

Rumbo a la acuaponía inteligente con tecnología 4.0

Jesús Josafat de León-Ramírez^{1*} y Juan Fernando García Trejo¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro campus Amazcala

* Dirección para correspondencia: leonjjrmz@gmail.com

La producción de alimentos es uno de los desafíos constantes ante el aumento de la población a nivel mundial; además, la reducción de los recursos naturales y los efectos del cambio climático incrementan la problemática. Ante esta situación, surge la necesidad de encontrar estrategias que deriven en la producción sostenible de alimentos.

La acuaponía es una práctica productiva que combina el cultivo de peces (acuicultura) con el de plantas sin suelo (hidroponía) y actualmente está siendo implementada en algunos países debido a su capacidad de aprovechamiento de los recursos naturales, sumado a su bajo impacto ambiental. No obstante, los sistemas acuapónicos aún enfrentan algunos desafíos por resolver; entre ellos se encuentran su escalabilidad y mejora en el manejo, lo que limita su adopción como una opción real hacia la seguridad alimentaria. En este sentido, las tecnologías digitales asociadas a la industria 4.0 han brindado la oportunidad de transformar el sector agropecuario, esto a través del llamado *smart farming* o agricultura inteligente, que involucra el uso de herramientas avanzadas como el Internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), la robótica y el análisis de grandes volúmenes de datos (*big data*). Estas tecnologías permiten tomar decisiones basadas en datos

recopilados en tiempo real, lo que mejora significativamente el control sobre los procesos de cultivo. En el caso de la acuaponía, la aplicación de estas herramientas podría contribuir a solventar varias de las problemáticas actuales, como el control de variables críticas del agua, la optimización en el aprovechamiento de los nutrientes y la mejora en la operatividad del sistema (Channa *et al.*, 2024).

Internet de las cosas

El Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una herramienta fundamental en la agricultura, al permitir el monitoreo continuo de variables críticas para el éxito de los cultivos. Esto se ha logrado mediante la implementación de sensores que recopilan y transmiten datos a sistemas digitales sobre variables como la humedad del suelo, la temperatura y los niveles de nutrientes en los cultivos. Estos sensores posibilitan a los productores acceder en tiempo real a la información generada y tomar decisiones sobre el manejo del cultivo. Como ejemplo, los sensores IoT en cultivos agrícolas han facilitado la optimización del riego en función de las condiciones climáticas y de la humedad del suelo, permitiendo reducir un 20 % el consumo de agua y un 15 % el uso de fertilizantes (Mohammed *et al.*, 2021).

En la actualidad, la acuicultura emplea el IoT para medir algunas variables del agua, como el oxígeno disuelto, la temperatura y el pH, lo que ha favorecido el cuidado de los peces. En el caso de la acuaponía, el monitoreo en tiempo real podría

ser aplicado en distintos puntos clave. En primer lugar, el seguimiento a posibles cambios en los niveles de pH y oxígeno disuelto, que pueden afectar negativamente tanto a los peces como a las plantas. Con esta información, los productores pueden tomar medidas correctivas antes de que produzcan daños. Además, el monitoreo continuo facilitaría el ajuste de las condiciones del sistema, por ejemplo, la concentración de compuestos como los nitratos, que en altas concentraciones son perjudiciales para los peces, pero son nutrientes esenciales para las plantas. Otra ventaja del IoT aplicado a la acuaponía es su capacidad para resguardar información a través del ciclo de cultivo, la cual, al ser analizada, permite identificar tendencias en el mismo. Esto facilitaría a los productores el manejo del sistema en función de las condiciones óptimas observadas en ciclos pasados (Yanes *et al.*, 2020).

Las aplicaciones y beneficios potenciales del uso de IoT en acuaponía incluyen:

- Monitoreo de la calidad del agua: sensores que monitorean variables como el pH, la temperatura, los niveles de compuestos nitrogenados y la presencia de nutrientes.
- Alertas: notificaciones en tiempo real que permiten la corrección de condiciones desfavorables.
- Gestión remota: los sistemas conectados a IoT permiten a los productores supervisar sus instalaciones desde cualquier lugar, lo que resulta de utilidad cuando las instalaciones se encuentran en zonas retiradas.

- Optimización de recursos: el control de las condiciones del sistema reduce el desperdicio de agua y de nutrientes.

Inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) representa un gran avance en la automatización de sistemas agropecuarios, ya que permite analizar grandes cantidades de datos y tomar decisiones basadas en patrones que, de forma manual, serían difíciles de detectar (Elbasi *et al.*, 2022). La IA utiliza algoritmos de aprendizaje automático, entre ellos métodos de clasificación y predicción como *random forest*, redes neuronales profundas (DNN) o máquinas de soporte vectorial (SVM). Estos algoritmos, al analizar datos provenientes de sensores IoT, pueden estimar rendimientos, predecir enfermedades o ajustar automáticamente el suministro de nutrientes y alimento (Elbasi *et al.*, 2022). Los algoritmos de IA también pueden analizar los datos climáticos y de suelo para ajustar los planes de siembra y riego, optimizando el rendimiento de los cultivos. Gracias al uso de IA, se ha reducido el uso de fertilizantes y pesticidas en los cultivos, lo que mejora la sostenibilidad y reduce los costos.

La inteligencia artificial ayuda en la gestión de sistemas agropecuarios mediante el análisis de datos en tiempo real y la creación de modelos predictivos. Aplicada a la acuaponía, la IA podrían ajustar automáticamente los niveles de nutrientes con base en las necesidades de las plantas en las diferentes fases de su

crecimiento, así como ajustar la alimentación de los peces en función de su tamaño. En evaluaciones piloto, la utilización de algoritmos de IA ha permitido incrementar hasta un 18 % la eficiencia en el uso de nutrientes y reducir un 10 % el desperdicio de alimento (Yanes *et al.*, 2020). Además, la IA contribuiría al ajuste de variables como el pH y el oxígeno, lo que no solo mejoraría la eficiencia y productividad del sistema, sino que también reduciría el desperdicio de recursos (Yanes *et al.*, 2020). La IA podría prever problemas tales como la aparición de enfermedades en los peces o deficiencias nutricionales en las plantas, permitiendo la intervención antes de que los problemas se agraven (Channa *et al.*, 2024). En estudios recientes, el uso de *random forest* ha mostrado una precisión superior al 80 % en la predicción de rendimientos de cultivos hidropónicos y acuapónicos, mientras que las redes neuronales han sido eficaces en la detección temprana de anomalías en la calidad del agua (Ghandar *et al.*, 2021; Channa *et al.*, 2024).

Entre las aplicaciones y beneficios potenciales del uso de IA en acuaponía, podemos mencionar los siguientes:

- Optimización de nutrientes: el balance automático de los nutrientes en los momentos requeridos evitaría el desperdicio de los mismos.
- Automatización de la alimentación de los peces: poder ajustar la cantidad y frecuencia de alimentación no solo reduce los costos de alimento, sino que también contribuye a mantener la calidad del agua de manera adecuada.

- Predicción de problemas: a partir de los historiales de cultivo, se podría anticipar problemas inherentes al desarrollo de los organismos o al desempeño del sistema.
- Reducción de costos operativos: la minimización del desperdicio de nutrientes, alimento y agua reduciría los costos operativos en cada ciclo productivo.

Big data

El análisis de *big data* ha permitido a los agricultores recopilar y analizar información de múltiples fuentes, incluyendo sensores, imágenes satelitales y datos históricos, todo ello para optimizar el uso de agua, fertilizantes y energía (Kamilaris *et al.*, 2017). En sistemas agrícolas a gran escala, el *big data* ha sido fundamental para mejorar la toma de decisiones estratégicas y aumentar la eficiencia en la producción. También ha permitido a los productores desarrollar modelos predictivos que mejoran el uso de recursos y anticipan posibles problemas. Por ejemplo, se puede identificar la correlación entre las condiciones del sistema y su rendimiento, lo que permite ajustar variables para maximizar la producción. Además, el análisis de datos históricos puede ayudar a prever cambios estacionales o fluctuaciones en el rendimiento, lo que mejora la planificación a largo plazo (Osinga *et al.*, 2022).

En primera instancia, aplicar el *big data* en los sistemas acuapónicos permitiría gestionar no solo datos de las condiciones del agua y el crecimiento de

las plantas, sino también del rendimiento de los peces, el consumo de nutrientes y otros factores que influyen en el funcionamiento del sistema. Así, el análisis de *big data* permitiría anticipar los rendimientos bajo diferentes condiciones de manejo y climáticas que también inciden en la producción (Ghandar *et al.*, 2021). Sin embargo, es importante señalar que la identificación de correlaciones no implica necesariamente causalidad directa (Osinga *et al.*, 2022).

Algunas aplicaciones y beneficios potenciales del uso de *big data* en acuaponía son:

- Elaboración de modelos predictivos: prever los rendimientos de plantas y peces en función de los datos históricos.
- Optimización de recursos: uso eficiente de agua, nutrientes e incluso energía a través del análisis de datos.
- Análisis de tendencias: identificación de patrones y comportamientos del sistema.
- Mejora en la toma de decisiones: contar con información detallada sobre el rendimiento permite una correcta planificación y mejora la sostenibilidad del sistema.

Automatización

La automatización es otra acción clave en la tecnología 4.0, ya que facilita la realización de muchas actividades que son repetitivas y exhaustivas, lo que reduce

la carga de trabajo manual y permite que los productores se centren en otras acciones inherentes al manejo del sistema (Abbasi *et al.*, 2022).

En la agricultura, la automatización ha llevado al desarrollo de equipos que son utilizados para tareas como la siembra, la cosecha y el control de plagas. En la ganadería, también se emplean equipos automatizados que, entre otras cosas, se utilizan para la alimentación del ganado y la ordeña de vacas.

Los sistemas acuapónicos requieren una gran cantidad de trabajo manual, desde la alimentación de los peces hasta la cosecha de las plantas, y la automatización podría facilitar la realización de estas actividades. Por ejemplo, con la automatización se podría alimentar a los peces en intervalos precisos y ajustar la cantidad de alimento según el tamaño, crecimiento de los peces y condiciones como la temperatura del agua. En el caso de las plantas, mediante inspecciones visuales periódicas se podría detectar problemas de crecimiento (deficiencias de nutrientes y presencia de plagas o enfermedades), así como determinar el momento adecuado de cosecha a partir del grado de madurez. Esto no solo reduciría costos, sino que también mejoraría la eficiencia operativa (Channa *et al.*, 2024).

Entre las aplicaciones y beneficios potenciales de la automatización aplicada en acuaponía podemos mencionar los siguientes:

- Alimentación de los peces: el suministro de alimento para los peces se realizaría de manera precisa y programada.
- Cosecha de plantas o frutos: recolección en el momento preciso de acuerdo a las necesidades comerciales.

- Monitoreo: equipos con cámaras y sensores permitirían dar seguimiento a la salud de las plantas y peces.
- Reducción de costos operativos: la automatización de tareas repetitivas reduce la necesidad de mano de obra e incluso la presencia de errores humanos.

Desafíos en la implementación de la tecnología 4.0 en acuaponía

Aunque las oportunidades que ofrece la tecnología 4.0 en sistemas acuapónicos son prometedoras, su adopción enfrenta una serie de desafíos importantes que pueden retrasar su implementación. Entre ellos podemos mencionar los siguientes:

1. *Costo inicial.* El costo de instalar sensores IoT, sistemas IA y *big data*, además de la automatización en sistemas acuapónicos, puede variar significativamente según la escala del sistema y el nivel de automatización deseado. No obstante, la inversión inicial puede requerir más de \$1,000,000 MN, sumado a los demás costos operativos; esta situación limita el acceso a esta tecnología a pequeños y medianos productores (Channa et al., 2024).
2. *Capacitación técnica.* Además del costo inicial, la capacitación técnica requerida para operar y mantener sistemas acuapónicos inteligentes puede ser un desafío significativo. Los sistemas que dependen de la tecnología 4.0 requieren personal capacitado para manejar, interpretar datos, realizar ajustes y mantenimiento preventivo en el equipo. En regiones rurales o países en desarrollo, donde el

acceso a la educación tecnológica es limitado, la falta de personal capacitado puede constituir una barrera importante para la adopción de estas tecnologías (Da Silveira *et al.*, 2021). La formación de operadores y técnicos calificados es un proceso que requiere tiempo y recursos, y puede generar costos adicionales para los productores.

3. *Infraestructura de redes.* Otro desafío crucial es la infraestructura necesaria para soportar la implementación de tecnologías 4.0, especialmente en términos de conectividad de redes (Da Silveira *et al.*, 2021). En áreas rurales, donde los sistemas acuapónicos podrían tener un gran impacto, a menudo carecen de redes de comunicación estables que permitan la transmisión de datos en tiempo real (Yanes *et al.*, 2020). La falta de infraestructura de telecomunicaciones puede hacer que sea casi imposible utilizar algunas de las funciones de la tecnología 4.0, como la monitorización remota y la automatización basada en datos en tiempo real.

Consideraciones éticas

Si bien la adopción de tecnologías 4.0 en sistemas acuapónicos ofrece beneficios en términos de eficiencia, sostenibilidad y productividad, también plantea cuestionamientos éticos que deben ser considerados. Uno de ellos es la desigualdad en el acceso, ya que los altos costos de implementación, la

dependencia de proveedores tecnológicos y la necesidad de contar con personal capacitado pueden ampliar la brecha entre grandes y pequeños productores.

En términos sociales, la automatización de procesos podría disminuir la demanda de mano de obra en actividades rutinarias, lo que representa un desafío en regiones donde la producción agropecuaria es una fuente importante de empleo. Finalmente, la incorporación de equipos electrónicos y sistemas digitales demanda una reflexión sobre su sostenibilidad integral, reflexión que debe considerar la huella energética de los dispositivos, la durabilidad de los equipos y la disposición final de componentes electrónicos.

En este sentido, la integración de tecnologías 4.0 en acuaponía debe acompañarse de un análisis ético que asegure que los beneficios productivos y ambientales se equilibren con principios de equidad social, justicia ambiental y autonomía de los productores.

Perspectivas

A pesar de estos desafíos, se espera que en un futuro la adopción de tecnologías 4.0 sea posible en cuanto los costos disminuyan y las tecnologías se vuelvan más accesibles. También se espera que los avances en la conectividad 5G ayuden a superar los problemas de infraestructura, lo que facilitará la implementación de sistemas acuapónicos inteligentes incluso en áreas rurales (Liu *et al.*, 2020).

Además, las iniciativas gubernamentales y los programas de subsidios en muchos

países están comenzando a apoyar la adopción de tecnologías sostenibles en la agricultura.

Es fundamental impulsar políticas públicas específicas que fomenten la adopción de tecnologías inteligentes en acuaponía. Ejemplos de ello son los subsidios dirigidos a la adquisición de sensores IoT en zonas rurales o marginadas, así como programas de capacitación técnica orientados a pequeños y medianos productores. De manera complementaria, el desarrollo y la promoción de tecnologías de bajo costo, como sensores de código abierto y plataformas digitales de libre acceso, representan una alternativa viable para reducir costos y democratizar el acceso a estas herramientas (Da Silveira *et al.*, 2021).

A medida que las tecnologías 4.0 se vuelvan más accesibles y la educación en estas herramientas se expanda, la acuaponía podría desempeñar un papel clave en el futuro de la producción sostenible de alimentos.

Referencias

Abbasi R, Martinez P and Ahmad R (2022). The digitization of agricultural industry—a systematic literature review on agriculture 4.0. *Smart Agricultural Technology* 2:100042.

Channa AA, Munir K, Hansen M and Tariq MF (2024). Optimisation of Small-Scale Aquaponics Systems Using Artificial Intelligence and the IoT: Current Status, Challenges, and Opportunities. *Encyclopedia* 4(1):313-336.

Da Silveira F, Lermen FH and Amaral FG (2021). An overview of agriculture 4.0 development: Systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages. *Computers and Electronics in Agriculture* 189:106405.

Elbasi E, Mostafa N, AlArnaout Z *et al.* (2022). Artificial intelligence technology in the agricultural sector: A systematic literature review. *IEEE Access* 11:171-202.

Ghandar A, Ahmed A, Zulfiqar S *et al.* (2021). A decision support system for urban agriculture using digital twin: A case study with aquaponics. *IEEE Access* 9:35691-35708.

Kamilaris A, Kartakoullis A and Prenafeta-Boldú FX (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 143:23-37.

Liu Y, Ma X, Shu L *et al.* (2020). From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17:4322-4334.

Mohammed M, Riad K and Alqahtani N (2021). Efficient IoT-based control for a smart subsurface irrigation system to enhance irrigation management of date palm. *Sensors* 21(12):3942.

Osinga SA, Paudel D, Mouzakitis SA and Athanasiadis IN (2022). Big data in agriculture: Between opportunity and solution. *Agricultural Systems* 195:103298.

Yanes AR, Martinez P and Ahmad R (2020). Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems. *Journal of Cleaner Production* 263:121571.