplicaciones de tecnologías emergentes en el sector agrícola, enfocándose en cómo los avances en la automatización, el monitoreo ambiental y la inteligencia artificial están revolucionando la producción agrícola, optimizando el uso de recursos y mejorando la calidad de los cultivos.

El uso de sistemas hidropónicos ha ganado popularidad en la agricultura moderna debido a su capacidad para optimizar el uso de recursos, como el agua y los nutrientes, a la vez que mejora la calidad de los cultivos. Diversos estudios han demostrado la efectividad de estos sistemas en la producción de cultivos como la lechuga, tomate y cebolla, empleando tecnologías avanzadas como sensores, controladores inteligentes y plataformas de Internet de las Cosas (IoT). Los sistemas hidropónicos no solo permiten un control más preciso de factores ambientales, sino que también pueden mejorar el contenido nutricional de los productos cultivados.

Yang et al. (2024) señala que el sistema de cultivo DWC (Deep Water Culture) es más efectivo en la producción de fitocompuestos beneficiosos, como carotenoides y vitamina C, en comparación con el sistema NFT (Nutrient Film Technique), especialmente durante la temporada de otoño. Estos resultados destacan la influencia del tipo de sistema hidropónico en la calidad nutricional de la lechuga. Sin embargo, en verano, aunque DWC mostró una mayor concentración de clorofila, el sistema NFT alcanzó un mayor rendimiento en términos de biomasa total, subrayando la importancia de considerar tanto el sistema como la temporada al cultivar lechuga.

Otros estudios, como el de Silva et al. (2023), demuestran avances en la automatización y monitoreo de nutrientes en soluciones hidropónicas, utilizando espectroscopía reactiva sin reactivos para detectar NPK (nitrógeno, fósforo y potasio), lo que reduce costos y residuos en la producción. Asimismo, en sistemas más complejos, como el prototipo descrito por Chang et al. (2021), la integración de lógica difusa y redes neuronales, junto con sensores de CO₂, luz y temperatura, permite ajustar los parámetros de crecimiento de la lechuga de manera predictiva y eficiente, con una alta capacidad de predicción.

Además, estudios sobre la gestión de nutrientes y la eficiencia en el uso de recursos también se han centrado en la optimización del control de parámetros como el pH y la conductividad eléctrica (EC) en sistemas acuapónicos e hidropónicos (Yang & Kim, 2020). Estos sistemas no solo se enfocan en el crecimiento y calidad de los cultivos, sino también en la sostenibilidad de los métodos agrícolas mediante la reducción del impacto ambiental y el uso eficiente de recursos, como lo evidencia el análisis realizado por Casamayor et al. (2024), que comparó el rendimiento de sistemas hidropónicos alimentados por energía humana con métodos convencionales de agricultura.

A través de la implementación de tecnologías avanzadas como imágenes hiperespectrales, redes neuronales artificiales (MLP) y controladores basados en IoT, los sistemas de cultivo hidropónico se están transformando en soluciones más precisas, económicas y sostenibles. Estos avances permiten monitorear y ajustar continuamente las condiciones de cultivo para maximizar el rendimiento y minimizar el impacto ambiental, lo que tiene un potencial significativo para la agricultura urbana y la producción de cultivos de alta calidad en espacios reducidos.

Este enfoque multidisciplinario que integra el control automatizado, la predicción de nutrientes y la eficiencia en el uso de recursos plantea nuevas posibilidades para la agricultura sostenible y la optimización de cultivos en sistemas hidropónicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio presenta un enfoque experimental para el diseño y evaluación de un sistema hidropónico tipo NFT, con el objetivo de optimizar la compensación del déficit de nutrientes en cultivos de lechuga. La metodología aplicada para la implementación del proyecto consistió en varias etapas clave que se muestran a continuación:

1. **Diseño del Prototipo:** Se construyó un sistema hidropónico utilizando tubos de PVC, junto con un sensor de pH para monitorear la concentración de nutrientes y un sensor de nivel para medir la cantidad de solución nutritiva en el reservorio. Estos sensores se conectaron a una tarjeta Arduino Mega, para realizar la implementación del sistema de control.
2. **Pruebas y Recolección de Datos:** La implementación en la fase de pruebas se realizó por un período de tres meses, donde se evaluó el rendimiento del sistema en comparación con un cultivo tradicional. Se evaluaron variables como el crecimiento de las plantas, el uso eficiente de

recursos y la compensación de nutrientes, con especial énfasis en el mantenimiento de los niveles adecuados de pH y solución nutritiva.

3. **Ánalisis Comparativo:** Los datos recolectados fueron analizados para determinar la efectividad del sistema en la mejora de la productividad y calidad de los cultivos frente a los métodos tradicionales.

Diseño del Sistema

El sistema hidropónico tipo NFT diseñado en este estudio se caracteriza por la recirculación de la solución nutritiva por medio de una bomba electro sumergible a través de una estructura compuesta por tubos de PVC, con dimensiones de 1.0 m de largo, 0.49 m de ancho y 0.84 m de altura. Estas dimensiones fueron seleccionadas para albergar 24 plántulas de lechuga crespa, manteniendo una distancia entre plantas de 20 a 30 cm para garantizar su correcto crecimiento. A diferencia de los cultivos tradicionales, en el sistema NFT es posible cultivar hasta 36 plantas, siempre que se mantengan los niveles óptimos de nutrientes necesarios para el desarrollo adecuado de las plantas.

Arquitectura del Sistema

El control del sistema hidropónico se realiza en base a las cantidades necesarias de dosificación que se requiere para la planta por cada litro de agua. En la tabla 1 se muestra las cantidades a dosificar por cada litro para lograr un pH en 6 a 7 que es el valor que permite garantizar un ambiente óptimo para el cultivo de lechugas, estos valores se fijaron en base a investigaciones previas. Por otra parte, es importante mantener las condiciones climáticas como la humedad relativa y temperatura ambiente dentro de un rango estable para garantizar el óptimo crecimiento de las plantas, estas variables pueden alterar el valor del pH, es por eso que el sistema es monitoreado de manera continua mediante un sensor de pH, con el fin de tomar decisiones que permitan garantizar la concentración de nutrientes en el cultivo hidráulico.

Además, un sensor de nivel mide la cantidad de solución nutritiva, y cuando se detecta un déficit, se activa el sistema de compensación para llenar la solución nutritiva según sea necesario. Todo el sistema es controlado mediante una tarjeta Arduino Mega, que recolecta y procesa la información de los sensores, permitiendo la activación de los actuadores para mantener los niveles adecuados de nutrientes y solución nutritiva. La arquitectura general del sistema se muestra en la Figura 1 y la cantidad de solución a dosificar por cada litro de agua se describe en la Tabla 1.

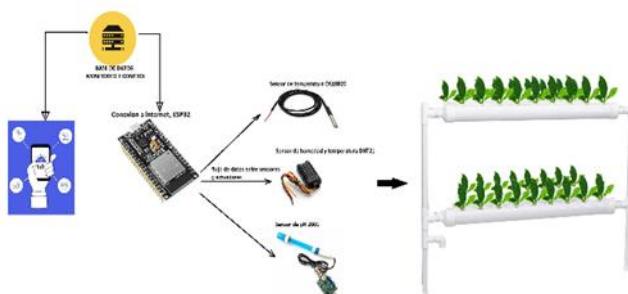


Figura 1. Diseño del sistema hidropónico propuesto.

Tabla 1

Cantidad de soluciones a dosificar por cada litro de agua.

Cantidad de dosificación por cada litro de agua

Solución A (N)	2 ml
Solución B (P)	2,5 ml
Solución C (K)	3 ml

Hardware

El sistema hidropónico está compuesto por 3 niveles donde se ubica un sensor de pH y un reservorio donde se encuentran los sensores de nivel, pH y temperatura. Estos sensores permiten la recopilación de datos y su procesamiento mediante el algoritmo de dosificación alojado en la tarjeta Arduino MEGA. El sistema de control también cuenta con un interfaz de monitoreo que permite visualizar al usuario las cantidades dosificadas al sistema y el nivel pH. Para el suministro de energía al sistema se emplea un convertidor AC/DC que transforma una entrada de 120 VAC a 5 VDC, proporcionando la energía necesaria para el microcontrolador y sensores instalados en el sistema. Para el suministro de energía hacia los actuadores se utiliza un módulo relé debido a que operan a 120 VAC.

El sistema de control ON-OFF es implementado en un microcontrolador Arduino MEGA, este dispositivo recepta las señales desde los sensores de caudal instalados a cada una de las salidas de los recipientes que contienen las soluciones N, P, K y agua, estos sensores permiten conocer la cantidad de solución suministrada. Este sistema de control es accionado diariamente por de un módulo reloj, para el cálculo de los volúmenes faltantes de acuerdo al difícil determinado a través del sensor nivel instalado en el reservorio. Por medio de esta información, el controlador puede ajustar la dosificación en función de la demanda de nivel faltante en el reservorio, evitando desperdicios o sobredosificación en el sistema.

El sistema también permite el almacenamiento de datos en una tarjeta microSD, estos datos son analizados para determinar los volúmenes utilizados en los 35 días que

dura la cosecha de la lechuga crespo, para la recirculación de la solución nutritiva en los tubos PVC, también se utiliza un control ON-OFF que se acciona una vez cada hora durante 15 min, esto con el fin de que las plantas reciban todos los nutrientes para su correcto desarrollo, en la Figura 2 se muestra el esquema del diseño propuesto.

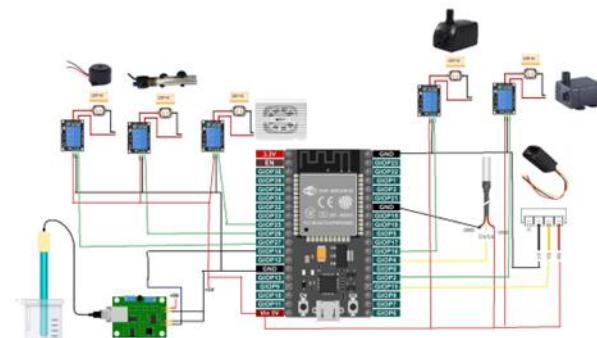


Figura 2. Diseño del sistema hidropónico propuesto.

El sistema en primer lugar activa la tarjeta SD, donde se registrarán las cantidades del suministro de agua y nutrientes. El nivel actual se mide mediante un sensor de nivel tipo resistivo (0-190 ohm). Cuando el nivel está por debajo de los 15 litros, el sistema calcula el déficit de nivel y calcula la cantidad de nutrientes esenciales (N, P, K), en base a una dosificación de (2-2.5-3) ml por cada litro de déficit, posteriormente se activa la electroválvula para suministrar agua limpia. En cuanto se alcanza el nivel óptimo, se detiene el suministro de agua, finalmente la cantidad de agua y nutrientes se registra en la tarjeta SD. El sistema verifica el nivel del tanque. Si se encuentra dentro de la zona correspondiente, el sistema entra en estado de espera hasta que se detecta un cambio de nivel. En ese momento, se reinicia el proceso de regulación.

La automatización de los horarios de riego de acuerdo a horas necesarias para la nutrición del cultivo es con el fin de nutrir a los cultivos de manera óptima, las raíces de los cultivos hidropónicos son de gran prioridad ya que al ser tratadas debidamente este representa mayores ventajas, siendo tal que dentro del sistema NFT que permite un contacto directo de la raíz con la solución hace que mejore la producción y desarrollo del cultivo permitiendo tener en un tiempo corto nuestros cultivos de calidad.

La recirculación de la solución nutricional es necesaria en un lapso debidamente considerado para la correcta nutrición del cultivo y evitar que exista un flujo excesivo que provoca que las plantas se estresen, que deberían estar entre 6 o 7 máximo. Además, dependiendo del tamaño de longitud por donde circulara la solución, ya que permite la uniformidad de los componentes de los macronutrientes Software.

En esta sección se aborda el diseño del sistema de monitoreo IoT para un prototipo de sistema hidropónico NFT, destacando el uso de sensores de bajo costo y sus condiciones operativas para la monitorización eficiente del cultivo. El sistema integra una plataforma de almacenamiento en Arduino Cloud, permitiendo la recolección, almacenamiento temporal y análisis de datos clave como temperatura, humedad y pH. Además, el sistema incluye un módulo de control que facilita la visualización y gestión de parámetros mediante gráficos interactivos. La interfaz de Arduino IoT Cloud sirve como servidor para el monitoreo y control de variables, ofreciendo a los usuarios la posibilidad de accionar manualmente los actuadores según las necesidades del cultivo.

Para la interconexión entre los elementos y la interfaz del sistema, se utiliza el reconocimiento serial, lo cual facilita la comunicación entre la red WiFi-ESP32 y la interfaz IoT, permitiendo la recepción de datos de los dispositivos vinculados. Esta estructura permite el control de variables críticas como la temperatura, donde el sistema analiza los niveles registrados para activar mecanismos correctivos: si la temperatura supera los 20°C, el ventilador se enciende para reducirla, y si cae por debajo de 15°C, el calefactor se activa para mantenerla en un rango óptimo.

El sistema de control de humedad opera de manera similar, activando la bomba 1 si la humedad cae por debajo del 60% y el ventilador si supera el 80%, garantizando un ambiente adecuado para el cultivo. Asimismo, el control de pH se gestiona mediante alarmas que alertan al usuario cuando el nivel se encuentra fuera del rango óptimo de 5.5 a 7, permitiendo intervenciones manuales para ajustar el pH. Todos los datos recolectados se reflejan en la interfaz IoT para un monitoreo constante, y la comunicación con el ESP32 asegura una visualización eficiente para un análisis detallado de las condiciones del cultivo hidropónico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestran los resultados más relevantes de la presente investigación, sobre la integración de un control ON-OFF para la compensación de nutrientes en un sistema hidropónico tipo NFT. Este sistema fue diseñado para compensar el déficit de solución nutritiva en el reservorio del cultivo, a través de los sensores y actuadores instalados en el sistema. Por otra parte, la implementación del sistema de monitoreo permitió visualizar las variables que inciden directamente en el cultivo, asegurando una constante supervisión para garantizar las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas.

Las pruebas para la validación del funcionamiento se realizaron durante 35 días, donde se realizó un control

continuo de los niveles de la solución nutritiva alojada en el reservorio del sistema. A través de los sensores de pH y nivel, se realizó el ajuste para la dosificación de los nutrientes y agua, en función de las necesidades de las plantas. Durante este periodo en base a los resultados se determinó que el pH se mantuvo dentro del rango óptimo para la correcta absorción de nutrientes de la planta, que se ubica entre 6 a 7. Para la compensación del déficit se realiza de manera automática, en base a la información recibida desde los sensores, cuando se detecta un déficit en la solución nutritiva, permitiendo un equilibrio adecuado en el suministro. En la tabla 2 se observa los resultados obtenidos durante los 35 días.

Tabla 2

Cantidad dosificadas en función del déficit detectado en el sistema.

Día	pH	N (mL)	P (mL)	K (mL)	Agua (L)
1	6.5	10	8	12	2.0
5	6.3	12	9	14	2.5
10	6.4	14	10	16	3.0
15	6.6	13	9	15	3.5
20	6.7	15	11	18	4.0
25	6.5	14	10	17	4.2
30	6.4	13	9	16	4.5
35	6.6	12	8	15	5.0

La automatización de la dosificación de nutrientes ha reducido el desperdicio de solución nutritiva y agua, además ha permitido mantener las condiciones del cultivo estable. Durante los 35 días se observó una dosificación efectiva de los nutrientes N, P, K y agua a lo largo del ciclo de cultivo, garantizando de esta manera las condiciones idóneas y disponibilidad de la solución rica en nutrientes en el reservorio para el crecimiento de las plantas. Además, el sistema de control ON-OFF alojado en el microcontrolador Arduino MEGA optimizó la dosificación en base a las necesidades detectados, lo que permitió reducir la posibilidad de una sobrealimentación al activar el suministro de solución nutritiva. En la Figura 3 se muestra el comportamiento del pH durante el ciclo del cultivo, donde se observa que el valor máximo alcanzado es de 6,9 y el mínimo es de 6,3.



Figura 3. Comportamiento del pH diario en el cultivo hidropónico

La dosificación de nutrientes en el sistema es fundamental para asegurar el crecimiento óptimo de las plantas de lechuga, a diferencia del cultivo tradicional, los nutrientes deben ser suministrados directamente a través de una solución que recircula cada 15 minutos. La dosificación se realiza de acuerdo con el déficit detectado y en función a los valores de referencia en la Tabla 1, el cálculo de las cantidades a dosificar se realiza en base al valor de referencia de nivel máximo fijado en 15 litros, a partir de este valor y de acuerdo con el nivel faltante se ajustan las dosis conforme lo requiera el sistema. A lo largo de los 35 días de cultivo, las cantidades totales suministradas son 91.26 ml de N, 92.82 de P, 117.72 de K y 40,27 L agua. Estos resultados reflejan un aumento gradual en las dosis para satisfacer las necesidades de las plantas. Este enfoque también permite garantizar que las plantas reciban la nutrición adecuada para su correcto desarrollo, sin deficiencias o excesos que podrían afectar su crecimiento. En la Figura 4 se puede ver las cantidades dosificadas durante los 35 días.

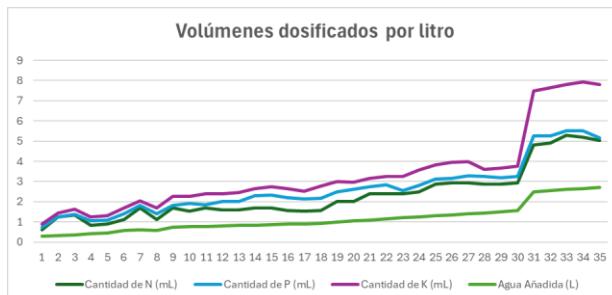


Figura 4. Comportamiento de volúmenes dosificados N, P, K y agua.

Es importante indicar que este método en comparación con el método tradicional permite el ahorro de recurso hídrico y nutrientes, ya que se suministra de acuerdo con las necesidades del cultivo y no se lo realiza de forma manual y en una sola ocasión como se lo realiza en los cultivos en suelo, el sistema NFT con dosificación controlada demostró un rendimiento óptimo y demuestra que el crecimiento de las plantas mejora considerablemente, lo que permite obtener los productos en un menor tiempo.

CONCLUSIONES

La tecnología de control ON-OFF del sistema hidropónico NFT para la compensación de fertilizantes ha demostrado ser increíblemente eficaz para maximizar el crecimiento de las plantas, garantizando a la vez una gestión precisa del agua y los nutrientes. El dispositivo mantuvo eficazmente el pH entre 6,3 y 6,9 durante el período de prueba de 35 días, lo cual es crucial para el crecimiento saludable de las plantas y la absorción adecuada de nutrientes. Basándose en la detección de déficit en tiempo real, el mecanismo de dosificación automatizado controló

eficientemente el suministro de agua, fosfato (P), potasio (K) y nitrógeno (N). Las dosis totales fueron 40,27 L de agua, 91,26 ml de N, 92,82 ml de P y 117,72 ml de K.

En comparación con la agricultura tradicional basada en el suelo, donde la administración de nutrientes suele ser laboriosa, irregular y propensa a excesos o deficiencias, esta automatización no solo redujo el desperdicio, sino que también optimizó el consumo de recursos. La cosecha se realizó en menos tiempo gracias a la capacidad de aplicar fertilizantes en las cantidades exactas en el momento oportuno, lo que también mejoró la productividad y promovió un crecimiento uniforme de las plantas. Además, al integrar un sistema de monitoreo, se mantuvieron condiciones de cultivo estables durante todo el ciclo mediante la supervisión continua de las variables críticas que afectan la salud de las plantas.

Al permitir modificaciones en tiempo real basadas en datos de sensores, el microcontrolador Arduino MEGA fue vital para controlar el sistema de encendido y apagado, evitando la sobrealimentación y garantizando un suministro de nutrientes equilibrado. Las ventajas de los sistemas hidropónicos sobre la agricultura convencional se ven reforzadas por este grado de automatización y precisión, que proporciona un método de cultivo más controlado y sostenible. El sistema hidropónico utilizaba mucha menos agua que el cultivo tradicional en suelo, donde se pierde mucha por evaporación y escorrentía; por lo tanto, el método de suministro controlado de fertilizantes también mejoró la eficiencia hídrica. Con su solución nutritiva recirculante, el sistema NFT mejoró aún más el ahorro de agua, garantizando al mismo tiempo que las plantas tuvieran acceso constante a los nutrientes vitales.

Los patrones de crecimiento descubiertos demostraron que las plantas cultivadas con este sistema automatizado se beneficiaron de un entorno nutricional estable y controlado, lo que resultó en plantas más sanas y mayores rendimientos. A la luz de estos hallazgos, el sistema de control ON-OFF ofrece a los agricultores hidropónicos una forma muy prometedora de maximizar el aprovechamiento de nutrientes, reducir su impacto ambiental y mejorar la calidad de los cultivos. Al reducir el desperdicio de recursos y aumentar la eficiencia total de la producción de alimentos, esta técnica tiene el potencial de mejorar considerablemente la sostenibilidad de la agricultura moderna si se adopta a mayor escala. Las conclusiones del estudio destacan cómo los sistemas hidropónicos automatizados tienen el potencial de transformar por completo los métodos de cultivo al aumentar su adaptabilidad, la eficiencia de los recursos y la capacidad de satisfacer la creciente demanda de productos de primera calidad de forma ecológica.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores han contribuido de manera equitativa a la concepción, diseño, desarrollo, análisis de datos y redacción del manuscrito.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui por el apoyo brindado durante la realización de este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Khandare, V., Alande Anuja, P., Alase Anagha, A., Patil Anjali, M., & Patil Kajal, K. (2019). IOT Based Monitoring System in Smart Agriculture. *MAT JOURNALS*, 5(2), 17-23. doi:<http://doi.org/10.5281/zenodo.3247404>
- Domingues, D. S., Takahashi, H. W., Camara, C. A., & Nixdorf, S. L. (2012). Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84, 53–61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.006>
- Manav, M., Sameer, S., Suresh, S., & Rijo, J. (2018). IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 473–486. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.015>.
- Rashid, M., Alioune, S., & Tahsin F, H. (2021). Automated Farming System Using Distributed Controller: A Feasibility Study. *ASIAN JOURNAL OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING*, 1(1), 21-29. doi:<https://doi.org/10.69955/ajoeee.2021.v1i1.11>
- Suchitrarani , S., Dayanidhi, S., & Khirod, K. (2024). Optimization of an efficient hydroponic cultivation method for high yield of strawberry plants. *South African Journal of Botany*, 167, 429-440. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.02.033>
- Pandey, K., Singh, K., & Singh, A. (2023). Multi-Sensors based smart nutrient reuse management system for closed. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107495>
- Sanjuan-Delmás, D., Josa, A., Muñoz, P., Gassó, S., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2020). Applying nutrient dynamics to adjust the nutrient-water balance in hydroponic crops. A case study with open hydroponic tomato crops from Barcelona. *Scientia Horticulturae*, 261. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108908>
- Nicol, W., & van Rooyen, I. (2022). Inferential control of the phosphate concentration in hydroponic systems via measurement of the nutrient solution's pH-buffering capacity. *Scientia Horticulturae*, 295, 1-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110820>
- Yang, T., Samarakoon, U., & Altland, J. (2024). Growth, phytochemical concentration, nutrient uptake, and water consumption of butterhead lettuce in response to hydroponic system design and growing season. *Scientia Horticulturae*, 332(1), 1-16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113201>
- Silva, F., Queirós, C., Pinho, T., Boaventura, J., Santos, F., Barroso, T., . . . Martins, R. (2023). Reagent-less spectroscopy towards NPK sensing for hydroponics nutrient solutions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 395(15). doi:<https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134442>
- Chang, C.-L., Chung, S.-C., Fu, W.-L., & Huang, C.-C. (2021). Artificial intelligence approaches to predict growth, harvest day, and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a IoT-enabled greenhouse system. *Biosystems Engineering*, 212, 77-105. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.015>
- Yang, T., & Kim, H.-J. (2020). Characterizing Nutrient Composition and Concentration in Tomato-, Basil-, and Lettuce-Based Aquaponic and Hydroponic Systems. *Water*, 12(5), 1-27. doi: <https://doi.org/10.3390/w12051259>
- Casamayor, J., Muñoz, E., Franchino, M., Gallego-Schmid, A., & Shin, H. (2024). Human-powered hydroponic systems: An environmental and economic assessment. *Sustainable Production and Consumption*, 46, 268-281. doi:<https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.026>