

Prototipo IoT para la desinfección de frutas y hortalizas por aspersión o inmersión



Colaboración

Heriberto Domingo Santiago, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Walter Ariel Silva Martínez, Universidad Autónoma del Carmen; Eduardo Fernández Echeverría, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla; Luis Enrique García Santamaría; Gregorio Fernández Lambert, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 24 de septiembre de 2025

Fecha de aceptación: 05 de mayo de 2026

Autor de Correspondencia: Eduardo Fernández Echeverría

RESUMEN: Se diseñó y validó un prototipo soportado en el microcontrolador ESP32 como control para la desinfección de frutas y hortalizas por aspersión o inmersión en tiempo real en contextos agrícolas. La arquitectura del presente sistema de desinfección se diseñó pensando en la necesidad de pequeños productores agrícolas para disponer de tecnologías económicas y flexibles para su instalación en comunidades en ausencia de infraestructura inmueble e instalaciones rigurosamente fijas. El prototipo transmite datos vía Wi-Fi a una plataforma en línea y fue calibrado comparativamente frente a instrumentos comerciales. Se realizaron pruebas controladas utilizando papa y chayote en un entorno simulado, con condiciones de temperatura y humedad constantes, realizando un total de 15 ciclos de desinfección para validar el prototipo. Los resultados mostraron una precisión mayor al 95 % y estabilidad operativa. El sistema de desinfección de frutas y verduras es replicable y ajustable para aplicaciones rurales y ahorro del agua de desinfección.

PALABRAS CLAVE: IoT, ESP32, sensores, calidad del agua, agricultura, monitoreo remoto.

ABSTRACT: A low-cost prototype supported by the ESP32 microcontroller was designed and validated as a control system for the real-time disinfection of fruits and vegetables through spraying or immersion in agricultural settings. The architecture of this disinfection system was conceived to address the needs of small-scale farmers, providing affordable and flexible technologies that can be installed in communities lacking permanent infrastructure or fixed facilities. The prototype transmits data via Wi-Fi to an online platform and was calibrated against commercial instruments. Results demonstrated an accuracy above 95% and stable operation. The fruit and vegetable disinfection system is replicable and adaptable for rural applications, while also contributing to water savings in the disinfection process.

KEYWORDS: IoT, ESP32, sensors, water quality, agriculture, remote monitoring.

INTRODUCCIÓN

En México y en gran parte de América Latina, los productores agrícolas rurales enfrentan severas limitaciones para posicionar sus cosechas en cadenas comerciales estructuradas que vayan más allá de los mercados locales o rodantes. Esta situación se relaciona no sólo con factores de escala productiva, sino con la carencia de infraestructura tecnológica que les permita cumplir con estándares mínimos de calidad, inocuidad y trazabilidad exigidos por centros de distribución, supermercados y agroindustrias [1, 2].

Una de las principales limitaciones para mejorar la colocación de sus cosechas en anaqueles comerciales, es la ausencia de sistemas de desinfección utilizada en la fase de postcosecha. El uso de agua contaminada para lavado, hidratación o fertirrigación representa un riesgo tanto para la salud del consumidor como para el rechazo de productos frescos en mercados más exigentes a los rodantes [3]. La inocuidad alimentaria, por tanto, no depende únicamente del manejo agronómico, sino también de la adopción de tecnologías accesibles en las actividades postcosecha, la cual ha sido un componente esencial en procesos agrícolas [4], permitiendo el incremento de rendimientos económicos al productor agrícola [5]. Dentro de la innovación tecnológica que se ha desarrollado en el campo de la agricultura se encuentran tecnologías que aportan un valor en diferentes áreas como lo son tecnologías para el rendimiento de suelos, sistemas de riego, y sistemas de desinfección en particular, que es el campo que se está tocando en este artículo.

Comercialmente existen sistemas de inmersión y aspersión dedicados al lavado y desinfección de frutas y hortalizas. Por mencionar algunas son: la Brush Washer de JBT es una lavadora específicamente para la limpieza exterior de los frutos usando un detergente espumoso combinado con cepillos para eliminar la suciedad y los residuos [6]. Así también la lavadora GewaV 5000 Plus la cual es una lavadora para grandes volúmenes de vegetales la cual tiene un tanque elevado en el que se eliminan suciedades que son separadas de la corriente que lleva el producto. Estos restos son arrastrados a una estructura posicionada en el fondo del tanque que realiza la operación de lavado. De este modo, se previene que las impurezas entren nuevamente en contacto con el producto ya higienizado. Sin embargo, en todas estas tecnologías al final se requiere descargar el agua una vez que ha cumplido su función. Aunque los sólidos en suspensión y sedimentados pueden pasar desapercibidos en el proceso, no ocurre así con el detergente o el desinfectante que acompaña dichas descargas. Estas tecnologías se insertan como una operación al proceso de lavado de manera fija ocupando un espacio determinado; haciendo esto, por una parte, más compleja la manipulación e instalación de la tecnología en espacio particular, y la compra de esta tecnología para la población de productores agrícolas o de traspatio de zonas rurales.

Una de las tecnologías que ha causado impacto en la productividad agrícola es el hardware y software libre orientados al modelo "hazlo tú mismo" que da la oportunidad de ser los propios creadores de productos con baja inversión, y con grandes beneficios [7]. En este contexto, las tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) han ganado atención por su capacidad de ofrecer soluciones de baja inversión que puede oscilar entre los 20,000.00 MXN, según el control que se requiera, personalizables, y adaptables a comunidades agrícolas

rurales sin posibilidad de invertir en tecnologías comerciales con exigencias en infraestructura para su instalación, a la cual se suma la mano de obra especializada para su operación y mantenimiento. En particular, el uso de microcontroladores, actuadores, junto con sensores de variables físico-químicas, permite construir sistemas de monitoreo en tiempo real que antes eran impensables para el pequeño agricultor por su alto costo o complejidad operativa [8, 9].

El sistema que se presenta en este artículo responde a esa necesidad: un prototipo funcional en IoT para el monitoreo de parámetros críticos del agua: Desinfectante medido a través del pH, turbidez, temperatura del agua de desinfección, y el nivel del agua de desinfección. Un prototipo funcional que puede ser integrado en espacios agrícolas sin infraestructura específica para su operación. La solución que se presenta en este artículo fue diseñada de manera que pueda instalarse y adaptarse en espacios de huertos familiares traspatio, comunitarios o módulos de producción diversificada; permitiendo a los pequeños agricultores practicar el proceso de desinfección, y con ello proporcionarles el valor agregado a sus productos agrícolas, frutos y hortalizas.

Por otra parte, el monitoreo y cuidado constante de la calidad del agua es crítico en la agricultura moderna, lo que requiere el manejo eficiente del recurso [8]; toda vez que, en regiones rurales existen limitaciones económicas y de infraestructura que dificultan la implementación de soluciones tecnológicas avanzadas. El uso de sistemas embebidos como el ESP32 permite desarrollar alternativas accesibles y eficientes para comunidades con recursos limitados [9].

Este artículo describe paso a paso la construcción de un prototipo de sistema IoT que integra sensores electrónicos, conectividad Wi-Fi, y almacena datos en plataformas remotas; pensado para mejorar prácticas agrícolas en zonas rurales carentes de infraestructuras inmuebles y tecnológicas. De esta forma, a través de una arquitectura basada en ESP32, sensores de bajo consumo energético, actuadores, y conectividad inalámbrica, se ofrece una alternativa viable para zonas rurales con conectividad intermitente y presupuesto limitado. El sistema IoT aquí expuesto puede contribuir no sólo al cumplimiento de buenas prácticas agrícolas, sino también al fortalecimiento de circuitos cortos de comercialización con valor agregado certificado por el propio productor. En este artículo, aunque la validación experimental se ha realizado en un sistema de desinfección por inmersión, el sistema propuesto es también adaptable a aplicaciones por aspersión, lo cual amplía su aplicabilidad en procesos de lavado de frutas y hortalizas.

MATERIAL Y MÉTODOS

El prototipo portátil para la desinfección de frutas y hortalizas se diseña para atender la necesidad de disponer

de una tecnología de bajo costo y accesible para productores de baja escala de producción agrícola, producción traspatio, y que no requiere de infraestructura inmueble establecida.

Esta tecnología es diseñada para adaptarse a configuraciones según la posibilidad del pequeño agricultor para incrementar el valor agregado comercial a sus cosechas agrícolas. Con este propósito se seleccionan materiales electrónicos de uso comercial y de fácil adquisición. El funcionamiento fue validado ejecutando pruebas en un ambiente agrícola desinfectando papa y chayote simultáneamente durante tres días de funcionamiento (72 horas), comparando los sensores electrónicos con equipos de referencia analógicos y digitales. De esta misma forma, la calibración de actuadores de consumo de corriente se validó mediante equipos de prueba e instrumentos estándar (Figura 1).

- Sensor ultrasónico HC SR04: estima el nivel de agua en tanques.
- Plataforma Arduino Cloud para visualización remota de datos.
- Válvula solenoide de agua 12 V.
- Bomba de agua de 12 V 130 Psi Autoprím diafragma.
- Calentador eléctrico para agua.
- Filtro de agua.

La construcción del prototipo de desinfección de frutas y hortalizas, como puede observarse en la Figura 2, inicia con identificar las variables del proceso de desinfección. Posteriormente se identifican y definen los elementos y actuadores que conforman la operación de este prototipo, para entonces definir la arquitectura del sistema de desinfección. Finalmente se ensambla el prototipo de desinfección.

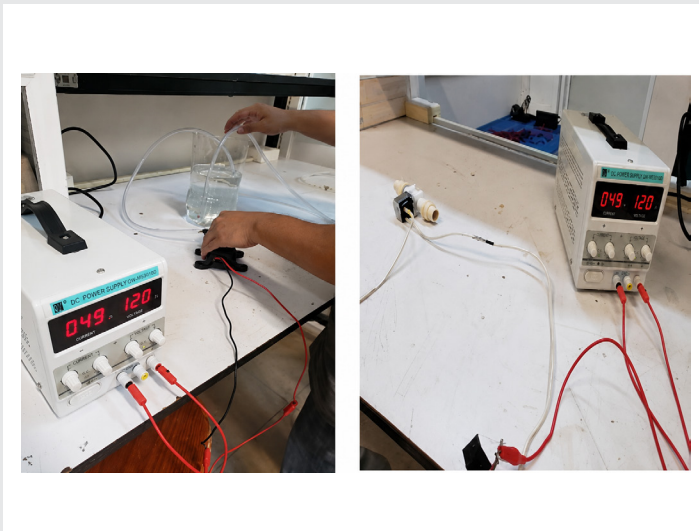


Figura 1. Calibración y Medición de Actuadores.
Fuente: Pruebas de campo.

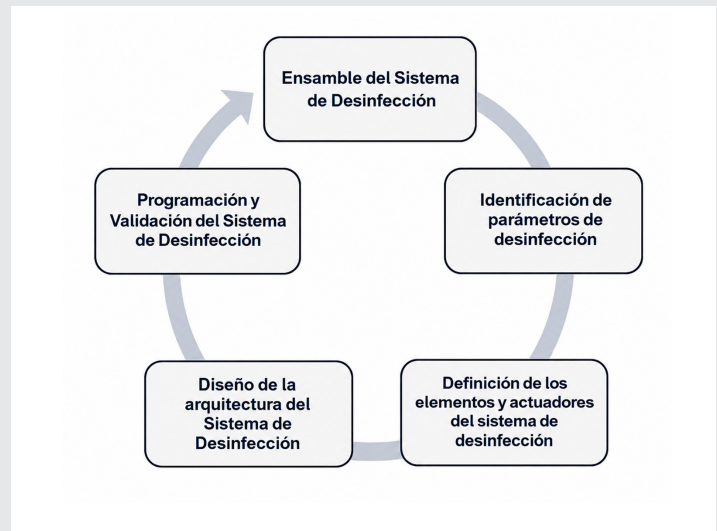


Figura 2. Diseño, programación y ensamble del sistema de desinfección.
Fuente: Diseño propio.

Los datos se analizaron mediante cálculo de error absoluto medio (MAE) y coeficiente de correlación (r).

El prototipo portátil para la desinfección de frutas y hortalizas se integró con los siguientes elementos y actuadores:

Para la elección de los componentes se cuidó que éstos fueran de distribución nacional, accesibles a través de plataformas comerciales, sin mayor requisito que su especificación.

- Microcontrolador ESP32 WROOM 32U, que permite conectividad Wi Fi integrada y control de periféricos.
- Sensor de pH DFRobot: mide niveles de acidez con un rango de 0-14 pH.
- Sensor de turbidez SEN0189: detecta partículas suspendidas en NTU.
- Sensor de temperatura DS18B20: ofrece mediciones precisas (-55 °C a 125 °C).

La programación del sistema de desinfección se realizó implementando rutinas de calibración por triplicado para cada sensor con protocolos para envíos automáticos cada 5 minutos provocando la variable.

RESULTADOS

Arquitectura y lógica del prototipo

La Figura 2 describe la lógica del funcionamiento y arranque del sistema de desinfección. Puede observarse que el arranque de este sistema inicia detectando el nivel de agua en el contenedor que el usuario ocupe para la desinfección de sus productos agrícolas. Una vez alcanzado el nivel, los sensores inician las lecturas de sus valores dentro de los umbrales que fueron establecidos en la programación del sistema. En esta lógica, la tarjeta lógica ESP32 funciona como el controlador principal conectando todos los elementos para su monitoreo y control. En primer lugar, se desarrolló un código inicial específico para la placa

gativo de la fuente poder de 12 V DC. La bomba de agua se conecta con el bloque 3 del relevador 2 y el calentador de agua se conecta con el bloque 2 del relevador 2.

Tabla 1 Relación de conexiones de componentes electrónicos con Arduino-Uno.

Elemento		Arduino
Nombre	Pin	Pin Arduino
Módulo sensor de Turbidez	Vcc	5v
	Gnd	Gnd
	A	A0

Fuente: Elaboración propia.

Variables de control

El Sistema de Desinfección mide y controla las variables a través de sensores y actuadores descritos en la Tabla 2.

Tabla 2 Relación de conexiones de componentes electrónicos con Arduino-Uno.

Variable	Descripción
Nivel de agua	Esta variable se controla a través del sensor de distancia HC-SR04 (Q) y una válvula de agua solenoide (U) que permite la alimentación de agua.
Temperatura del agua	Esta variable se controla a través del sensor de temperatura de agua (R) y el calentador de agua (W).
pH del agua	Esta variable se controla a través del sensor de pH (S) y una válvula de agua solenoide (U) que permite dosificar el desinfectante.
Turbidez del agua	Esta variable se controla a través del sensor de turbidez (T), una válvula de agua solenoide (U) que abre el paso a la recirculación de agua, una bomba de agua (V) para recircular el agua por medio de la instalación hidráulica y una válvula de agua solenoide (U) que permite desaguar el agua.

Fuente: Elaboración propia.

Calibración de sensores

Calibración del sensor de pH

Se utilizaron tres medidas de pruebas para calibrar el sensor de pH Figura 6. Una prueba con pH de 4.0, otra prueba con 7.0 de pH y otra prueba de 10.0 de pH. La conexión de la prueba se realizó con el módulo del sensor a una placa Arduino; se le compila el código a la tarjeta de Arduino desde el Arduino IDE. Se ingresó la sonda del sensor de pH a la solución a cada una de estas soluciones buffer.

Calibración del sensor de distancia

La calibración del sensor de distancia HC-SR04 consiste en comparar la distancia que mide el sensor con

una distancia conocida como se muestra en la Figura 7. Para esto se conectó el sensor HC-SR04 con la placa de Arduino Uno, utilizando el código de programación bajado de internet que corresponde a dicho sensor. El resultado de la medición del sensor corresponde a la misma distancia conocida.

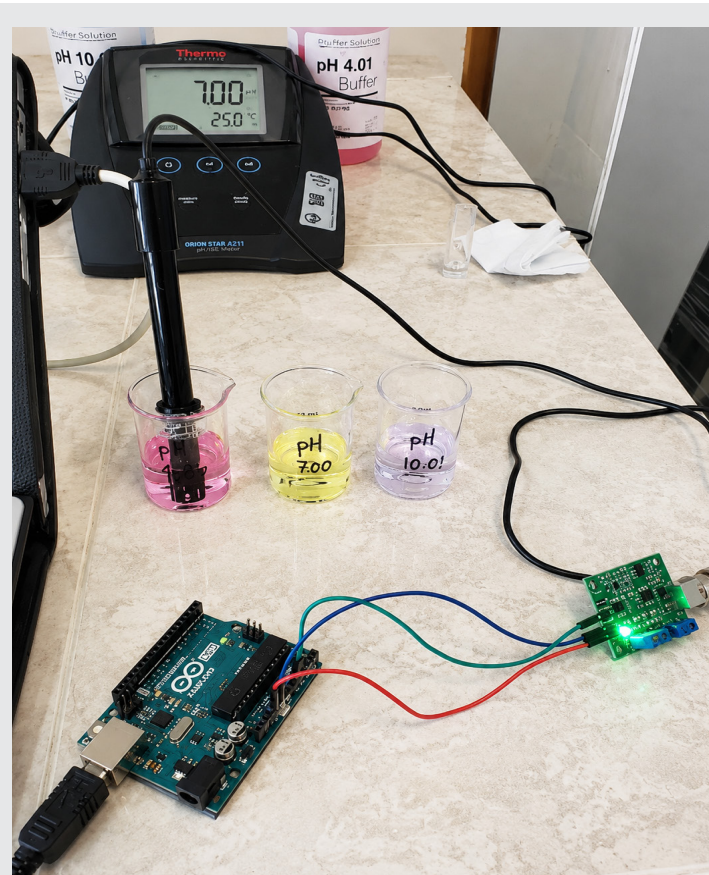


Figura 6. Calibración del sensor de pH.

Fuente: Estudio de campo.



Figura 7. Calibración del sensor de distancia.

Fuente: Estudio de campo.

Calibración del sensor de temperatura

La calibración del sensor de temperatura, en este caso, se realiza con apoyo del sensor de temperatura DS18B20 y una placa de Arduino Uno.

Se sumergió el sensor de temperatura en el interior de un recipiente con agua donde también se encuentra un controlador de temperatura con termostato que se reguló a una temperatura de 28 °C Figura 8.



Figura 8. Calibración del sensor de temperatura.
Fuente: Estudio de campo.

Calibración del sensor de turbidez

Se llevó a cabo el proceso de calibración del sensor de turbidez TS-300B utilizando agua con diferentes cantidades de colorante Figura 9. La calibración del sensor de turbidez TS-300B con agua limpia obtuvo un resultado de 743 NTU. La calibración del sensor de turbidez TS-300B con agua con 30% peso/volumen de colorante se obtuvo un resultado de 2224 NTU.

La calibración del sensor de turbidez TS-300B con agua y con 60% peso/volumen se obtuvo un resultado de 2981 NTU.

Para la calibración del sensor de turbidez TS-300B se utilizó la Ecuación 1:

$$(-1120.4)(v) + (5742.3)(v) - 4352.9 \quad \text{Ec. (1)}$$

en donde;

v; es el voltaje que alimenta al sensor.

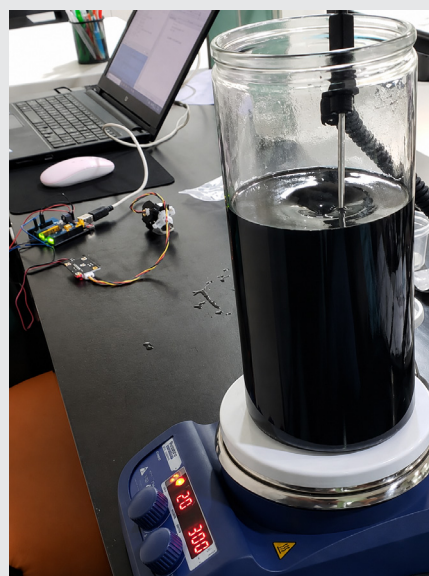


Figura 9. Calibración del sensor de turbidez.
Fuente: Estudio de campo.

Los análisis revelaron una precisión superior al 95 %. El coeficiente de correlación fue de $r= 0.98$ para el sensor de pH y $r= 0.95$ para turbidez, con un MAE inferior al 5 % en ambos parámetros. La temperatura se midió con una desviación de ± 0.3 °C, y el nivel con un margen de error <3 %.

El consumo energético que operó en modo continuo fue de aproximadamente 150 mA, lo que permite su uso con paneles fotovoltaicos.

Instalación de sensores y actuadores

Los sensores que monitorean los parámetros del sistema salen del gabinete y se sumergen en el depósito de agua que se utiliza para la operación de la desinfección de frutas y hortalizas Figura 10.

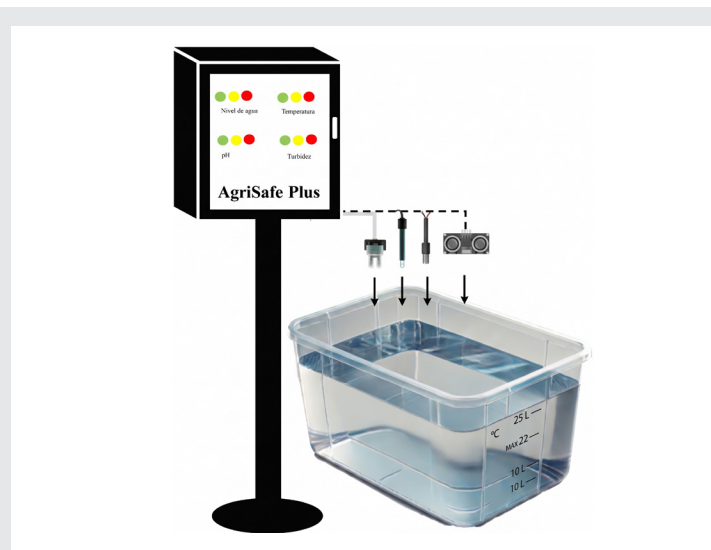


Figura 10. Representación gráfica del gabinete e inmersión de sensores en agua.
Fuente: Estudio de campo.

La Figura 11 representa gráficamente los elementos del sistema hidráulico conformado por actuadores y sensores. Mientras que la Figura 12, describe la interconexión de sensores con actuadores en el sistema de desinfección.

La Figura 13 detalla el Prototipo del Sistema de Desinfección de Frutas y Verduras en la que puede observarse una representación gráfica de los elementos posicionados en una arquitectura en la que normalmente puede instalarse en un depósito según las necesidades del agricultor.

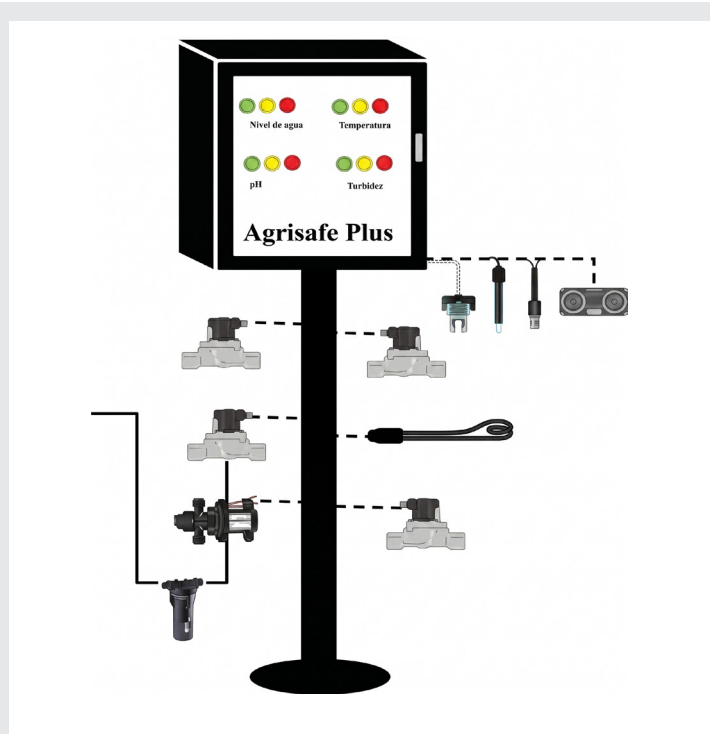


Figura 11. Interconexión de sensores y actuadores. Fuente: Estudio de campo.

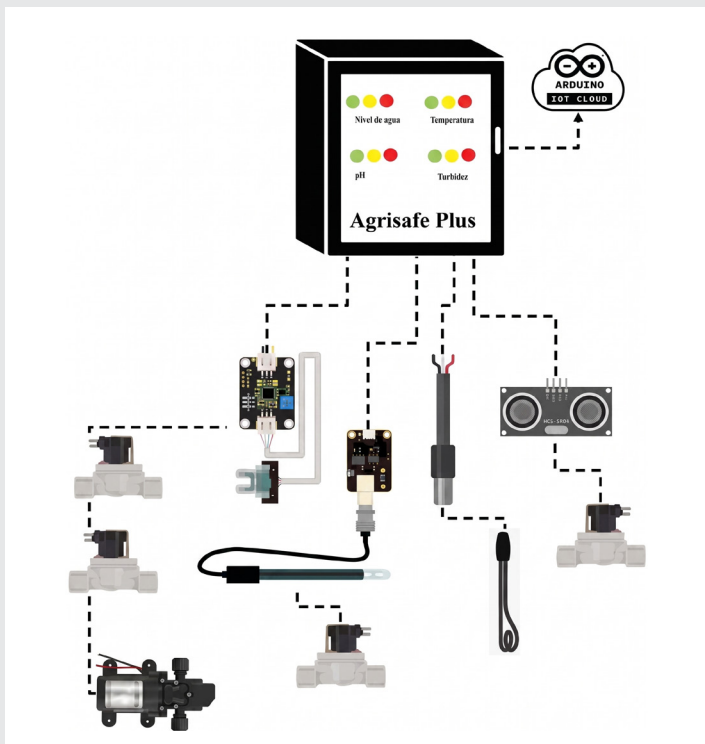


Figura 12. Interconexión de sensores y actuadores. Fuente: Estudio de campo.

La validación del sistema se realiza durante 72 horas de servicio mediante 15 ciclos de desinfección. Los valores medidos se contrastaron contra mediciones físicas de mediciones de transmitancia, así como con instrumentos como un potenciómetro, y termómetro.

El agua reincorporada en este periodo de evaluación fueron 5.5 L.

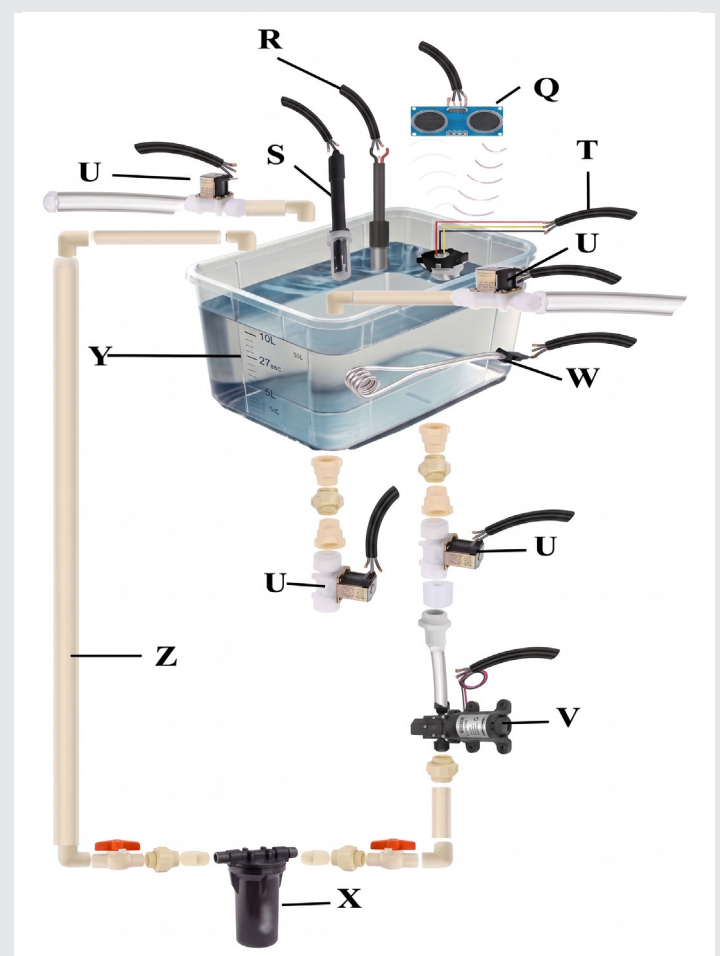


Figura 13. Sistema de Desinfección de frutas y hortalizas. Fuente: Diseño propio.

Q) Sensor de distancia | R) Sensor de temperatura | S) Sensor de pH | T) Sensor de turbidez | U) Electroválvula | V) Bomba de agua | W) Calentador de agua | X) Filtro de agua | Y) Depósito de agua | Z) Instalación hidráulica

La Figura 14 presenta el sistema en funcionamiento en uno de los 15 ciclos del proceso de sanitización de papa y chayote.



Figura 14. Sistema de Desinfección de frutas y hortalizas.
Fuente: Imagen propia.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema IoT eficiente para monitorear la calidad del agua en el ámbito agrícola rural para la desinfección de frutas y hortalizas. Al demostrar precisión en contraste con mediciones físicas del 98%, estabilidad en el consumo de agua al incorporar durante 15 ciclos en 72 horas de lavado, sólo 5.5 L de agua; demostrando de esta forma el sistema de desinfección su contribución sustentable.

Con base en estos resultados, se recomienda su implementación en proyectos de campo y su ampliación con interfaces web de gestión y alertas automáticas.

Esta “Tecnología portátil para la desinfección de frutas y hortalizas en comunidades rurales” ofrece al productor agrícola un medio para agregar valor comercial a su cosecha y proporciona una solución adaptable y sustentable a las necesidades y recursos de los pequeños productores, mejorando así sus ventajas competitivas para su inserción en cadenas comerciales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México por el proyecto financiado TECNM 22343.26-PD.

BIBLIOGRAFÍA

[1] SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2018). Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para la producción primaria de vegetales frescos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/427849/Manual_BPA_Vegetales_Frescos.pdf.

[2] FAO. (2020). Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe 2020. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb2242es>.

[3] Castillo, A., Villarruel-López, A., Navarro-Hidalgo, V., & Lugo, J. (2021). Evaluación microbiológica de agua usada en la producción de hortalizas frescas: riesgos y alternativas para el control de patógenos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(2), 239-251. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2489>.

[4] Chanki Pandey, P. K. S., Behera, S. K., Vishwakarma, J., & Tande, V. (2022). Smart agriculture: Technological advancements on agriculture—A systematical review. In *Deep Learning for Sustainable Agriculture* (pp. 1-56). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85214-2.00002-1>.

[5] Pingali, P. L. (2012). Green revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(31), 12302-12308. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109>.

[6] Bello José Ascencio, P., Autónoma de Guerrero, U., & Roberto Aranda Benito, M. (2024). Sistema de maduración de frutas mediante la implementación de Arduino. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(6), 7499-7519. https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V8I6.15445.

[7] Chora García, D., Álvarez Martínez, G., & Espinoza García, M. (2018). Raspberry Pi y Arduino: semilleros en innovación tecnológica para la agricultura de precisión. *Informática y Sistemas: Revista de Tecnologías de la Informática y las Comunicaciones*, 2(1), 74. <https://doi.org/10.33936/ISRTIC.V2I1.1134>.

[8] Bogdan, R., Paliuc, C., Crisan Vida, M., Nimara, S., & Barmayoun, D. (2023). Low cost Internet of Things water quality monitoring system for rural areas. *Sensors*, 23(8), 3919. <https://doi.org/10.3390/s23083919>.

[9] Naloufi, M., Abreu, T., Souihi, S., Therial, C., Rodrigues, N. A. d. P., Le Goff, A. G., & Lucas, F.

S. (2024). Long term stability of low cost IoT system for monitoring water quality in urban rivers. *Water*, 16(12), 1708. <https://doi.org/10.3390/w16121708>.

[10] Chaudhari, L. B., Kapse, S., Bathe, V., Sakhare, S., & Mahadik, S. (2025). Low cost fruit sanitization using ESP module. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 12(3), 407-413. <https://ijsrset.com/index.php/home/article/view/IJSRSET251257>.

[11] Correa Quiroz, J. J., Toribio Barrueto, M. A., & Castro Vargas, C. (2025). IoT system with ESP32 for smart drip irrigation and climate monitoring in greenhouses. *Emerging Science Journal*, 9(3), June 2025. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-03-01>

