

## DEL LABORATORIO AL PLATO: LA CIENCIA DETRÁS DE LA HIDROPONÍA

Alan E. Guerrero <sup>a</sup>, Viridiana S. Reyes <sup>a</sup>, Emmanuel Mendoza-Hernández <sup>a,\*</sup>,

Miguel A. Sandoval <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato, Tecnológico Nacional de México, Carretera Estatal Guanajuato-Puentecillas km. 10.5, 36262, Guanajuato, Guanajuato, México.

[emmanuel.mh@guanajuato.tecnm.mx](mailto:emmanuel.mh@guanajuato.tecnm.mx); [miguel.sl@guanajuato.tecnm.mx](mailto:miguel.sl@guanajuato.tecnm.mx)

### Resumen

La hidroponía es una técnica de cultivo sin suelo que emplea soluciones nutritivas de composición controlada y ambientes regulados. Este artículo de divulgación-revisión sistematiza la literatura científica reciente para describir los fundamentos fisicoquímicos de la hidroponía, clasificar los principales sistemas comerciales y analizar sus aportaciones a la agricultura sostenible. Se presentan las ventajas cuantificadas —hasta 90 % de ahorro hídrico y producción continua en espacios reducidos— y se discuten las barreras técnicas y económicas que frenan su adopción a gran escala. Además, se revisan innovaciones emergentes, desde fertilizantes de baja huella ambiental hasta esquemas de automatización e integración con energías renovables, que fortalecen la viabilidad de la hidroponía para la seguridad alimentaria futura.

*Palabras clave:* Hidroponía; Cultivo sin suelo; Agricultura sostenible; Ahorro de agua; Energías renovables

## FROM LAB TO TABLE: THE SCIENCE BEHIND HYDROPONICS

### Abstract

Hydroponics is a soilless cultivation technique that relies on precisely formulated nutrient solutions and controlled environments. This science communication-review article synthesizes recent scientific literature to describe the physicochemical principles of hydroponics, classify the main commercial systems, and evaluate their contribution to sustainable agriculture. Quantified benefits—such as up to 90 % water savings and year-round production in reduced spaces—are presented, along with the technical and economic barriers that hinder large-scale adoption. Emerging innovations are also examined, ranging from low-impact fertilizers to automation schemes and renewable-energy integration, all of which reinforce the feasibility of hydroponics for future food security.

**Keywords:** Hydroponics; Soilless culture; Sustainable agriculture; Water saving; Renewable energy integration

## 1. Introducción

Desde los albores de la civilización, la agricultura ha sustentado el desarrollo humano al posibilitar el asentamiento de comunidades y la expansión de las sociedades. Hoy, sin embargo, el modelo agrícola convencional atraviesa una crisis sin precedentes: el crecimiento demográfico acelerado, la escasez hídrica, la reducción de tierras cultivables y el cambio climático ponen en riesgo la seguridad alimentaria mundial. Ante estos desafíos, la investigación científica impulsa sistemas productivos más eficientes y resilientes (Erekath y col., 2024). Entre ellos destaca la hidroponía, un conjunto de técnicas de cultivo sin suelo que optimizan los recursos y elevan la productividad agrícola (Junge y col., 2025).

La hidroponía se basa en soluciones nutritivas de composición controlada y en ambientes perfectamente regulados para maximizar la fotosíntesis y el desarrollo vegetal (Massa y col., 2020; Yep y Zheng, 2019). Al prescindir del suelo, las plantas reciben los elementos esenciales mediante una solución diseñada con precisión (Sharma y col., 2024). Gracias a la recirculación cerrada del agua y a la dosificación exacta de nutrientes, se han documentado ahorros hídricos del 85–95 % y rendimientos un 20–30 % superiores respecto

a la agricultura tradicional (Fathidarehniyeh y col, 2023). No obstante, la adopción masiva de la hidroponía aún se ve limitada por barreras técnicas y económicas, entre las que destacan los altos costos iniciales, la dependencia de un suministro eléctrico continuo y la gestión de los efluentes nutritivos agotados (Pomoni y col, 2023).

Este trabajo se enmarca en la literatura de revisión sobre cultivo sin suelo e hidroponía. Existen revisiones que abordan la tecnología “soilless” (sin suelo) en la horticultura moderna (Savvas y Gruda, 2018), la clasificación de sistemas y el manejo del agua (Maucieri y col., 2018), así como comparativas entre hidroponía vs. suelo desde la óptica de energía/agua/uso de tierra (Pomoni y col., 2023). Otras síntesis tratan tendencias y digitalización (IoT, IA) en hidroponía (Rajaseger y col., 2023) y análisis críticos del consumo energético de la iluminación en agricultura vertical (Stanghellini y Katzin, 2024). Nuestro aporte integra estas líneas en un marco unificado y divulgativo bajo los siguientes objetivos: i) describir los fundamentos fisicoquímicos de la hidroponía; ii) clasificar los principales sistemas comerciales; iii) evaluar sus ventajas y retos desde la óptica de la sostenibilidad; y iv) examinar innovaciones emergentes como

fertilizantes ecológicos, automatización e integración energética que pueden consolidar su viabilidad como solución para la disponibilidad y acceso a alimentos suficientes para todos.

## 2. Fundamentos de la hidroponía.

### 2.1 Bases fisiológicas y fotosintéticas

En hidroponía, el rendimiento depende de una zona radicular (el volumen de solución o sustrato que rodea a las raíces) bien oxigenada y con sales equilibradas, además de luz, temperatura y CO<sub>2</sub> controlados. Para cultivos de hoja como lechuga, se recomiendan valores de pH 5.5–6.5 y conductividad eléctrica (CE) 1.4–2.2 mS cm<sup>-1</sup>, mientras que la concentración de oxígeno disuelto debe permanecer entre 6–8 mg L<sup>-1</sup> (Barbosa y col., 2015; Massa y col., 2020). Estos rangos minimizan precipitaciones de fosfatos y carbonatos, optimizan la absorción iónica y aceleran la diferenciación celular (proceso por el cual las células jóvenes e inmaduras adquieren características y funciones específicas, convirtiéndose en células maduras y especializadas). El control de temperatura (18–24 °C) y el periodo de luz (14–16 h luz día<sup>-1</sup>) completa el microambiente que explica

los rendimientos 20–30 % superiores frente a cultivos convencionales (Fathidarehniyeh y col., 2023). La calidad espectral de la luz influye directamente en la eficiencia fotosintética. Numerosos estudios coinciden en que una combinación de luz roja ( $\approx$  660 nm) y luz azul ( $\approx$  450 nm) en proporciones entre 7:3 y 1:1 maximiza la acumulación de biomasa en lechuga y tomate cultivados en NFT, al tiempo que incrementa el contenido de clorofillas y carotenoides (por ejemplo, la luz azul favorece el crecimiento vegetativo, mientras que la luz roja estimula la floración) (Wang y col., 2022; Luo y col., 2024).

### 2.2 Composición de la solución nutritiva

Las soluciones nutritivas se ajustan según las necesidades específicas de cada cultivo, optimizando su desarrollo (DSouza y col., 2025; Rajendran y col., 2024). La formulación más extendida deriva de la solución de Hoagland (Yep y Zheng, 2019), que aporta 14 elementos esenciales. Los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) suelen estar presentes en concentraciones de 50–300 mg L<sup>-1</sup>, mientras que los micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo) se dosifican en el rango  $\mu$ g L<sup>-1</sup> (Du y col., 2022) usualmente en forma quelatada (la unión de una molécula orgánica

con un ion metálico, creando un anillo estable llamado quelato) para evitar precipitación. Cada uno de estos elementos cumple funciones específicas en el metabolismo vegetal (serie de procesos que ocurren en las plantas para sintetizar y transformar sustancias en energía), desde la síntesis de clorofila hasta la formación de estructuras celulares. El balance N:P:K (por ejemplo 1:0.4:1.3 para solanáceas como el tomate y la papa) es crítico, pues excesos de K<sup>+</sup> inhiben la absorción de Mg<sup>2+</sup> y Ca<sup>2+</sup> (Savvas y Gruda, 2018; Sonneveld y Voogt, 2009). El ajuste de pH se realiza, por lo general, con ácido fosfórico o hidróxido potásico, evitando cloruros para no elevar la salinidad.

No obstante, el uso de sales minerales convencionales conlleva un alto coste energético y una huella de carbono significativa; desarrollar alternativas de menor impacto, tales como fertilizantes de origen orgánico o sistemas de reciclaje de nutrientes, constituye hoy uno de los retos centrales de la hidroponía moderna, tema que se aborda en detalle en la Sección 4.3.

### 2.3 Comparación hidroponía vs. agricultura convencional

Esta subsección compara los sistemas hidropónicos con sus equivalentes en agricultura en suelo (surcos o goteo) considerando consumo de agua (L kg<sup>-1</sup>), rendimiento (kg m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>), y energía (kWh kg<sup>-1</sup>). Iniciamos con NFT por ser el sistema de referencia para hortalizas de hoja y el más documentado en la literatura; a partir de él contrastamos DWC, goteo en sustrato y aeroponía (véase la descripción técnica en la Sección 3). Los sistemas Nutrient Film Technique (NFT) y de sustrato inerte pueden ahorrar 85–95 % de agua gracias a la recirculación cerrada, mientras que el rendimiento por superficie se duplica o triplica. Entre las ventajas adicionales destacan la reducción del uso de pesticidas (la ausencia de suelo evita la mayoría de los patógenos radiculares, de modo que los sistemas hidropónicos requieren muchas menos aplicaciones de pesticidas y herbicidas que, además de reducir la carga química sobre el ambiente y los alimentos, esto disminuye la exposición directa de los operarios a sustancias potencialmente tóxicas y, con ello, el riesgo de enfermedades dérmicas, respiratorias o neurológicas asociadas al uso prolongado de agroquímicos) y la producción

continua sin que influyan las estaciones del año. En contrapartida, los desafíos comprenden la inversión inicial en infraestructura, el consumo eléctrico para bombeo y climatización, y la gestión de la solución agotada que concentra sales y debe tratarse antes de su descarga (Pomoni y col., 2023; Kumar y Cho, 2014).

La Tabla 1 resume los requerimientos típicos para hortalizas de hoja y fruto, junto con la eficiencia hídrica y energética comparada con la agricultura en suelo.

**Tabla 1.** Comparación de la hidroponía y la agricultura convencional en cultivos de lechuga y tomate.

Cultivo	Agua necesaria $\text{L kg}^{-1}$	Energía $\text{kWh kg}^{-1}$	Beneficio $\text{kg m}^{-2} \text{año}^{-1}$
Lechuga (suelo, riego por surcos)	250	0.35	3.5
Lechuga (NFT)	20	1.1	8.0
Tomate (suelo, goteo)	60	0.45	5.0
Tomate (sustrato inerte, coco)	30	1.50	10.5

Fuente. (Barbosa y col., 2015; Pomoni y col., 2023)

### 3. Clasificación de sistemas hidropónicos.

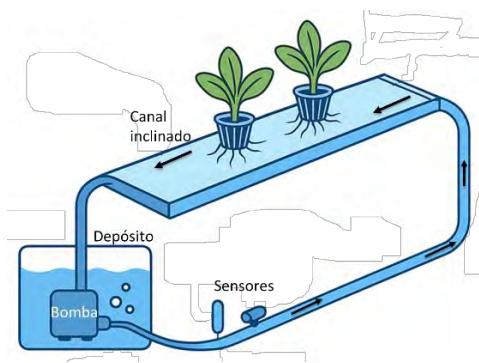
La hidroponía no es un sistema único, sino un conjunto de técnicas que permiten el crecimiento de plantas sin suelo mediante diferentes métodos de suministro de agua, nutrientes y oxígeno. La Figura 1 ilustra el flujo de agua y nutrientes en un sistema NFT, del cual derivan las siguientes variantes. Cada sistema tiene su fundamento científico y aplicaciones específicas dependiendo del tipo de cultivo, recursos disponibles y objetivos de producción.

#### 3.1 Flujo laminar o NFT

En este sistema, las raíces de las plantas están en contacto constante con una fina película de solución nutritiva en circulación, lo que les permite absorber los nutrientes esenciales sin estar completamente sumergidas (Alipio y col., 2019). En NFT la solución nutritiva forma una película de 2-3 mm que recorre canales con pendiente del 1–2 %, lo que garantiza oxigenación radicular y consumo hídrico muy bajo. Estudios comparativos indican rendimientos de lechuga  $7\text{--}11 \text{ kg m}^{-2} \text{año}^{-1}$  con ahorros de hasta 90 % de agua frente al cultivo en suelo (Alipio y col., 2019; Maucieri y col., 2018). Su principal limitación es la escasa capacidad de

amortiguación térmica: temperaturas superiores a 26 °C o fallas de bombeo provocan hipoxia y pérdidas rápidas de cultivo.

Las plantas se colocan en canales ligeramente inclinados, generalmente de PVC o materiales similares. Una bomba impulsa la solución nutritiva desde un tanque hasta la parte superior del canal, permitiendo que fluya en una fina capa sobre las raíces. Las raíces absorben los nutrientes y el agua que necesitan, mientras que el exceso de solución regresa al tanque para ser reutilizado. La circulación constante garantiza la oxigenación de las raíces, promoviendo un crecimiento rápido y saludable.



**Figura 1.** Esquema de un sistema NFT.

### 3.2 Raíz flotante o Deep-Water Culture (DWC)

Las plantas se sostienen sobre balsas flotantes que reposan en depósitos aireados (20–30 cm de profundidad). La disponibilidad continua de agua atenúa fluctuaciones de pH y CE, por lo que DWC resulta idóneo para hortalizas de hoja bajo climas cálidos. Ensayos en lechuga muestran rendimientos algo menores que NFT ( $\approx 6\text{--}8 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) pero mayor estabilidad térmica. El consumo energético aumenta (aireadores 24 h) y el volumen de solución por planta es 4–6 veces mayor que en NFT (Pantanella y col., 2012).

### 3.3 Goteo en sustrato inerte (Substrate Drip)

En este sistema el soporte lo proporcionan perlita, fibra de coco o lana de roca contenidos en bolsas o cubetas (Li y col., 2025; Ahmadi y col., 2021). A diferencia de los sistemas que dependen únicamente de soluciones nutritivas circulantes, el cultivo en sustratos inertes facilita la retención de agua y la absorción de nutrientes (Kannan y col., 2022). El riego por pulsos permite ajustar la frecuencia según la demanda evaporativa. Para cultivos de fruto (tomate, pepino, pimiento) se reportan rendimientos de 9–12  $\text{kg m}^{-2} \text{ ciclo}^{-1}$  con consumos de agua 40–60 % menores que en goteo sobre suelo. La desventaja principal es la reposición

periódica del sustrato, debido a la degradación de su estructura física, la acumulación de sales que reduce la CE de poro y a criterios de inocuidad (riesgo de biofilm y residuos), lo que añade costos y manejo de residuos cada ciclo. Otra desventaja es la necesidad de drenar 15–20 % del volumen para evitar acumulación de sales (Maatjie y col., 2018).

#### 3.4 Aeroponía

La aeroponía es un sistema hidropónico avanzado en el que las raíces de las plantas están suspendidas en el aire y se riegan mediante nebulización (en forma de aerosol) con una solución nutritiva de gotículas < 50  $\mu\text{m}$ . Este método proporciona una oxigenación óptima, lo cual disminuye el volumen de solución a < 1 L por planta, maximiza la absorción de nutrientes y reduce enfermedades radiculares, lo que puede acelerar el crecimiento vegetal (Schmidt Rivera y col., 2023). Se han documentado incrementos de biomasa de 15–25 % frente a NFT en albahaca y papa minitubérculo, con un uso de agua hasta 96 % menor respecto al suelo. No obstante, el sistema es sensible a obstrucciones de boquillas y requiere presión

constante (0.4–0.6 MPa) (Erekath y col., 2024; Medina-García y col., 2021).

La Tabla 2 sintetiza el agua requerida, el rendimiento y la inversión inicial de los distintos sistemas hidropónicos.

**Tabla 2.** Comparación de los principales sistemas hidropónicos.

Sistema	Agua necesaria L kg <sup>-1</sup>	Beneficio kg m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>	Inversión Inicial USD m <sup>-2</sup>
NFT	20–30	7–11	35–45
DWC	30–45	6–8	30–40
Substrate Drip	25–35	9–12	40–60
Aeroponía	5–10	8–13	60–80
Acuaponía	25–40	5–9	50–70

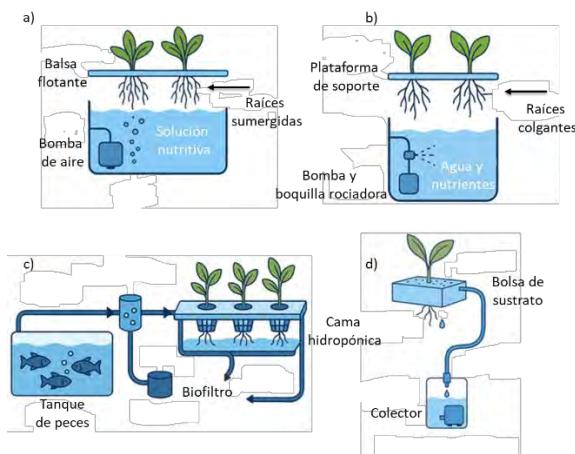
Fuente. (Fernandes y col., 2024; Maucieri y col., 2018; Pomoni y col., 2023)

#### 3.5 Sistemas híbridos y acuaponía

La integración de NFT o DWC con tanques de peces forma sistemas acuapónicos, donde el efluente rico en amonio se convierte biológicamente en nitratos útiles para las plantas. Esto reduce la demanda de fertilizante químico en 25–40 % pero añade complejidad al balance de sólidos y oxígeno. Otros híbridos combinan columnas verticales

NFT con aeroponía intermitente para cultivos urbanos de alta densidad (Aslanidou y col., 2023; Ravani y col., 2024).

La Figura 2 resume gráficamente las cuatro configuraciones descritas en esta sección. En a) se aprecia el sistema DWC, donde las plantas crecen sobre balsas que flotan en un depósito aireado; b) muestra la aeroponía, donde las raíces cuelgan reciben una neblina nutritiva a alta presión; c) ilustra la acuaponía acoplada, combinando un tanque de peces con un lecho NFT para cerrar el ciclo de nitrógeno; y d) presenta el *substrate drip*, donde pulsos controlados de solución se aplican sobre bolsas de sustrato como fibra de coco o lana de roca.



**Figura 2.** Configuraciones hidropónicas. a) DWC, b) Aeroponía, c) Acuaponía y d) Substrate Drip.

#### 4. Avances tecnológicos en hidroponía

El éxito de la hidroponía no solo depende del suministro de nutrientes, sino también de un control ambiental preciso. Parámetros como la iluminación, temperatura, la humedad, la concentración de CO<sub>2</sub> y la automatización de procesos permiten optimizar el crecimiento y la productividad de los cultivos hidropónicos.

##### 4.1 Iluminación LED de espectro optimizado

La sustitución de luminarias de vapor de sodio de alta presión (HPS, por sus siglas en inglés) y fluorescentes por LED de alto rendimiento ha transformado la horticultura bajo ambiente controlado. Más allá de la eficiencia energética ( $\geq 2.8 \text{ } \mu\text{mol J}^{-1}$ ), la programación de espectros rojo y azul permite modular fotomorfogénesis (conjunto de cambios en el crecimiento y desarrollo de las plantas que son inducidos por la luz, excluyendo la fotosíntesis) y calidad nutrimental. Por ejemplo, tratamientos LED (Light Emitting Diode, por sus siglas en inglés) con una razón rojo:azul 7:3 aumentaron el peso fresco de lechuga hasta un 52 % respecto a lámparas fluorescentes convencionales, mientras que un balance 1:1 adelantó la floración y fructificación en tomate (Amoozgar y col., 2017; Wang y col., 2022). Además, las luces LED son

energéticamente eficientes y generan menos calor, reduciendo la evaporación de agua y optimizando el consumo energético (Erekath y col., 2024).

La administración dinámica del Daily Light Integral (DLI) vía sensores de radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) y controladores de modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) reduce hasta 18 % el consumo eléctrico sin comprometer el rendimiento (Morella y col., 2023).

#### *4.2 Automatización, sensórica e inteligencia artificial*

La tecnología ha revolucionado la hidroponía, permitiendo una gestión automatizada y altamente eficiente de los cultivos. Por ejemplo, la aplicación de sensores (pH, conductividad eléctrica, etc.) y sistemas de riego automatizados son capaces de ajustar en tiempo real la composición de la solución nutritiva, además, activan bombas dosificadoras o alarmas, y regulan la cantidad exacta de agua y nutrientes, evitando el desperdicio y garantizando un suministro equilibrado (Bosman y col., 2024; Pal y Anantharaman, 2022).

Sensores de humedad y temperatura permiten un monitoreo en tiempo real y ajustan automáticamente los sistemas de climatización. El uso de sistemas de neblina (en aeroponía, la solución nutritiva se suministra como una neblina de gotículas de tamaño micrométrico generada por boquillas de alta presión o discos ultrasónicos), donde cada ciclo de 3–5 s de nebulización va seguido de 2–3 min de pausa, mantiene a las raíces suspendidas en un ambiente saturado de oxígeno ( $> 8 \text{ mg L}^{-1}$ ), ayuda a mantener una humedad relativa óptima, generalmente entre 50% y 70%; y evita no solo la deshidratación de las raíces promoviendo un desarrollo saludable sino también el goteo continuo (Birkhold y Burdick, 2019; Sharma y col., 2024). El exceso de solución condensa en el fondo y retorna al depósito mediante gravedad.

Algoritmos de *machine learning* pueden ajustar automáticamente luces LED, riego, CO<sub>2</sub> y ventilación, basándose en el crecimiento de las plantas (Mamatha y Kavitha, 2023). Por otro lado, el Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) permite a los productores monitorear y controlar sus cultivos en tiempo real desde dispositivos móviles (Sadek y col., 2024).

Algoritmos de control PID (Proporcional-

Integral-Derivativo) ajustan la dosificación de nutrientes, mientras que técnicas de visión artificial detectan estrés hídrico o plagas mediante aprendizaje profundo. En ensayos con lechuga NFT permitió predecir concentraciones foliares de N, P y K con coeficientes de determinación de 0.60–0.88 y activar ajustes automáticos de la solución nutritiva. Estas herramientas incrementaron la eficiencia en el uso de nutrientes en torno al 10–15 %, facilitando la gestión de granjas urbanas con mínima mano de obra (Pandey y col., 2023). Mediante aprendizaje profundo, Jiang y col., (2024) clasificaron deficiencias de N, P y Fe en lechuga hidropónica con F1-scores de 0.93–0.98. Es importante mencionar que el F1-score es un indicador global (escala 0–1) que combina aciertos y errores de un detector; valores cercanos a 1 significan que hay muy pocos falsos positivos y falsos negativos. La integración de estos modelos con controladores de dosificación permitió reducir el consumo total de fertilizante en  $\approx 12\%$ .

Para plagas, modelos basados en visión artificial (Technology Readiness Level, TRL 7) detectaron larvas de *Tuta absoluta* en tomate hidropónico con F1-score 0.94, lo que permitió la aplicación localizada de agentes biológicos en lugar de pesticidas de amplio

espectro (González-Carrasco y col., 2022). Estas herramientas integradas al sistema SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) minimizan pérdidas de rendimiento y disminuyen la exposición a agroquímicos.

#### 4.3 Fertilizantes ecológicos y bioestimulantes

Uno de los principales retos de la hidroponía es la formulación de soluciones nutritivas que sean eficientes y sostenibles. Actualmente, la mayoría de los fertilizantes utilizados provienen de fuentes minerales no renovables, lo que genera un impacto ambiental considerable (huella de carbono y riesgo de eutrofización). La bioingeniería está avanzando en la producción de soluciones nutritivas personalizadas, es decir, ajustadas a las necesidades específicas de cada cultivo para maximizar la eficiencia y reducir el desperdicio de recursos (de Nijs y col., 2024; Junge y col., 2025; Vollmer y col., 2025). Por ejemplo, investigaciones recientes muestran que extractos de algas marrones *Ascophyllum nodosum* mejoran el rendimiento y elevan la capacidad antioxidante del tomate hidropónico, así como la tolerancia a la deficiencia de hierro (Campobenedetto y col., 2021; Carrasco-Gil y col., 2021). Por otra parte, extractos de microalgas (*Chlorella*,

*Scenedesmus*) aplicados foliarmente han demostrado mejorar biomasa y calidad nutrimental de hortalizas en NFT, además de elevar la eficiencia en el uso de nitrógeno (Ronga y col., 2019). Estos avances confirman que la bioingeniería microbiana y el aprovechamiento de biomasa algal pueden reducir la dependencia de sales minerales convencionales en hidroponía.

#### 4.4 Integración de energías renovables y gestión energética

Uno de los principales desafíos de la hidroponía es su dependencia de la energía eléctrica para mantener el funcionamiento de bombas, sistemas de iluminación y control ambiental. Para hacerla más sustentable, se está explorando la integración de energías renovables (Dewi y col., 2025; Udovichenko y col., 2021).

El consumo eléctrico, principalmente iluminación y bombeo, representa 35–55 % de los costos operativos (Pomoni y col., 2023). Paneles solares, sistemas eólicos y biogás generado de desechos orgánicos están siendo implementados en invernaderos hidropónicos para reducir la huella de carbono y minimizar costos operativos (Zhu y col., 2022).

La instalación de módulos fotovoltaicos en techos de invernadero o granjas verticales produce hasta  $60 \text{ kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , suficiente para cubrir el 70 % de la demanda de un sistema NFT de 4 niveles (Udovichenko y col., 2021). Complementariamente, bancos de baterías LiFePO<sub>4</sub> aseguran 4–6 h de autonomía durante cortes de red (TRL 7).

### 5. Desafíos y tendencias de la hidroponía

#### 5.1 Barreras técnicas y económicas

A pesar de las ventajas descritas, la adopción masiva de la hidroponía se ve limitada por tres grandes obstáculos. En primer lugar, la inversión inicial sigue siendo elevada: la infraestructura básica para NFT o goteosustrato en invernadero oscila entre \$ 35 y 80 USD  $\text{m}^{-2}$ , cifra que representa alrededor del 45 % del costo total de producción (Pomoni y col., 2023). El segundo reto es la demanda energética: la iluminación LED y el bombeo consumen entre 1.2 y 1.8 kWh kg<sup>-1</sup> de biomasa. La solución más extendida consiste en cubrir techos y fachadas con paneles fotovoltaicos. Finalmente, el tercer obstáculo reside en la gestión de la solución nutritiva agotada: tras 4–6 ciclos de recirculación, la conductividad eléctrica suele superar 4 mS cm<sup>-1</sup> debido a la acumulación de Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>, lo

que obliga a descartar entre 30 y 40 % del volumen total (Kumar y Cho, 2014). Las estrategias actuales son recircular una fracción diluida con agua de ósmosis inversa, aplicar membranas selectivas para retirar sodio, o precipitar nutrientes valiosos.

## 5.2 Impactos ambientales y economía circular

Los análisis de ciclo de vida (ACV) muestran que la huella de carbono de un kilogramo de lechuga NFT puede oscilar entre 1.8 y 4.2 kg CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup>, dominada por la electricidad del mix regional (combinación porcentual de fuentes de generación como carbón, gas, hidro, nuclear, eólica, solar, etc, que alimentan la red pública de un territorio concreto) (Graamans y col., 2021). Sin embargo, la integración fotovoltaica “in situ” y el uso de fertilizantes orgánicos reducen esa huella hasta en 45 %. Además, la recuperación de nutrientes (N, P) mediante precipitación de estruvita permite reutilizar 25–40 % del fertilizante externo en sistemas acuapónicos desacoplados (TRL 5) (Aslanidou y col., 2023). Estudios de caso en Europa cuantifican la huella de carbono de la lechuga en granjas verticales modulares “on-site” entre 0.78–1.18 kg CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> en

Estocolmo (Martin y col., 2024), y ≈1.0–1.3 kg CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> en contextos comerciales; por ejemplo, 1.24 kg CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> en una granja contenedor para cafetería en Suecia (Martin y col., 2024b), con valores en torno a ~1.0 kg CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> reportados para explotación comercial a gran escala (Arcasi y col., 2024). Los principales “hotspots” coinciden: electricidad para iluminación/HVAC, y en segundo plano empaque e infraestructura. La mejora del mix eléctrico reduce sustancialmente el impacto; en granjas tipo contenedor aeropónico la huella climática baja hasta ~80 % cuando se opera con electricidad renovable, volviendo el sistema competitivo con cadenas convencionales (Schmidt Rivera y col., 2022). Además, ACV comparativos muestran que la acuaponía puede presentar menor impacto global que la hidroponía cuando se valoriza el coproducto (pescado) y se optimiza el reciclaje de nutrientes (Chen y col., 2020). En conjunto, la literatura converge en que el desempeño ambiental depende sobre todo de la intensidad de carbono del mix eléctrico, la eficiencia lumínica y el tratamiento/recirculación de nutrientes, y recomienda armonizar supuestos y límites de sistema para mejorar la comparabilidad entre estudios (Villagrán y col., 2023).

### 5.3 Aspectos regulatorios e inocuidad alimentaria

La rápida expansión de la hidroponía ha puesto en primer plano frentes regulatorios:

#### Etiquetado orgánico

En algunos países los cultivos sin suelo no pueden comercializarse como orgánicos; en otros sí se permite, siempre que el productor demuestre un balance de nutrientes cerrado y el uso exclusivo de insumos libres de pesticidas.

Por tanto, la falta de criterios homogéneos dificulta el reconocimiento de sellos “eco-friendly” y crea barreras comerciales para los exportadores de productos hidropónicos.

#### Inocuidad microbiológica

Aunque el cultivo se realiza sin suelo, los brotes de *Listeria monocytogenes* y *Salmonella Javiana* asociados a lechuga NFT demuestran que los puntos críticos son la recirculación de agua y el biofilm en tuberías. Las medidas más efectivas reportadas son desinfección UV-C en línea, filtración absoluta y limpieza “in situ” (CIP, por sus

siglas en inglés) con peróxido de hidrógeno o ácido peracético (Lara-Perez y col., 2024).

En este mismo apartado, la recirculación continuada favorece la acumulación de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$  que pueden rebasar los límites permitidos, por lo que el precipitado selectivo de estruvita o la ósmosis inversa a baja presión son las estrategias más usadas para cumplir la normativa.

### 5.4 Tendencias emergentes: de las megaciudades al espacio

En paralelo a su consolidación como tecnología agrícola urbana, la hidroponía evoluciona sobre cinco ejes disruptivos que redefinirán su alcance en la próxima década.

Primero, la digitalización se dirige hacia la creación de gemelos digitales: modelos virtuales que integran datos de sensores IoT con simulaciones de dinámica de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) y algoritmos de aprendizaje automático (TRL 6). Estos entornos predicen en tiempo real la distribución de luz, la dinámica de nutrientes y los microclimas, permitiendo ajustes automáticos (Reyes Yanes y col., 2022).

En segundo lugar, el cultivo multi-especie cobra fuerza como estrategia de

sostenibilidad. Rotaciones controladas, por ejemplo, lechuga-fresa o albahaca-tomate, equilibran la extracción iónica, reducen la descarga salina y diversifican la oferta comercial de cada módulo. Ensayos piloto muestran disminuciones de hasta 25 % en purgas de solución nutritiva, manteniendo la productividad global (Pomoni y col., 2023).

El tercer frente es la edición génica dirigida que se emplean para desarrollar variedades de tomate y lechuga con sistemas radiculares compactos y mayor absorción de nitrato, capaces de prosperar a conductividades eléctricas sin pérdida de biomasa (Rouphael y col., 2017).

En cuarto lugar, emergen las finanzas verdes, es decir, fondos de inversión sostenible comienzan a emitir bonos temáticos y líneas de crédito bonificadas para granjas verticales alimentadas con fotovoltaica. Al demostrar reducciones certificadas de CO<sub>2</sub>, dichas instalaciones pueden generar créditos de carbono que se reintegran como flujo financiero adicional, acelerando el retorno de inversión inicial.

Finalmente, la exploración espacial impulsa avances que retroalimentan la hidroponía terrestre. Programas de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio

(NASA, por sus siglas en inglés) y las Agencias Aeroespaciales Europea y Japonesa (ESA y JAXA, respectivamente) han demostrado en la Estación Espacial Internacional el cultivo hidropónico de lechuga, trigo y rábanos bajo microgravedad, mientras la granja antártica EDEN-ISS produjo 268 kg de hortalizas en 9 m<sup>2</sup> simulando condiciones marcianas (TRL 6) (Zabel y col., 2020). Proyectos recientes combinan hidro- y aeroponía en circuitos de reciclaje total de agua y nutrientes para futuros hábitats lunares y marcianos (Ryu y col., 2025; Maity y Saxena, 2024). El Proyecto Luna Verde es una iniciativa de investigación multidisciplinar española que explora la viabilidad de cultivar plantas más allá de la Tierra (Green Moon Project).

La Figura 3 muestra la Cámara de Producción de Biomasa del Centro Espacial Kennedy, banco de pruebas donde se valida la iluminación, la desinfección y la automatización que luego adopta la industria hidropónica urbana.





**Figura 3.** Cámara de Producción de Biomasa del Centro Espacial Kennedy. Fuente: (NASA SPINOFF).

En conjunto, estos cinco vectores, digitalización, diversificación de cultivos, mejoramiento genético, innovación financiera y proyección extraterrestre, configuran un panorama en el que la hidroponía dejará de ser un nicho tecnológico para convertirse en pilar de la seguridad alimentaria, tanto en las megaciudades como más allá de la Tierra.

## 6. Conclusiones

La evidencia científica revisada confirma que la hidroponía puede ahorrar entre 85 % y 95 % de agua, duplicar o triplicar el rendimiento por unidad de superficie y reducir de forma significativa el uso de plaguicidas frente a los cultivos en suelo. Estos beneficios se deben al control preciso de la solución nutritiva, la

recirculación cerrada y la posibilidad de operar en ambientes totalmente gestionados, desde invernaderos periurbanos hasta granjas verticales en centros urbanos.

No obstante, la adopción generalizada del sistema exige superar tres barreras clave: la inversión inicial elevada, la dependencia energética de la iluminación LED y el bombeo y la gestión sostenible de la solución agotada, que puede concentrar sales y metales tras varios ciclos de recirculación. Las tendencias emergentes presentadas apuntan a mitigar estos retos y a consolidar modelos de economía circular con baja huella de carbono. La hidroponía espacial y de la granja EDEN-ISS en la Antártida demuestran que la tecnología es capaz de suministrar alimentos frescos en entornos extremos, utilizando volúmenes mínimos de agua y un control ambiental hermético.

En conjunto, la hidroponía se perfila como un pilar de la seguridad alimentaria global, capaz de abastecer a megaciudades, reducir la presión sobre suelos fértilles y, a medio plazo, sostener misiones de exploración fuera de la Tierra. Para consolidar su despegue, será indispensable armonizar la normativa internacional, promover incentivos fiscales y energéticos, e impulsar líneas de I+D que integren inteligencia artificial, fuentes

renovables y valorización de efluentes. Con estas acciones coordinadas, la hidroponía puede trascender su condición de nicho tecnológico y convertirse en una herramienta clave para la sostenibilidad agrícola del siglo XXI.

La pregunta final sigue abierta: ¿será la hidroponía la clave para la agricultura del futuro?

## Referencias bibliográficas

Ahmadi, F., Samadi, A., Sepehr, E., Rahimi, A., & Shabala, S. (2021). Perlite particle size and NO<sub>3</sub>-/NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ratio affect growth and chemical composition of purple coneflower (*Echinacea purpurea* L.) in hydroponics. *Industrial Crops and Products*, 162, 113285. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113285>

Alipio, M. I., Dela Cruz, A. E. M., Doria, J. D. A., & Fruto, R. M. S. (2019). On the design of Nutrient Film Technique hydroponics farm for smart agriculture. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(3), 315–324.

<https://doi.org/10.1016/j.eaef.2019.02.008>

Amoozgar, A., Mohammadi, A., Sabzalian, M.R. (2017). Impact of light-emitting diode

irradiation on photosynthesis, phytochemical composition and mineral element content of lettuce cv. *Grizzly*. *Photosynthetica* 55(1): 85-95. <https://doi.10.1007/s11099-016-0216-8>

Arcasi, A., Mauro, A.W., Napoli, G., Tariello, F., Vanoli, G.P. (2024). Energy and cost analysis for a crop production in a vertical farm. *Applied Thermal Engineering*, 239, 122129. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122129>

Aslanidou, M., Elvanidi, A., Mourantian, A., Levizou, E., Mente, E., Katsoulas, E. (2023). Nutrients Use Efficiency in Coupled and Decoupled Aquaponic Systems. *Horticulturae*, 9(10), 1077. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9101077>

Barbosa, G. L., Gadelha, F. D. A., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G., Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879-6891. <http://doi.10.3390/ijerph120606879>

Bosman, R. C., van Rooyen, I. L., Brancken, J., Brink, H. G., & Nicol, W. (2024). Simultaneous pH and EC control in hydroponics through real-time manipulation of the ammonium-to-nitrate ratio in the nutrient solution. *Scientia Horticulturae*, 332, 113185.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113185>

Campobenedetto, C., Agliassa, C., Mannino, G., Vigliante, I., Contartese, V., Secchi, F., Berte, C. M. (2021). A biostimulant based on seaweed (*Ascophyllum nodosum* and *Laminaria digitata*) and yeast extracts mitigates water stress effects on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Agriculture*, 11(6), 557.

<https://doi.org/10.3390/agriculture11060557>

Carrasco-Gil, S., Allende-Montalbán, R., Hernández-Apaolaza, L., Lucena, J. J. (2021). Application of seaweed organic components increases tolerance to Fe deficiency in tomato plants. *Agronomy*, 11(3), 507.

<https://doi.org/10.3390/agronomy11030507>

Cheng, P., Zhu, G., Kim, H.J., Brown, P.B., Huang, J.H. (2020). Comparative life cycle assessment of aquaponics and hydroponics in the Midwestern United States. *Journal of*

*Cleaner Production*, 275, 122888.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122888>

de Nijs, E. A., Bol, R., Zuurbier, R., & Tietema, A. (2024). From waste to fertilizer: The impact of rose-waste compost on commercial cut rose cultivation in Kenya.

*Cleaner Waste Systems*, 10, 100208.  
<https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100208>

Dewi, T., Risma, P., Oktarina, Y., Dwijayanti, S., Mardiyati, E. N., Sianipar, A. B., Hibrizi, D. R., Azhar, M. S., & Linarti, D. (2025). Smart integrated aquaponics system: Hybrid solar-hydro energy with deep learning forecasting for optimized energy management in aquaculture and hydroponics. *Energy for Sustainable Development*, 85, 101683.

<https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101683>

DSouza, G. C., Dodangeh, F., Venkata, G. B., Ray, M. B., Prakash, A., & Xu, C. (2025). A comprehensive review of biobased polyurethane and phenol formaldehyde hydrophilic foams for environmental remediation, floral, and hydroponics applications. *Biomass and Bioenergy*, 192, 107493.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107493>

Du, M., Xiao, Z., & Luo, Y. (2022). Advances and emerging trends in cultivation substrates for growing sprouts and microgreens toward safe and sustainable agriculture. *Current Opinion in Food Science*, 46, 100863.  
<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100863>

Erekath, S., Seidlitz, H., Schreiner, M., & Dreyer, C. (2024). Food for future: Exploring cutting-edge technology and practices in vertical farm. *Sustainable Cities and Society*, 106, 105357.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105357>

Fathidarehnijeh, E., Nadeem, M., Cheema, M., Thomas R., Krishnapillai, M., Galagedara, L. (2003). Current perspective on nutrient solution management strategies to improve the nutrient and water use efficiency in hydroponic systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 104, 88-102.  
<https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0034>

Fernandes, P., Batalha, L., Santos, T., Cardoso, P. (2024). Evaluation of hydroponic systems for organic lettuce production in controlled environment. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1401089.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1401089>

González-Carrasco, E., Ruiz, L., Barrios, P. (2022). Deep-learning-based detection of

*Tuta absoluta* larvae in hydroponic tomato using RGB imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 199, 107138.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107138>

Graamans, L., Visser, P., Kuhn, E., van den Dobbelsteen, A. (2021). Environmental impacts of vertical farming: Life cycle assessment and energy analysis of a pilot-scale facility. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127507.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127507>

Green Moon Project. A team. A project. A reality. Consultado en abril 2025.  
<https://www.greenmoonproject.com/>

Jiang, Y., Tan, Y., Ji, F., Su, D., Wang, S., Zhang, L., Zhou, Q. (2024). CFIHL: a variety of chlorophyll-a fluorescence transient image datasets of hydroponic lettuce. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1414324.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1414324>

Junge, R., Schmautz, Z., & Milliken, S. (2025). Toward nutrient cycling from organic waste streams for soilless cultivation. *Current Opinion in Food Science*, 61, 101257.  
<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101257>

Kannan, M., Elavarasan, G., Balamurugan, A., Dhanusuya, B., & Freedon, D. (2022).

Hydroponic farming – A state of art for the future agriculture. *Materials Today: Proceedings*, 68, 2163–2166.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.416>

Kumar, R. R., Cho, J. Y. (2014). Reuse of hydroponic waste solution. *Environmental Science and Pollution Research* 21(16): 9569-9577. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3024-3>.

Lara-Perez, S., Basilio-Ferro, R., Correa, B., Casarin, R., Quatrini-Correa, T., Blanco, K., Bagnato, V. (2024). Enhanced vegetable production in hydroponic systems using decontamination of closed circulating fluid. *Scientific Reports*, 14, 602.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-50974-9>

Li, T., Wang, X., Zhu, Z., Gaju, O., Shi, Y., & Chang, Y. (2025). Effect of coconut waste and its biochar as hydroponics substrates on system performance and nitrogen transformation in aquaponics. *Aquacultural Engineering*, 109, 102512.

<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2025.102512>

Luo, S.P., Zou, J., Shi, M., Lin, S., Wang, D., Liu, W., Shen, Y., Ding, X., Jiang, Y. (2024). Effects of red–blue light spectrum on growth, yield, and photosynthetic efficiency of lettuce in a uniformly illumination environment.

*Plant, Soil and Environment* 70: 305-316.

<https://doi.org/10.17221/480/2023-PSE>

Maatjie, M. A., Maboko, M. M., Modise, D. M. (2018). Yield of hydroponically grown tomato (*Solanum lycopersicum*) as affected by different particle sizes of sawdust. *South African Journal of Plant and Soil* 35(5), 385-387.

<https://doi.org/10.1080/02571862.2018.1424357>

Maity, T., & Saxena, A. (2024). Challenges and innovations in food and water availability for a sustainable Mars colonization. *Life Sciences in Space Research*, 42, 27–36.

<https://doi.org/10.1016/j.lssr.2024.03.008>

Mamatha, V., & Kavitha, J. C. (2023). Machine learning based crop growth management in greenhouse environment using hydroponics farming techniques. *Measurement: Sensors*, 25, 100665.

<https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100665>

Martin M., Bustamante, M.J., Zauli, I., Orsini, F. (2024) Environmental life cycle assessment of an on-site modular cabinet vertical farm. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8:1403580.

<https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1403580>

Martin, M., Soy, A.S., Carotti, L., Orsini, F. (2024b). Environmental life cycle assessment of lettuce production in a container-based vertical farm. *European Journal of Horticultural Science*, 89(5).  
<https://doi.org/10.17660/eJHS.2024/021>

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

Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1–11.  
<https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>

Medina-García, A., Otazu, V., Caballero, B. (2021). Performance of basil and potato minitubers under aeroponic and NFT systems in a controlled environment. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 734589.  
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.734589>

Morella, P. Lambán, M. P., Royo, J., Sánchez, J. C. (2023). Vertical Farming Monitoring: How Does It Work and How Much Does It Cost? *Sensors*, 23(7), 3502.  
<https://doi.org/10.3390/s23073502>

NASA SPINOFF. NASA Technology Transfer Program. Consultado en *abril 2025*.  
<https://spinoff.nasa.gov/indoor-farming>

Pal, P., & Anantharaman, H. (2022). CO<sub>2</sub> nanobubbles utility for enhanced plant growth and productivity: Recent advances in agriculture. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 61, 102008.

<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102008>

Pandey, P., Veazie, P., Whipker, B., Young, S. (2023). Predicting foliar nutrient concentrations and nutrient deficiencies of hydroponic lettuce using hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*, 230, 258-269.

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.05.005>

Pantanella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E., Marcucci, A. (2012). Aquaponics vs. hydroponics: Production and quality of lettuce crop. *Acta Horticulturae*, 927, 887-893.

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.109>

Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., Vasiliadis, L. (2023). A Review of Hydroponics and Conventional Agriculture Based on Energy and Water Consumption, Environmental Impact, and Land Use.

*Energies*, 16(4), 1690.  
<https://doi.org/10.3390/en16041690>

Rajaseger, G., Chan, KL., Yee-Tan, K., Ramasamy, S., Khin, MC., Amaladoss, A., Kadamb-Haribhai P. (2023). Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*, 30, 19(9).  
<https://doi.org/10.6026/97320630019925>

Rajendran, S., Domalachenpa, T., Arora, H., Li, P., Sharma, A., & Rajauria, G. (2024). Hydroponics: Exploring innovative sustainable technologies and applications across crop production, with Emphasis on potato mini-tuber cultivation. *Helixon*, 10(5), e26823.

<https://doi.org/10.1016/j.helixon.2024.e26823>

Ravani, M., Chatzigeorgiou, I., Monokrousos, N., Giantsis, I., Ntinas, G., (2024). Life cycle assessment of a high-tech vertical decoupled aquaponic system for sustainable greenhouse production. *Frontiers in Sustainability*, 5, 1422200.  
<https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1422200>

Reyes Yanes, A., Abbasi, R., Martínez, P., Ahmad, R. (2022). Digital Twinning of Hydroponic Grow Beds in Intelligent Aquaponic Systems. *Sensors*, 22(19), 7393.  
<https://doi.org/10.3390/s22197393>

Ronga, D., Biazzi, E., Parati, K., Caradonia, F., Setti, L., Colla, G., Rouphael, Y. (2019). Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. *Agronomy*, 9(4), 192.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy9040192>

Rouphael, Y., Colla, G., Bernardo, L., Kane, D., Cardarelli, M., Lucini, L. (2017). Biostimulant action of protein hydrolysates: unravelling their effects on plant physiology and stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 8: 2202.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02202>

Ryu, J. H., Baek, J., & Subah, Z. (2025). A low-cost autonomous and scalable hydroponics system for space farming. *HardwareX*, 21, e00625.  
<https://doi.org/10.1016/j.ohx.2025.e00625>

Sadek, N., kamal, N., & Shehata, D. (2024). Internet of Things based smart automated indoor hydroponics and aeroponics greenhouse in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102341.  
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102341>

Savvas, D., Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in greenhouse horticulture—A review. *European Journal of Horticultural Science* 83(5): 280-293.  
<https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>

Schmidt Rivera, X., Rodgers, B., Odanye, T., Jalil-Vega, F., & Farmer, J. (2023). The role of aeroponic container farms in sustainable food systems – The environmental credentials. *Science of The Total Environment*, 860, 160420.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160420>

Sharma, A., Hazarika, M., Heisnam, P., Pandey, H., Devadas, V. S., & Wangsu, M. (2024). Controlled Environment Ecosystem: A plant growth system to combat climate change through soilless culture. *Crop Design*, 3(1), 100044.

<https://doi.org/10.1016/j.cropd.2023.100044>

Sonneveld, C., Voogt, W. (2009). *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer.

Stanghellini, C., Katzin, C. (2024). The dark side of lighting: A critical analysis of vertical farms' environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 458, 142359.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142359>

Udovichenko, A., Fleck, B. A., Weis, T., & Zhong, L. (2021). Framework for design and optimization of a retrofitted light industrial space with a renewable energy-assisted hydroponics facility in a rural northern Canadian community. *Journal of Building*

*Engineering*, 37, 102160.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102160>

Villagrán, E., Romero-Perdomo, F., Numa-Vergel, S., Galindo-Pacheco, J. R., & Salinas-Velandia, D. A. (2024). Life Cycle Assessment in Protected Agriculture: Where Are We Now, and Where Should We Go Next? *Horticulturae*, 10(1), 15.

<https://doi.org/10.3390/horticulturae10010015>

Vollmer, A., Schmidt, U., Ulrichs, C., & Dannehl, D. (2025). Closing the loop: Utilization of composted tomato plant residues as fertilizer and soil amendment. *Scientia Horticulturae*, 342, 114028.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114028>

Wang, S., Meng, X., Tang, Z., Wu, Y., Xiao, X., Zhang G., Hu L., Liu, Z., Lyu, J., Yu, J. (2022). Red and Blue LED Light Supplementation in the Morning Pre-activates the Photosynthetic System of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Leaves and Promotes Plant Growth. *Agronomy*, 12(4): 897.

<https://doi.org/10.3390/agronomy12040897>

Yep, B., & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges – A review. *Journal of*

Cleaner Production, 228, 1586–1599.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290>

Zabel, P., Zeidler, C., Vrakking, V., Dorn, M., Schubert, D. (2020). Biomass Production of the EDEN ISS Space Greenhouse in Antarctica During the 2018 Experiment Phase. *Frontiers in Plant Science*, 11, 656.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00656>

Zhu, Z., Yoge, U., Goddek, S., Yang, F., Keesman, K. J., & Gross, A. (2022). Carbon dynamics and energy recovery in a novel

near-zero waste aquaponics system with onsite anaerobic treatment. *Science of The Total Environment*, 833, 155245.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155245>

