ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.2454

SMART URBAN FARMING WITH SUSTAINABLE MINI-GARDEN AS A TECHNOLOGICAL SOLUTION TO FOOD INSECURITY

María Elizabeth Puelles Bulnes, Dr[1], Jorge Luis Inche Mitma, Dr[2], V. A. A. Espinoza, Dr[3], Juan Carlos Miguel Ángel Gonzáles Lévano, Ing[4], Angie L. Atoche Puelles, Mg[5], Yna Levy Cristobal Espinoza, Lic[6], Yair Augusto Atoche Puelles[7].

[1,2,3,6]National Major San Marcos University, Perú, mpuellesb@unmsm.edu.pe, jinchem@unmsm.edu.pe, vatochee@unmsm.edu.pe, yna.cristobal@unmsm.edu.pe, [4]Ricardo Palma University, Perú, jkma0116@gmail.com, [5]Federal University of Minas Gerais, Brazil, angie.puelles@gmail.com, [7]Unicesumar University, Brazil, augusto.yair@gmail.com

Abstract

Currently, more than half of Peru's population is experiencing food insecurity. According to the 2022 "State of Food Security and Nutrition in the World" (SOFI) report, an estimated 16.6 million Peruvians are affected, with an unprecedented upward trend. Furthermore, data from Peru's National Institute of Statistics and Informatics (INEI, 2021) indicate that 25% of the population lives in poverty, while anemia and obesity are increasing due to the inability of over half the population to access a healthy diet. The Second Citizen Monitoring Report on Pesticides in Food (2023) evaluated the presence of toxic residues in fresh produce sold at 18 supermarkets and markets across the cities of Arequipa, Cusco, Huaraz, and Huánuco. Of the 103 samples analyzed, 44.6% were deemed unfit for human consumption. The global crisis, along with rising food prices and the effects of climate change, further exacerbates this situation. This study presents the design, implementation, and initial evaluation of an automated domestic hydroponic system using biodegradable nutrient capsules. It was developed as a technological proposal aimed at improving food security in vulnerable urban environments. The objective was to construct a low-cost, easy-to-maintain, and replicable domestic mini-garden for vegetables, applying principles of sustainability, biology, mechatronic, engineering, physics, and user-centered design. The methodology combined the use of sensors for automated system monitoring, controlled trials with lettuce (Lactuca sativa L.) in a home greenhouse, and physicochemical analysis of the behavior of the controlled-release capsules. The results showed a gradual release of nutrients, an increase in plant biomass, and a reduction in operational intervention. The system demonstrated technical and functional viability in low-tech contexts, promoting the use of appropriate technologies for self-cultivation. The implementation of this smart domestic mini garden involves the participation of vulnerable communities, ensuring that the technology is not only accessible but also adapted to their needs, capacities, and local conditions. This inclusive and participatory approach ensures that the project not only provides a technical solution but also strengthens food self-sufficiency and resilience among urban populations most affected by the lack of access to fresh and nutritious food.

Keywords: Domestic hydroponics, Biodegradable capsules, Humanitarian engineering, Urban agriculture, Food security, Sensors and automation.

Cultivo urbano inteligente con minihuertos domésticos sostenibles como solución tecnológica ante la inseguridad alimentaria

María Elizabeth Puelles Bulnes, Dr[1], Jorge Luis Inche Mitma, Dr[2], V. A. A. Espinoza, Dr[3], Juan Carlos Miguel Ángel Gonzáles Lévano, Ing[4], Angie L. Atoche Puelles, Mg[5], Yna Levy Cristobal Espinoza, Lic[6], Yair Augusto Atoche Puelles[7].

[1,2,3,6]Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, mpuellesb@unmsm.edu.pe, jinchem@unmsm.edu.pe, vatochee@unmsm.edu.pe, yna.cristobal@unmsm.edu.pe, [4]Universidad Ricardo Palma, Perú, jkma0116@gmail.com, [5]Universidade Federal Minas Gerais, Brasil, angie.puelles@gmail.com, [7]Universidade Unicesumar, Brasil, augusto.yair@gmail.com

Resumen

Actualmente, más de la mitad de la población del Perú se encuentra en situación de inseguridad alimentaria, según el informe "Estado de la inseguridad alimentaria y la nutrición en el mundo" (SOFI), del 2022, se estima que 16.6 millones de peruanos se encuentran en esta situación y con aumento sin precedentes. Además, el INEI del 2021, el 25% de la población vive en la pobreza, la anemia y la obesidad están en aumento debido a que más de la mitad del país no puede acceder a una dieta saludable. En el Segundo Monitoreo Ciudadano de Pesticidas en los Alimentos del 2023, se evaluó la presencia de residuos tóxicos en productos frescos comercializados en 18 supermercados y mercados de las ciudades de Arequipa, Cusco, Huaraz y Huánuco y de un total de 103 muestras analizadas, el 44.6% fueron consideradas no aptas para el consumo humano. La crisis mundial, junto con la inflación de precios de los alimentos y los efectos del cambio climático, agravan aún más la situación. Este trabajo presenta el diseño, implementación y evaluación inicial de un sistema de cultivo hidropónico doméstico automatizado con cápsulas nutritivas biodegradables, desarrollado como una propuesta tecnológica orientada a mejorar la seguridad alimentaria en entornos urbanos vulnerables. El objetivo fue construir un minihuerto doméstico para hortalizas de bajo costo, fácil mantenimiento y replicabilidad, aplicando principios de sostenibilidad, biología, mecatrónica, ingeniería, física y diseño centrado en el usuario. La metodología combinó el uso de sensores para el monitoreo automatizado del sistema, pruebas controladas con lechuga (Lactuca sativa) en invernadero doméstico, y el análisis fisicoquímico del comportamiento de las cápsulas de liberación controlada. Los resultados mostraron una liberación gradual de nutrientes, una mejora en la biomasa vegetal y una disminución de la intervención operativa. El sistema demostró viabilidad técnica y funcional en contextos de baja tecnificación, promoviendo el uso de tecnologías apropiadas para el autocultivo. La implementación de este minihuerto doméstico inteligente contempla la participación de las comunidades vulnerables, garantizando que la tecnología no solo sea accesible, sino también adaptada a sus necesidades, capacidades y condiciones locales. Este enfoque inclusivo y participativo asegura que el proyecto no solo provea una solución técnica, sino que también fortalezca la autosuficiencia alimentaria y la resiliencia de las poblaciones urbanas más afectadas por la falta de acceso a alimentos frescos y nutritivos.

Palabras clave: Hidroponía doméstica, Cápsulas biodegradables, Ingeniería humanitaria, agricultura urbana, seguridad alimentaria, sensores y automatización.

I. Introducción

La inseguridad alimentaria en los centros urbanos es una problemática creciente a nivel global, impulsada por la rápida urbanización, el limitado acceso a alimentos frescos y nutritivos, y los elevados costos de los productos agrícolas [1], [2], En Lima Metropolitana y otras ciudades del Perú, este fenómeno adquiere carácter crítico debido al crecimiento urbano desordenado, que ha reducido significativamente los espacios disponibles para actividades agrícolas. A esto se suman factores como la escasez de agua y la contaminación del suelo, que restringen aún más la producción local de alimentos [3], [4], [5]. Además, la escasa capacitación en prácticas agrícolas modernas y la limitada implementación de políticas públicas efectivas dificultan la consolidación de la agricultura urbana como una solución viable. No obstante, el surgimiento de tecnologías innovadoras, como los minihuertos inteligentes, la hidroponía y los sistemas automatizados de cultivo, ofrece nuevas oportunidades para superar estas limitaciones. Estas soluciones permiten una producción eficiente de alimentos en espacios reducidos, con un uso optimizado de recursos, promoviendo así la autosuficiencia alimentaria y mejorando la calidad de vida de las familias urbanas [6],[7],[8].

En América Latina, la agricultura tiene una rica tradición influenciada por prácticas precolombinas y adaptaciones de modelos europeos y asiáticos. Esta herencia ha dado lugar a una fusión de saberes ancestrales y metodologías modernas, en la cual los primeros agricultores dependían de la observación empírica y la transmisión oral del conocimiento para determinar las necesidades de sus cultivos [9].

Hoy, gracias al desarrollo de disciplinas como la botánica, rama de la biología que estudia el dominio *Eukarya* y específicamente el reino *Plantae*, se reconoce que las plantas requieren un equilibrio específico de estos nutrientes, el cual varía según la especie, la etapa de crecimiento y las condiciones ambientales [10]. Este conocimiento ha permitido el diseño de técnicas avanzadas como la hidroponía y la aeroponía, que permiten un control preciso sobre la nutrición vegetal, maximizando el rendimiento en espacios limitados [11]. Estos avances son esenciales para el desarrollo de sistemas de nutrición programada en minihuertos domésticos.

Por otro lado, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la ONU, particularmente en lo relativo al fin del hambre y la promoción de la agricultura sostenible hacia 2030, existe una creciente presión por adoptar prácticas agrícolas que reduzcan el impacto ambiental. La integración de tecnologías verdes, para alimentar sistemas de riego automatizado, ha demostrado ser una estrategia viable para reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables [12]. Estas prácticas no solo reducen el impacto ambiental, sino que también hacen que la agricultura urbana sea más accesible, eficiente y sostenible a largo plazo. En el caso de las ciudades de países desarrollados, proyectos de agricultura urbana han demostrado que es posible producir alimentos frescos y nutritivos de forma sustentable, incluso en espacios reducidos [13]. En el caso del Perú, la hidroponía aún presenta un nivel de desarrollo incipiente frente al cultivo tradicional. Sin embargo, factores como el crecimiento del turismo, gastronomía y la expansión de restaurantes y hoteles de tres a cinco estrellas han impulsado una mayor demanda de hortalizas hidropónicas, reconocidas por su calidad e inocuidad y con el transcurso del tiempo se irá adaptándolas al contexto doméstico.

Frente a este escenario, surge una pregunta fundamental: ¿cómo puede la ingeniería contribuir a que las personas cultiven su propia comida, incluso en espacios reducidos, sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados ni grandes recursos? Este proyecto nace como una respuesta a esa inquietud, apostando por una solución sencilla, automatizada y basada en el conocimiento colectivo: un minihuerto doméstico inteligente con nutrición programada de plantas.

A través de un enfoque interdisciplinario que une física, biología, mecatrónica, ingeniería eléctrica e investigación operativa, se ha diseñado un sistema de cultivo automatizado que permite a las personas producir vegetales frescos desde sus propios hogares, controlando variables clave como el riego, la luz y los nutrientes. Esta solución, de bajo costo y fácil uso, se plantea como una estrategia concreta para enfrentar la inseguridad alimentaria desde lo local, lo cotidiano y lo tecnológicamente accesible.

El presente artículo describe el desarrollo, implementación y primeras observaciones de este sistema, así como su potencial para escalarse en entornos urbanos de alta vulnerabilidad. El objetivo es demostrar que la ingeniería, cuando se conecta con las necesidades reales de las personas, puede ser una herramienta poderosa no solo para innovar, sino para transformar vidas desde la raíz.

II. OBJETIVO

Se propone el desarrollo e implementación de un sistema automatizado de cultivo urbano doméstico, basado en tecnologías IoT, como una solución sostenible frente a la inseguridad alimentaria en contextos urbanos del Perú.

El proyecto incluye una fase inicial de validación de baja fidelidad, destinada a identificar las preferencias y necesidades de los usuarios potenciales respecto al diseño del minihuerto. Posteriormente, se lleva a cabo el diseño e implementación del sistema, incorporando sensores ambientales (como temperatura, humedad y luz) y sensores de sustrato (para medir la humedad), así como una programación orientada a la gestión nutricional de los cultivos. El sistema ha sido diseñado para ser intuitivo y fácil de usar, permitiendo que personas sin experiencia previa en agricultura cultiven sus propios alimentos de manera autónoma y eficiente.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

Durante la revolución industrial (siglo XIX y principios del XX) las huertas urbanas empiezan a cumplir funciones de subsistencia, salud, higiene y control social en los momentos de crisis a lo largo de toda la historia de las ciudades. Fue cuando en Inglaterra se concebían las primeras leyes para regular los huertos urbanos, obligando a la iglesia y a las autoridades locales a proporcionar terrenos a los obreros para ser cultivados [14]. En este momento es donde surge el término de “huertos para los pobres” los cuales contribuían a completar sus ingresos y mejoraban la calidad de los alimentos que consumían [15]. A finales del siglo XX, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) publicó en 1996 el libro titulado “Urban Agriculture: Food, Jobs and Sustainable Cities”. Ese mismo año, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) en su informe anual sobre el Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación, incluyó una sección dedicada a la agricultura urbana basada principalmente en las investigaciones realizadas por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) y de la Universidad de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Tres años después, la FAO hizo un llamado a la coordinación de la agricultura peri-urbana [16]. Hoy en día, la producción en huertos, especialmente en cultivos frutales y hortalizas, constituye una actividad agrícola intensiva en mano de obra, con tareas que requieren alta precisión, como la poda, el riego, la recolección y el monitoreo de plagas y enfermedades [17].

En este contexto, la automatización ha surgido como una estrategia clave para enfrentar desafíos como la escasez de trabajadores rurales, el incremento de los costos operativos y la necesidad de mejorar la sostenibilidad de la producción [18]. Históricamente, la mecanización en huertos ha enfrentado mayores limitaciones en comparación con los cultivos extensivos, debido a características estructurales y operativas particulares de estos sistemas agrícolas [19]. Uno de los principales obstáculos para implementar tecnologías automatizadas en huertos es la falta de estandarización en sus estructuras y sistemas productivos. A diferencia de los cultivos extensivos, que suelen presentar configuraciones homogéneas y repetitivas, los huertos muestran una gran variabilidad en aspectos como el espaciamiento entre plantas, la altura de los árboles, la geometría del terreno, el tipo de poda e incluso los sistemas de riego empleados (goteo, microaspersión, entre otros) [20]. Además, los espacios reducidos entre hileras y el diseño irregular de las parcelas representan desafíos adicionales para la integración de equipos automatizados de gran tamaño. Esta situación se ve agravada por la alta diversidad de especies cultivadas, cada una con requerimientos agronómicos específicos, lo cual complica la estandarización de procesos mediante una única solución tecnológica.

Por otro lado, la degradación progresiva de los suelos agrícolas, provocada por la sobreexplotación, la contaminación química y el uso intensivo de pesticidas, ha limitado la capacidad de producción de cultivos en numerosas regiones del mundo. Estos problemas han impulsado la búsqueda de métodos alternativos de cultivo más sostenibles y controlados. En este contexto, la hidroponía surge como una respuesta tecnológica innovadora, permitiendo el crecimiento de plantas en soluciones nutritivas sin necesidad de suelo [16].

En el Perú y nivel mundial, a hidroponía se ha consolidado como una técnica agrícola innovadora, orientada a optimizar la dieta de las personas y contribuir al desarrollo económico mediante el aprovechamiento eficiente del espacio y los recursos. Estos productos, cultivados mediante técnicas hidropónicas, están siendo progresivamente ofertados en supermercados de alta rotación, particularmente en la ciudad de Arequipa y en Lima [21].

Por otro lado, con el crecimiento de las ciudades y la reducción de espacios cultivables, estas técnicas han evolucionado hacia modelos de agricultura urbana doméstica, dando lugar a los llamados huertos automatizados o *Smart Garden*. Estos sistemas integran tecnologías como el riego automático, la iluminación LED de espectro ajustado y sensores IoT para facilitar el cultivo de vegetales frescos en el hogar, con mínimos requerimientos de conocimiento agrícola y esfuerzo por parte del usuario [22].

En el contexto peruano, la adopción de huertos hidropónicos y automatizados es lento, solo ha aumentado la comercialización de productos hidropónicos frescos en ciertos supermercados, evidenciando una aceptación creciente tanto a nivel doméstico como comercial.

IV. METODOLOGIA

4.1 *Enfoque metodológico: Diseño centrado en el usuario*

Este proyecto se desarrolló bajo el enfoque de diseño centrado en el usuario (UX), el cual busca crear productos alineados a las necesidades, motivaciones y comportamientos reales de los usuarios. Esta metodología se basa en iteraciones que permiten validar ideas de manera progresiva, involucrando a los usuarios desde las primeras fases del desarrollo. En la etapa inicial, se emplean técnicas como entrevistas, encuestas y prototipos de baja fidelidad para validar hipótesis de diseño sin necesidad de contar con una versión funcional del producto [23]. En este tipo de estudios, es habitual trabajar con grupos entre 15 y 30 personas para testear percepciones, actitudes y viabilidad de uso, antes de avanzar hacia prototipos funcionales. De hecho, según estudios [23], el autor Nielsen Norman, demuestra que con 5 usuarios ya se pueden detectar aproximadamente el 85% de los problemas de usabilidad, y que aumentando hasta 15-20 usuarios se logra identificar más del 90% de los problemas principales en una fase temprana de validación. Esta muestra fue considerada adecuada para una fase exploratoria de validación de baja fidelidad, típica en proyectos de innovación tecnológica con enfoque en diseño centrado en el usuario (UX).

Si bien la muestra no es estadísticamente representativa de toda la población peruana ni permite extrapolar resultados a nivel nacional, sí aporta insumos valiosos para detectar patrones iniciales, validar supuestos de diseño y proyectar una futura fase de validación funcional con mayor cobertura y participación representativa de otras regiones.

4.2. *Metodología de la Validación del Prototipo*

4.2.1Estudio exploratorio y validación de usuario

Antes de la construcción del prototipo físico del sistema de minihuerto doméstico inteligente basado en IoT, se llevó a cabo una fase exploratoria de carácter cualitativo con el objetivo de comprender el perfil, los hábitos y las limitaciones de espacio de los usuarios potenciales en contextos urbanos, particularmente en departamentos y viviendas pequeñas de Lima Metropolitana.

Este estudio preliminar buscó orientar el diseño del sistema de cultivo, considerando variables como funcionalidad, dimensiones, facilidad de uso e integración con la vida cotidiana. El análisis también permitió identificar expectativas y preferencias de los usuarios respecto al producto final. Como parte del mismo proceso de desarrollo, se ejecutó una validación de tipo exploratoria, orientada a evaluar tanto el interés de los usuarios como la viabilidad del uso doméstico del prototipo.

4.2.2 *Objetivo de la validación*

El objetivo de la validación fue conocer las percepciones, necesidades y disposición de los usuarios urbanos frente a la incorporación de un minihuerto automatizado en el hogar. Asimismo, se buscó evaluar la aceptación del diseño preliminar en cuanto a dimensiones, funcionalidad, ubicación potencial dentro del hogar y su valor percibido como solución tecnológica sostenible.

4.2.3 *Diseño metodológico*

La validación se desarrolló en dos fases complementarias:

- Fase 1: Validación del prototipo de baja fidelidad
  Se realizó mediante un cuestionario estructurado y la presentación de imágenes conceptuales a través de una landing page desarrollada en Wix, permitiendo observar las primeras reacciones de los usuarios ante el diseño y la idea del producto.
- Fase 2: Validación del prototipo funcional (en preparación)
  Está prevista para una etapa posterior, en la que se evaluará el funcionamiento real del dispositivo en hogares urbanos, recogiendo datos de uso, rendimiento de cultivo, facilidad de instalación y mantenimiento.

Para la Fase 1, se diseñó un cuestionario con 16 preguntas, abarcando los siguientes ejes:

- Información sociodemográfica de los participantes.
- Hábitos de consumo de frutas y verduras.
- Percepción sobre alimentos orgánicos.
- Experiencia previa en cultivo de plantas.
- Disposición a adoptar un huerto inteligente en el hogar.
- Expectativas respecto al tamaño, funcionamiento y costo estimado del sistema

Este diseño metodológico permitió recopilar insumos clave para refinar el prototipo y planificar futuras mejoras a partir de las preferencias del usuario final.

4.2.4 *Participantes y justificación metodológica*

Se entrevistó a un total de 30 personas adultas, residentes de distintos distritos de Lima Metropolitana, seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia. Los perfiles incluyeron hombres y mujeres de entre 25 y 60 años, con diversidad de ocupaciones y niveles educativos, pero con un común interés por prácticas alimentarias saludables y sostenibles. Para asegurar la relevancia social del proyecto, se priorizó la inclusión de participantes de distritos urbanos y periurbanos con alta vulnerabilidad alimentaria y limitaciones de espacio para el cultivo, garantizando que el diseño respondiera a sus necesidades reales. Se aplicó un enfoque de diseño centrado en el usuario, involucrando activamente a estas comunidades mediante entrevistas, encuestas y pruebas de baja fidelidad, con el fin de adaptar el prototipo a sus condiciones específicas y facilitar su adopción práctica y sostenible.

Asimismo, se tuvo en cuenta la necesidad de mantener bajos los costos operativos y asegurar una interfaz amigable para usuarios sin conocimientos agrícolas. El diseño inicial buscó equilibrar estas variables, priorizando la sostenibilidad, la facilidad de uso y el bajo consumo energético, integrando sensores de temperatura, luz y humedad, alimentados corriente doméstica. Este análisis fue clave para definir las dimensiones iniciales del prototipo, así como para proyectar la aceptación del producto entre hogares urbanos peruanos, contribuyendo al diseño de una solución alineada con las condiciones reales de vivienda y uso en la región.

Aunque la validación inicial se centró en la percepción y viabilidad de uso, se reconoce la importancia de involucrar activamente a las comunidades vulnerables en las siguientes etapas del desarrollo para definir conjuntamente las características y funcionalidades del minihuerto. Este proceso participativo garantizará que la solución tecnológica responda de manera precisa a las necesidades locales, fortaleciendo la apropiación social y asegurando un impacto real en la seguridad alimentaria y bienestar de los usuarios. Se proyecta incluir talleres, codiseño y pruebas piloto en entornos comunitarios como parte integral del plan de desarrollo futuro del proyecto.

4.3 *La importancia de la solución nutritiva en sistemas hidropónicos y estrategia de dosificación controlada*.

La solución nutritiva constituye el elemento esencial en los sistemas de cultivo hidropónico, reemplazando las funciones tradicionales del suelo como proveedor de nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal. En hidroponía, el agua actúa como medio de soporte y transporte de los nutrientes disueltos, permitiendo que las raíces absorban directamente los elementos necesarios para su desarrollo.

Una solución nutritiva bien formulada debe contener tanto macronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre) como micronutrientes (hierro, manganeso, zinc, cobre, molibdeno, boro y cloro) en proporciones adecuadas. La calidad de la solución, su concentración, su pH y su conductividad eléctrica son factores críticos que determinan la eficiencia en la absorción de nutrientes y, por ende, el éxito del cultivo. Existen diferentes formulaciones específicas según el tipo de planta y su etapa fenológica. Por ejemplo, en cultivos de hoja como lechuga o espinaca, las soluciones nutritivas se ajustan para favorecer un crecimiento rápido, verde y uniforme. Además, se recomienda el monitoreo constante de la concentración de sales en la solución, así como la oxigenación adecuada, para evitar la acumulación de sales y el estrés radicular. Gracias al desarrollo de tecnologías modernas, hoy en día es posible automatizar la preparación, dosificación y monitoreo de la solución nutritiva, aumentando la eficiencia del cultivo hidropónico en ambientes domésticos o comerciales [24]-[28].

Según llevado a cabo la experimentación, una innovación en el sistema en las verduras de la lechuga es el uso de cápsulas de dosificación programada, diseñadas para disolverse gradualmente en contacto con el agua del depósito. Estas cápsulas, fabricadas con biopolímeros hidrosolubles y biodegradables (como el alginato de sodio o gelatina vegetal endurecida), permiten una liberación controlada de nutrientes, facilitando el mantenimiento del sistema incluso para usuarios sin experiencia agrícola. la implementación de cápsulas de dosificación programada en cultivos hidropónicos de lechuga representa una solución avanzada basada en principios de cinética de disolución controlada y transferencia de masa en medios acuosos. Estas cápsulas, compuestas por biopolímeros hidrosolubles y biodegradables —como el alginato de sodio o matrices de gelatina vegetal endurecida— presentan una estructura polimérica que actúa como una barrera semipermeable, modulando la liberación de nutrientes en función de parámetros fisicoquímicos del medio (pH, temperatura, conductividad eléctrica, entre otros).

El mecanismo de disolución gradual se explica por la difusión controlada de agua hacia el interior de la cápsula, seguida por la solubilización progresiva del núcleo activo, permitiendo así una entrega sostenida de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) y micronutrientes quelatados (Fe, Zn, Mn, Cu, B). Esta dinámica evita pulsos bruscos de concentración, favoreciendo un equilibrio termodinámico más estable en la solución nutritiva y una mayor eficiencia en la absorción radicular. La matriz polimérica se comporta como un sistema de liberación tipo matriz (reservoir), donde la velocidad de liberación está regida por leyes de Fick modificadas y depende tanto del gradiente de concentración como de la permeabilidad del polímero. Además, al ser biodegradables, estos materiales no generan residuos persistentes, cerrando el ciclo fisicoquímico sin impactos ambientales negativos.

Desde una perspectiva práctica, estas formulaciones permiten reducir la frecuencia de intervención del usuario, aportando estabilidad en la concentración de nutrientes, incluso en condiciones de operación fluctuantes. Esto las convierte en una herramienta útil no solo para la agricultura tecnificada, sino también para usuarios sin formación previa, dada su simplicidad operacional basada en principios fisicoquímicos bien caracterizados [29], [30], [31]. Composición sugerida de cada cápsula de fertilizante de 1 gramo:

- Nitrógeno (N): 5–10% como nitrato de calcio o nitrato de potasio.
- Fósforo (P): 2–4% como fosfato monopotásico.
- Potasio (K): 10–15% como sulfato de potasio o nitrato de potasio.
- Magnesio (Mg): 2–3% como sulfato de magnesio.
- Calcio (Ca): 8–10% como nitrato de calcio.
- Micronutrientes: Mezcla quelatada (EDTA o DTPA) incluyendo Fe, Zn, Mn, Cu y B en concentraciones ajustadas (ppm) según el cultivo.

Estas cápsulas ofrecen múltiples ventajas: reducen la necesidad de medir manualmente los nutrientes, evitan errores de sobredosificación, disminuyen el contacto directo del usuario con fertilizantes y simplifican el mantenimiento del huerto. Además, al disolverse de forma paulatina, aseguran una liberación continua de los elementos nutritivos, favoreciendo un crecimiento vegetal estable y saludable.

Este enfoque permite escalar el uso del sistema a usuarios urbanos sin formación técnica, promoviendo una agricultura doméstica automatizada, eficiente y sostenible.

4.4 *Diseño del control y automatización del minihuerto doméstico*

Una de las características clave del proyecto es la automatización de los procesos de monitoreo de variables como la como la humedad del sustrato y la temperatura ambiental [31], [32], lo que permite un control inteligente que optimiza el uso de recursos y garantizar condiciones adecuadas para el desarrollo del cultivo. Además, el sistema puede integrarse con una interfaz web, lo que permite al usuario consultar el estado del minihuerto y ajustar sus parámetros operativos de forma remota, desde cualquier dispositivo con acceso a Internet, conforme el esquema lógico se puede observar el la Figura 1.

En la mencionada figura, se puede observar que el componente encargado de gestionar el funcionamiento del minihuerto es el microcontrolador ESP32 con conectividad Wi-Fi. Este dispositivo recolecta datos desde los sensores instalados y los transmite mediante la red Wi-Fi al Dashboard, donde pueden ser monitoreados en tiempo real. Además, mantiene una lectura continua de los parámetros del sistema, permitiendo un control preciso de las condiciones del cultivo.

4.4.1 Componentes técnicos del sistema

- Microcontroladores (ESP32WROOM) para la gestión de datos.
- Sensor de humedad DS18B20: sensor digital de temperatura con alta precisión, utilizado para monitorear la temperatura y humedad del sustrato o del entorno, según su ubicación en el sistema.
- Sensor de temperatura TZT-HTU21D: sensor de temperatura ambiental y humedad relativa, que proporciona mediciones en tiempo real para ajustar de manera eficiente las condiciones del minihuerto.
- Sensor de Nivel.
- Módulos de riego y dosificación de nutrientes.
- Dashboard Interfaz de usuario básico para monitoreo.

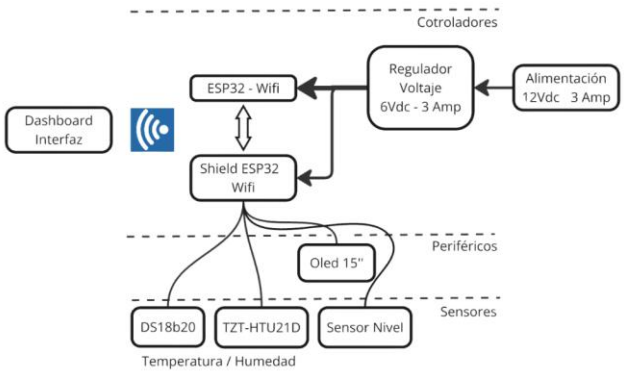

Figura 1. Esquema de integración electrónica con ESP32. Elaboración propria.

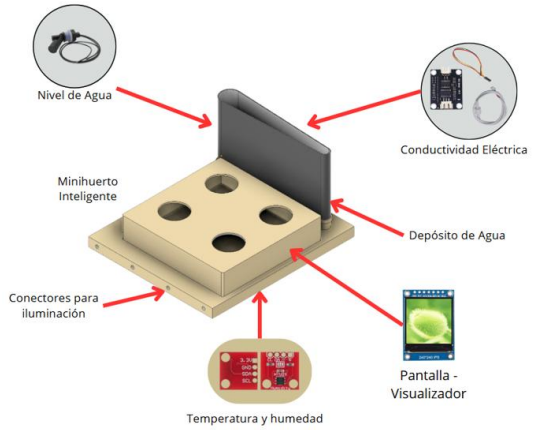

Figura 2. Diagrama de instalación y ubicación de sensores y pantalla visualizador. Elaboración propria.

En la Figura2, muestra el sistema del minihuerto inteligente, tamaño sugerido por la encuesta 0.60m alto x 0.80m ancho x 0.35 m de profundidad), el 45% lo consideró adecuado, mientras que un 20% sugirió aumentar el tamaño. El minihuerto propuesto, se basa en un depósito de agua que puede ser recargado manualmente, diseñado para suministrar de manera continua el recurso hídrico necesario para el desarrollo de las plantas. A medida que las plantas absorben el agua disponible, el nivel del depósito desciende progresivamente hasta alcanzar un umbral mínimo predefinido. Al llegar a dicho nivel, el sistema emite una alerta que indica la necesidad de reposición del suministro.

Paralelamente, la aplicación de nutrientes se optimiza mediante el uso de cápsulas fertilizantes especialmente formuladas para su integración en el sistema. Esta metodología mejora la eficiencia del cultivo, al permitir una dosificación controlada y adaptada a las necesidades específicas de las plantas.

Este enfoque integral no solo permite un monitoreo y control más precisos de las condiciones del cultivo, sino que también simplifica su gestión operativa. De esta forma, el sistema resulta accesible para usuarios con distintos niveles de conocimiento en jardinería, promoviendo la adopción de tecnologías agrícolas sostenibles en contextos urbanos.

En la figura 3 se puede apreciar el diagrama de conexiones de los componentes electrónicos del minihuerto el cual está protegido ante un caso de alta tensión con un fusible en la línea de entrada para evitar cualquier desperfecto externo hacia los componentes.

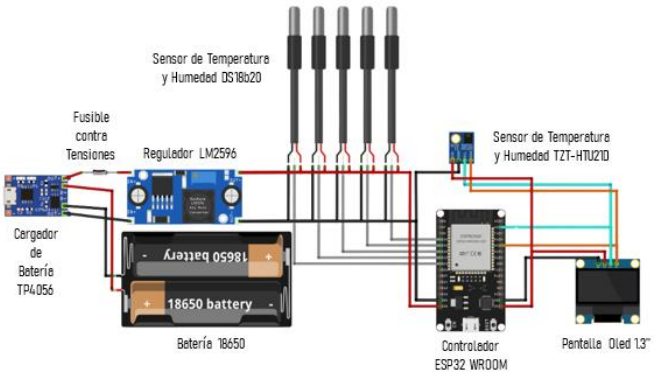

Figura 3. Diagrama de Alimentación y protección en caso de falla del sistema.

La medición de temperatura y humedad del entorno interno se realiza mediante el sensor TZT-HTU21D, cuya lectura se compara con las temperaturas individuales de las plantas, obtenidas por sensores DS18B20. Este enfoque permite identificar inconsistencias o fallas en los sensores distribuidos y optimizar el control ambiental.

Para garantizar la operación ininterrumpida del sistema ante fallos de suministro eléctrico, se ha integrado un sistema de respaldo basado en baterías, gestionado mediante el módulo TP4056, el cual permite la carga y protección de las baterías de forma eficiente cuando se dispone de alimentación externa.

La información relevante del sistema, como temperatura y nivel de agua, se muestra en una pantalla OLED de 1.3", ubicada estratégicamente en el panel frontal del minihuerto para facilitar la supervisión local.

En síntesis, el Minihuerto inteligente constituye una solución tecnológica innovadora que combina sensores, automatización y herramientas de control para generar un entorno óptimo para el crecimiento vegetal, todo ello en un formato compacto, eficiente y de fácil implementación.

V. RESULTADOS

5.1 *Resultado de la Validación del Prototipo*

- ✓ El 95% manifestó interés en cultivar sus propios alimentos mediante un sistema inteligente.
- ✓ El 100% valoró positivamente la idea de acceder a alimentos libres de residuos tóxicos.
- ✓ Un 65% había cultivado previamente alguna planta en casa, lo que indica una base favorable para la adopción del sistema.
- ✓ Respecto al tamaño del prototipo 0.60m alto x 0.80m ancho x 0.35 m de profundidad, el 45% lo consideró adecuado, mientras que un 20% sugirió aumentar el tamaño.
- ✓ El 85% de usuarios prefieren el cultivo de lechuga que otros vegetales.
- ✓ En cuanto al precio, un 74% indicó estar dispuesto a pagar entre S/. 50 y S/. 70, mientras que el 26% estaría dispuesto a pagar hasta S/. 90.
- ✓ Las ubicaciones preferidas para instalar el huerto fueron la cocina 53% y la sala 47%.

5.2 *Resultado de la Implementación del minihuerto*

- ✓ La implementación del minihuerto doméstico inteligente basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) demuestra ser una solución innovadora y sostenible para promover la agricultura urbana en espacios domésticos reducidos.
- ✓ El sistema desarrollado integra un conjunto de sensores de humedad, temperatura y nivel de agua, gestionados a través de un microcontrolador ESP32 y una interfaz de usuario accesible mediante conexión Wi-Fi, lo que permite el monitoreo y control remoto en tiempo real de las condiciones del cultivo.
- ✓ El diseño modular es escalable, complementado con la activación de actuadores como luces LED, lo cual facilita la expansión y adaptación del sistema a diferentes necesidades domésticas. Asimismo, la incorporación de un sistema automatizado de riego y la dosificación de nutrientes mediante cápsulas específicas optimizan el uso de recursos hídricos y nutricionales, garantizando el crecimiento saludable de las plantas con un mínimo de intervención manual.
- ✓ Los resultados obtenidos en la validación preliminar con usuarios potenciales sugieren una alta aceptación del prototipo, destacando especialmente su facilidad de uso, adaptabilidad a espacios reducidos y capacidad de gestión eficiente del cultivo.
- ✓ Esto confirma que el sistema propuesto puede ser una herramienta eficaz para fomentar la seguridad alimentaria, la autosuficiencia urbana y la adopción de tecnologías agrícolas sostenibles, incluso entre usuarios sin experiencia previa en jardinería o agricultura.
- ✓ Se realizó una implementación piloto, se eligieron varios hogares urbanos para la prueba del prototipo. Se capacitaron a los usuarios en el manejo del sistema y se monitoreó el uso durante 4 semanas. Se recolectaron datos técnicos y testimonios cualitativos. Lo cual será incluido en la Fase 2 de Validación.

5.3 *Resultado de la Evaluación de cápsulas biodegradables con liberación controlada en un sistema hidropónico doméstico para lechuga.*

- ✓ Se evaluó el desempeño de cápsulas nutritivas biodegradables formuladas con alginato de sodio y gelatina vegetal endurecida. Las cápsulas fueron cargadas con una mezcla balanceada de nutrientes esenciales (N, P, K, Ca, Mg y micronutrientes quelatados) y colocadas directamente en el depósito de solución nutritiva. Durante los primeros 8 a 10 días, se observó un aumento progresivo en la conductividad eléctrica del sistema (CE), indicando una liberación gradual de los nutrientes desde la matriz polimérica. Las plantas de lechuga (Lactuca sativa) cultivadas bajo este sistema mostraron un crecimiento aceptable, con hojas de coloración verde uniforme y una biomasa fresca promedio 9.4% mayor en comparación con el lote control que recibió una única carga de solución nutritiva diluida al inicio. Sin embargo, se detectó una ligera variabilidad en el tamaño de las plantas entre

macetas, atribuida a diferencias en la proximidad y distribución de las cápsulas en el sistema. Al finalizar el ciclo de cultivo (35 días), a degradación fue sustancial, lo cual es suficiente para sistemas caseros donde no se requiere limpieza técnica estricta.

En síntesis, el minihuerto inteligente combina automatización, control ambiental y diseño compacto, contribuyendo significativamente a la promoción de prácticas agrícolas resilientes en entornos urbanos y ofreciendo una alternativa viable para la producción de alimentos frescos en el hogar.

VI. DISCUSIONES

En línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la ONU, particularmente en lo relativo al fin del hambre y la promoción de la agricultura sostenible hacia 2030, existe una creciente presión por adoptar prácticas agrícolas que reduzcan el impacto ambiental. La integración de tecnologías verdes ha demostrado ser una estrategia viable para reducir la dependencia de alimentos costoso y orgánicos de los supermercados. Estudios recientes han evaluado la huella de carbono de estos sistemas, evidenciando que pueden ser significativamente más eficientes en el uso de recursos en comparación con la agricultura tradicional.

Estas prácticas no solo reducen el impacto ambiental, sino que también hacen que la agricultura urbana sea más accesible, eficiente y sostenible a largo plazo. En ciudades de países desarrollados, proyectos de agricultura urbana han demostrado que es posible producir alimentos frescos y nutritivos de forma sustentable, incluso en espacios reducidos. En el caso del Perú, la implementación de minihuertos inteligentes en centros urbanos podría beneficiarse de estas experiencias internacionales, adaptándolas al contexto local, tanto en términos de clima como de hábitos de uso.

Por otro lado, el uso de cápsulas biodegradables con liberación controlada de nutrientes representa una innovación interesante en el contexto de la hidroponía a pequeña escala, particularmente en sistemas domésticos donde el manejo técnico puede ser limitado. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que este tipo de formulación es capaz de liberar gradualmente nutrientes esenciales, favoreciendo un crecimiento vegetal homogéneo sin necesidad de dosificaciones frecuentes o preparación manual de soluciones nutritivas. Desde una perspectiva fisicoquímica, el comportamiento observado se alinea con modelos de difusión controlada a través de matrices poliméricas, donde la transferencia de masa se ve influida por el tipo de polímero, el espesor de la cápsula y las condiciones del entorno. La elección de materiales como el alginato de sodio o la gelatina vegetal permite una biodegradación progresiva, sin dejar residuos estructurados. No obstante, se debe considerar que, aunque no se observaron residuos sólidos visibles al finalizar el ciclo de cultivo, pueden persistir restos gelificados microscópicos en suspensión, cuya degradación completa depende en gran medida de la temperatura, la oxigenación y la actividad microbiana del sistema. A pesar de estos beneficios, es importante señalar que el uso de cápsulas en hidroponía no está generalizado actualmente, en parte debido a limitaciones prácticas. En sistemas de recirculación o con bombas, existe el riesgo de obstrucción por fragmentos parciales o la liberación irregular de nutrientes, comprometiendo la estabilidad iónica de la solución. Además, la imposibilidad de ajustar de forma inmediata la concentración de nutrientes, como sí ocurre con las soluciones líquidas estándar, representa una desventaja en entornos que requieren precisión agronómica.

Por ello, su uso en hidroponía doméstica debería considerarse como una herramienta complementaria, especialmente útil en sistemas pasivos o semicontrolados, donde su simplicidad operativa, su bajo impacto ambiental y su potencial de ahorro en mano de obra representan ventajas significativas. Además, estas cápsulas podrían adaptarse para incluir no solo fertilizantes, sino también bioestimulantes, fitohormonas o agentes de biocontrol, lo que abre una línea de investigación interesante hacia formulaciones multifuncionales adaptadas al manejo sostenible del cultivo en espacios reducidos. Aunque no constituyen una solución integral para todos los sistemas hidropónicos, las cápsulas biodegradables de liberación controlada pueden desempeñar un papel estratégico en el fortalecimiento de la agricultura urbana doméstica, siempre que se comprendan sus condiciones de uso óptimas y se gestionen adecuadamente sus limitaciones técnicas.

Es importante señalar que la implementación del proyecto enfrenta desafíos relacionados con el acceso digital y la disponibilidad de recursos, especialmente en comunidades con altos niveles de pobreza. Si bien se ofrecen estrategias innovadoras para facilitar la adopción y el mantenimiento del sistema, la falta de acceso a internet podría limitar su efectividad. No obstante, el sistema está diseñado para ser autónomo e incluye un respaldo con baterías, gestionado por el módulo TP4056, que garantiza su operación continua en caso de fallos de suministro eléctrico. Aunque el sistema depende principalmente de la energía eléctrica para el funcionamiento de la bomba de aire y otros componentes, la batería asegura que el sistema siga operativo en ausencia de energía, proporcionando autonomía durante cortes de electricidad. El módulo TP4056 carga y protege las baterías de forma eficiente cuando hay suministro eléctrico, optimizando su uso y prolongando la vida útil.

Finalmente, dado que el sistema está diseñado para ser fácil de manipular, la capacitación inicial será suficiente para garantizar que los usuarios comprendan cómo operarlo y realizar el mantenimiento básico. Sin embargo, se ofrecerá soporte técnico ocasional para resolver problemas imprevistos, asegurando que las familias, incluso sin experiencia previa, puedan utilizar el sistema de manera autónoma y eficiente.

Todas estas consideraciones deberán ser tomadas en cuenta para la escalabilidad y sostenibilidad del proyecto, así como para diseñar estrategias adaptadas a las condiciones socioeconómicas específicas de las comunidades objetivo.

VII. CONCLUSIONES

1. La validación de baja fidelidad permitió confirmar la existencia de un interés real y un mercado potencial para el uso doméstico de minihuertos inteligentes en contextos urbanos.
2. Se logró la construcción e implementación del prototipo del minihuerto inteligente con un enfoque accesible y de bajo costo, lo que demuestra la viabilidad de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles para familias de bajos recursos.
3. El sistema automatizado, basado en tecnologías IoT y cápsulas biodegradables de liberación controlada, proporcionó resultados positivos en términos de crecimiento vegetal y facilidad de uso para usuarios sin experiencia previa en agricultura.
4. Utilizar cápsulas de liberación controlada como complemento en sistemas hidropónicos domésticos pasivos o de flujo simple, especialmente en cultivos de ciclo corto como la lechuga.
5. La participación comunitaria y colaborativa asegura que la tecnología esté adaptada a las necesidades locales y promueve su apropiación social, maximizando el impacto en términos de seguridad alimentaria y bienestar de los usuarios.
6. El diseño y la implementación del minihuerto doméstico inteligente han demostrado ser una solución técnica viable para enfrentar la inseguridad alimentaria en comunidades urbanas vulnerables

Es importante destacar que el sistema desarrollado tiene un enfoque social y educativo, orientado a fortalecer la seguridad alimentaria y la autosuficiencia urbana sin fines comerciales. La tecnología está concebida para ser accesible, replicable y de bajo costo, promoviendo su uso en entornos vulnerables y facilitando la transferencia de conocimientos y la participación comunitaria.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos y la validación preliminar del minihuerto doméstico inteligente, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras tecnológicas:

1. Ampliar la validación funcional del prototipo en diferentes entornos urbanos, incluyendo hogares de distintas regiones climáticas del Perú, para evaluar la adaptabilidad del sistema a variaciones ambientales y socioculturales.
2. Optimizar la eficiencia energética del sistema mediante el uso de fuentes de energía renovable, como paneles solares de bajo costo, buscando reducir aún más el impacto ambiental y la dependencia de la red eléctrica convencional.
3. Desarrollar modelos predictivos basados en inteligencia artificial o machine learning para anticipar necesidades de riego y fertilización, mejorando la eficiencia del manejo del cultivo en función de datos históricos y condiciones ambientales en tiempo real.
4. Incorporar sensores adicionales para el monitoreo de parámetros como la concentración de nutrientes en la solución, la calidad del agua y la detección temprana de enfermedades o plagas.
5. Promover estrategias de capacitación digital para usuarios finales, especialmente mediante aplicaciones móviles didácticas, que faciliten el uso del sistema a personas sin experiencia previa en agricultura.
6. Estudiar el impacto social y alimentario de la adopción masiva de minihuertos inteligentes en comunidades urbanas, evaluando su contribución a la seguridad alimentaria, la salud nutricional y el bienestar psicosocial de los usuarios.
7. Optimizar la formulación de los biopolímeros para mejorar la uniformidad de la liberación y la biodegradabilidad en condiciones de baja actividad microbiana.
8. Evaluar la cinética de disolución bajo diferentes parámetros ambientales (temperatura, pH, oxigenación).
9. Explorar la incorporación de microorganismos benéficos, bioestimulantes o agentes de control biológico para convertir estas cápsulas en vehículos multifuncionales dentro de un enfoque agroecológico y sustentable.

La continuidad de este tipo de desarrollos tecnológicos, junto con su democratización y escalabilidad, puede constituir un aporte significativo hacia modelos urbanos más sostenibles, resilientes y autosuficientes en materia de producción de alimentos.

AGRADECIMIENTO

Esta investigación fue financiada por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos RR N.º 004305-2024 con código C24202661 de Proyecto PCONFIGI. Expresamos nuestro agradecimiento por el apoyo recibido, el cual hizo posible la ejecución de esta investigación. Expresamos también a nuestro más sincero agradecimiento al equipo de trabajo cuyo compromiso y experiencia han sido fundamentales para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

[1] Estado de la Seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo (SOFI). Naciones Unidas, Perú. 2022. https://www.fao.org/publications/fao-flagship-publications/the-state-of-food-security-and-nutrition-in-the-world/es

[2] FAO, FIDA, OMS, PMA & UNICEF. *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2024: Financiación para acabar con el hambre, la inseguridad alimentaria y la malnutrición en todas sus formas*. Roma: FAO. 2024

[3] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). 2023. Disponible en: https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/pobreza-afecto-al-259-de-la-poblacion-del-pais-en-el-ano-2021-13572/

[4] Torres F, Tovar A, Romero R. Verduras contaminadas con plaguicidas. Consorcio Agroecológico Peruano; 2023 nov 14. Disponible en: https://consorcioagroecologico.pe/verduras-contaminadas-con-plaguicidas-se-venden-en-18-mercados-y-supermercados-de-4-ciudades/

[5] Urban Harvest. (2007). *Agricultura urbana y periurbana en Lima Metropolitana: Una estrategia de lucha contra la pobreza y la inseguridad alimentaria. Tercera Reunión Interinstitucional, 25-26 de agosto de 2006*. Lima: Centro Internacional de la Papa - Urban Harvest.

[6] Gunapala R, Gangahagedara R, Wanasinghe WCS, Samaraweera AU, Gamage A, Rathnayaka C, et al. *Agricultura urbana: una vía estratégica para*

construir resiliencia y garantizar la seguridad alimentaria sostenible en las ciudades. Sistema agrícola. 2025 jul;3(3):100150. doi: 10.1016/j.farsys.2025.100150.
[7] Salcedo, S., & Guzmán, L. (Eds.). *Agricultura familiar en América Latina y el Caribe: Recomendaciones de política*. Santiago de Chile: FAO. 2014.
[8] Gianella, T., & Pinzás, T. (Eds.). *Agricultura urbana en América Latina*. LEISA - Revista de Agroecología, 35(3), pp.40. 2019.
[9] Smit, J., Nasr, J., & Ratta, A. *Urban agriculture yesterday and today.* In J. Smit, J. Nasr, & A. Ratta (Eds.), *Urban agriculture: Foods, jobs and sustainable cities* (p. 31). Washington, DC: The Urban Agriculture Network, Inc. 2001.
[10] Taiz, L., & Zeiger, E. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal* (6ª ed.). Porto Alegre: Artmed. 2017.
[11] Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal (ABISOLO). (2020). *Anuário Brasileiro de Tecnologia em Nutrição Vegetal 2020*. São Paulo: ABISOLO.
[12] Naciones Unidas. *Objetivo 2: Poner fin al hambre.* New York: ONU. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/
[13] Hydroponic Internacional: *Hydroponic Systems instala sus canales en un invernadero-restaurante de Japón.* 2022.
https://hydroponicsystems.eu/es/hydroponic-systems-instala-sus-canales-en-un-invernadero-restaurante-de-japon/
[14] Díaz Rangel AL, Luna Cárdenas V. *Autogestión alimentaria de las familias vinculadas al Centro Social Unidad, barrio La Merced Sur, Bogotá D.C.* Universidad El Bosque, Facultad de Ingeniería, Programa Ingeniería Ambiental; 2021. Disponible en: https://repositorio.unbosque.edu.co/server/api/core/bitstreams/e9abc3af-2c9f-43e3-bbf7-7aae2948c7fd/content
[15] Morán N. Agricultura urbana: un aporte a la rehabilitación integral. 2010 Disponible en: https://www.fuhem.es/media/ecosocial/File/revistapapeles/111/agricultura_urbana_N._MORAN.pdf
[16] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). *Informe sobre desarrollo humano*. 2014. Disponible en: https://www.undp.org/content/dam/undp/library/corporate/HDR/2014HDR/HDR-2014-Spanish.pdf
[17] EOS Data Analytics. Agricultura intensiva: qué es, ventajas y desventajas. EOSDA Blog; 2022. Disponible en: https://eos.com/es/blog/agricultura-intensiva/
[18] Viejó-Altamirano JM, Caicedo-Aldaz JC. Innovaciones en agricultura sostenible: un estudio exploratorio de las nuevas tendencias. *Horizon Nexus J*. 2024;2(3):31–44.
[19] Fountas S, Mylonas N, Malounas I, Rodias E, Hellmann Santos C, Pekkeriet E. Agricultural robotics for field operations. *Sensors*. 2020;20(9):2672. doi:10.3390/s20092672
[20] Auat Cheein FA, Carelli R. Agricultural robotics: unmanned robotic service units in agricultural tasks. *IEEE Ind Electron Mag*. 2013;7(3):48–58. doi:10.1109/MIE.2013.2252957
[21] Rojas Cardona O, Vaca Lozano JZ, Vaca Lozano YA. Diseño e implementación de un sistema automatizado para invernadero hidropónico [Trabajo de grado en Internet]. Mariquita (CO): Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías. 2017.
[22] Perez Cari, M., & Tellez Garrido, I. *Producción y comercialización con sistema hidropónico NFT de lechuga y tomate cherry, en la ciudad de Arequipa* [Tesis de maestría, ESAN Graduate School of Business]. 2022
[23] Nielsen J**.** *Why You Only Need to Test with 5 Users.* Nielsen Norman Group. 2000. Disponible en: https://www.nngroup.com/articles/why-you-only-need-to-test-with-5-users/
[24] Castañares JL. *ABC de la hidroponía.* Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina; 2022.
[25] Brenes Peralta LP, Jiménez Morales MF. *Manual de producción hidropónica para hortalizas de hoja en sistema NFT (Nutrient Film Technique)*. 1ª ed. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica; 2016.
[26] Beltrano J, Gimenez DO, coordinadores**.** *Cultivo en hidroponía*. La Plata: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP); 2022.
[27] Cabildo Insular de Tenerife. *Cálculo de soluciones nutritivas*. Servicio Técnico de Agricultura y Desarrollo Rural. 2016. https://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/otro_622_soluciones_nutritivas.pdf
[28] Pérez López, E., & Rodríguez Barrantes, D. *Estudio fisicoquímico para la formulación de un fertilizante líquido de composición completa*. *Pensamiento Actual*, *17*(29), 51–68. 2017. https://doi.org/10.15517/pensar.v17i29.
[29] Lubkowski K, Smorowska A, Grzmil B, Kozłowska A. Controlled-release fertilizer prepared using a biodegradable aliphatic copolyester of poly(butylene succinate) and dimerized fatty acid. *J Agric Food Chem*. 2015;63(10):2597–2605. doi:10.1021/jf505901n.
[30] Ezziddine M, Liltved H, Seljåsen R. *Hydroponic lettuce cultivation using organic nutrient solution from aerobic digested aquacultural sludge*. Agronomy. 2021;11(8):1484. doi:10.3390/agronomy11081484.
[31] Ahmed ZFR, Alnuaimi AKH, Askri A, Tzortzakis N. *Evaluation of lettuce (Lactuca sativa L.) production under hydroponic system: Nutrient solution derived from fish waste vs. inorganic nutrient solution.* Horticulturae. 2021;7(9):292. doi:10.3390/horticulturae7090292.
[32] Puelles Bulnes Maria Elizabeth, et. al. *Automated hydroponic greenhouse customized for family nutrition using plants varieties.* 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; 2024 Jul 17-19; San Jose, Costa Rica. 2024. doi:10.18687/LACCEI2024.1.1.2005.
[33] Puelles Bulnes Maria Elizabeth. *Prototipo de un Invernadero automatizado hidropónico NFT con dos microclimas para el hogar basado en Internet de las cosas.* Rev Invest Sist Inform. 2023;16(1). DOI: https://doi.org/10.15381/risi.v16i1.25581.