

Smart solar-powered hydroponic system based on artificial intelligence as a replicable model for sustainable food development in vulnerable communities

Maria Elizabeth Puelles Bulnes, Dr¹; Rosa Sumactika Delgadillo Avila, Dr²; Igor Jovino Aguilar Alonso, Dr³; Jorge Luis Inche Mitma, Dr⁴; V.A.A. Espinoza, Dr⁵; Angie L. Atoche Puelles, Mg⁶
^{1,2,3,4}National University of San Marcos, Perú, mpuellesb@unmsm.edu.pe, rdelgadilloa@unmsm.edu.pe, iaguilara@unmsm.edu.pe, jinchem@unmsm.edu.pe; ⁵National University of Callao, Perú, vaatochee@unac.edu.pe; ⁶Federal University of Minas Gerais, Brazil, angie.puelles@gmail.com

Abstract— This study presents the design, implementation, and experimental evaluation of a compact hydroponic system based on the Nutrient Film Technique (NFT), integrated with solar photovoltaic energy, IoT monitoring, and intelligent control for domestic applications and vulnerable communities in Latin America. The objective was to evaluate the technical feasibility of a replicable model capable of improving water, energy, and crop management efficiency through automation and continuous monitoring. As a distinguishing feature, the system incorporates an Intelligent Microgreenhouse Health Indicator (IISM) based on a Random Forest machine learning model, designed to integrate multiple environmental and physicochemical variables and translate them into an operational indicator to support monitoring and user decision-making.

*A prototype was developed using a Raspberry Pi, environmental and physicochemical sensors, actuators, and an autonomous photovoltaic energy system. The experimental evaluation was conducted over 30 days following the transfer of six lettuce (*Lactuca sativa*) seedlings with an initial height of approximately 8–10 cm into the Microgreenhouse, considering productive, energetic, water-use, and operational performance indicators. The results showed an average production of 280 ± 10 g per plant, reaching 1.68 kg per cultivation cycle, corresponding to a 16.7% yield increase compared with the equivalent manual system. Water consumption was reduced by 72.2%, requiring 15 L compared to 54 L per cycle, while the energy subsystem achieved 100% grid independence with a 16-hour nighttime autonomy.*

Additionally, the artificial intelligence model achieved 91.2% accuracy in classifying the operational status of the Microgreenhouse, supporting automated decision-making and reducing manual intervention by 50–60%.

It is concluded that the integration of NFT hydroponics, solar energy, and artificial intelligence represents a technically viable alternative to strengthen domestic sustainable food production systems and expand access to efficient agricultural technologies in contexts with limited space, water availability, or energy infrastructure.

Keywords— Hydroponics, Internet of Things (IoT), Solar Energy, Sustainable Agriculture, Artificial Intelligence, Random Forest.

Sistema Hidropónico solar Inteligente basado en Inteligencia Artificial como modelo replicable para el Desarrollo Alimentario Sostenible en Comunidades Vulnerables

Maria Elizabeth Puelles Bulnes, Dr¹; Rosa Sumactika Delgadillo Avila, Dr²; Igor Jovino Aguilar Alonso, Dr³; Jorge Luis Inche Mitma, Dr⁴; V.A.A. Espinoza, Dr⁵; Angie L. Atoche Puelles, Mg⁶
^{1,2,3,4}Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, mpuellesb@unmsm.edu.pe, rdelgadilloa@unmsm.edu.pe, iaguilara@unmsm.edu.pe, jinchem@unmsm.edu.pe; ⁵Universidad Nacional del Callao, Perú, vaatochee@unac.edu.pe; ⁶Universidade Federal Minas Gerais, Brasil, angie.puelles@gmail.com

Resumen - Este estudio presenta el diseño, implementación y evaluación experimental de un sistema hidropónico compacto tipo NFT (Nutrient Film Technique), integrado con energía solar fotovoltaica, monitoreo IoT y control inteligente orientado a aplicaciones domésticas y comunidades vulnerables en América Latina. El objetivo fue evaluar la viabilidad técnica de un modelo replicable capaz de mejorar la eficiencia en el uso de agua, energía y operación del cultivo mediante automatización y monitoreo continuo. Como elemento diferenciador, el sistema incorpora un Indicador Inteligente de Salud del Microinvernadero (IISM) basado en un modelo de aprendizaje automático Random Forest, diseñado para integrar múltiples variables ambientales y fisicoquímicas y traducirlas en un indicador operativo para apoyar el monitoreo y la toma de decisiones del usuario. Se desarrolló un prototipo basado en Raspberry Pi, sensores ambientales y fisicoquímicos, actuadores y un sistema fotovoltaico autónomo. La evaluación se realizó durante 30 días posteriores al ingreso al microinvernadero de seis plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*) con una altura inicial aproximada de 6–8 cm, considerando indicadores productivos, energéticos, hídricos y operativos. Los resultados mostraron una producción promedio de 280 ± 10 g por planta, alcanzando 1.68 kg por ciclo, equivalente a un incremento del rendimiento de 16.7 % respecto al sistema manual equivalente. El consumo hídrico se redujo en 72.2 %, utilizando 15 L frente a 54 L por ciclo, mientras que el sistema energético operó con 100 % de autonomía respecto a la red eléctrica y una autonomía nocturna de 16 horas. Adicionalmente, el modelo inteligencia artificial alcanzó una precisión de 91.2 %, en la clasificación del estado operativo del microinvernadero, permitiendo apoyar la toma de decisiones automáticas y reducir la intervención manual entre 50 % y 60 %.

Se concluye que la integración entre hidroponía NFT, energía solar e inteligencia artificial constituye una alternativa técnicamente viable para fortalecer sistemas domésticos de producción sostenible y ampliar el acceso a tecnologías agrícolas eficientes en contextos con limitaciones de espacio, agua o infraestructura energética.

Palabras clave-- Hidroponía, Internet de las Cosas (IoT), Energía Solar, Agricultura sostenible, Inteligencia Artificial.

I. Introducción

A. Sistemas hidropónicos y sostenibilidad alimentaria

La inseguridad alimentaria en América Latina enfrenta una crisis alimentaria crítica, más de 49 millones de personas padecen hambre [1], situación agravada por el cambio climático, la crisis postpandemia y las fallas en las cadenas de suministro. Este escenario perpetúa ciclos de pobreza en

comunidades vulnerables al limitar su acceso a nutrición básica. Por su parte, la agricultura convencional resulta inviable en estos contextos debido a barreras estructurales como la degradación de suelos, la escasez hídrica y la dependencia de insumos costosos [2]-[4]. Esta incapacidad de adaptación ante la volatilidad climática compromete la estabilidad productiva de quienes poseen menos recursos [5],[6].

Ante este escenario, la hidroponía emerge como una alternativa sostenible por su alta eficiencia hídrica y su capacidad de producir en espacios reducidos o suelos marginales [7]. Al prescindir de tierra cultivable y permitir un control preciso de nutrientes, la hidroponía multiplica las posibilidades productivas en entornos donde el suelo es un bien escaso, como zonas urbanas o con superficies degradadas [8]. Un metaanálisis global de 499 observaciones respalda la hidroponía como una vía de intensificación sostenible, concluyendo que los rendimientos en ambientes controlados superan consistentemente a la agricultura tradicional en hortalizas frescas. No obstante, el estudio subraya que la eficiencia varía según el tipo de cultivo y la orientación del sistema, destacando la necesidad de optimizar los entornos productivos para maximizar resultados [9].

De igual manera, el cultivo hidropónico en el hogar se consolida como una estrategia fundamental de agricultura familiar y urbana, actuando como una herramienta clave para la resiliencia alimentaria. Este enfoque permite a las comunidades vulnerables transformar sus propios espacios en sistemas productivos sostenibles que minimizan el gasto de recursos hídricos y fortalecen la seguridad alimentaria local. Al aprovechar los recursos y la mano de obra familiar, estos sistemas empoderan a los hogares, incrementando su capacidad de adaptación frente a la volatilidad climática y garantizando una gestión autónoma de su propia nutrición [10]. Sin embargo, su implementación de estos sistemas exige una supervisión constante de parámetros como el pH y la conductividad eléctrica (CE). Estas exigencias técnicas, sumadas a la falta de sistemas adaptados a espacios domésticos no convencionales, actúan como barreras de adopción en comunidades con acceso restringido a formación o tecnología [11]. Ante esto, investigaciones recientes sugieren que la automatización mediante sensores simples y sistemas modulares de bajo costo puede reducir estas brechas, que esta tecnología sea accesible y

funcional sin requerir infraestructuras complejas [12]-[15]. A esto se suma la necesidad de integrar interfaces de comunicación inteligente que funcionen como un indicador de salud del cultivo; mediante alertas en tiempo real y simplificadas, el sistema guía al usuario en la gestión de agua y nutrientes, permitiendo que la tecnología asuma la complejidad técnica. Así, se garantiza la eficiencia operativa sin exigir al usuario conocimientos previos en tecnología o agronomía.

B. Inteligencia artificial en agricultura inteligente

En este escenario, la Inteligencia Artificial (IA) y la agricultura de precisión emergen como catalizadoras de una nueva generación de sistemas hidropónicos. Mediante algoritmos de aprendizaje automático, es posible optimizar en tiempo real variables críticas como el pH, la conductividad eléctrica y los ciclos de iluminación, anticipándose a desequilibrios que afecten el cultivo [16]. La evidencia experimental demuestra que la automatización no solo acelera el ciclo productivo y mejora la uniformidad del crecimiento, sino que optimiza el uso de fertilizantes y reduce errores humanos, validando la viabilidad de sistemas domésticos para la producción local en contextos urbanos [17].

Para garantizar la replicabilidad en comunidades con infraestructura deficitaria, la integración de energía solar fotovoltaica confiere a estas instalaciones una autonomía fundamental. La combinación de generación renovable y sistemas de almacenamiento permite que sensores, bombas y unidades de control operen de manera continua, desacoplando la producción alimentaria de la inestabilidad de la red eléctrica convencional [18]. Esta sinergia tecnológica permite alcanzar eficiencias hídricas de hasta un 90% superior a la agricultura tradicional, consolidando a la hidroponía de precisión como una herramienta de alta eficiencia y bajo mantenimiento [8].

No obstante, persiste un desafío estructural crítico: la mayoría de estas soluciones inteligentes están diseñadas para la escala industrial, con altos costos y dependencia de infraestructuras complejas. Existe una brecha significativa en el diseño de sistemas que sean realmente accesibles y de bajo costo. Por ello, el desarrollo tecnológico debe trascender la eficiencia técnica para incorporar principios de justicia social y diseño participativo [19]; solo mediante soluciones contextualizadas y de fácil apropiación comunitaria, la tecnología podrá convertirse en una verdadera herramienta de transformación social en entornos vulnerables.

C. Sistemas Inteligentes y Autonomía Energética

La agricultura inteligente ha evolucionado mediante la integración de técnicas de IA y el Internet de las Cosas (IoT) para maximizar el rendimiento de los cultivos. Investigaciones recientes demuestran que el uso de algoritmos de Machine Learning, como el modelo Random Forest, permite alcanzar precisiones superiores al 98% en la predicción de cosechas y gestión de nutrientes [16],[20]. Asimismo, la implementación de sensores conectados a plataformas en la nube (AWS) y aplicaciones móviles ha validado la posibilidad de reducir drásticamente la intervención humana mediante el control

remoto en tiempo real de variables como el pH y la conductividad eléctrica [21]. Estas tecnologías, apoyadas en redes de comunicación de bajo consumo como LoRaWAN, no solo optimizan el uso de agua y agroquímicos (tecnología VRT), sino que fortalecen la seguridad alimentaria al permitir anticipar la producción y demanda mediante modelos de series de tiempo [22], [23]. Sin embargo, la eficiencia técnica de estos sistemas no garantiza su viabilidad en contextos de vulnerabilidad social si no se resuelve la dependencia de la infraestructura energética convencional. La integración de sistemas fotovoltaicos *off-grid* surge como una solución fundamental para dotar de autonomía operativa a sensores y bombas en zonas con acceso limitado a la red eléctrica. Experiencias en comunidades rurales y asentamientos vulnerables demuestran que la energía solar es técnica y económicamente viable cuando se acompaña de un diseño centrado en la resiliencia y la formación local [24],[25]. Desde la perspectiva de la ingeniería humanitaria, el éxito de estas intervenciones depende de diagnósticos participativos y de una transferencia tecnológica que asegure la apropiación comunitaria y la sostenibilidad a largo plazo [26],[27].

A pesar de estos avances, la literatura evidencia un vacío en el desarrollo de modelos que integren de manera explícita la hidroponía, la inteligencia artificial y la autonomía energética bajo un enfoque de replicabilidad para comunidades domésticas. La mayoría de las soluciones de precisión actuales son difícilmente transferibles debido a sus altos costos y complejidad operativa [28].

El presente estudio se enmarca en la intersección entre la innovación tecnológica y la soberanía alimentaria urbana. Se propone diseñar, implementar y evaluar un sistema hidropónico solar inteligente basado en IA, concebido como un modelo replicable para familias en contextos domésticos urbanos. El objetivo central es trasladar la capacidad productiva del campo al entorno residencial, superando las barreras del espacio limitado y la falta de tiempo. Mediante la automatización y el uso de energía renovable, se busca que cualquier hogar, independientemente de su acceso a tierra o conocimientos agrícolas, pueda gestionar un ciclo de cultivo eficiente, convirtiendo la vivienda en un nodo de producción sostenible y resiliente en América Latina. La investigación no se limita a los aspectos técnicos, sino que integra las condiciones sociales, económicas y formativas que permitirían su adopción efectiva y escalable. De esta forma, se contribuye tanto al acervo de conocimiento sobre aplicaciones de IA en agricultura urbana como a la generación de herramientas concretas para enfrentar el desafío ético y social de nuestro tiempo: garantizar el derecho a la alimentación para todas las personas, independientemente de su lugar de origen o condición socioeconómica.

II. Metodología

La presente investigación corresponde a un estudio de tipo aplicada, cuantitativa y experimental, desarrollado mediante la implementación y evaluación piloto de un sistema hidropónico compacto integrado con energía solar, monitoreo IoT e inteligencia artificial. A continuación, se presenta la

descripción y definición de los dispositivos e instrumentos utilizados en este trabajo.

A. Diseño de Variables

1. Variable Independiente

Sistema hidropónico inteligente automatizado, basado en tecnologías de monitoreo, control y autonomía energética para la gestión del microinvernadero.

2. Variable Dependiente

Desempeño del sistema hidropónico, evaluado mediante indicadores productivos, fisicoquímicos, energéticos y de eficiencia operativa.

B. Arquitectura del Sistema (Hardware)

La arquitectura se divide en tres capas funcionales que permiten el control en lazo cerrado: Entrada (Sensado), Procesamiento y Salida (Actuación).

1. Unidad Central de Procesamiento

Raspberry Pi 4: El núcleo de control del sistema hidropónico es una Raspberry Pi 4, seleccionada por su arquitectura de ordenador de placa reducida que integra un procesador (CPU), memoria RAM y amplias capacidades de conectividad (USB, Ethernet, WiFi y Bluetooth). Su elección se fundamenta en su capacidad para ejecutar tareas de alta carga computacional en un formato compacto y eficiente. Se encarga de la lectura de sensores, ejecución de algoritmos de control en Python, gestión de la base de datos y conectividad web. Su capacidad de procesamiento permite la futura integración de modelos de Inteligencia Artificial (IA) y la conexión con una plataforma web para supervisión remota, ver Fig.1:



Fig. 1 Raspberry Pi 4. Adaptado de RedesZone por Sergio De Luz, 2019.

2. Capa de Sensado (Monitoreo de Variables).

Para la adquisición de datos se seleccionaron instrumentos de alta precisión:

a. *Sensor de temperatura (MCP 9808)*: Para la monitorización del microclima interno, se seleccionó el mencionado sensor, debido a su alta precisión y estabilidad en la medición de temperatura ($\pm 0.25^\circ\text{C}$ en el rango típico de operación). Este dispositivo incorpora un convertidor analógico-digital de alta resolución (hasta 16 bits), proporcionando datos confiables a través de una interfaz de comunicación I2C, lo que permite una integración eficiente con la Raspberry Pi y la conexión de múltiples dispositivos en el mismo bus, optimizando el uso de pines GPIO.

Su implementación es fundamental para la estabilidad del sistema por las siguientes razones:

- **Control de Stress**: Permite la activación automatizada de ventiladores y actuadores térmicos para mantener el cultivo dentro de rangos fisiológicos óptimos.

- **Prevención de Condiciones Adversas**: Facilita la detección precisa de variaciones de temperatura que, en conjunto con otros sensores (como humedad), contribuyen al análisis del punto de rocío y a la anticipación de condiciones favorables para la proliferación de patógenos.
- **Eficiencia Energética y Precisión**: Su bajo consumo energético, junto con su alta resolución de medición, permite optimizar el rendimiento del sistema, especialmente en configuraciones alimentadas por energía solar, garantizando lecturas confiables sin comprometer la autonomía, ver Fig.2:



Fig. 2 sensor MCP9808.

b. *Sensor de temperatura sumergible DS18B20*: Se utilizó el sensor digital DS18B20 (IP68) con protocolo 1-Wire para el monitoreo térmico de la solución nutritiva (Precisión: $\pm 0.5^\circ\text{C}$). Su importancia radica en la Ley de Henry, que establece que la solubilidad del oxígeno disminuye al aumentar la temperatura. El dispositivo permite prevenir la hipoxia radicular y la proliferación de patógenos, garantizando que el sistema opere en el rango óptimo ($18-22^\circ\text{C}$) para maximizar la absorción de nutrientes y la eficiencia fisiológica del cultivo, ver Fig.3:

Pin Configurations

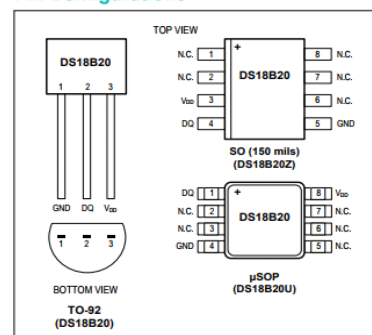


Fig. 3. Sensor de Temperatura Sumergible DS18B20. Adaptado de DS18B20, Luis del Valle Hernández, s.f.,

c. *Sonda de pH 4502c*: Es un sensor ampliamente utilizado en proyectos de monitoreo de calidad de agua, especialmente en sistemas hidropónicos, debido a que mide la concentración de iones de hidrógeno mediante un electrodo de referencia y uno de vidrio, permitiendo ajustar la solución nutritiva antes del ingreso al sistema, ver Fig.4.



Fig. 4 Sonda Ph 4502c

La Ph 4502C es una sonda electroquímica diseñada para medir el nivel de acidez o alcalinidad (pH) de una solución líquida. Funciona mediante un electrodo de vidrio sensible al ion hidrógeno (H⁺), que genera una señal de voltaje proporcional al pH de la solución

3. Capa de Actuación y Control

Módulo Relé de Estado Sólido (SSR) de 4 Canales: A diferencia de los relés mecánicos, estos permiten una conmutación rápida, silenciosa y sin desgaste físico. Controlan la bomba de agua, iluminación LED de espectro completo, ventiladores de termorregulación y electroválvulas, ver Fig 5:



Fig. 5. Módulo Relé de Estado Sólido de 4 Canales

C. Sistema de Autonomía Energética (Solar Off-Grid)

1. *Fundamentos de la Generación Fotovoltaica:* Para garantizar la operación continua del microinvernadero en entornos domésticos y contextos con acceso limitado o inestable a la red eléctrica, se seleccionó el uso de paneles solares fotovoltaicos, los cuales convierten la radiación solar directamente en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, ver Fig. 6.

La eficiencia del sistema depende de la estructura del material semiconductor empleado, clasificándose principalmente en tres tipos de tecnología de silicio:

a. *Silicio Monocristalino:* Fabricado a partir de un único cristal de alta pureza. Presenta un mayor rendimiento energético y eficiencia por unidad de área.

b. *Silicio Policristalino:* Constituido por múltiples cristales de silicio. Presenta un coste de fabricación menor, aunque su eficiencia es ligeramente inferior a la del monocristalino debido a las impurezas en las uniones de los cristales.

c. *Silicio Amorfo:* Carece de estructura cristalina definida. Aunque posee el menor rendimiento, destaca por su capacidad de generar pequeñas cantidades de energía bajo condiciones de radiación no perpendicular o luz difusa.

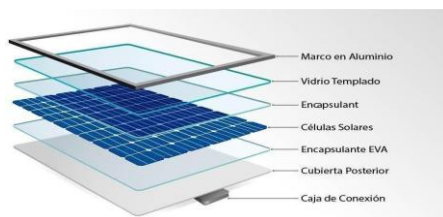


Fig.6. Adaptado de. Panel solar por Ineldec, s.f.

Para el prototipo implementado, se seleccionó la tecnología monocristalina debido a su mayor densidad energética y adecuación para aplicaciones domésticas.

2. Dimensión Energética

El dimensionamiento energético del panel se estimó considerando el consumo diario del sistema y las Horas Sol Pico (HSP) de la región:

$$P_{panel} = \frac{E_{diaria}}{HSP} \quad \dots (2)$$

Donde:

P_{panel} : potencia requerida del panel (W)

E_{diaria} : demanda energética diaria del sistema (Wh/día)

HSP: horas sol pico del lugar (h)

3. Gestión Energética

El sistema incorpora un controlador de carga encargado de regular el flujo energético entre el panel fotovoltaico y el sistema de almacenamiento, ver Fig. 6. Funciones principales:

a. *Regulación de Carga:* Controla la intensidad de entrada para evitar sobrecargas que puedan comprometer la estabilidad química de la batería.

b. *Protección contra Descarga Profunda:* Desconecta automáticamente las cargas (actuadores y sistema embebido) si el voltaje de la batería cae por debajo de un umbral crítico, asegurando su operatividad a largo plazo.

c. *Compensación de Voltaje:* Estabiliza las fluctuaciones provenientes del panel solar causadas por variaciones en la radiación incidente, protegiendo los circuitos de control.



Fig. 6. Controlador de Carga Solar. Adaptado de. Panel solar por Ineldec, s.f.

4. Almacenamiento y Conversión de Energía

Para asegurar la continuidad operativa durante periodos de baja o nula radiación solar (noche o días nublados), el sistema integra un banco de almacenamiento y una etapa de regulación de voltaje (Ver Figura 10):

a. *Batería de LiFePO₄:* Seleccionada por alta eficiencia energética, vida útil superior (2000–4000 ciclos) y capacidad de descarga profunda (hasta el 90%), superando las limitaciones de peso y durabilidad de las baterías de plomo-ácido. Su función es estabilizar el suministro para el sistema embebido y cubrir los picos de demanda de los actuadores (bombas y luces LED).

b. *Convertidor DC-DC (Step-Down):* Con el fin de proteger la electrónica sensible, se implementó un regulador con eficiencia del 85-95%. Este módulo reduce los 12V de la batería a niveles estables de 5V para la Raspberry Pi y 3.3V para la red de sensores (pH, AM2302, etc.), garantizando una alimentación libre de fluctuaciones.

D. Indicador Inteligente de Salud del Microinvernadero (IISM)

Como aporte a la interfaz de usuario, se diseñó un IISM, un panel visual que sintetiza múltiples variables operativas en un índice porcentual único para facilitar la interpretación del estado del cultivo.

1. *Lógica de Evaluación*: Utiliza una escala semaforizada basada en algoritmos de ponderación:

- Óptimo (80–100%): Iconografía feliz; condiciones ideales.
- Advertencia (50–79%): Iconografía neutra; requiere ajustes menores.
- Crítico (<50%): Iconografía triste; activa protocolos de intervención automática.

2. *Integración con el Sistema*

El IISM se integra con la Raspberry Pi y el módulo de relés para convertir el estado calculado del cultivo en acciones automáticas de control. Cuando el índice detecta una desviación respecto a los rangos óptimos, el sistema puede activar o desactivar los actuadores asociados al manejo hídrico, térmico y lumínico del microinvernadero. De esta manera, el indicador permite:

- Activación de la bomba de agua*: mantiene la recirculación de la solución nutritiva en el sistema NFT.
- Control del ventilador*: regula la temperatura y humedad interna del microinvernadero.
- Control de iluminación LED*: complementa la radiación disponible cuando las condiciones lumínicas son insuficientes.
- Activación de electroválvula*: permite regular el ingreso o reposición de agua y solución nutritiva.
- Emisión de alertas*: informa al usuario cuando el sistema entra en estado de advertencia o crítico.

3. *Modelo de Agregación*

El IISM se calcula como un índice normalizado entre 0 y 100, construido a partir de la integración de variables críticas del sistema hidropónico. Para ello, cada variable monitoreada se compara con un rango óptimo de operación y se transforma en un valor parcial de desempeño. Considerando:

pH de la solución nutritiva
Conductividad eléctrica (CE)
Temperatura de la solución
Temperatura ambiental
Humedad relativa
Radiación o intensidad lumínica

El cálculo general del índice puede representarse como una ponderación multicriterio:

$$IISM = \sum_{i=1}^n w_i S_i$$

donde S_i representa el puntaje normalizado de cada variable y w_i el peso asignado según su importancia en el desarrollo del cultivo.

Con el fin de incorporar capacidad predictiva al sistema, las variables monitoreadas son procesadas mediante un modelo supervisado basado en Random Forest, el cual analiza el

comportamiento conjunto de los parámetros ambientales y fisicoquímicos registrados.

Con el fin de incorporar capacidad predictiva al sistema, las variables monitoreadas son procesadas mediante un modelo supervisado basado en Random Forest, el cual analiza el comportamiento conjunto de los parámetros ambientales y fisicoquímicos registrados. Las predicciones obtenidas son integradas al cálculo del IISM para complementar la evaluación del estado del microinvernadero y apoyar la activación automática de mecanismos de control implementados en el sistema.

E. Sistema Hidropónico y Funcionalidades Integradas

1. Sistema Hidropónico NFT (Nutrient Film Technique)

El sistema de cultivo implementado corresponde a una configuración hidropónica tipo NFT, en la cual la solución nutritiva circula continuamente formando una lámina delgada (película) sobre el fondo de los canales de cultivo. Este mecanismo permite mantener un suministro constante de agua y nutrientes mientras preserva zonas de aireación para el sistema radicular. El sistema incorpora las siguientes características:

- Oxigenación Dual*: Las raíces obtienen oxígeno tanto del aire presente en la parte superior del canal como del oxígeno disuelto en la solución, optimizado mediante la bomba de aire integrada.
- Recirculación Continua*: El sistema opera bajo un circuito cerrado que maximiza la eficiencia hídrica y permite el ajuste continuo de los parámetros nutricionales antes del retorno de la solución al sistema.

2. Control Biomecánico mediante Actuadores

El sistema hidropónico responde dinámicamente a las condiciones del cultivo mediante mecanismos automáticos de actuación:

- Termorregulación Activa*: Mediante ventiladores se regula la temperatura y humedad interna del microinvernadero para mantener condiciones favorables para el crecimiento vegetal.
- Desinfección de Circuito*: La incorporación de radiación ultravioleta en la línea de retorno contribuye a disminuir la presencia de microorganismos sin alterar la composición química de la solución nutritiva.

3. Optimización del Espacio y Escalabilidad

El diseño físico fue concebido considerando restricciones de espacio típicas del entorno doméstico urbano.

- Densidad de Siembra*: Maximizar el número de plantas por metro cuadrado.
- Mantenimiento Simplificado*: La configuración del sistema facilita el acceso al reservorio, sensores y raíces para inspección y mantenimiento.
- Escalabilidad Modular*: El sistema permite incorporar progresivamente automatización, energía solar y monitoreo según disponibilidad económica.

F. Modelo Inteligente y Monitoreo

1. Modelo de Inteligencia Artificial basado en Random Forest

Estas dimensiones permitieron desarrollar un sistema compacto manteniendo integración entre cultivo, energía y electrónica.

C. Producción obtenida

El sistema fue evaluado durante un ciclo piloto de 30 días posteriores al ingreso de plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*) con una altura inicial aproximada de 6cm a 8cm al microinvernadero, utilizando un módulo NFT de seis plantas.

Producción promedio por planta: 280 g $\pm$ 10 g

Producción total del módulo: 1.68 kg por ciclo

Tasa de supervivencia: 100 %

Coefficiente de variación del crecimiento: 3.8 %

Comparación con sistema manual (6 plantas):

Producción promedio manual por planta: 240 g $\pm$ 18 g

Producción total manual: 1.44 kg

Incremento de rendimiento: +16.7 %

Reducción de variabilidad: -40 %

Los resultados muestran mayor uniformidad y estabilidad del crecimiento bajo control automatizado.

D. Eficiencia energética

El sistema operó mediante una configuración autónoma compuesta por: Panel solar de 100 W y una batería de 75 Ah. Los resultados fueron:

Consumo promedio diario: 0.28 kWh

Generación promedio diaria: 0.48 kWh

Autonomía nocturna: 16 horas

Autonomía total respecto a red eléctrica: 100 %

Comparado con sistema conectado a red:

Reducción de consumo eléctrico externo: -100 %

Reducción estimada de emisiones indirectas: -68 %

El sistema operó completamente off-grid durante el ciclo experimental

E. Eficiencia Hídrica

Durante el ciclo experimental de 30 días, el consumo hídrico se estimó mediante el volumen acumulado de reposición.

Para el sistema NFT: 15L/ciclo y en un sistema de riego manual: 54L/ciclo. La recirculación permitió disminuir significativamente el uso del recurso hídrico.

F. Desempeño del Modelo Random Forest

El modelo Random Forest fue entrenado utilizando variables ambientales y fisicoquímicas registradas por el sistema, incluyendo temperatura, humedad relativa, pH y conductividad eléctrica (CE), con el objetivo de apoyar la clasificación del estado operativo del microinvernadero mediante el Indicador Inteligente de Salud del Microinvernadero (IISM).

Los resultados (ver tabla 1), muestran que el modelo permitió mejorar la estabilidad operativa del sistema respecto al manejo manual, reduciendo las fluctuaciones de pH y conductividad eléctrica y disminuyendo la necesidad de intervención directa del usuario.

G. Viabilidad económica y replicabilidad del sistema

Se realizó una estimación económica considerando la infraestructura, sensado, energía y automatización, ver Tabla 2.

Tabla 1: Desempeño del modelo Random Forest para el monitoreo de microinvernadero

Métrica	Resultado
Precisión global	91.2 %
Reducción fluctuación pH	45%
Reducción desviación CE	34%
Reducción intervención manual	55%

El costo total estimado del prototipo fue de USD 372, incluyendo infraestructura hidropónica, sistema fotovoltaico, automatización, monitoreo y control inteligente. El valor debe interpretarse como el costo de un prototipo tecnológico completo y replicable, y no como el costo mínimo de implementación. Desde la perspectiva de ingeniería para el desarrollo sostenible, el sistema fue concebido bajo criterios de modularidad, escalabilidad y reducción del costo operativo, permitiendo implementar únicamente los módulos prioritarios según disponibilidad económica local.

Del costo total, aproximadamente 32.3 % corresponde al sistema energético (panel y batería), cuya inversión se justifica por eliminar la dependencia de la red eléctrica y permitir operación en zonas con acceso limitado o inestable a energía. Luego, el 21.5% corresponde a la parte electrónica y procesamiento, para el sistema NFT el 8.1% y el sensado el 13.4% aproximadamente. El 24.7% restante corresponde a componentes estructurales y de integración, como cableado, estructura física, conectores y elementos auxiliares.

Aunque la inversión inicial supera sistemas manuales convencionales, el diseño modular permite implementación progresiva y adaptación según disponibilidad económica.

Desde la perspectiva de comunidades vulnerables, el sistema constituye una alternativa orientada a:

- ahorro hídrico
- autonomía energética
- reducción de intervención técnica
- producción doméstica sostenible

Para facilitar la adopción en comunidades vulnerables, el diseño permite estrategias progresivas de implementación:

- Nivel básico (USD 90–130): NFT + reservorio + control manual.
- Nivel intermedio (USD 220–260): incorporación de sensores y automatización básica.
- Nivel completo (USD 372): integración de energía solar, monitoreo IoT e inteligencia artificial.

Bajo este enfoque escalable, el sistema no busca competir con cultivos comerciales de gran escala, sino ofrecer una infraestructura doméstica resiliente orientada a seguridad alimentaria, autonomía energética y reducción del consumo de recursos, favoreciendo su replicabilidad en contextos urbanos y comunidades con limitaciones económicas.

Tabla 2: Recursos utilizados

Componente	Especificación utilizada	Cantidad	Costo unitario
Unidad de procesamiento	Raspberry Pi 4 (2 GB RAM)	1	40
Tarjeta microSD	32 GB Clase 10	1	6
Sensor ambiental	DHT22 / AM2302	1	5
Sensor temperatura agua	DS18B20 1P68	1	5
Sensor pH	Sonda pH 4502C	1	18
Sensor conductividad	EC analógico	1	22
Relé SSR	4 canales	1	12
Bomba agua NFT	12 V – 10 W	1	15
Ventilador	12 V	1	8
Lámpara LED crecimiento	espectro completo 20 W	1	18
Panel solar	Monocristalino 100 W	1	55
Controlador carga	PWM 10 A	1	15
Batería	LiFePO ₄ 12 V – 20 Ah	1	65
Convertidor DC-DC	12 V → 5 V	1	6
Sistema NFT	canales + conexiones	1	30
Estructura	acrílico + impresión 3D	1	40
Cableado y conectores	varios	1	12
		TOTAL	372

V. Conclusión

El presente estudio permitió diseñar, implementar y realizar una validación preliminar de un sistema hidropónico compacto tipo NFT integrado con energía solar fotovoltaica, monitoreo IoT y control inteligente, orientado a entornos domésticos y comunidades vulnerables. La evaluación experimental se realizó durante 30 días posteriores al ingreso al microinvernadero de plántulas de lechuga con una altura inicial aproximada de 6cm a 8cm, permitiendo analizar el desempeño del sistema durante una etapa del crecimiento del cultivo.

Desde el punto de vista productivo, el sistema alcanzó una producción promedio de 280 ± 10 g por planta, obteniendo 1.68 kg por ciclo para seis plantas de lechuga, lo que representa un incremento del rendimiento de 16.7 % respecto al sistema manual equivalente (1.44 kg por ciclo). Adicionalmente, el coeficiente de variación del crecimiento se mantuvo en 3.8 %, acompañado de una reducción aproximada del 40 % en la variabilidad del cultivo, indicando mayor uniformidad y estabilidad del sistema bajo condiciones controladas.

En términos ambientales, el sistema NFT con recirculación permitió reducir el consumo hídrico de 54 L a 15 L por ciclo de cultivo, equivalente a una disminución del 72.2 % respecto al riego manual convencional. Asimismo, la integración fotovoltaica permitió operar bajo un esquema completamente autónomo (100 % off-grid), alcanzando una autonomía nocturna de 16 horas, una generación energética diaria de 0.48 kWh frente a un consumo promedio de 0.28 kWh, y una reducción estimada del 68 % de emisiones indirectas asociadas al uso de energía convencional.

Respecto al desempeño del sistema inteligente, el modelo implementado alcanzó una precisión de predicción de 91.2 %, permitiendo reducir las fluctuaciones de pH en 45 %, disminuir la desviación de conductividad eléctrica en 34 % y reducir la intervención manual requerida entre 50–60 %, favoreciendo una operación más estable y accesible para usuarios sin conocimientos técnicos especializados.

Desde la perspectiva económica, el prototipo presentó un costo estimado de implementación de USD 372, donde aproximadamente 32.3 % corresponde al sistema energético y 21.5 % a la estructura y unidad de procesamiento. Aunque esta

inversión inicial puede representar una limitación para algunos contextos vulnerables, el diseño modular permite estrategias de implementación progresiva y escalable, facilitando su adaptación según disponibilidad de recursos y necesidades locales.

En conjunto, los resultados sugieren que la integración entre hidroponía NFT, automatización, inteligencia artificial y energía solar constituye una alternativa técnicamente viable para fortalecer la seguridad alimentaria urbana, incrementar la eficiencia en el uso de recursos y promover modelos domésticos de producción sostenible.

Si bien los resultados obtenidos muestran un desempeño favorable, estos corresponden a una evaluación preliminar desarrollada durante un único ciclo experimental de 30 días utilizando una sola especie vegetal; por ello, futuros trabajos deberán ampliar la validación mediante múltiples ciclos de cultivo, diferentes especies y escenarios reales de implementación comunitaria para evaluar sostenibilidad técnica, económica y social a largo plazo.

En las líneas futuras de investigación se propone ampliar el periodo experimental, incorporar mayor volumen de datos para fortalecer el desempeño del modelo inteligente, evaluar diferentes especies vegetales y validar el sistema mediante estudios piloto en escenarios comunitarios reales.

VI. Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), mediante Resolución Rectoral N.º 005446-2025-R/UNMSM, en el marco del Concurso 2025 del Programa de Proyectos de Investigación para Grupos de Investigación (PCONFIGI), código de proyecto C25201251, titulado “Implementación de un invernadero hidropónico con inteligencia artificial y energía solar para la optimización de la producción de cultivos domésticos de forma sostenible”, 2025.

Referencia

- [1] CEPAL, *Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe 2022*. Santiago, Chile: Naciones Unidas, 2023. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/panorama-seguridad-alimentaria-nutricional-america-latina-caribe>
- [2] FAO, *Sistemas de tierras y aguas al límite: desafíos profundos para la productividad agrícola*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2021. <https://www.fao.org/3/CB7654ES>
- [3] Organización de los Estados Americanos (OEA), “Capítulo 9: Agricultura. Limitaciones para el desarrollo agrícola en la selva central,” en *Bienes y servicios naturales*. Washington, D.C., EE. UU.: Departamento de Desarrollo Sostenible, 2021. <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea27s/ch12.htm>
- [4] Universidad Nacional Agraria, *Cultivos en callejones (Alley Cropping) en suelos de alta fragilidad: una alternativa para la agricultura sostenible*. Managua, Nicaragua, 2020. <https://repository.agrosavia.co/items/dfcf4c-39f6-401e-bd30-92ecfb481606>
- [5] M. A. Taboada et al., *Adaptación al cambio climático en sistemas agropecuarios de América Latina*. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Argentina, 2020. <https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar>
- [6] E. Johansson, R. Martin and K. Mapunda, “Climate vulnerability of agroecological and conventional smallholders in Mvomero District, Tanzania:

Using mixed-methods to uncover local experiences and motivations of farming for the future,” *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 8, Art. no. 1423861, 2024.

<https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1423861>

[7] N. E. Fonseca Carreño and J. A. Fonseca Carreño, “Socioecological resilience in agricultural agro-ecosystems in Sumapaz Cundinamarca,” *Ciencia en Desarrollo*, vol. 15, no. 1, pp. 1–12, 2024. <https://doi.org/10.19053/01217488.v15.n1.2024.16652>

[8] G. Rajaseger *et al.*, “Hydroponics: Current trends in sustainable crop production,” *Bioinformation*, vol. 19, no. 9, pp. 925–938, 2023. <https://doi.org/10.6026/97320630019925>

[9] Y. S. Goh, Y. C. Hum, Y. L. Lee, K. W. Lai, W. S. Yap and Y. K. Tee, “A meta-analysis: Food production and vegetable crop yields of hydroponics,” *Scientia Horticulturae*, vol. 321, Art. no. 112339, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112339>

[10] K. Chao, “Family farming in climate change: Strategies for resilient and sustainable food systems,” *Heliyon*, vol. 10, no. 7, Art. no. E28599, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28599>

[11] S. Karimzadeh, Z. Li and M. S. Ahamed, “Machine learning-based fault detection and diagnosis of electrical conductivity and pH sensors in hydroponic systems,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 237, Art. no. 110544, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110544>

[12] M. A. Yenikaya, O. Oktaysoy and G. Kerse, “Technological transformation and sustainable agriculture: Automation supported home-type hydroponic production system application,” *Black Sea Journal of Agriculture*, vol. 8, no. 4, pp. 533–547, 2025. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1656377>

[13] M. E. Puelles Bulnes, J. L. Inche Mitma, V. A. Atoche Espinoza, A. L. Atoche Puelles, M. Á. Gonzáles Lévano, Y. L. Cristobal Espinoza and Y. A. Atoche Puelles, “Smart Urban Farming with Sustainable Mini-Garden as a Technological Solution to Food Insecurity,” *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, vol. 1, no. 12, 2025. <https://laccei.org/LACCEI2025-Mexico/meta/FP2454.html>

[14] M. E. Puelles Bulnes *et al.*, “Automated hydroponic greenhouse customized for family nutrition using plants varieties,” in *22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0*, San José, Costa Rica, Jul. 17–19, 2024, Art. no. 2005. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.2005>

[15] M. E. Puelles Bulnes, “Prototipo de un invernadero automatizado hidropónico NFT con dos microclimas para el hogar basado en Internet de las Cosas,” *Rev. Investig. Sist. Inform.*, vol. 16, no. 1, 2023. <https://doi.org/10.15381/risi.v16i1.25581>

[16] V. Gupta, R. Singh, D. Mishra, P. Sexena and N. Kapoor, “Smart agriculture: Leveraging IoT and machine learning for sustainable farming,” *International Journal of Research Review in Applied Science, Humanities and Technology*, vol. 7, 2025. <https://doi.org/10.71143/R5SBB313>

[17] K. N. Siddiquee *et al.*, “Development of algorithms for an IoT-based smart agriculture monitoring system,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, Art. no. 7372053, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7372053>

[18] L. R. Reddy, V. Maheshwari, R. S. Kumar and Y. R. Reddy, “IoT based smart agriculture system with solar panel,” in *Proceedings of the 7th International Conference on Inventive Material Science Applications (ICIMA)*, Namakkal, India, 2025, pp. 939–944. <https://doi.org/10.1109/ICIMA64861.2025.11073882>

[19] V. D. Ávila Akerberg, “Traditional and modern agricultural practices in a periurban community close to Mexico City,” in *Sustainable Agricultural Production Systems: Traditional and Modern Perspectives*. Palm Bay, FL, USA: Apple Academic Press / CRC Press, 2024. https://web.siiia.unam.mx/siiia-publico/v/include/modulo_productos/libros.php?id=655145

[20] Y. Akkem, S. K. Biswas and A. Varanasi, “Smart farming using artificial intelligence: A review,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 120, Art. no. 105899, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105899>

[21] O. Ogbolumani and B. Mabaso, “An IoT-based hydroponic monitoring and control system for sustainable food production,” *Journal of Digital Food, Energy and Water Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 106–140, 2023. https://doi.org/10.36615/digital_food_energy_water_systems.v4i2.2873

[22] K. Kumari, A. M. Nafchi, S. Mirzaee and A. Abdalla, “AI-driven future farming: Achieving climate-smart and sustainable agriculture,” *Agriengineering*, vol. 7, no. 3, pp. 1–30, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7030089>

[23] H. Shahab, M. Iqbal, A. Sohaib, F. U. Khan and M. Waqas, “IoT-based agriculture management techniques for sustainable farming: A comprehensive review,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 220, Art. no. 108851, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108851>

[24] M. G. Osman and G. Lazaroiu, “Harnessing solar energy for sustainable development in rural communities,” *Agriculture*, vol. 15, no. 19, pp. 1–32, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriculture15192021>

[25] A. A. Alnasser *et al.*, “Renewable resilience in conflict: Lessons learned from Syria’s solar-powered electric health vehicles,” *Frontiers in Public Health*, vol. 13, pp. 1–11, 2025. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1560063>

[26] A. Pena *et al.*, “A solar photovoltaic system applied to açai production and the development of riverside communities in the Amazon,” *Sustainability*, vol. 17, no. 6, pp. 1–21, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17062447>

[27] A. Z. Abdullah, N. Azizan and Z. Bohari, “Implementation of solar street lighting for empowering rural communities,” in *BIO Web of Conferences*, vol. 137, 2024. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413703001>

[28] M. T. Linaza *et al.*, “Data-driven artificial intelligence applications for sustainable precision agriculture,” *Agronomy*, vol. 11, no. 6, Art. no. 1227, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061227>