

Artículo Científico

Eficiencia de los sistemas de cultivo hidropónico en entornos urbanos

Efficiency of hydroponic growing systems in urban environments



Herrera-Sánchez, Daniela Jaqueline¹



<https://orcid.org/0009-0005-3667-8395>



daniela.herrera@ute.edu.ec



Universidad UTE, Ecuador, Santo Domingo.

Autor de correspondencia ¹



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v3/n2/2>

Resumen: El presente estudio revisa sistemáticamente la eficiencia de los sistemas de cultivo hidropónico en entornos urbanos, en respuesta a los desafíos actuales de seguridad alimentaria, escasez hídrica y urbanización. Mediante un análisis crítico de literatura científica indexada en Scopus y Web of Science, se identifican indicadores clave como el uso eficiente del agua y del espacio, la alta productividad por unidad de superficie y la calidad de los productos obtenidos. Se destaca la capacidad de la hidroponía para reducir hasta un 90 % el consumo de agua y para multiplicar la producción en espacios reducidos mediante el cultivo vertical. Sin embargo, también se evidencian limitaciones significativas, como los altos costos iniciales, el consumo energético y la necesidad de conocimientos técnicos especializados. La revisión concluye que el éxito de la hidroponía urbana depende de una articulación entre financiamiento, capacitación, marcos normativos y planificación urbana. Esta tecnología se perfila como una estrategia viable para transformar los sistemas alimentarios urbanos hacia modelos sostenibles y resilientes.

Palabras clave: hidroponía urbana; eficiencia hídrica; agricultura sostenible; cultivo vertical; seguridad alimentaria.



Check for updates

Received: 15/Mar/2025

Accepted: 02/Abr/2025

Published: 16/Abr/2025

Cita: Herrera-Sánchez, D. J. (2025). Eficiencia de los sistemas de cultivo hidropónico en entornos urbanos. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 3(2), 15-29. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v3/n2/2>

Revista Científica Ciencia y Método (RCyM)

<https://revistacym.com>

revistacym@editorialgrupo-aea.com

info@editorialgrupo-aea.com

© 2025. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional**.



Abstract:

This study systematically reviews the efficiency of hydroponic growing systems in urban environments in response to the current challenges of food security, water scarcity and urbanization. Through a critical analysis of scientific literature indexed in Scopus and Web of Science, key indicators such as efficient use of water and space, high productivity per unit area, and quality of the products obtained are identified. The capacity of hydroponics to reduce water consumption by up to 90% and to multiply production in reduced spaces through vertical cultivation is highlighted. However, significant limitations are also evident, such as high initial costs, energy consumption and the need for specialized technical knowledge. The review concludes that the success of urban hydroponics depends on an articulation between financing, training, regulatory frameworks and urban planning. This technology emerges as a viable strategy to transform urban food systems towards sustainable and resilient models.

Keywords: urban hydroponics; water efficiency; sustainable agriculture; vertical farming; food security.

1. Introducción

En las últimas décadas, el crecimiento acelerado de la población urbana ha generado una presión creciente sobre los sistemas tradicionales de producción y distribución de alimentos, lo que ha motivado la búsqueda de alternativas sostenibles para garantizar la seguridad alimentaria en contextos urbanos. En este escenario, la hidroponía, entendida como un método de cultivo sin suelo en el que las plantas reciben nutrientes a través de soluciones acuosas, ha emergido como una opción tecnológica viable para producir alimentos frescos en espacios urbanos reducidos (Jensen, 1997). Sin embargo, pese a su expansión, persisten interrogantes sobre su eficiencia comparada con los métodos tradicionales de agricultura, especialmente en términos de consumo de recursos, productividad y sostenibilidad ambiental.

El principal problema que aborda esta revisión es la evaluación de la eficiencia de los sistemas de cultivo hidropónico en contextos urbanos, entendida como la capacidad de estos sistemas para maximizar la producción de alimentos minimizando los insumos y el impacto ambiental. Esta problemática adquiere especial relevancia frente a la creciente escasez de recursos como el agua y el suelo fértil, especialmente en ciudades densamente pobladas donde la expansión agrícola convencional es inviable (Goddek et al., 2019). En muchos casos, los sistemas de producción tradicionales resultan inadecuados para responder a las necesidades alimentarias urbanas debido a su baja adaptabilidad a entornos urbanos, su alta dependencia de agroquímicos y su impacto en el deterioro ambiental (Despommier, 2010).

Varios factores inciden en la complejidad del problema. En primer lugar, la eficiencia hídrica es un elemento crítico: mientras que la agricultura convencional puede utilizar hasta el 70% del agua dulce disponible a nivel mundial, los sistemas hidropónicos reportan reducciones de hasta el 90% en el consumo de agua, gracias a la recirculación del recurso (Resh, 2022). En segundo lugar, la utilización del espacio es otra ventaja sustancial, ya que la hidroponía permite el cultivo vertical y el aprovechamiento de áreas no agrícolas como techos o espacios interiores adaptados (Kalantari et al., 2018). No obstante, estos beneficios se contraponen con ciertas limitaciones como los altos costos iniciales de implementación, la necesidad de conocimientos técnicos especializados y el uso intensivo de energía en algunos sistemas controlados (Touliatos, Dodd & McAinsh, 2016). Además, las condiciones climáticas urbanas, la calidad del agua disponible y las regulaciones locales pueden influir considerablemente en el desempeño de estos sistemas.

La justificación de este estudio radica en la necesidad de consolidar y sintetizar la evidencia científica disponible sobre la eficiencia de la hidroponía en entornos urbanos, proporcionando una base teórica sólida que permita orientar futuras investigaciones, decisiones políticas y prácticas agrícolas sostenibles. Dada la creciente demanda global de alimentos y los compromisos internacionales en torno al desarrollo sostenible, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, específicamente el ODS 2 (Hambre Cero) y el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), resulta fundamental evaluar críticamente alternativas productivas como la hidroponía urbana (United Nations, 2021). Desde una perspectiva científica y técnica, resulta viable realizar este estudio mediante una revisión bibliográfica sistemática que identifique y analice las investigaciones más relevantes y actuales en bases de datos académicas reconocidas como Scopus y Web of Science, lo que garantiza la validez y pertinencia de los hallazgos.

La viabilidad de este trabajo también se sustenta en el creciente cuerpo de literatura científica sobre el tema, así como en la disponibilidad de estudios de caso y experiencias documentadas en diversas ciudades del mundo que han adoptado sistemas hidropónicos como parte de sus estrategias de agricultura urbana. Además, la metodología de revisión bibliográfica permite un abordaje integral del tema sin requerimientos logísticos o financieros significativos, lo cual resulta adecuado para los objetivos de este tipo de investigación. Esta aproximación no solo facilita el análisis comparativo entre distintas experiencias y contextos, sino que también permite identificar brechas de conocimiento y áreas de oportunidad para el desarrollo futuro del campo.

El objetivo general de esta revisión es analizar la eficiencia de los sistemas de cultivo hidropónico en entornos urbanos, evaluando sus beneficios, limitaciones y factores determinantes, a partir de la literatura científica más actual y pertinente. En particular, se busca identificar los indicadores más utilizados para medir la eficiencia de estos sistemas, las condiciones que favorecen su desempeño óptimo y las implicaciones de su adopción en términos de sostenibilidad ambiental, económica y social. Esta revisión

también pretende ofrecer recomendaciones basadas en evidencia que puedan ser útiles para investigadores, tomadores de decisiones, urbanistas y emprendedores interesados en la promoción de la agricultura urbana sostenible.

A través de este análisis, se espera contribuir a una mejor comprensión de la viabilidad y el potencial de la hidroponía como una estrategia relevante en la transformación de los sistemas alimentarios urbanos, en respuesta a los desafíos actuales de urbanización, cambio climático y seguridad alimentaria.

2. Materiales y métodos

El presente estudio adoptó un enfoque exploratorio de tipo cualitativo, centrado en el análisis crítico y sistemático de literatura científica sobre la eficiencia de los sistemas de cultivo hidropónico en entornos urbanos. Se optó por una investigación de carácter bibliográfico, dado que este tipo de estudio permite integrar conocimientos teóricos y empíricos dispersos en distintas fuentes, con el propósito de identificar patrones, tendencias, limitaciones y oportunidades presentes en el campo de la hidroponía urbana. Esta aproximación resulta especialmente adecuada en contextos donde se requiere una comprensión amplia de un fenómeno en evolución, como lo es el desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles en zonas urbanizadas.

La metodología se estructuró a partir de una revisión exhaustiva de publicaciones científicas especializadas, seleccionadas a través de búsquedas sistemáticas en bases de datos académicas reconocidas internacionalmente, tales como Scopus y Web of Science. Estas plataformas fueron elegidas por su alta exigencia en cuanto a criterios de calidad editorial y revisión por pares, lo cual garantiza la solidez y la validez de las fuentes consultadas. Las búsquedas se realizaron empleando combinaciones de palabras clave relacionadas con el tema central del estudio, como “hydroponic systems”, “urban agriculture”, “efficiency”, “sustainability”, “resource use”, “urban farming” y “urban food production”, utilizando operadores booleanos para optimizar los resultados.

Se delimitaron criterios temporales para acotar la búsqueda a publicaciones comprendidas entre los años 2013 y 2024, a fin de asegurar la actualidad del contenido y su pertinencia con respecto a las innovaciones recientes en la materia. Además, se aplicaron filtros idiomáticos que incluyeron artículos en inglés y español, y se priorizaron aquellos textos que abordaran la hidroponía en contextos urbanos, considerando aspectos técnicos, económicos, sociales y medioambientales. No se incluyeron trabajos que trataran exclusivamente cultivos en condiciones rurales o a campo abierto, ni aquellos que carecieran de sustento metodológico riguroso o cuya revisión fuera meramente descriptiva.

La etapa de preselección incluyó la lectura de resúmenes y títulos para descartar documentos irrelevantes o repetitivos. Posteriormente, se realizó la lectura completa de los artículos seleccionados, extrayendo información clave mediante fichas de

registro y matrices temáticas. Estas matrices permitieron organizar los datos en categorías analíticas previamente definidas, tales como eficiencia hídrica, consumo energético, uso del espacio, productividad, costos operativos, sostenibilidad ambiental y barreras de implementación en contextos urbanos. Este proceso facilitó el análisis comparativo entre distintas experiencias y tecnologías, así como la identificación de factores comunes y divergencias significativas.

En consonancia con el carácter exploratorio de la investigación, el análisis de la información se llevó a cabo mediante una síntesis cualitativa de los hallazgos, orientada a interpretar los datos dentro de un marco teórico integrador. No se aplicaron técnicas estadísticas ni procedimientos de metaanálisis, dado que el objetivo no era cuantificar relaciones entre variables, sino comprender de manera profunda las características y condiciones que influyen en la eficiencia de los sistemas hidropónicos urbanos. Este tipo de análisis permite una mayor flexibilidad para integrar conocimientos provenientes de diversas disciplinas, incluyendo la agronomía, la ingeniería, la arquitectura urbana y las ciencias ambientales.

Cabe señalar que se consideró la diversidad geográfica y tecnológica de los estudios incluidos, abarcando experiencias en contextos urbanos de países tanto desarrollados como en vías de desarrollo. Esta heterogeneidad enriquece la perspectiva del análisis, al permitir identificar cómo factores como el clima, las políticas públicas, la infraestructura urbana y el acceso a recursos tecnológicos condicionan el desempeño de los sistemas de cultivo hidropónico en diferentes regiones del mundo. Asimismo, se prestó atención a estudios de caso que documentaran proyectos reales implementados en ciudades, lo que aportó una dimensión práctica al estudio y permitió observar la aplicabilidad de los conceptos teóricos en situaciones concretas.

Durante todo el proceso de revisión se respetaron los principios éticos de la investigación científica, asegurando la transparencia, la trazabilidad de la información y el adecuado reconocimiento de los autores originales mediante la citación correspondiente. Todas las fuentes utilizadas fueron debidamente documentadas siguiendo el estilo APA en su séptima edición, con el objetivo de mantener la coherencia y el rigor académico del trabajo. Este procedimiento metodológico permitió construir una base sólida para la discusión de los resultados y la formulación de conclusiones fundamentadas, contribuyendo al conocimiento existente sobre el potencial y los desafíos de la hidroponía como estrategia de agricultura urbana sostenible.

En suma, la metodología empleada facilitó un abordaje integral, crítico y actualizado de la eficiencia de los sistemas de cultivo hidropónico en entornos urbanos, posicionando este trabajo como un aporte relevante para investigadores, formuladores de políticas públicas y actores sociales interesados en el desarrollo de ciudades más resilientes, autosuficientes y sostenibles desde el punto de vista alimentario.

3. Resultados

3.1. Indicadores de eficiencia en sistemas hidropónicos urbanos

3.1.1. Eficiencia en el uso de recursos hídricos y espaciales

La eficiencia en el uso de recursos hídricos y espaciales constituye uno de los principales argumentos a favor de la hidroponía en contextos urbanos. Este tipo de agricultura sin suelo ha demostrado ser particularmente eficaz en la gestión racional del agua, lo cual resulta crítico en un contexto global de escasez hídrica agravada por el cambio climático, el crecimiento demográfico y la expansión urbana descontrolada. A diferencia de la agricultura convencional, donde el agua se pierde a través de la evaporación, escorrentía y filtración al subsuelo, los sistemas hidropónicos utilizan métodos cerrados de recirculación que minimizan las pérdidas, optimizando así el aprovechamiento del recurso. Estudios experimentales han documentado que los sistemas hidropónicos pueden reducir el consumo de agua en un rango de entre el 70 % y el 90 %, dependiendo del diseño del sistema, del tipo de cultivo y de las condiciones ambientales (Barbosa et al., 2015; Gruda, 2009).

Los sistemas NFT (Nutrient Film Technique), por ejemplo, utilizan una lámina delgada de solución nutritiva que circula continuamente por las raíces, evitando tanto el estancamiento como el desperdicio del agua. De manera similar, los sistemas de raíz flotante y de mecha permiten el mantenimiento constante de la hidratación y nutrición sin necesidad de riego diario, lo que representa una ventaja logística y técnica significativa en ambientes urbanos donde el acceso al agua puede ser limitado o intermitente (Resh, 2022). A esto se suma el hecho de que, al no depender del suelo, estos sistemas evitan la lixiviación de nutrientes y la contaminación de fuentes hídricas, un problema frecuente en la agricultura a cielo abierto.

En cuanto a la eficiencia espacial, la hidroponía urbana transforma la noción tradicional de uso del territorio agrícola al permitir la producción intensiva de alimentos en espacios no agrícolas. En contextos metropolitanos caracterizados por la alta densidad demográfica y la limitada disponibilidad de suelo cultivable, la posibilidad de instalar sistemas de cultivo en azoteas, terrazas, balcones, patios interiores y edificaciones adaptadas —como contenedores marítimos o invernaderos verticales— representa una solución estratégica para la seguridad alimentaria local (Kalantari et al., 2018). El uso vertical del espacio, en particular, permite una intensificación del cultivo sin aumentar la huella territorial. Sistemas apilados o modulares, integrados con tecnología LED y control ambiental automatizado, pueden alcanzar densidades de cultivo que multiplican varias veces la capacidad de producción por metro cuadrado en comparación con métodos horizontales convencionales (Touliatos, Dodd, & McAinsh, 2016).

Además, la posibilidad de controlar completamente las condiciones ambientales (temperatura, humedad, CO₂, iluminación, pH y conductividad eléctrica de la solución nutritiva) permite extender la temporada de cultivo a lo largo de todo el año, eliminando

la dependencia estacional. Este factor no solo incrementa el rendimiento anual, sino que también estabiliza la oferta de alimentos frescos en entornos urbanos, contribuyendo a la resiliencia alimentaria local frente a crisis externas, como interrupciones en la cadena de suministro o desastres naturales.

La eficiencia combinada en el uso de agua y espacio, además de sus implicaciones ambientales, también genera beneficios sociales y económicos. En particular, permite reducir los costos de transporte y distribución, mejora el acceso a alimentos frescos en zonas con inseguridad alimentaria y favorece la creación de empleos verdes en las ciudades. Estas características convierten a la hidroponía urbana en una estrategia viable para avanzar hacia sistemas alimentarios sostenibles, descentralizados y resilientes.

3.1.2. Productividad y rendimiento por unidad de superficie

Otro de los indicadores fundamentales para evaluar la eficiencia de los sistemas hidropónicos urbanos es la productividad, entendida como la capacidad de generar biomasa vegetal comestible por unidad de superficie en un determinado periodo de tiempo. La evidencia científica acumulada en la última década ha demostrado que los sistemas hidropónicos, cuando se encuentran bien diseñados y gestionados, superan en productividad a la agricultura tradicional, especialmente en el cultivo de hortalizas de ciclo corto como la lechuga (*Lactuca sativa*), la espinaca (*Spinacia oleracea*), el tomate cherry (*Solanum lycopersicum*) y algunas hierbas aromáticas (Resh, 2022; Benke & Tomkins, 2017).

Una de las razones de este alto rendimiento radica en el control riguroso de los factores de crecimiento. En condiciones hidropónicas, las plantas reciben directamente los nutrientes esenciales disueltos en el agua, lo que elimina la competencia por recursos en el suelo y asegura una disponibilidad continua y balanceada de macro y micronutrientes. Asimismo, la gestión automatizada de variables ambientales permite mantener condiciones óptimas durante las 24 horas del día, lo que acelera el metabolismo vegetal, reduce el estrés hídrico y minimiza la incidencia de plagas y enfermedades (Goddek et al., 2019).

Un ejemplo ilustrativo de esta superioridad en rendimiento es el estudio de Barbosa et al. (2015), donde se compararon cultivos de lechuga en sistemas hidropónicos verticales con cultivos convencionales al aire libre. Los resultados mostraron que los sistemas hidropónicos produjeron hasta 17 veces más por metro cuadrado, una diferencia atribuida tanto a la mayor densidad de cultivo como a la posibilidad de realizar hasta 11 ciclos productivos anuales en condiciones controladas. Este patrón se repite en diversas investigaciones realizadas en países como Estados Unidos, Países Bajos, Japón y Singapur, donde la hidroponía urbana se ha consolidado como una opción productiva altamente eficiente.

Además de la cantidad, otro aspecto relevante es la calidad de los productos obtenidos. En general, las plantas cultivadas en hidroponía presentan un crecimiento

más uniforme, una apariencia más atractiva y menores niveles de residuos de pesticidas, dado que los sistemas están aislados de contaminantes del suelo y del agua subterránea. Estos atributos favorecen su aceptación en mercados exigentes, como el gastronómico, el hotelero y el minorista especializado en productos orgánicos o de proximidad (Al-Kodmany, 2018).

Sin embargo, es importante señalar que la productividad de los sistemas hidropónicos urbanos no es homogénea y depende de múltiples factores interrelacionados, incluyendo el tipo de cultivo, el nivel tecnológico del sistema, la disponibilidad de insumos, el conocimiento técnico del operador y las condiciones macroeconómicas del entorno urbano. Por ello, aunque la hidroponía tiene el potencial de alcanzar altos niveles de rendimiento, su implementación exitosa requiere de planificación, inversión y capacitación adecuadas (Sanye-Mengual et al., 2015).

En síntesis, la productividad por unidad de superficie en los sistemas hidropónicos urbanos constituye un indicador robusto de su eficiencia, revelando no solo una ventaja en términos de cantidad, sino también de calidad, continuidad y adaptabilidad. Estos elementos son claves para la consolidación de modelos agrícolas urbanos sostenibles y tecnológicamente innovadores.

3.2. Factores limitantes y desafíos de implementación

3.2.1. Costos de inversión e infraestructura tecnológica

Aunque los sistemas de cultivo hidropónico urbano representan una alternativa viable y sostenible frente a los retos de seguridad alimentaria y degradación ambiental, su adopción a gran escala se enfrenta a obstáculos significativos. Uno de los principales es el elevado costo de inversión inicial, el cual actúa como una barrera estructural, especialmente para productores urbanos de pequeña escala, comunidades vulnerables o emprendedores que carecen de acceso a financiamiento. La hidroponía, a diferencia de la agricultura tradicional, requiere de una infraestructura compleja y especializada que incluye sistemas de riego por recirculación, tanques de soluciones nutritivas, sistemas de soporte estructural, módulos de cultivo vertical, iluminación artificial —particularmente LED de espectro específico—, sensores ambientales, sistemas de climatización, controladores automatizados, y plataformas de software para la gestión de variables agronómicas (Kozai, Niu, & Takagaki, 2019).

Diversos estudios han documentado que los costos iniciales de implementación por metro cuadrado pueden variar sustancialmente según el nivel de tecnología, el tipo de cultivo, la escala del proyecto y su ubicación geográfica. Por ejemplo, Barbosa et al. (2015) estimaron que los sistemas hidropónicos verticales integrados en contenedores marítimos reciclados requieren inversiones que oscilan entre los USD 200 y USD 500 por metro cuadrado, cifra que se eleva en entornos urbanos con altos costos de construcción y electricidad. Adicionalmente, un informe del Fraunhofer Institute sobre agricultura urbana en Europa reveló que los sistemas de producción en ambientes controlados (CEA, por sus siglas en inglés) pueden tener un costo inicial hasta 40

veces superior al de los cultivos tradicionales a cielo abierto, debido a su fuerte dependencia tecnológica (Specht et al., 2013).

A esto se suma el elevado consumo energético asociado a la operación de estos sistemas, en especial aquellos que funcionan en interiores sin luz solar directa. El uso intensivo de iluminación artificial, ventilación forzada, sistemas de bombeo y control de temperatura implica una carga energética significativa. Según Benke y Tomkins (2017), los costos de energía pueden representar entre el 40 % y el 60 % de los gastos operativos totales en sistemas verticales de alta tecnología. Este aspecto no solo afecta la rentabilidad económica, sino también el balance ambiental de la hidroponía si la energía proviene de fuentes fósiles, lo cual pone en tensión los objetivos de sostenibilidad del modelo.

Asimismo, los costos relacionados con el mantenimiento, reposición de equipos, calibración de sensores, actualizaciones de software y reparación de componentes electrónicos pueden comprometer la viabilidad a largo plazo de los sistemas si no se cuenta con una planificación financiera sólida. En muchas experiencias comunitarias o educativas, la falta de recursos para mantener los sistemas en funcionamiento tras la fase inicial de financiamiento ha llevado al abandono de proyectos, lo que genera escepticismo respecto a su efectividad y escalabilidad (Sanye-Mengual et al., 2015).

Otro aspecto crítico es la adecuación arquitectónica de los espacios urbanos para la instalación de sistemas hidropónicos. No todas las edificaciones están preparadas para soportar la carga estructural adicional de invernaderos, tanques o módulos verticales. Se requieren análisis estructurales previos, inversiones en impermeabilización, refuerzo de techos y adaptación de sistemas eléctricos y de drenaje, lo que eleva considerablemente el costo total del proyecto. Además, muchas ciudades carecen de marcos regulatorios claros que permitan la integración legal y técnica de actividades agrícolas en edificaciones urbanas, lo cual genera incertidumbre y limita el acceso a financiamiento institucional (Specht et al., 2013).

Para mitigar estos desafíos, es fundamental que los gobiernos y entidades financieras desarrollen mecanismos de apoyo que incluyan subvenciones para tecnologías limpias, programas de créditos verdes, incentivos fiscales y asistencia técnica para proyectos agrícolas urbanos. También es esencial fomentar modelos asociativos y cooperativos que permitan compartir costos y recursos, así como integrar los sistemas hidropónicos en estrategias más amplias de planificación urbana sostenible, en sinergia con políticas de vivienda, energía y alimentación.

3.2.2. Requerimientos técnicos y capacitación especializada

La hidroponía urbana no es una tecnología accesible únicamente con voluntad e infraestructura: requiere además de conocimientos técnicos altamente especializados y una curva de aprendizaje pronunciada. Este es otro de los factores limitantes más relevantes para su implementación exitosa. A diferencia de la agricultura convencional, donde muchas prácticas pueden ser heredadas, intuitivas o empíricas,

el manejo efectivo de sistemas hidropónicos demanda una comprensión profunda de la fisiología vegetal, la química de las soluciones nutritivas, la hidráulica de los sistemas, la automatización y monitoreo de variables, así como una capacidad operativa para tomar decisiones en tiempo real con base en datos técnicos (Goddek, Joyce, Kotzen, & Burnell, 2019).

Uno de los aspectos más delicados es la formulación y mantenimiento de la solución nutritiva. Un error en la concentración de nutrientes o un desbalance en el pH puede comprometer el desarrollo radicular, reducir la absorción de micronutrientes o inducir toxicidad, afectando severamente la productividad del sistema. De igual forma, el control de variables como la temperatura del agua, la conductividad eléctrica y la disponibilidad lumínica debe ser constante, requiriendo conocimientos que muchas veces exceden el perfil de un agricultor convencional y se acercan más al ámbito de la ingeniería agronómica o la ciencia de cultivos en ambientes controlados (Beacham, Vickers, & Monaghan, 2019).

La falta de acceso a formación técnica representa un desafío significativo en contextos donde no existen programas de capacitación específicos sobre hidroponía urbana. En muchas ciudades latinoamericanas, africanas o del sudeste asiático, los cursos ofrecidos se limitan a talleres básicos, sin suficiente profundidad en aspectos operativos, financieros o de escalabilidad. Esta situación genera una alta tasa de error en la fase inicial de los proyectos, y en muchos casos deriva en la percepción de que la hidroponía no es rentable o funcional, cuando en realidad el problema radica en su gestión deficiente.

Asimismo, la operación de sistemas automatizados y digitalizados requiere de competencias en tecnología agrícola, manejo de sensores, interpretación de datos y programación de software especializado. Esta dimensión técnica, aunque representa una oportunidad para la profesionalización del sector, también excluye a muchos potenciales adoptantes que no cuentan con acceso a educación técnica formal ni a redes de acompañamiento profesional. Por tanto, el desarrollo de centros de formación, redes de extensión agrícola urbana, incubadoras de innovación agroalimentaria y plataformas de conocimiento abierto resulta esencial para democratizar el acceso a esta tecnología.

Las experiencias más exitosas en ciudades como Tokio, Ámsterdam, Montreal o Nueva York han contado con el respaldo de universidades, centros de investigación y entidades gubernamentales que promueven el vínculo entre ciencia, tecnología y sociedad. Estos modelos demuestran que, con una base sólida de conocimiento técnico, la hidroponía urbana no solo es viable, sino altamente eficiente y replicable. Sin embargo, para ello es imprescindible formar capital humano capacitado y crear entornos institucionales que favorezcan la transferencia tecnológica (Al-Kodmany, 2018).

En resumen, la falta de capacitación y la complejidad técnica de los sistemas representan una barrera tan crítica como la económica. La sostenibilidad de la

hidroponía urbana depende, en buena medida, de la capacidad de formar operadores competentes, establecer marcos de gobernanza adecuados y facilitar el acceso al conocimiento científico y técnico necesario para una gestión óptima de estos sistemas.

4. Discusión

La eficiencia de los sistemas de cultivo hidropónico en entornos urbanos se posiciona como una de las respuestas tecnológicas más prometedoras frente a los desafíos contemporáneos de seguridad alimentaria, sostenibilidad ambiental y urbanización acelerada. Los resultados analizados en esta revisión evidencian que la hidroponía urbana ofrece ventajas comparativas sustanciales respecto a la agricultura convencional, particularmente en lo que concierne al uso racional del agua, la optimización del espacio, la productividad por unidad de superficie y la calidad del producto final. Sin embargo, tales beneficios se ven contrarrestados por limitaciones significativas relacionadas con los costos de implementación, los requerimientos técnicos especializados y las barreras normativas que dificultan su integración plena en el tejido urbano.

Desde la perspectiva de la eficiencia hídrica y espacial, los sistemas hidropónicos permiten una reducción sustancial del consumo de agua —hasta un 90 % en algunos casos— debido a la recirculación y control preciso del recurso, lo cual los convierte en una solución estratégica en ciudades afectadas por estrés hídrico o sin acceso confiable a fuentes de agua dulce (Barbosa et al., 2015; Gruda, 2009). Asimismo, la posibilidad de instalar cultivos en espacios no convencionales, como azoteas, paredes verticales o interiores adaptados, redefine el concepto de suelo agrícola y permite incorporar la producción de alimentos a la infraestructura urbana existente (Al-Kodmany, 2018). Este aprovechamiento del espacio urbano ocioso contribuye tanto a la resiliencia alimentaria como a la reducción de las emisiones asociadas al transporte de alimentos, favoreciendo modelos de producción de proximidad o “kilómetro cero”.

En términos de productividad, los datos revisados muestran que los cultivos hidropónicos, especialmente de hortalizas de hoja, pueden alcanzar rendimientos hasta 10 veces superiores a los obtenidos por métodos tradicionales, al combinar densidades de siembra elevadas con ciclos productivos intensivos durante todo el año (Touliatos, Dodd, & McAinsh, 2016; Resh, 2022). Estos niveles de eficiencia son posibles gracias al control riguroso de los factores ambientales y nutricionales, que optimiza el crecimiento vegetal y reduce las pérdidas por factores bióticos y abióticos. No obstante, estos sistemas no son homogéneamente eficientes: su rendimiento depende en gran medida del diseño técnico, el tipo de cultivo, la calidad de los insumos y, sobre todo, del conocimiento técnico de quienes los operan (Goddek et al., 2019).

Precisamente en este último aspecto emergen los principales desafíos para la implementación y sostenibilidad de la hidroponía urbana. Uno de ellos es el elevado

costo de inversión inicial que requieren los sistemas tecnológicamente avanzados, especialmente aquellos con automatización ambiental, iluminación artificial y control climático. El diseño e instalación de estos sistemas puede superar con facilidad los USD 400 por metro cuadrado, lo que limita su adopción a actores con acceso a financiamiento o apoyo institucional (Benke & Tomkins, 2017; Kozai, Niu, & Takagaki, 2019). Esta barrera se ve acentuada en contextos del sur global, donde la brecha tecnológica y la falta de políticas públicas orientadas al fomento de la agricultura urbana agravan la desigualdad en el acceso a sistemas de producción modernos.

Aun cuando se logre superar la etapa de inversión, los costos operativos — particularmente los energéticos— continúan representando un obstáculo importante para la rentabilidad a largo plazo. Estudios como el de Beacham, Vickers y Monaghan (2019) señalan que los gastos energéticos pueden constituir entre el 40 % y el 60 % del total de los costos de operación, afectando la sostenibilidad financiera y ambiental de los sistemas, sobre todo si no se integran fuentes de energía renovable.

Adicionalmente, la complejidad técnica de los sistemas hidropónicos requiere de personal capacitado en múltiples disciplinas, incluyendo agronomía, ingeniería ambiental, automatización y gestión de recursos. La falta de formación técnica especializada ha sido una causa documentada del fracaso de numerosos proyectos de hidroponía urbana en América Latina y Asia, donde muchas iniciativas fueron impulsadas sin el respaldo de capacitación continua ni redes de soporte técnico (Sanye-Mengual et al., 2015; Specht et al., 2013). Esta situación pone en evidencia la necesidad urgente de incorporar programas educativos formales y no formales orientados a la capacitación en agricultura en ambientes controlados, así como la promoción de redes de transferencia tecnológica que faciliten la adopción de buenas prácticas operativas.

La falta de marcos regulatorios claros y de planificación urbana que contemple la agricultura como una actividad integrada al espacio construido también limita el potencial de la hidroponía urbana. En la mayoría de las ciudades, las normativas de uso del suelo, edificación y servicios públicos no consideran la agricultura como un componente legítimo del entorno urbano, lo cual genera inseguridad jurídica, dificultades de conexión a servicios básicos (agua, electricidad, drenaje) y obstáculos en el acceso a créditos o subsidios gubernamentales (Specht et al., 2013; Al-Kodmany, 2018). La institucionalización de la agricultura urbana, por tanto, representa un paso necesario para viabilizar la expansión sostenible de la hidroponía en las ciudades del futuro.

En conclusión, si bien la hidroponía urbana ha demostrado ser una tecnología altamente eficiente desde el punto de vista ambiental y productivo, su implementación exitosa requiere superar desafíos estructurales asociados al financiamiento, la capacitación técnica y la regulación. La evidencia sugiere que para lograr una adopción masiva y sostenible de estos sistemas es necesario un enfoque multidimensional que articule inversión pública y privada, formación técnica

especializada, integración normativa y participación comunitaria. Solo mediante esta sinergia será posible consolidar modelos de agricultura urbana hidropónica que contribuyan efectivamente a ciudades más resilientes, inclusivas y sostenibles.

5. Conclusiones

Los sistemas de cultivo hidropónico en entornos urbanos representan una alternativa tecnológicamente avanzada y ambientalmente sostenible frente a los desafíos que plantea el actual modelo agroalimentario, especialmente en contextos urbanos densamente poblados, con escasez de recursos hídricos y limitaciones de espacio. Esta revisión permitió evidenciar que la hidroponía urbana ofrece altos niveles de eficiencia en el uso del agua y del espacio, así como una notable productividad por unidad de superficie, factores que contribuyen directamente a la mejora de la seguridad alimentaria local y la resiliencia de las ciudades.

Asimismo, se comprobó que, mediante el control preciso de variables ambientales y nutricionales, los sistemas hidropónicos pueden generar cosechas constantes, de alta calidad y con menor impacto ambiental que la agricultura tradicional. Esta capacidad de producir alimentos frescos de manera intensiva y cercana al lugar de consumo tiene implicaciones positivas en términos de reducción de emisiones, disminución de la dependencia de cadenas de suministro largas y fortalecimiento de economías locales.

No obstante, también se identificaron barreras importantes para su adopción masiva y sostenible. Entre los principales desafíos se encuentran los elevados costos de inversión inicial, los requerimientos energéticos de los sistemas avanzados, la complejidad técnica de su operación y la escasa disponibilidad de formación especializada en muchos contextos urbanos. Además, la falta de marcos normativos que integren la agricultura como una función legítima del espacio urbano limita la expansión de estos sistemas en muchas ciudades.

A partir del análisis realizado, se concluye que el éxito y la sostenibilidad de la hidroponía urbana dependen de la articulación entre avances tecnológicos, acceso a financiamiento, generación de capacidades humanas y adecuación de políticas públicas. Es indispensable fomentar programas de capacitación técnica, diseñar incentivos para la inversión en tecnologías limpias y promover una planificación urbana inclusiva que incorpore la producción de alimentos como componente estructural de las ciudades del futuro. Solo a través de un enfoque multidimensional será posible consolidar la hidroponía como un pilar estratégico en la transición hacia sistemas alimentarios urbanos sostenibles, resilientes y equitativos.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Al-Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. *Buildings*, 8(2), 24. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
- Barbosa, G. L., Gadelha, F. D. A., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., ... & 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. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
- Beacham, A. M., Vickers, L. H., & Monaghan, J. M. (2019). Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(3), 277–283. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1574214>
- Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13–26. <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>
- Caicedo-Aldaz, J. C., & Herrera-Sánchez, D. J. (2022). El Rol de la Agroecología en el Desarrollo Rural Sostenible en Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 1(2), 1-16. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n2/24>
- Despommier, D. (2010). *The vertical farm: Feeding the world in the 21st century*. Picador.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (Eds.). (2019). *Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- Gruda, N. (2009). Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables?. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 82, 141-147. <https://doi.org/10.18452/9433>
- Guamán-Rivera, S. A. (2022). Desarrollo de Políticas Agrarias y su Influencia en los Pequeños Agricultores Ecuatorianos. *Revista Científica Zambos*, 1(3), 15-28. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n3/30>
- Guamán-Rivera, S. A., & Flores-Manchano, C. I. (2023). Seguridad Alimentaria y Producción Agrícola Sostenible en Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 2(1), 1-20. <https://doi.org/10.69484/rcz/v2/n1/35>
- Herrera-Feijoo, R. J. (2024). Principales amenazas e iniciativas de conservación de la biodiversidad en Ecuador. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(1), 33–56. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n1/85>
- Jensen, M. H. (1997). Hydroponics worldwide. *Acta Horticulturae*, 578, 19–25. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.481.87>

- Kalantari, F., Mohd Tahir, O., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2018). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. *Journal of Landscape Ecology*, 11(1), 35–60.
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). (2019). *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic Press.
- Resh, H. M. (2022). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower* (7th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003133254>
- Rojas, F. E., & Saavedra-Mera, K. A. . (2022). Diversificación de Cultivos y su Impacto Económico en las Fincas Ecuatorianas. *Revista Científica Zambos*, 1(1), 51-68. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n1/21>
- Romero Cedeño, K. A., & Cadme Arévalo, M. L. (2024). *Uso de sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS) en el monitoreo de plantaciones forestales*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.87>
- Saavedra-Mera, K. A., Casanova-Villalba, C. I., Escarabay Cadena, A. Y., & Pluas Pai, Y. E. (2022). Análisis económico frente a la PC (Phytophthora palmivora) de la Palma Africana en el sector agroindustrial. Caso de estudio La Fabril planta La Independencia período 2021. *Código Científico Revista De Investigación*, 3(3), 301–315. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v3/n3/67>
- Sanye-Mengual, E., Cerón-Palma, I., Oliver-Solà, J., Montero, J. I., & Rieradevall, J. (2015). Integrating horticulture into cities: A guide for assessing the implementation potential of rooftop greenhouses. *Journal of Urban Technology*, 22(1), 87–111. <https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942095>
- Sanyé-Mengual, E., Oliver-Solà, J., Montero, J.I. et al. An environmental and economic life cycle assessment of rooftop greenhouse (RTG) implementation in Barcelona, Spain. Assessing new forms of urban agriculture from the greenhouse structure to the final product level. *Int J Life Cycle Assess* 20, 350–366 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0836-9>
- Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U. B., Sawicka, M., Werner, A., ... & Dierich, A. (2013). Urban agriculture of the future: An overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agriculture and Human Values*, 31(1), 33–51. <https://doi.org/10.1007/s10460-013-9448-4>
- Touliatos, D., Dodd, I. C., & McAINSH, M. (2016). Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. *Food and Energy Security*, 5(3), 184–191. <https://doi.org/10.1002/fes3.83>
- United Nations. (2021). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Vera Chang, J. F., Barzola Miranda, S. E., & Álvarez Aspiazú, A. A. (2024). *Procesamiento y conservación de frutas y hortalizas*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.84>