

Eficiencia hídrica en policultivos para la agricultura de pequeña escala

Zurisaddai Drouaillet-Mejía¹
Eduardo Fernández-Echeverría²
Walter Ariel Silva-Martínez³
Yoselyn Nohemí Ortega-Gijón⁴
Gregorio Fernández-Lambert⁵
Luis Enrique García-Santamaría^{5,5}

1 Maestría en Ingeniería Industrial-TecNM/ITS Misantla. Carretera a Loma del Cojolite km 1.8, Misantla, Veracruz, México. CP. 93850. (zuridrouaillet@gmail.com).

2 TecNM/ITS-Zacapoaxtla. Zacapoaxtla, Puebla, México. CP. 73680. (eduardo.fe@zacapoaxtla.tecnm.mx).

3 Universidad Autónoma del Carmen. Av. 56 núm. 4, Esquina Avenida Concordia, Colonia Benito Juárez, Ciudad del Carmen, Campeche, México. CP. 24180. (wsilva@pampano.unacar.mx).

4 Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora. Cuahtémoc, Boca de Lima, Gutiérrez Zamora, Veracruz, México. CP. 93557. (yosdra230792@gmail.com).

5 TecNM/ITS Misantla. Carretera a Loma del Cojolite km 1.8, Misantla, Veracruz, México. CP. 93850. (gfernandezl@itsm.edu.mx).

Autor para correspondencia: legarcias@itsm.edu.mx.

Resumen

La adopción de tecnologías de riego en cultivos de pequeña escala enfrenta barreras económicas que dificultan su implementación. Esta investigación desarrolló, implementó y evaluó un sistema automatizado de riego para policultivo, basado en una plataforma de código abierto. En septiembre de 2023, el sistema fue instalado en el invernadero Orquiazul[®], Veracruz, México, aplicándose a orquídeas de las especies *Phalaenopsis*, *Dendrobium* y *Vanda*. Equipado con sensores de humedad del sustrato, temperatura y humedad relativa y controlado con un Arduino-R1[®], regula automáticamente el suministro de agua según las necesidades de cada planta. Entre septiembre y diciembre de 2023, redujo el consumo de agua en un 94%, pasando de 90 L semestrales con riego manual a solo 5 L con el sistema automatizado. Además, disminuyó la supervisión semanal de 10 a 2 h y logró una tasa de supervivencia del 100%. Su diseño modular y bajo costo favorecen su adopción en comunidades rurales sin requerir conocimientos técnicos avanzados. Aunque los resultados son prometedores, se recomienda evaluar su desempeño en distintos cultivos y climas para garantizar su viabilidad económica y sostenibilidad a largo plazo, reforzando el potencial de tecnologías accesibles en la agricultura de pequeña escala.

Palabras clave:

agricultura de precisión, agricultura de traspatio, policultivos, riego automatizado, sostenibilidad agrícola.

Introducción

La agricultura mexicana enfrenta desafíos críticos en el manejo del agua. Su disponibilidad es irregular: en abundancia se desperdicia; y en escasez los agricultores dependen de la lluvia. En México, 76% del agua dulce se usa en la agricultura, perdiéndose más del 50% por ineficiencias (CONAGUA, 2023), aunado a la disminución de fuentes subterráneas de hasta un 30% en dos décadas (SIAP, 2024), comprometiendo la sustentabilidad y la seguridad alimentaria del país.

En este contexto de escasez hídrica y la imprevisibilidad climática, las prácticas agrícolas apoyadas por el internet de las cosas (IoT) e inteligencia artificial (IA), han demostrado mejorar la productividad agrícola (Qazi *et al.*, 2022), y aprovechar de mejor forma el uso del agua (Al-Hazmi *et al.*, 2023). Este desafío del uso eficiente del agua es sistemas agrícolas es hoy en día una constante en comunidades rurales (Statista, 2024).

En México, 21% de las hectáreas cultivables tiene riego tecnificado y menos del 5% de los pequeños agricultores usa herramientas digitales para la gestión hídrica (CONAGUA, 2023; FAO, 2023). La modernización del riego enfrenta barreras económicas, culturales y técnicas, limitando la sostenibilidad agrícola (Brahmanand y Singh, 2022). Para reducir esta brecha, se incluyen estrategias de financiamiento, capacitación y tecnologías accesibles, optimizando el uso del agua y fortaleciendo la resiliencia del sector.

Los pequeños agricultores combinan cultivos con ciclos de crecimiento sujetos a una deficiente gestión del agua, lo que puede reducir el rendimiento agrícola hasta un 40% (Juárez y Agudelo, 2021). Investigadores como Lu *et al.* (2022) han desarrollado sensores e internet de las cosas para optimizar el uso del agua de riego y mejorar la gestión de cultivos. Sin embargo, su alto costo excluye a pequeños productores y su diseño se enfoca principalmente en sistemas monocultivo.

A pesar de la imposibilidad y resistencia económica de los pequeños agricultores para adoptar tecnologías de gestión de cultivos (Dahane *et al.*, 2022), los sistemas de riego automatizados basados en plataformas de código abierto emergen como una alternativa económica y adaptable (Carrera *et al.*, 2021). Su flexibilidad para integrarse con redes locales y dispositivos móviles los convierte en soluciones ideales para la agricultura de pequeña escala y familiar (Lucín y Torres, 2023).

Además de la resistencia económica del pequeño productor a adoptar tecnologías de gestión de cultivos (Barnes *et al.*, 2019), su implementación requiere inversión en aprendizaje para instalación y operación, creando una brecha entre tecnología, compra y uso (Klerkx y Rose, 2020). Para reducir esta barrera, Kamienski *et al.* (2019) han desarrollado soluciones tecnológicas accesibles, simples y eficientes, permitiendo su adopción pequeños productores sin comprometer funcionalidad.

Con este propósito, la investigación que precede a este artículo tuvo el objetivo principal de diseñar, implementar y evaluar un sistema de riego policultivo automatizado (SRPA) basado en código abierto para mejorar la eficiencia hídrica en la agricultura de pequeña escala. Este artículo contribuyó al diseño de sistemas de riego que permiten el monitoreo en tiempo real de la humedad del suelo y la temperatura ambiental.

Es ideal para pequeños productores rurales, y policultivos con líneas de riego independientes, ajustadas a las necesidades de los cultivos en invernaderos, túneles y huertos de traspatio, mejorando la eficiencia en el uso del agua y reducción de su consumo. La utilidad del SRPA se evalúa en el invernadero de orquídeas Orquiazul[®], ubicado en una comunidad de México.

Materiales y métodos

Gestión tradicional y problemas en Orquiazul[®]

La investigación se estableció en el invernadero Orquiazul[®], en San Rafael, Veracruz en México (20° 10' 07.0" latitud norte, 96° 54' 48.4" longitud oeste), que cultiva orquídeas *Phalaenopsis*, *Dendrobium* y *Vanda*. Las plantas dispuestas en cinco líneas de producción con 15 ejemplares

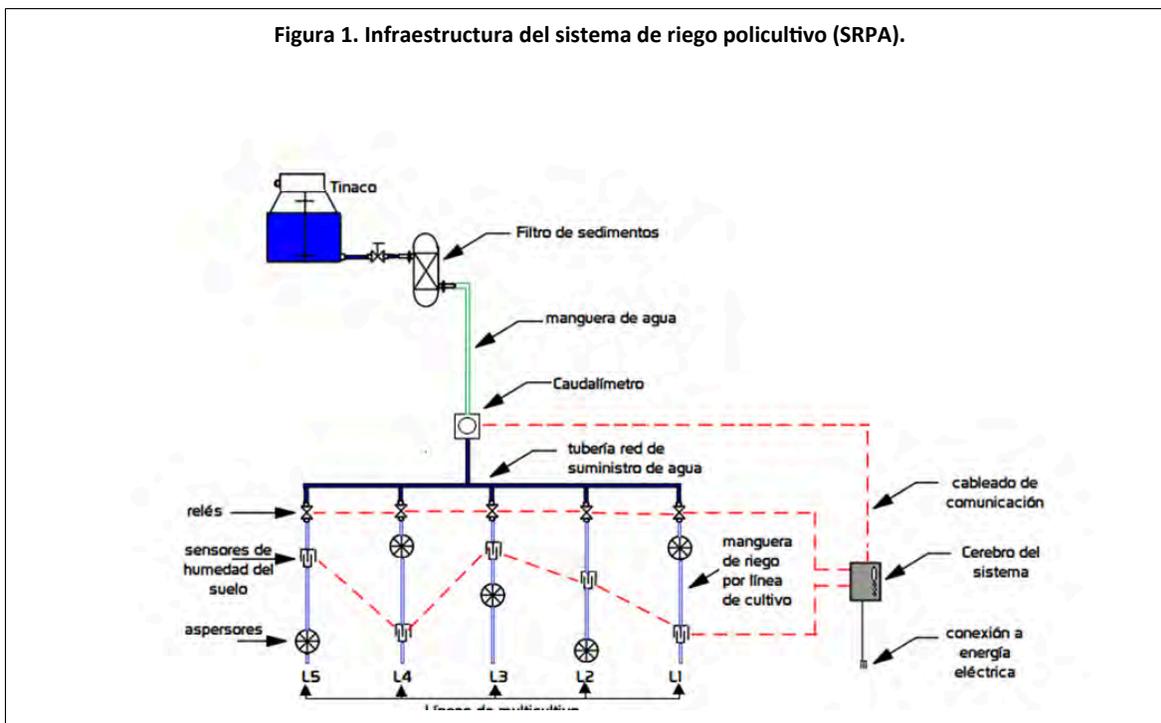
de la misma especie por línea son gestionadas por dos trabajadores bajo supervisión constante en turnos matutino y vespertino, realizan el riego, provocando problemas fúngicos y pudrición de raíces, con 13% al 20% de mortalidad por línea, afectando la viabilidad económica del invernadero. En respuesta a estas limitaciones, se implementó un sistema de riego policultivo automatizado (SRPA), diseñado para ajustar el suministro de agua con precisión según las necesidades específicas de cada especie de orquídea mediante el uso de sensores y controladores programables.

Método

El SRPA, programado en Arduino-R1[®] (Registro Indautor-México: 03-2023-071911280500-01), opera con líneas de riego independientes para cada especie de orquídea. Reduce la supervisión manual mediante alertas visuales y sonoras: una luz verde indica riego en curso, mientras que una luz roja y una alerta intermitente señalan falta de agua tras cinco minutos, con pausas de 30 s. Monitorea la humedad del sustrato y activa el riego cuando baja del umbral establecido. Además, almacena datos de temperatura, humedad relativa y del sustrato en una tarjeta SD, con opción de exportación a Excel[®] o Minitab[®].

Materiales: arquitectura del sistema de riego

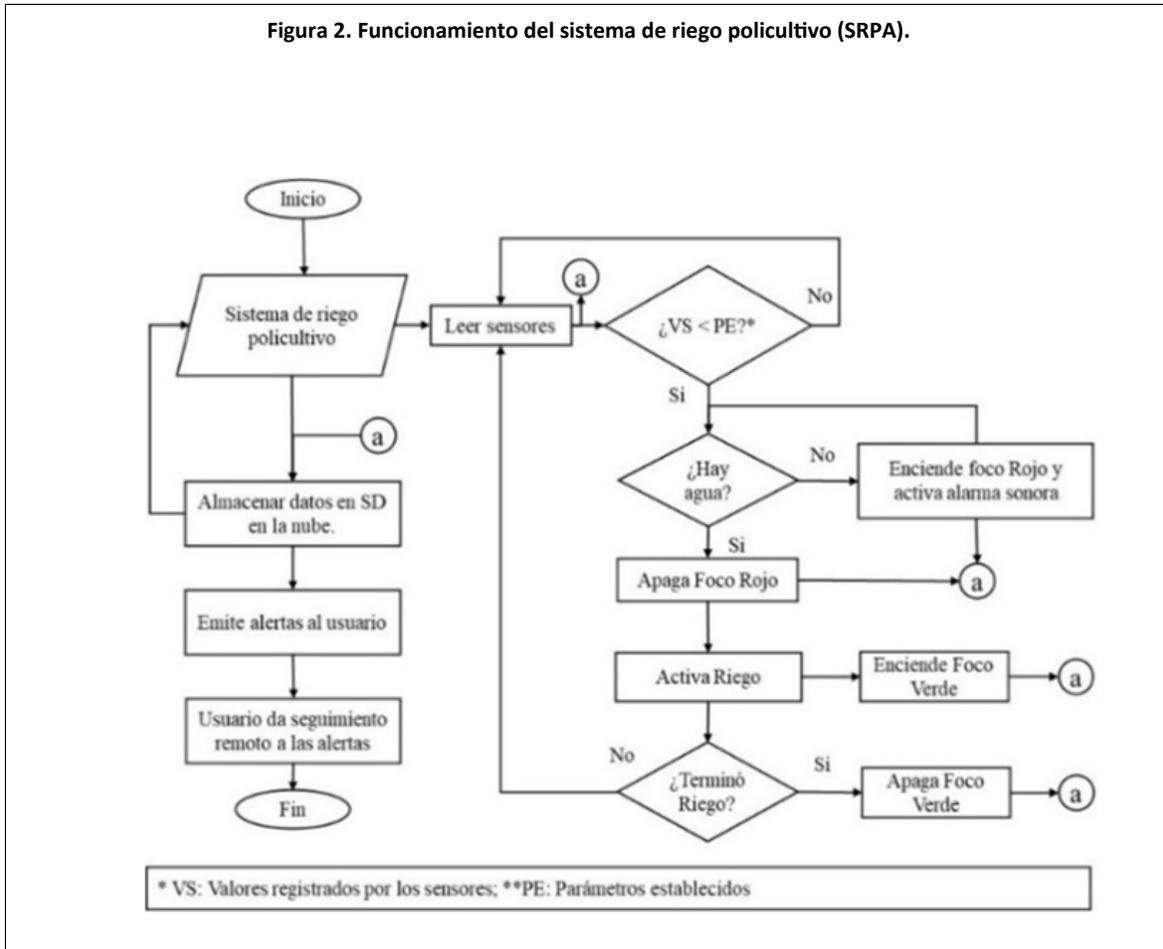
El SRPA, basado en Arduino-R1[®], utiliza sensores capacitivos anticorrosivos para medir la humedad del suelo y activa automáticamente cada línea de riego según los parámetros específicos de cada especie. Sus componentes incluyen sensores de humedad del suelo, temperatura ambiental (TA), humedad relativa (HR), caudalímetros, válvulas, alertas visuales (LED) y sonoras (buzzer), relés, un módulo Wi-Fi (ESP32) para monitoreo remoto y una tarjeta SD para almacenamiento de datos (Figura 1).



El riego se ajusta conforme a parámetros preestablecidos, optimizando el uso del agua y evitando excesos, mientras permite monitoreo en tiempo real a través de Wi-Fi con alertas visuales y sonoras, reduciendo la necesidad de supervisión presencial (Figura 2).

Antes de la instalación, los sensores de humedad se calibraron con sustratos seco y húmedo para determinar límites específicos de cada especie, y los caudalímetros se ajustaron para suministrar el flujo preciso de agua según las necesidades de las plantas. El sistema fue validado durante tres meses, demostrando su capacidad para mantener la humedad del sustrato en rangos óptimos y operar de manera autónoma, sin intervención directa del agricultor.

Figura 2. Funcionamiento del sistema de riego policultivo (SRPA).



Validación del sistema automatizado

Se calibraron los rangos óptimos de humedad por orquídea y se registraron datos horarios. Luego, se aplicó una prueba *t* de Student (Molina, 2022) y se verificó la normalidad con Shapiro-Wilk (Tapia y Ceballos, 2021). Además, inspecciones semanales registraron la supervivencia y signos de estrés. A las 16 semanas, se evaluó la humedad, estabilidad térmica y eficiencia de riego y se comparó el volumen de agua entre riego automatizado y manual. Finalmente, los datos fueron analizados en Minitab®.

Resultados

La Figura 3 muestra el sistema de riego en operación. Entre septiembre y diciembre de 2023, se registraron datos horarios de temperatura ambiental (TA), humedad relativa (HR) y humedad del sustrato (HS), analizados en Minitab® para generar gráficos del comportamiento del sistema. La Figura 4 presenta valores por la línea de producción (L1 a L5), destacando momentos de riego (R) y límites superiores (LS) e inferior (LI) para Phalaenopsis (L1, L2), Dendrobium (L3) y Vanda (L4, L5).

Figura 3. Sistema de riego en operación. Fotos originales orquíazul®.



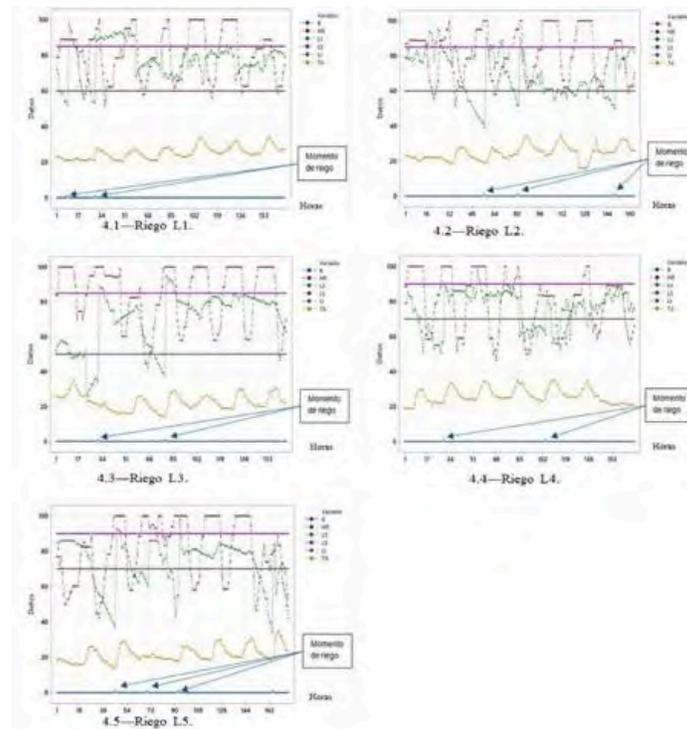
a) al fondo: sistema de control

b) línea de riego

Durante el estudio, la precipitación osciló entre 34.2 y 71.9 mm, la HR entre 42.3% y 100% y la TA entre 14 °C y 35 °C (SMN, 2023) con clima cálido húmedo, lluvias en verano y humedad relativa elevada. El suelo del invernadero es una mezcla de fibra de coco y corteza de pino, sustrato especializado para orquídeas que reduce encharcamientos y enfermedades radiculares.

El SRPA demostró activar el riego al detectar humedad baja. En las líneas 2 y 4 (Figura 4), el riego no se activó cuando la humedad del sustrato cayó por debajo del límite inferior, respetando las restricciones de horario y temperatura. Esto evitó excesos de agua y favoreció la salud de las plantas.

Figura 4. Comportamiento de las líneas de riego.



El Tabla 1 detalla los parámetros de humedad del suelo (HS), temperatura ambiental (TA) y humedad relativa (HR), logrando una supervivencia del 100% y manteniendo los niveles de HS dentro de los límites establecidos para cada orquídea.

Tabla 1. Registros de humedad y supervivencia de las plantas por cada línea de cultivo.

| Línea | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 |
|-----------------------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| HS (%) | LI | 60 | 60 | 50 | 70 | 70 |
| | LS | 85 | 85 | 85 | 90 | 90 |
| HS (%) (min, max) | | 77.61 (52, 98) | 69.43 (39, 95) | 69.7 (26, 95) | 75.75 (51, 98) | 73.16 (34, 98) |
| TA (°C) (min, máx) | | 25.21 (20, 34) | 24.63 (16, 34) | 22.62 (14, 35) | 26.22 (18, 35) | 21.72 (14, 35) |
| HA (%) (min, máx) | | 94.64 (86, 95) | 94.4 (92, 95) | 93.96 (91, 95) | 94.56 (81, 95) | 93.72 (91, 95) |
| Plantas vivas (%) | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| HS (promedio sensada) | | 77.61 | 69.43 | 69.7 | 75.75 | 73.16 |
| HS (DE) | | 6.25 | 6.25 | 8.75 | 5 | 5 |
| Estadístico t | | 3.27 | -1.964 | 1.002 | -3.4 | -5.47 |
| p | | 0.0051 | 0.06823 | 0.3305 | 0.00395 | 6.4346 |

L1= Phalaenopsis; L2= Phalaenopsis; L3= Dendrobium; L4= Vanda; L5= Vanda.

Se aplicó una prueba t para comparar la humedad sensada con el rango de operación (Tabla 1), considerando H0: la humedad media sensada no difiere del punto medio del rango y H1: existe diferencia significativa. Con 95% de confianza ($\alpha = 0.05$), los resultados mostraron que la humedad sensada no difiere en cinco líneas. Sin embargo, en L4 y L5 (Vanda) se recomienda ajustar riego, aumentar volumen o frecuencia, y monitorear temperatura.

El SRPA redujo el uso de agua en un 95% comparado con el riego manual y la supervisión semanal de 10 a 2 h (Tabla 2). Antes de su implementación en Orquiazul[®], el riego manual, realizado tres veces por semana, consumía 90 L por semestre. La cantidad de agua dependía de la percepción del agricultor, generando variaciones en la humedad, una mortalidad del 13%-20% y favoreciendo hongos y pudrición radicular.

Tabla 2. Comparación entre riego manual y automatizado por semestre.

| Registros | Método de riego | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|---------------------|
| | Manual | Manual | Manual | Manual | Automatizado |
| Semestre | 2021-2 | 2022-1 | 2022-2 | 2023-1 | 2023-2 [*] |
| Consumo de agua (litros-promedio) | 100 | 80 | 100 | 90 | 5 |
| Plantas iniciales | 35 | 30 | 30 | 40 | 75 |
| Plantas muertas | 6 | 4 | 5 | 7 | 0 |
| Tasa de mortalidad (%) | 20 | 13 | 16 | 17.5 | 0 |
| Supervisión requerida (horas/semana) | 10 | 12 | 10 | 16 | 2 |
| Aplicación de agua subjetiva | Si | Si | Si | Si | No |

* = en todos los casos se tomó el valor de n= 16, que corresponde al número de semanas en las que se validó el sistema.

La prueba de Shapiro-Wilk para Consumo de agua, tasa de mortalidad y supervisión requerida mostró ($p > 0.05$), indicando que los datos no presentan desviaciones significativas respecto a una distribución normal (Tabla 3). Por ello, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes con varianzas desiguales (prueba de Welch) para evaluar la diferencia entre los métodos de riego manual y automatizado (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación de métodos de riego.

| Método de riego | Consumo de agua (L) | Tasa de mortalidad (%) | Supervisión requerida (horas/semana) |
|-------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Promedio (manual) | 96.62 ±7.6843 | 15.91 ±1.8777 | 13.68 ±2.05 |
| Promedio (automatizado) | 4.56 ±1.1528 | 0.98 ±0.5455 | 2.05 ±0.5123 |
| Shapiro-Wilk | 0.9194 | 0.9507 | 0.8976 |
| <i>p</i> - valor | 0.1655 | 0.5015 | 0.0737 |
| Estadístico t | 47.3913 | 30.5587 | 22.8843 |
| <i>p</i> - valor | 0 | 0 | 0 |

En todos los casos se tomó el valor de n= 16, que corresponde al número de semanas en las que se validó el sistema.

La prueba t de Student muestra diferencias significativas ($p < 0.001$) entre los métodos de riego. Con el SRPA, el consumo de agua disminuyó 94% (90 a 5 L por semestre) sin afectar el desarrollo de las orquídeas. No hubo enfermedades fúngicas ni mortalidad, logrando 100% de supervivencia, frente a la mortalidad observada con riego manual.

La supervisión de riego disminuyó de 10 a 2 h, optimizando el esfuerzo laboral y redistribuyendo recursos hacia otras actividades agrícolas. Los beneficios económicos por la línea de cultivo aumentaron de 4 000 a 12 000 MXN, según la especie. El SRPA basado en Arduino-R1[®] mejora la eficiencia hídrica, la sanidad vegetal y la productividad agrícola.

Ventajas y desventajas del SRPA

El SRPA mejora el riego, evitando encharcamientos y pudrición de raíces, previniendo enfermedades y mejorando el uso de agua. Sin embargo, la inversión inicial de 19 000.00 MXN y mantenimiento anuales de 2 500.00 mxn a 3 000.00 mxn pueden ser una complicación para pequeños productores. Además, los componentes eléctricos requieren manejo cuidadoso y el agricultor debe comprender su funcionamiento para operarlo correctamente.

Implicaciones técnicas

Las implicaciones técnicas del funcionamiento del SRPA incluyen garantizar un suministro de agua continuo, realizar inspecciones periódicas de sensores, válvulas, relés y conexiones e incorporar protección eléctrica. Capacitar al personal en el funcionamiento del SRPA y preservar el sistema periódicamente, son esenciales para su buen funcionamiento.

Discusión

El SRPA mejoró la eficiencia hídrica, reduciendo el consumo en 95% y eliminando la subjetividad del riego manual, alcanzando 100% de supervivencia. El ahorro de 85 L por semestre es significativo por el volumen total de agua utilizada en la agricultura mexicana; a mayor escala, mejoraría la resiliencia hídrica de los sistemas agrícolas rurales optimizando el recurso disponible.

Esto confirma la efectividad de los sistemas automatizados en la optimización del riego y la salud de los cultivos (Brahmanand y Singh, 2022; García-Salazar *et al.*, 2023). En las líneas 4 y 5 (Vanda), se ajustó el riego, para garantizar la humedad del sustrato, mejorando la eficiencia del sistema y reduciendo la pudrición de raíces y enfermedades fúngicas mediante el SRPA.

En comparación con otros sistemas de riego automatizado, el SRPA basado en Arduino R1[®] destaca por su accesibilidad y eficiencia hídrica (Akter *et al.*, 2018). Aunque tecnologías avanzadas como IA o IoT reducen el consumo de agua entre 30% y 80% (Dahane *et al.*, 2022), sus costos y complejidad limita su adopción en comunidades rurales (Qazi *et al.*, 2022).

Aunque los sistemas comerciales son efectivos a gran escala (Al-Hazmi *et al.*, 2023), su alto costo limita su adopción por pequeños productores. Los sistemas de riego automatizado con

controladores comerciales ofrecen eficiencias similares, pero con mayores costos operativos (Brahmanand y Singh, 2022). El SRPA basado en Arduino-R1[®], de código abierto y bajo costo, es una alternativa viable para productores de contextos rurales (García-Salazar *et al.*, 2023).

Este estudio presenta limitaciones importantes. Aunque el experimento de cuatro meses mostró beneficios iniciales, no basta para evaluar el desempeño a largo plazo. Se requieren estudios prolongados en diversas condiciones climáticas. Además, los resultados, centrados en orquídeas en invernadero, no son generalizables a otras especies o configuraciones agrícolas (González-Lorence *et al.*, 2024).

Conclusiones

Los resultados demuestran que el sistema de riego policultivo automatizado (SRPA) basado en Arduino R1[®] mejora significativamente la eficiencia hídrica en la agricultura de pequeña escala. Su implementación en el invernadero Orquiazul[®] redujo el consumo de agua en un 95%, pasando de 90 a solo 5 L por semestre, y garantizó una supervivencia del 100% en las plantas de orquídeas, eliminando la mortalidad registrada con el riego manual. Además, optimizó la gestión operativa al reducir la supervisión del riego de 10 a 2 h semanales, permitiendo una redistribución eficiente del tiempo de trabajo y los recursos disponibles.

Desde una perspectiva económica, la disminución de pérdidas por mortalidad vegetal representó beneficios de entre 4 000.00 mxn y 12 000.00 mxn por la línea de cultivo, además de reducir los costos asociados al consumo de agua y supervisión manual. El SRPA se presenta como una solución accesible y rentable para pequeños agricultores, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles y eficientes. No obstante, el estudio se limitó a un período de cuatro meses, lo que impide evaluar su desempeño a largo plazo y en diversas condiciones climáticas. Se recomienda realizar estudios adicionales para validar su estabilidad operativa y analizar su impacto económico en escenarios más prolongados.

Financiación

La primera autora recibió una beca para estudios de posgrado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) con número CVU 633731. Este artículo cuenta con el registro Indautor en México (Núm. 03-2023-071911280500-01, 19 de julio de 2023) y el consentimiento de los autores para el uso de la información documentada del proceso presentado en el artículo.

Bibliografía

- 1 Akter, S.; Mahanta, P.; Mim, M. H.; Hasan, M. R.; Ahmed, R. U. and Billah, M. M. 2018. Developing a smart irrigation system using Arduino. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*. 6(1):31-39. <http://www.ijrsset.org/pdfs/v6-i1/5.pdf>.
- 2 Al-Hazmi, H. E.; Mohammadi, A.; Hejna, A.; Majtacz, J.; Esmaeili, A.; Habibzadeh, S.; Saeb, M. R.; Badawi, M.; Lima, E. C. and M#kinia, J. 2023. Wastewater treatment for reuse in agriculture: Prospects and challenges. *Environmental Research*. 236(1):1-14. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116711>.
- 3 Barnes, A. P.; Soto, I.; Eory, V.; Beck, B.; Balafoutis, A.; Sánchez, B.; Vangeyte, J.; Fountas, S.; Van W. T. and Gómez, M. B. 2019. Exploring the adoption of precision agricultural technologies: a cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy*. 80:163-174. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004>.
- 4 Brahmanand, P. S. and Singh, A. K. 2022. Precision irrigation water management-current status, scope, and challenges. *Indian J. Fertil.* 18:372-380. <https://www.researchgate.net/publication/360119350>.

- 5 Carrera, F. F.; Sánchez, H. S.; García-Orellana, Y. and Chadrina, O. 2021. A system for measuring water levels in open-air irrigation canals. *In: EPJ Web of Conferences*. 248:1-6. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124802011>.
- 6 CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. 2023. Estadísticas del agua en México 2023. Ciudad de México. <https://acortar.link/FrkxpX>. 69-84 pp.
- 7 Dahane, A.; Benameur, R. and Kechar, B. 2022. An innovative smart and sustainable low-cost irrigation system for smallholder farmers' communities. 3rd international conference on embedded & distributed systems (EDiS). 37-42 pp. Doi: 10.1109/edis57230.2022.9996498.
- 8 FAO. 2023. World Food and Agriculture. Statistical Yearbook 2023. Rome. Doi: 10.4060/cc8166en. 39-45 pp.
- 9 García-Salazar, J. A.; Bautista-Mayorga, F. y Reyes-Santiago, E. 2023. Factores que condicionan la tasa de adopción de sistemas de riego tecnificados en México. *Agronomía Mesoamericana*. 34(2). 51202-51202 pp. Doi: <https://doi.org/10.15517/am.v34i2.51202>.
- 10 González-Lorence, A.; Morales, C. M.; Castro-Bello, M.; Navarrete-Damián, J.; Ayala-Landeros, J. G. and Ramírez, M. S. G. 2024. Farms connect: real-time monitoring platform for poultry farms. *In 2024. Argentine Conference on Electronics (CAE) IEEE*. 92-98 pp. Doi: 10.1109/CAE59785.2024.10487159.
- 11 Juárez, K. R. C. and Agudelo, L. B. 2021. Towards the development of homemade urban agriculture products using the internet of things: a scalable and low-cost solution. 2nd Sustainable Cities Latin America Conference (SCLA). 1-6 pp. IEEE. Doi:10.1109/SCLA53004.2021.9540204.
- 12 Kamienski, C.; Soininen, J. P.; Taumberger, M.; Dantas, R.; Toscano, A.; Cinotti, T. S.; Maia, R. F. and Torre, A. N. 2019. Smart water management platform: iot-based precision irrigation for agriculture. *Sensor*. 19(2):1-20. <https://doi.org/10.3390/s19020276>.
- 13 Klerkx, L.; Rose, D. 2020. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: how do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*. 24:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347>.
- 14 Lu, Y.; Liu, M.; Li, C.; Liu, X.; Cao, C.; Li, X. and Kan, Z. 2022. Precision fertilization and irrigation: progress and applications. *AgriEngineering*. 4(3):626-655. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4030041>.
- 15 Lucín-Álvarez, E. J. y Torres-Lima, G. A. 2023. Diseño e implementación de una estación de monitorización de parámetros ambientales y calidad de aire aplicados al cultivo de pitahaya utilizando internet de las cosas y hardware de bajo costo. Tesis para obtener el grado de ingeniero electrónico. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador. 4-6 pp. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26381>.
- 16 Molina, M. 2022. Paso a paso. Prueba de la t de Student para muestras independientes. *Revista Electrónica AnestesiaR*. 14(8):3-5. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8704951>.
- 17 Qazi, S.; Khawaja, B. A. and Farooq, Q. U. 2022. IoT-equipped and AI-enabled next generation smart agriculture: a critical review, current challenges and future trends. *LEEE Access*. 10:21219-21235. Doi: 10.1109/access.2022.3152544.
- 18 SIAP. 2024. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. Comportamiento del PIB Agroalimentario al primer trimestre de 2024. 1-3 pp. <https://acortar.link/cmM7Gk>.
- 19 SMN. 2023. Reporte anual del clima 2023. Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua. 31-63 pp. <https://acortar.link/de2sqo>.
- 20 Statista. 2024. Valor de la producción agrícola en México de 2007 a 2023. <https://acortar.link/Cqg4f7>.
- 21 Tapia, C. E. F. y Cevallos, K. L. F. 2021. Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson-Darling, Ryan-Joiner, Shapiro-wilk y Kolmogórov-Smirnov. *Societas*. 23(2):83-106.

Eficiencia hídrica en policultivos para la agricultura de pequeña escala

| |
|--|
| Journal Information |
| Journal ID (publisher-id): remexca |
| Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas |
| Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc |
| ISSN (print): 2007-0934 |
| Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias |

| |
|---------------------------------------|
| Article/Issue Information |
| Date received: 01 June 2025 |
| Date accepted: 01 August 2025 |
| Publication date: 04 October 2025 |
| Publication date: Aug-Sep 2025 |
| Volume: 16 |
| Issue: 6 |
| Electronic Location Identifier: e3821 |
| DOI: 10.29312/remexca.v16i6.3821 |

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

agricultura de precisión
agricultura de traspatio
policultivos
riego automatizado
sostenibilidad agrícola

Counts

Figures: 4

Tables: 3

Equations: 0

References: 21

Pages: 0