



Sistemas, Sensores y Monitoreo para un Cultivo Hidropónico: una revisión de literatura

xxxxxxxxxx
xxxxxxxxxx
xxxxxxxxxx

Autores:

Johan Steven Restrepo Beltran
Andrés David Paez Manjarrés
Jhorlan Arbey Peña

Resumen

El cultivo hidropónico ha surgido como una alternativa prometedora a la agricultura convencional porque permite un control preciso de las variables ambientales, aumentando así la eficiencia productiva y sostenibilidad. La tecnología de sensores juega un papel vital en el monitoreo hidropónico, lo que permite mediciones precisas y en tiempo real del estado ambiental y nutricional de las plantas. Las variables ambientales específicas de cada cultivo deben controlarse con precisión para garantizar un crecimiento óptimo de las plantas. El propósito de este estudio es analizar los referentes teóricos de los sistemas de información, considerando las limitaciones presentes en los cultivos hidropónicos. Se utilizarán referencias a estudios e investigaciones previas relacionadas con el monitoreo de cultivos hidropónicos, control climático, control de plagas y enfermedades, uso y colocación de sensores en sistemas de cultivo, análisis de datos e implementación de sistemas de control automatizado en base a la información obtenida. sensor.

Palabras claves:

Cultivo, Agricultura, Productividad, Tecnología alimentaria, Control automático, Vigilancia.

Abstract

Hydroponic cultivation has emerged as a promising alternative to conventional agriculture because it allows precise control of environmental variables, thus increasing productive efficiency and sustainability. Sensor technology plays a vital role in hydroponic monitoring, enabling accurate and real-time measurements of the environmental and nutritional status of plants. Specific environmental variables for each crop must be precisely controlled to ensure optimal plant growth. The purpose of this study is to analyze the theoretical frameworks of information systems, considering the limitations present in hydroponic crops. References to previous studies and research related to hydroponic crop monitoring, climate control, pest and disease control, sensor usage and placement in cultivation systems, data analysis, and implementation of automated control systems based on sensor-derived information will be used.

Keywords:

Cultivation, Agriculture, Productivity, Food technology, Automatic control, Surveillance.

Introducción

En los últimos años, la productividad de cultivos hidropónicos se ha convertido en una alternativa prometedora para la agricultura convencional (Pomoni et al., 2023). Este método de cultivo sin suelo permite el control preciso de las variables ambientales, dando como resultado una producción más eficiente y sostenible de frutas, verduras y otros cultivos (Szekely & Jijakli, 2022). De igual manera, cuando se trata de monitorear la hidroponía, la tecnología de sensores puede desempeñar un papel fundamental (Tatas et al., 2022a). Ya que, estos sensores proporcionan mediciones precisas en tiempo real del estado ambiental y nutricional de la planta (Soheli et al., 2022). Sin embargo, para garantizar un crecimiento óptimo de las plantas, es esencial controlar con precisión las variables ambientales como la humedad, la temperatura, la luz y los nutrientes, que son específicos para cada tipo de cultivo (Soheli et al., 2022). Por lo que cada cultivo tiene requisitos específicos para su crecimiento y desarrollo además del monitoreo constante para garantizar que se cumplan las condiciones óptimas del ambiente (Hemathilake & Gunathilake, 2022).

Esta investigación está estructurada en tres secciones. La primera sección se centra en sistemas hidropónicos, describiendo las técnicas y campos de investigación utilizados en estos sistemas. En la segunda sección se enfoca en el tema de sensores para agricultura hidropónica, describiendo las técnicas utilizadas, sus campos de aplicación y los campos de investigación. Mientras que en la tercera sección se enfoca en el tema de sistema de monitoreo hidropónico, describiendo las técnicas y herramientas utilizadas en los cultivos hidropónicos, los campos de investigación y los campos de aplicación. La presente investigación surge con el propósito de desarrollar un sistema de información para monitorear cultivos de precisión hidropónica, teniendo en cuenta las limitaciones que presentan los cultivos hidropónicos. Para la construcción y estudio del sistema de información se toman como referencias investigaciones y estudios realizados acerca del monitoreo de cultivos hidropónicos, la climatización de los cultivos, las plagas o enfermedades que se pueden generar, el uso de sensores y ubicación de estos en un sistema de cultivo, recopilar análisis de datos e implementar sistemas de control automatizados basados en información obtenida de sensores.



Metodología

La metodología general se basa en el método exploratorio, con fuentes de información secundarias obtenidas en las bases de datos (Google académico, MDPI, Scielo y CrossRef). El método exploratorio se utilizó para analizar los referentes teóricos sobre las categorías y subcategorías bases y emergentes: sistemas hidropónicos, sensores para agricultura hidropónica y sistema de monitoreo hidropónico.

En la búsqueda de artículos se seleccionaron 200 referentes los cuales están distribuidos por base de datos:

Base de datos	2019	2020	2021	2022	2023
Google académico	7	13	10	9	14
MDPI	6	7	12	8	15
Scielo	8	10	11	10	5
CrossRef	9	14	5	11	16

Los criterios de inclusión definidos para la búsqueda fueron: el nombre de la categoría, la pregunta de investigación y la ventana de cinco años atrás de referentes sobre el tema.

Se utilizaron cuatro preguntas para sistematizar los artículos encontrados (Claros-Perdomo et al., 2020):

1. ¿Qué vacíos se presentan en el tema?
2. ¿Cómo se desarrolla el tema a lo largo de los años?
3. ¿En qué se está enfocando la discusión actual?
4. ¿Cuáles son los temas relevantes en estas investigaciones?



Sistemas hidropónicos

Un sistema hidropónico es un método de plantación el que las raíces se sumergen o se mantienen en un medio de cultivo sin suelo y se les proporciona directamente una solución nutritiva que permite un control preciso del entorno de cultivo, incluyendo la composición química y el pH de la solución nutritiva, la temperatura, la humedad y la luz (Pérez & Morales-Fonseca, 2021). El sistema hidropónico utiliza diferentes técnicas para cultivar las plantas de manera eficiente y controlada como puede ser el sistema de flujo y reflujo, sistema NFT, sistema aeropónico y cultivo acuapónico (Kour et al., 2022).

El sistema de flujo y reflujo una técnica popular en la hidroponía debido a su simplicidad donde las plantas se colocan en bandejas o contenedores que se inundan periódicamente con una solución y luego se drenan (Rasheed et al., 2021). Este ciclo repite periódicamente, lo que permite a las plantas obtener los nutrientes necesarios mientras se evita el estancamiento de agua en las raíces (Nasih et al., 2021). Este sistema permite un mayor control sobre los nutrientes y el riego, lo que puede resultar en un crecimiento eficiente y saludable de las plantas (Kumar et al., 2021).

El sistema NFT (nutrient film technique) en su traducción al español” técnica de película de nutrientes” es una técnica utilizada en la hidroponía donde una solución nutritiva fluye continuamente a través de una inclinada canaleta, proporcionando nutrientes a las raíces (Gaikwad et al., 2020). Este sistema es adecuado para cultivos de hojas verdes y hierbas, y requiere un monitoreo y control cuidadosos de los niveles de nutrientes (Anitha et al., 2023). Una de las ventajas del sistema NFT es que requiere un menor volumen de agua en comparación con otros métodos de cultivo, ya que la solución nutritiva se recircula continuamente a través de la canaleta (Massa et al., 2020).

El sistema aeropónico es una técnica avanzada en la hidroponía donde las raíces de las plantas se encuentran suspendidas en el aire y se rocían en una cámara de nebulización donde los atomizadores rocían la solución nutritiva sobre las raíces expuestas (R, 2020). Permite una alta oxigenación de las raíces, lo que promueve un crecimiento rápido y vigoroso de las plantas cabe recalcar que requiere un monitoreo y control cuidadosos de los niveles de nutrientes (Tunio et al., 2020). Es un sistema adecuado para cultivos de plantas de rápido crecimiento como hortalizas y plantas de flor (Serio et al., 2022).

El cultivo acuapónico es una combinación entre la hidroponía con la acuicultura, creando un sistema integrado en el que se cultivan plantas y se crían peces en un mismo sistema (Goddek & Körner, 2019). Los desechos de pescado se utilizan como nutrientes para las plantas, y las plantas actúan como filtros naturales, manteniendo el agua limpia y oxigenada para los peces (Danner et al., 2019). Este sistema puede ser altamente eficiente en términos de uso de recursos y nutrientes, requiere de un monitoreo y control cuidadosos de los parámetros (Abusin & Mandikiana, 2020).



Algunas de las áreas de investigación más destacadas relacionadas con los sistemas hidropónicos incluyen nutrición vegetal, tecnología de sistemas hidropónicos, fisiología vegetal, calidad y seguridad de los alimentos, y agricultura urbana y sostenibilidad (Modu et al., 2020). La investigación en estas áreas tiene como objetivo optimizar los nutrientes y las soluciones nutritivas, desarrollar y mejorar técnicas y sistemas hidropónicos, estudiar la fisiología y adaptación de las plantas en estos sistemas, garantizar la seguridad y calidad de los productos cultivados y promover la agricultura sostenible en entornos urbanos (Zimmermann & Fischer, 2020).

Sensores para agricultura hidropónica

Los sensores para agricultura hidropónica son dispositivos electrónicos o instrumentos de medición que se utilizan para monitorizar y controlar variables ambientales y parámetros del cultivo hidropónico (Mendon et al., 2022). Al ser un método de cultivo sin suelo hace que el monitoreo y control precisos sean esenciales para el éxito del cultivo (Elegado, 2022). Los sensores para agricultura hidropónica pueden variar en función del tipo de cultivo, la escala del sistema y los objetivos de cultivo. (Chowdhury et al., 2021) Pero suelen medir algunas variables clave, como: pH del agua, conductividad eléctrica (CE), temperatura del agua, humedad del aire, intensidad de la luz, oxígeno disuelto y CO₂ (Rusu et al., 2021).

Un sensor de pH del agua para agricultura hidropónica es un dispositivo que mide el nivel de acidez o alcalinidad del agua de la solución nutritiva en un sistema hidropónico (Yaqin et al., 2022). El pH es un factor crítico en la agricultura hidropónica, ya que afecta la disponibilidad y absorción de nutrientes por las plantas. (Ullah et al., 2019). Permiten monitorear y controlar los niveles de pH para mantenerlos en el rango óptimo para sus cultivos, lo que contribuye a un crecimiento saludable y óptimo de las plantas (Shetty et al., 2021).

Los sensores de conductividad eléctrica (CE) que se utilizan en la agricultura hidropónica son dispositivos que miden la capacidad del agua para conducir electricidad, indicando la concentración de sales disueltas, incluidos los nutrientes, en la solución nutritiva del sistema hidropónico (Michael et al., 2021). Es un parámetro importante en la agricultura hidropónica porque puede monitorear y controlar la concentración de nutrientes en la solución nutritiva, afectando directamente el crecimiento y desarrollo de las plantas (Vega et al., 2021). Permite ajustar la concentración de nutrientes en la solución nutritiva según las necesidades específicas de las plantas en cada etapa de crecimiento, lo que ayuda a aumentar la eficiencia y el rendimiento del cultivo (Mehboob et al., 2019).

Un sensor de temperatura de agua para es un instrumento que evalúa la temperatura del agua en la solución nutritiva de un sistema hidropónico (Hariono et al., 2021). La temperatura del agua es un elemento crucial en la agricultura hidropónica, ya que influye en la capacidad de las plantas para absorber nutrientes, así como en la actividad biológica y química del sistema (Ang et al., 2022). Por lo general, los sensores utilizados constan de una sonda o termistor que se sumerge en la solución nutritiva del agua, generando una señal eléctrica que es proporcional a la temperatura del agua (Joshitha et al., 2021).

Los sensores de humedad del aire utilizados en la agricultura hidropónica son instrumentos que evalúan el nivel de humedad presente en el ambiente que rodea al cultivo hidropónico (Dutta et al., 2021). La humedad del aire es un factor clave en la agricultura hidropónica, ya que tiene un impacto directo en la transpiración de las plantas y en la evaporación del agua en el sistema, lo cual puede afectar la absorción de nutrientes y el desarrollo de las plantas (Win et al., 2019).

Los sensores de intensidad de luz utilizados en la agricultura hidropónica son dispositivos que evalúan la cantidad de luz disponible para las plantas (Alipio et al., 2019). La luz juega un papel fundamental debido que es necesaria para la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas convierten la energía luminosa en energía química para su crecimiento y desarrollo (Puengsungwan & Jirasereeamornkul, 2019).

Los sensores de oxígeno disuelto utilizados en la agricultura hidropónica son instrumentos que evalúan la concentración de oxígeno disuelto en el agua de un sistema (Gur Yegül, 2023). El oxígeno disuelto es un factor crucial, ya que las plantas requieren oxígeno para su respiración y metabolismo, y su disponibilidad en el agua puede tener un impacto directo en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Al-Rawahy et al., 2019).

Los sensores de dióxido de carbono (CO₂) utilizados en la agricultura hidropónica son dispositivos que evalúan la concentración de CO₂ en el aire (Terence & Purushothaman, 2020). Permite optimizar las condiciones de crecimiento del cultivo, asegurando que las plantas reciban la cantidad adecuada (Ng & Mahkeswaran, 2021). El CO₂ es un gas esencial para la fotosíntesis de las plantas, y su disponibilidad en el aire puede tener un impacto directo en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Ojo & Zahid, 2022).

La investigación en este campo se centra en la optimización de las condiciones de cultivo, la mejora de la eficiencia y productividad del cultivo, la reducción del uso de recursos y la correlación entre los diferentes parámetros medidos para lograr un cultivo hidropónico de alta calidad y sostenible (Preite et al., 2023).



Sistema de monitoreo hidropónico

Un sistema de monitoreo hidropónico es un conjunto de herramientas, dispositivos y sensores que se utilizan para medir y registrar diversos parámetros y condiciones en un cultivo hidropónico (Hidayanti et al., 2020). Estos sistemas de monitoreo permiten a los agricultores obtener datos precisos y en tiempo real sobre el pH del agua, la conductividad eléctrica, la temperatura, la humedad, la intensidad de luz, el oxígeno disuelto, la concentración de CO₂ y otros parámetros importantes para el cultivo hidropónico (Taha et al., 2022). La información recopilada por el sistema de monitoreo hidropónico es utilizada para tomar decisiones informadas en la gestión del cultivo, como ajustar los niveles de nutrientes, agua y luz, y prevenir problemas como enfermedades o estrés en las plantas (Prapti et al., 2022). Los sistemas de monitoreo hidropónico pueden ser automatizados y estar conectados a sistemas de control, lo que permite un manejo más preciso y eficiente del cultivo hidropónico, mejorando la calidad y la productividad del cultivo (Wijaya et al., 2020).

Los sistemas de control, es un sistema de monitoreo hidropónico son componentes que posibilitan la toma de acciones automatizadas o manuales en función de la información recopilada por los sensores y registrada por los registradores de datos (Rathod et al., 2021). Estos sistemas de control pueden variar en funcionalidades y técnicas de implementación, adaptándose a las necesidades y requerimientos específicos del cultivo hidropónico en cuestión (J. D. ; Stevens et al., 2023). Utilizan diferentes técnicas, como la automatización de bombas y válvulas, el control de iluminación, temperatura y humedad, el ajuste de pH y conductividad eléctrica, la generación de alarmas y notificaciones, y la integración con sistemas de monitoreo remoto (Tatas et al., 2022b). Estas técnicas permiten tomar acciones automatizadas o manuales en base a la información recopilada por los sensores, asegurando condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de las plantas, y facilitando la gestión y supervisión del cultivo, incluso a distancia (Mahaboob et al., 2022).

El software de análisis de datos es una componente esencial en un sistema de monitoreo hidropónico, ya que el software permite procesar, interpretar y visualizar la información recolectada por los sensores y registradores de datos (Sambo et al., 2019). Esto brinda datos valiosos para la toma de decisiones y la optimización del cultivo hidropónico (Lopez-Guerrero et al., 2022). tiene varias funciones importantes, incluyendo la visualización en tiempo real de los datos de los sensores, el análisis de tendencias y patrones, la generación de alertas y notificaciones, la generación de informes, la integración con otros sistemas y el acceso remoto (Suryani et al., 2020). Permite procesar, interpretar y visualizar los datos recolectados para tomar decisiones informadas y optimizar el cultivo hidropónico para obtener mejores resultados (Cuong et al., 2022).



La comunicación remota es una parte importante de un sistema de monitoreo hidropónico porque le permite acceder y controlar los datos hidropónicos desde una ubicación remota (Lukito & Lukito, 2019). Algunos métodos comunes de comunicación conexiones por cable, comunicación celular, cloud computing y protocolos de comunicación estándar (Samijayani et al., 2020). Estos métodos permiten el acceso y control remoto de los datos del cultivo hidropónico, lo que facilita la toma de decisiones y el manejo eficiente del cultivo desde ubicaciones remotas (Muralimohan G, 2021).

Las áreas de investigación en sistemas de monitoreo hidropónico abarcan el desarrollo de sensores más precisos y económicos, la automatización y control mediante algoritmos avanzados, la gestión eficiente de datos y análisis, la optimización de nutrientes y manejo del agua, y la integración de tecnologías emergentes como IoT, robótica, realidad aumentada y virtual, y computación en la nube (Ghorbel et al., 2022). Estas investigaciones tienen como objetivo mejorar la gestión de los cultivos hidropónicos para maximizar su rendimiento y eficiencia (Gumisiriza et al., 2022).

Discusión

La investigación realizada sobre sistemas hidropónicos, sensores de cultivo hidropónico y sistemas de monitoreo hidropónico revela la importancia de estas tecnologías en el cultivo de plantas de manera eficiente y controlada (Ragaveena et al., 2021). Los sistemas hidropónicos ofrecen una alternativa viable al cultivo tradicional del suelo, lo que permite un control preciso del entorno de cultivo y la entrega de soluciones nutritivas directamente a las raíces de la planta (Velazquez-Gonzalez et al., 2022). En los sistemas hidropónicos se identifican diferentes tecnologías, cada una con sus ventajas y aplicaciones específicas (Wang et al., 2022).

Se presenta una revisión del estado de la cuestión sobre sistemas hidropónicos, sensores para agricultura hidropónica y sistemas de monitoreo hidropónico (Saad et al., 2021). Los resultados muestran que existen diversas categorías de sistemas hidropónicos, como el sistema de flujo y reflujo, el sistema NFT, el sistema aeropónico y el cultivo acuapónico (Rai, n.d.). Cada uno de estos sistemas ofrece ventajas y desafíos particulares en términos de control de nutrientes, riego y crecimiento de las plantas (Younis et al., 2021).

Por último, se examinan los sistemas de monitoreo hidropónico, que incluyen herramientas, equipos y sensores para medir y registrar parámetros y condiciones en tiempo real (Reyes Yanes et al., 2022). Estos sistemas brindan información invaluable para tomar decisiones informadas en el manejo de cultivos, ajustar los niveles de nutrientes, agua y luz, y proteger las plantas de problemas como enfermedades (Alwis et al., 2022). Los registradores de datos y los sistemas de control son componentes clave de los sistemas de monitoreo hidropónico, ya que recopilan y procesan la información generada por los sensores y toman medidas automáticas o manuales para mantener condiciones óptimas de crecimiento (Chavan et al., 2022).



Conclusiones

Los sistemas hidropónicos ofrecen un método eficiente y controlado para cultivar plantas sin suelo, utilizando diferentes técnicas como el sistema de flujo y reflujo, sistema NFT, sistema aeropónico y cultivo acuapónico. Estos sistemas permiten un mayor control sobre los nutrientes y el riego, lo que resulta en un crecimiento saludable de las plantas. Las áreas de investigación destacadas en este campo incluyen la nutrición vegetal, tecnología de sistemas hidropónicos, fisiología vegetal, calidad y seguridad de los alimentos, y agricultura urbana y sostenibilidad.

Estos sistemas permiten un mejor control de los nutrientes y el riego, lo que da como resultado un crecimiento saludable y vigoroso de las plantas. La capacidad de ajustar y optimizar los niveles de nutrientes y agua asegura un suministro constante y equilibrado de elementos esenciales para el desarrollo de las plantas. Además, dado que no dependen del suelo, los sistemas hidropónicos reducen los riesgos asociados con enfermedades, plagas y malezas transmitidas por el suelo, lo que contribuye a un entorno de cultivo más saludable y seguro.

Los sensores desempeñan un papel fundamental en la agricultura hidropónica, ya que permiten el monitoreo y control precisos de variables ambientales y parámetros del cultivo. Los sensores más utilizados incluyen los de pH del agua, conductividad eléctrica, temperatura del agua, humedad del aire, intensidad de la luz, oxígeno disuelto y CO₂. Estos sensores ayudan a ajustar los niveles de nutrientes y mantener las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas.

El monitoreo continuo de factores como el pH del agua, la conductividad, la temperatura del agua, la humedad del aire, la intensidad de la luz, el oxígeno disuelto y el dióxido de carbono permite ajustar y mantener las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas. Esta capacidad de control y regulación precisa garantiza un entorno estable y favorable para el crecimiento de las plantas, mejorando significativamente el rendimiento y la calidad de los cultivos.

Los sistemas de monitoreo hidropónico incluyen registradores de datos, sistemas de control y software de análisis de datos que recopilan, registran y procesan información generada por sensores. Estos sistemas ayudan a tomar decisiones informadas en el manejo de cultivos, asegurando condiciones óptimas y mejorando la calidad y productividad del cultivo hidropónico.

Además, los sistemas de monitoreo hidropónico, incluidos los registradores de datos, los sistemas de control y el software de análisis de datos, desempeñan un papel clave en la gestión eficaz de la hidroponía. Estos sistemas recopilan y procesan información generada por sensores para permitir decisiones informadas basadas en datos para optimizar el rendimiento de los cultivos. Al brindar una visión holística de la salud de los cultivos, estos sistemas ayudan a identificar problemas potenciales de manera temprana e implementar estrategias correctivas rápidas y efectivas.

Referencias Bibliográficas

- Abusin, S. A. A., & Mandikiana, B. W. (2020). Towards sustainable food production systems in Qatar: Assessment of the viability of aquaponics. *Global Food Security*, 25, 100349. <https://doi.org/10.1016/j.GFS.2020.100349>
- Ali Al Meselmani, M. (2023). Nutrient Solution for Hydroponics. *Recent Research and Advances in Soilless Culture*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.101604>
- Alipio, M. I., Dela Cruz, A. E. M., Doria, J. D. A., & Fruto, R. M. S. (2019). On the design of Nutrient Film Technique hydroponics farm for smart agriculture. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(3), 315–324. <https://doi.org/10.1016/j.EAEF.2019.02.008>
- Al-Rawahy, M. S., Al-Rawahy, S. A., Al-Mulla, Y. A., & Nadaf, S. K. (2019). Influence of Nutrient Solution Temperature on Its Oxygen Level and Growth, Yield and Quality of Hydroponic Cucumber. *Journal of Agricultural Science*, 11(3). <https://doi.org/10.5539/jas.v11n3p75>
- Ang, H. N., Lim, M. W., & Chua, W. S. (2022). Design of a Water Quality Monitoring System Utilizing IOT Platform for Hydroponics Application. *AIP Conference Proceedings*, 2610(1). <https://doi.org/10.1063/5.0099653/2830400>
- Anitha, M. L., Gowda, G. S., Tejaswini, L., Prokshith, P., & Gupta, A. P. S. (2023). Smart Identification of Nutrient Based pH for an NFT Hydroponic System. 2023 *Advanced Computing and Communication Technologies for High Performance Applications (ACCTHPA)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ACCTHPA57160.2023.10083370>
- Chiu, M. C., Chen, C. L., Chen, C. W., & Lin, H. J. (2022). Weather fluctuation can override the effects of integrated nutrient management on fungal disease incidence in the rice fields in Taiwan. *Scientific Reports* 2022 12:1, 12(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08139-7>
- Chowdhury, M., Islam, M. N., Reza, M. N., Ali, M., Rasool, K., Kiraga, S., Lee, D. hyun, & Chung, S. O. (2021). Sensor-Based Nutrient Recirculation for Aeroponic Lettuce Cultivation. *Journal of Biosystems Engineering*, 46(1), 81–92. <https://doi.org/10.1007/S42853-021-00089-8/METRICS>
- Claros-Perdomo, D.-C., Millán-Rojas, E.-E., Gallego-Torres, A.-P., Claros-Perdomo, D.-C., Millán-Rojas, E.-E., & Gallego-Torres, A.-P. (2020). Uso de la realidad aumentada, gamificación y m-learning. *Revista Facultad de Ingeniería*, 29(54), 12264. <https://doi.org/10.19053/01211129.V29.N54.2020.12264>
- Cuong, H., A□ Bich, N., Vo, T., Quang, T. B., Ngo, H., Bich, N.---, & Ngo, T.---Q. H. (2022). Automatic Monitoring System for Hydroponic Farming: IoT-Based Design and Development. *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, 12(3), 210–219. <https://doi.org/10.55493/5005.V12I3.4630>
- Danner, R. I., Mankasingh, U., Anamthawat-Jonsson, K., & Thorarinsdottir, R. I. (2019). Designing Aquaponic Production Systems towards Integration into Greenhouse Farming. *Water* 2019, Vol. 11, Page 2123, 11(10), 2123. <https://doi.org/10.3390/W11102123>
- Dey, S., Sreenivasulu, A., Veerendra, G. T. N., Rao, K. V., & Babu, P. S. S. A. (2022). Renewable energy present status and future potentials in India: An overview. *Innovation and Green Development*, 1(1), 100006. <https://doi.org/10.1016/j.IGD.2022.100006>
- Dutta, A., Nag, I., Basu, S., Seal, D., & Gayen, R. K. (2021). IoT based Indoor Hydroponics System. 2021 *5th International Conference on Electronics, Materials Engineering and Nano-Technology, IEMENTech 2021*. <https://doi.org/10.1109/IEMENTECH53263.2021.9614730>
- Elegado, A. N. (2022). The Novel Approaches in Monitoring and Controlling Hydroponic Greenhouse Systems: A Literature Review. *Proceedings - 2022 2nd International Conference in Information and Computing Research, ICORE 2022*, 231–237. <https://doi.org/10.1109/ICORE58172.2022.00059>
- Gaikwad, D., Maitra, S., & Gaikwad, D. J. (2020). Hydroponics Cultivation of Crops Arsenic in food chain: cause, effect and mitigation View project Research on Small millets View project Hydroponics Cultivation of Crops. <https://doi.org/10.30954/NDP-PC-SA.2020.31>
- Ghorbel, R., Chakchak, J., & Koşum, N. (2022). Hydroponic Technology for Green Fodder Production: Concept, Advantages, and Limits The Potential of Solar Energy for Sustainable Water Resource Development in Rural Areas in Zambia View project APPLICATION OF RURAL PHOTOVOLTAIC WATER PUMPING SYSTEM USING IMMERSED PUMP AND DC MOTOR View project. <https://doi.org/10.52460/issc.2022.010>
- Goddek, S., & Körner, O. (2019). A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: A case study for system sizing in different environments. *Agricultural Systems*, 171, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.AGSY.2019.01.010>

Gur Yegül, U. (2023). Development of an Embedded Software and Control Kit to Be Used in Soilless Agriculture Production Systems. *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 3706, 23(7), 3706. <https://doi.org/10.3390/S23073706>

Hariono, T., Chanifuddin, A., & Hasbullah, K. A. W. (2021). Monitoring Automation System Design Hydroponics Based on Chatbot. *NEWTON: Networking and Information Technology*, 1(2), 88–93. <https://ejournal.unwaha.ac.id/index.php/newton/article/view/1616>

Hemathilake, D. M. K. S., & Gunathilake, D. M. C. C. (2022). High-productive agricultural technologies to fulfill future food demands: Hydroponics, aquaponics, and precision/smart agriculture. *Future Foods*, 555–567. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91001-9.00018-9>

Hidayanti, F., Rahmah, F., & Sahro, A. (2020). Mockup as Internet of Things Application for Hydroponics Plant Monitoring System. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(5), 5157–5164.

Joshitha, C., Kanakaraja, P., Kumar, K. S., Akanksha, P., & Satish, G. (2021). An eye on hydroponics: The iot initiative. *Proceedings of the 7th International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2021*, 553–557. <https://doi.org/10.1109/ICEES51510.2021.9383694>

Kour, K., Gupta, D., Gupta, K., Dhiman, G., Juneja, S., Viriyasitavat, W., Mohafez, H., & Islam, M. A. (2022). Smart-Hydroponic-Based Framework for Saffron Cultivation: A Precision Smart Agriculture Perspective. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 1120, 14(3), 1120. <https://doi.org/10.3390/SU14031120>

Kumar, S., Singh, M., Yadav, K. K., & Singh, P. K. (2021a). Opportunities and constraints in hydroponic crop production systems: A review. *Environment Conservation Journal*, 22(3), 401–408. <https://doi.org/10.36953/ECJ.2021.22346>

Kumar, S., Singh, M., Yadav, K. K., & Singh, P. K. (2021b). Opportunities and constraints in hydroponic crop production systems: A review. *Environment Conservation Journal*, 22(3), 401–408. <https://doi.org/10.36953/ECJ.2021.22346>

Kumar, S., Singh, M., Yadav, K. K., & Singh, P. K. (2021c). Opportunities and constraints in hydroponic crop production systems: A review. *Environment Conservation Journal*, 22(3), 401–408. <https://doi.org/10.36953/ECJ.2021.22346>

Langenfeld, N. J., & Bugbee, B. (2022). Continuous pH Monitoring and Control: Selecting and Interfacing Continuous pH Monitoring and Control: Selecting and Interfacing the Electrode, Controller, and Datalogger the Electrode, Controller, and Datalogger Continuous pH monitoring and control: Selecting and interfacing the electrode, controller, and datalogger. https://www.google.com/search?sxsrff=APwXEdcXC_aeuBvVL Dj KC NC I-uehVCzpKwG:1683728836734&q=Continuous+pH+Monitoring+and+Control:+Selecting+and+Interfacing+Continuous+pH+Monitoring+and+Control:+Selecting+and+Interfacing+the+Electrode,+Controller,+and+Data+Logger+the+Electrode,+Controller,+and+Data+Logger+Continuous+pH+monitoring+and+control:+Selecting+and+interfacing+the+electrode,+controller,+and+datalogger&spell=1&sa=X&ved=2ahUKEwJxpNjZ-ur-AhURVTABHcSkB6oQBSgAegQICBAB

Lin, L., Yang, H., & Xu, X. (2022). Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 975. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2022.880246/BIBTEX>

Lopez-Guerrero, M. G., Wang, P., Phares, F., Schachtman, D. P., Alvarez, S., & van Dijk, K. (2022). A glass bead semi-hydroponic system for intact maize root exudate analysis and phenotyping. *Plant Methods*, 18(1), 1–21. <https://doi.org/10.1186/S13007-022-00856-4/TABLES/3>

Lukito, R. B., & Lukito, C. (2019). Development of IoT at hydroponic system using raspberry Pi. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 17(2), 897–906. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.V17I2.9265>

Mahaboob, M., Tanushree, N., Rogini, M., Vishnupranavi, N., & Vidhya Bharathi, S. (2022). Movable mini-Hydroponic Home Garden with Automated Monitoring System. *8th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, ICACCS 2022*, 1179–1183. <https://doi.org/10.1109/ICACCS54159.2022.9785239>

Massa, D., Magán, J. J., Montesano, F. F., & Tzortzakakis, N. (2020). Minimizing water and nutrient losses from soilless cropping in southern Europe. *Agricultural Water Management*, 241, 106395. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106395>

Mehboob, A., Ali, W., Rafiqat, T., & Talib, A. (2019). Automation and Control System of EC and pH for Indoor Hydroponics System.

Mendon, A., Votavat, B. M., & Singh, S. (2022). Design and Construction of Automated Hydroponics System with Remote Monitoring and Control. *2022 13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies, ICCCNT 2022*. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT54827.2022.9984617>

Michael, G. W., Tay, F. S., & Then, Y. L. (2021). Development of Automated Monitoring System for Hydroponics Vertical Farming. *Journal of Physics: Conference Series*, 1844(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1844/1/012024>

- Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R., & Cesco, S. (2019). *Hydroponic Solutions for Soilless Production Systems: Issues and Opportunities in a Smart Agriculture Perspective*. *Frontiers in Plant Science*, 10, 923. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.00923/BIBTEX>
- Samijayani, O. N., Darwis, R., Rahmatia, S., Mujadin, A., & Astharini, D. (2020). *Hybrid ZigBee and WiFi Wireless Sensor Networks for Hydroponic Monitoring*. 2nd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, ICECCE 2020. <https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179342>
- Saquee, F. S., Diakite, S., Kavhiza, N. J., Pakina, E., & Zargar, M. (2023). *The Efficacy of Micronutrient Fertilizers on the Yield Formulation and Quality of Wheat Grains*. *Agronomy* 2023, Vol. 13, Page 566, 13(2), 566. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13020566>
- Sathyanarayana, S. R., Gangadhar, W. V., Badrinath, M. G., Ravindra, R. M., & Shriramrao, A. U. (2022). *Hydroponics: An Intensified Agriculture Practice to Improve Food Production*. *Reviews in Agricultural Science*, 10, 101–114. https://doi.org/10.7831/RAS.10.0_101
- Serio, F., Manuel, R., Machado, A., Fussy, A., & Papenbrock, J. (2022). *An Overview of Soil and Soilless Cultivation Techniques—Chances, Challenges and the Neglected Question of Sustainability*. *Plants* 2022, Vol. 11, Page 1153, 11(9), 1153. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11091153>
- Shetty, H. M., Pai, K., & Mallya, N. (2021). *Engineering and Manufacturing*. *Engineering and Manufacturing*, 4, 33–41. <https://doi.org/10.5815/ijem.2021.04.04>
- Soheli, S. J., Jahan, N., Hossain, M. B., Adhikary, A., Khan, A. R., & Wahiduzzaman, M. (2022). *Smart Greenhouse Monitoring System Using Internet of Things and Artificial Intelligence*. *Wireless Personal Communications*, 124(4), 3603–3634. <https://doi.org/10.1007/S11277-022-09528-X>
- Stevens, J. D., Murray, D., Diepeveen, D., & Toohey, D. (2022). *Adaptalight: An Inexpensive PAR Sensor System for Daylight Harvesting in a Micro Indoor Smart Hydroponic System*. *Horticulturae* 2022, Vol. 8, Page 105, 8(2), 105. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8020105>
- Stevens, J. D., Murray, D., Sozzi, M., Cogato, A., Laroche-Pinel, E., Stevens, J. D., Murray, D., Diepeveen, D., & Toohey, D. (2023). *Development and Testing of an IoT Spectroscopic Nutrient Monitoring System for Use in Micro Indoor Smart Hydroponics*. *Horticulturae* 2023, Vol. 9, Page 185, 9(2), 185. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE9020185>
- Suryani, E., Putra, L. V., Imah, N., Mufafidah, M., & Hidayah, C. (2020). *Analysis of the Hydroponics Program in Instilling an Environmental Care Attitude for Elementary School Students*. *Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Ilmu Pendidikan: E-Saintika*, 4(3), 299–307. <https://doi.org/10.36312/E-SAINTIKA.V4I3.273>
- Sutulienė, R., Laužikė, K., Pukas, T., & Samuolienė, G. (2022). *Effect of Light Intensity on the Growth and Antioxidant Activity of Sweet Basil and Lettuce*. *Plants* 2022, Vol. 11, Page 1709, 11(13), 1709. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11131709>
- Szekely, I., & Fijakli, M. H. (2022). *Bioponics as a Promising Approach to Sustainable Agriculture: A Review of the Main Methods for Producing Organic Nutrient Solution for Hydroponics*. *Water* 2022, Vol. 14, Page 3975, 14(23), 3975. <https://doi.org/10.3390/W14233975>
- Taha, M. F., ElMasry, G., Gouda, M., Zhou, L., Liang, N., Abdalla, A., Rousseau, D., & Qiu, Z. (2022). *Recent Advances of Smart Systems and Internet of Things (IoT) for Aquaponics Automation: A Comprehensive Overview*. *Chemosensors* 2022, Vol. 10, Page 303, 10(8), 303. <https://doi.org/10.3390/CHEMOSENSORS10080303>
- Tatas, K., Al-Zoubi, A., Christofides, N., Zannettis, C., Chrysostomou, M., Panteli, S., & Antoniou, A. (2022a). *Reliable IoT-Based Monitoring and Control of Hydroponic Systems*. *Technologies* 2022, Vol. 10, Page 26, 10(1), 26. <https://doi.org/10.3390/TECHNOLOGIES10010026>
- Tatas, K., Al-Zoubi, A., Christofides, N., Zannettis, C., Chrysostomou, M., Panteli, S., & Antoniou, A. (2022b). *Reliable IoT-Based Monitoring and Control of Hydroponic Systems*. *Technologies* 2022, Vol. 10, Page 26, 10(1), 26. <https://doi.org/10.3390/TECHNOLOGIES10010026>
- Terence, S., & Purushothaman, G. (2020). *Systematic review of Internet of Things in smart farming*. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 31(6), e3958. <https://doi.org/10.1002/ETI.3958>
- Tunio, M. H., Gao, J., Shaikh, S. A., Lakhiar, I. A., Qureshi, W. A., Solangi, K. A., Chandio, F. A., Tunio, M. H., Gao, J., Shaikh, S. A., Lakhiar, I. A., Qureshi, W. A., Solangi, K. A., & Chandio, F. A. (2020). *Potato production in aeroponics: An emerging food growing system in sustainable agriculture for food security*. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80(1), 118–132. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000100118>

- Ullah, A., Aktar, S., Sutar, N., Kabir, R., & Hossain, A. (2019). Cost Effective Smart Hydroponic Monitoring and Controlling System Using IoT. *Intelligent Control and Automation*, 10(04), 142–154. <https://doi.org/10.4236/ICA.2019.104010>
- Vega, J. A. Dela, Gonzaga, J. A., & Lim, L. A. G. (2021). Fuzzy-based automated nutrient solution control for a hydroponic tower system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1109(1), 012064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1109/1/012064>
- Wang, S., Adekunle, A., & Raghavan, V. (2022). Exploring the integration of bioelectrochemical systems and hydroponics: Possibilities, challenges, and innovations. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132855. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132855>
- Wijaya, R., Hariono, B., Saputra, T. W., & Rukmi, D. L. (2020). Development of plant monitoring systems based on multi-camera image processing techniques on hydroponic system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 411(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/411/1/012002>
- Win, T. T., Thazin, T., Lin Aung, Z., Tun, T., & W. (2019). IoT based Hydroponic Temperature and Humidity Control System using Fuzzy Logic AI and IoT methods for plant disease detection in developing countries View project Recurrent Neural Network for weather prediction of Green house with Low Cost Sensors View project IoT based Hydroponic Temperature and Humidity Control System using Fuzzy Logic. <https://www.researchgate.net/publication/332098358>
- Yamin*, H., Yusoff, H. ., Ghafar, Mohd Jumain Jalil, & S.Kasolang. (2022). Design of real-time electrical conductivity monitoring contr. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=bkkmEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA30&dq=Data+loggers+are+devices+used+in+hydroponic+monitoring+systems.&ots=zJrdEqhOic&sig=vUDfZgnZD1ra6IG2Wil4fojA1m8#v=onepage&q&f=false>
- Yaqin, N., Zuhri, A. F., & Hariono, T. (2022). Automatic Control of Hydroponic Plant Ph Levels Using Sensor Sku Sen 0161. *NEWTON: Networking and Information Technology*, 1(3), 125–131. <https://doi.org/10.32764/NEWTON.V1I3.2094>
- Zimmermann, M., & Fischer, M. (2020). Impact assessment of water and nutrient reuse in hydroponic systems using Bayesian Belief Networks. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 10(4), 431–442. <https://doi.org/10.2166/WRD.2020.026>