

Artículo:

Arquitectura portátil de bajo costo habilitada con IoT para el monitoreo y control de la desinfección de frutas y hortalizas

IoT-Enabled Low-Cost Portable Architecture for Monitoring and Control of Fruit and Vegetable Disinfection

Heriberto Domingo-Santiago¹, Luis Enrique García-Santamaría¹, Eduardo Fernández-Echeverría², Yoselyn Nohemí Ortega-Gijón³, Gregorio Fernández-Lambert¹

Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social

Recibido: 25 de septiembre de 2025
Aceptado: 30 de octubre de 2025
Publicado: 20 de noviembre de 2025

Publicación continua editada por el **Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca**

Desv. Lindero Tametate, S/N
Col. La Morita
C.P. 92100
Tantoyuca, Veracruz, México.
Teléfono: 789 8931680, Ext.196.

Correo electrónico:
revistadigital@itsta.edu.mx

Sitio WEB
<https://itsta.edu.mx/revistadigital>

ISSN 2448-8003
Reserva de derechos al uso exclusivo
No. 04-2016-092313253300-203

Editor responsable:
Dr. Horacio Bautista Santos

Copyright: Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

¹ Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, México.

² Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla, Puebla, México.

³ Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz, México.

* Autor corresponsal: eduardo.fe@zacapoaxtla.tecnm.mx

Resumen: La inocuidad alimentaria es fundamental para garantizar la competitividad en la producción de frutas y hortalizas especialmente en regiones rurales, donde pequeños productores carecen de acceso a tecnologías de desinfección adecuadas. Este artículo presenta una arquitectura portátil para el monitoreo y control del proceso de desinfección, orientada a contextos de traspasado y agricultores de pequeña escala. La propuesta integra hardware y software de bajo costo, destacando el uso del microcontrolador ESP32 en conjunto con Arduino Uno, módulos de sensores y actuadores para la regulación automática de agua, desinfectante y temperatura. La metodología incluyó la identificación de parámetros críticos de desinfección reportados en la literatura, el desarrollo de la lógica de control, la construcción de la infraestructura hidráulica, y la programación del sistema conectado a la nube mediante Arduino IoT Cloud. Los resultados demuestran la funcionalidad de un sistema para mantener las condiciones óptimas de parámetros para la desinfección de frutas y hortalizas —nivel de agua, temperatura (24 °C), pH (8–9) y turbidez (<1288 NTU)—, con monitoreo remoto y almacenamiento de datos históricos. El sistema de recirculación y recuperación del medio desinfectante advierte potencial reducción en el consumo de agua a un costo de fabricación de 11,975.83 MXN; lo que convierte a este sistema en una alternativa accesible para productores rurales de pequeña escala frente a sistemas industriales de alto costo. En conjunto, los hallazgos confirman que esta tecnología representa una solución viable y adaptable para mejorar la inocuidad en comunidades rurales, fortaleciendo su inserción en cadenas agroalimentarias más competitivas.

Palabras clave: Inocuidad alimentaria, Desinfección, Frutas y Hortalizas, IoT, ESP32.

Abstract

Food safety is essential to ensure competitiveness in fruit and vegetable production, particularly in rural regions where small-scale farmers often lack access to appropriate disinfection technologies. This article presents a low-cost portable architecture for monitoring and controlling the disinfection process, specifically designed for backyard farming and smallholder contexts. The proposed system integrates both hardware and software, featuring the ESP32 microcontroller in combination with Arduino Uno, as well as sensors for water level, temperature, pH, and turbidity, along with actuators for the automated regulation of water, disinfectant, and temperature. The methodology involved identifying critical disinfection parameters reported in the literature, developing the control logic, constructing the hydraulic infrastructure, and programming the system to connect with the cloud through Arduino IoT Cloud. Results validated the system's ability to maintain optimal operating conditions of water level, temperature (24 °C), pH (8–9), and turbidity (<1288 NTU), with remote monitoring and historical data storage capabilities. The recirculation and recovery mechanism for the disinfectant medium demonstrated the potential to reduce water consumption, while the total fabrication cost of 11,975.83 MXN makes the system considerably more accessible to small-scale rural producers compared to high-cost industrial technologies. Overall, the findings confirm that this portable IoT-based architecture offers a viable, adaptable, and cost-effective solution to enhance food safety in rural communities, thereby strengthening their integration into more competitive agri-food supply chains.

Keywords: Food safety, Disinfection, Fruits and vegetables, IoT, ESP32.

Introducción

México ocupa un lugar distinguido en el orden mundial como productor y exportador de frutas y hortalizas; este dinamismo agroindustrial generado por la naturaleza agrícola del país ha tenido un impacto relevante en los mercados nacionales, demostrando capacidad de autoconsumo (Mordor Intelligence, 2025). En el ámbito internacional, estados como Veracruz se han consolidado como palancas de desarrollo económico local, especialmente por su producción de cítricos como naranja agria, valenciana y lima persa (Fernández-Echeverría et al., 2024). Asimismo, aunque la producción de pequeña escala —productores de una hectárea o menos, sea bajo estrategias de agricultura protegida (Montalvo-Romero et

al., 2024), incluidas operaciones traspatio— no siempre tenga gran visibilidad exportadora, ha demostrado ser un motor de economía local al fomentar autosuficiencia alimentaria y complementar ingresos campesinos (Soto et al., 2020; USDA FAS, 2024).

Un proceso clave para incrementar el valor comercial de estos productos es la inocuidad alimentaria, particularmente al presentarse al mercado con estándares sanitarios. La desinfección de frutas y hortalizas es esencial en este contexto, pues permite eliminar contaminación microbiológica y otros agentes de riesgo (Almonte, 2000; Avendaño et al. 2002). La literatura reciente muestra que los brotes de enfermedades transmitidas por alimentos vinculados a frutas y verduras frescas han aumentado globalmente, asociados a patógenos como *Salmonella spp.*, *Escherichia coli* y *Listeria monocytogenes*, que pueden persistir incluso tras procesos convencionales de lavado (Jin & Adhikari, 2025; Bautista-Baños et al., 2025). Además, cumplir con estándares internacionales —como los establecidos en la Ley de Modernización de Inocuidad Alimentaria (FSMA) en EE. UU.— exige aplicar tratamientos de desinfección efectivos que reduzcan riesgos microbiológicos, químicos y físicos (USDA ERS, 2024).

La inocuidad de las frutas y hortalizas constituye un elemento fundamental para la protección de la salud humana, la cual se gestiona a lo largo de toda la cadena agroalimentaria con el propósito de fortalecer las prácticas en la producción, empaque, manejo poscosecha y comercialización (Barajas-Rodríguez et al, 2021; Bernardino-Hernández et al., 2024). En este sentido, la inocuidad implica que el consumo de alimentos debe garantizar la reducción de riesgos biológicos, químicos y físicos que pueden encontrarse en huertos o empaques y que podrían causar daño a la salud de los consumidores. Las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) constituyen una estrategia consolidada para prevenir y minimizar estos riesgos, incluyendo durante recepción, preselección, clasificación, empaque y distribución (Sánchez-Galván, et al., 2019; Fernández-Echeverría et al., 2024).

Particularmente, la etapa de desinfección es determinante para asegurar la inocuidad de frutas y hortalizas. Este proceso suele implementarse en la agroindustria que atiende mercados nacionales e internacionales; sin embargo, en sectores rurales como los productores de traspatio o pequeña escala que abastecen mercados locales, la operación de desinfección frecuentemente no se realiza. Entre las causas destacan factores culturales, la concentración de volúmenes de cosecha en intermediarios impactando en la resiliencia de la actividad

económica (Bautista-Santos et al., 2021) y, de manera sobresaliente, el factor económico que limita la adopción de tecnologías sanitarias (SENASICA, 2025).

En Veracruz, diversas iniciativas han mostrado la importancia de fortalecer la inocuidad en unidades productivas rurales. Programas de vigilancia microbiológica en vegetales frescos han identificado deficiencias en lotes de pequeños productores, lo que evidencia la necesidad de reforzar procesos de desinfección como medida clave de acceso a mercados competitivos (SENASICA, 2025). Asimismo, investigaciones en comunidades citrícolas del centro-norte del estado destacan que el manejo fitosanitario, el uso de insumos y las buenas prácticas agrícolas son factores determinantes para la calidad e inocuidad de la producción local (Sánchez-Galván et al. (2020); Fernández-Echeverría et al., 2024). Estas evidencias refuerzan la importancia de impulsar tecnologías accesibles y adaptadas a las condiciones rurales para garantizar la inocuidad alimentaria y fortalecer la competitividad regional (Bautista-Santos et al., 2025).

Las tecnologías que pueden encontrarse comercialmente sobre lavado y desinfección de frutas y hortalizas comparten enfoques industriales centralizados y de alto costo de instalación y operación; las cuales son diseñadas principalmente para instalaciones fijas de gran escala. Ejemplo de estas tecnologías incluyen la lavadora GEWA 5000 PLUS, las máquinas multifuncionales de ASTIMEC, y los sistemas modulares de INGRO, las cuales integran la operación de aspersión, recirculación y secado automático mediante sistemas de control con requerimientos elevados de infraestructura, energía y mantenimiento. Otras patentes como la EP3111782A1 y ES1038702U incorporan sensores y actuadores conectados a cintas transportadoras. En cualquiera de estas tecnologías su diseño está limitado a entornos con infraestructura establecida, que exigen para su operación conocimiento especializado.

En este artículo se describe el diseño de una arquitectura para el monitoreo y control del proceso de desinfección de frutas y hortalizas para adaptarse en comunidades rurales. Esta tecnología portátil busca atender la falta de acceso a sistemas de desinfección adecuados en la agricultura de traspatio y en pequeños productores, quienes actualmente enfrentan limitaciones para insertar sus productos en cadenas comerciales más exigentes en términos de inocuidad alimentaria. Esta tecnología, a diferencia de sistemas industriales de alto costo y complejidad, se caracteriza por ser portátil, de bajo costo, adaptable a diferentes infraestructuras; la cual busca disminuir el gasto de agua en dicho proceso de desinfección.

Materiales y métodos

El diseño del Sistema de Desinfección de Frutas y Hortalizas a nivel prototipado se definió con el objetivo de obtener retroalimentación del usuario y partes interesadas para refinar el concepto, aclarar requisitos y reducir riesgos y costos en las fases posteriores del desarrollo. Con este propósito, se definen cinco pasos representados en la Figura 1.

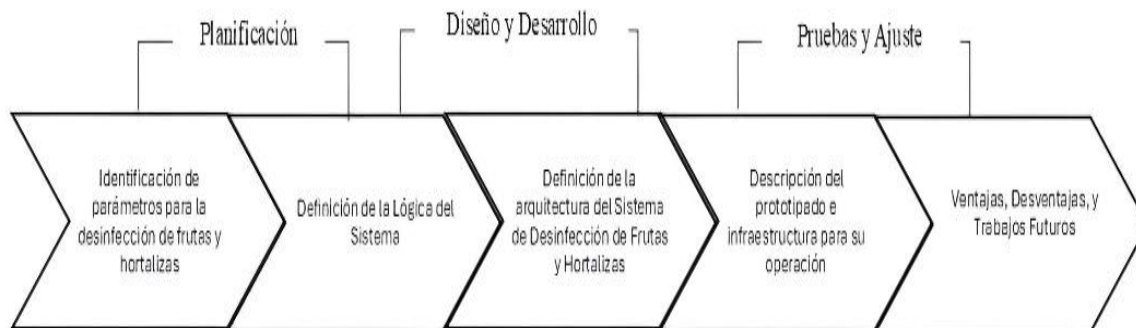


Figura 1. Diseño del sistema de desinfección.

El diseño inicia identificando los parámetros comunes que las tecnologías comerciales reportan evaluar en el proceso de desinfección. Los parámetros se documentan y verifica con lo tratado por la literatura para dicho proceso. Posteriormente se realiza una búsqueda de las tecnologías que existen y que se utilizan comercialmente para el lavado y desinfección de productos agrícolas.

En el paso tres se define la lógica del sistema, bajo la cual se programa el algoritmo de control, y seguimiento del proceso de desinfección. Posteriormente a la Lógica del Sistema se definen los elementos que constituyen la arquitectura del Sistema de Desinfección, para posteriormente describir cada uno de los elementos constitutivos de dicho sistema. Finalmente, se describen la ventajas y desventajas para la operación del Sistema de desinfección de Frutas y Hortalizas.

Resultados y discusión

Lógica del Sistema de Desinfección de Frutas y Verduras

El Sistema de Desinfección de Frutas y Hortalizas se compone de una combinación de hardware y software que integrado funciona para optimizar el desempeño de la desinfección de frutas y hortalizas. La Figura 2 describe en bloques el funcionamiento de la tecnología portátil para la desinfección de frutas y hortalizas. En esta Figura 2 puede observarse que este sistema se caracteriza por su construcción con sensores que monitorean y controlan las

variables mediante un microcontrolador (ESP32) y actuadores, así como sus diferentes suministros de voltaje que éstos utilizan para la operación de la desinfección de las frutas y hortalizas.

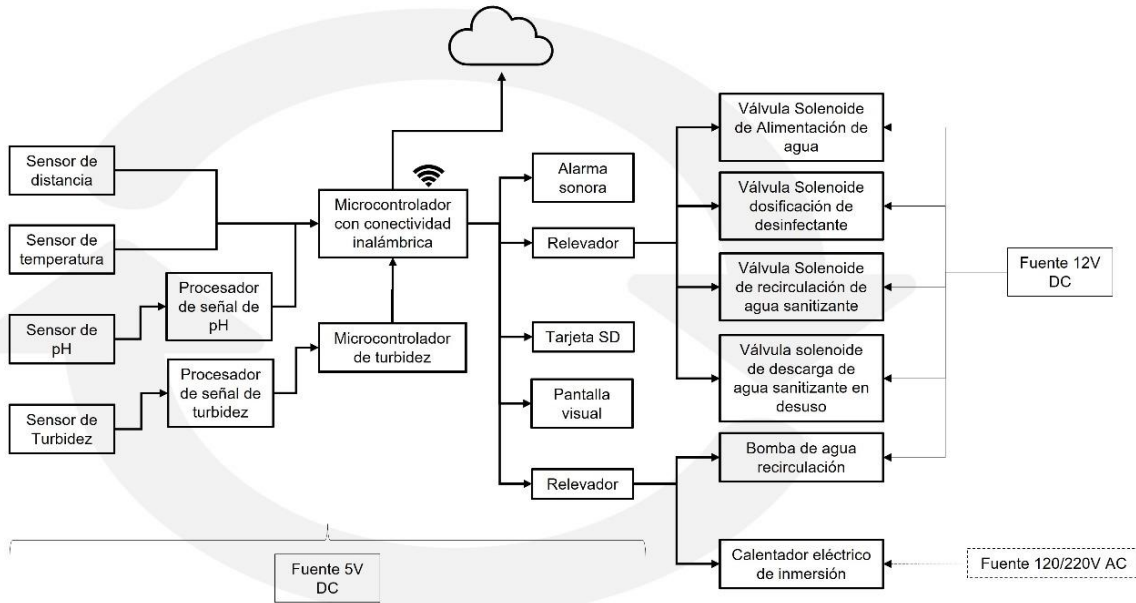


Figura 2. Lógica de funcionamiento del Sistema de desinfección de frutas y hortalizas.

Por otra parte, la Figura 3 describe el diagrama general del Sistema de desinfección de frutas y hortalizas, en el que puede observarse sensores, microcontroladores y actuadores para controlar los parámetros del recurso hídrico utilizado en el proceso de desinfección.

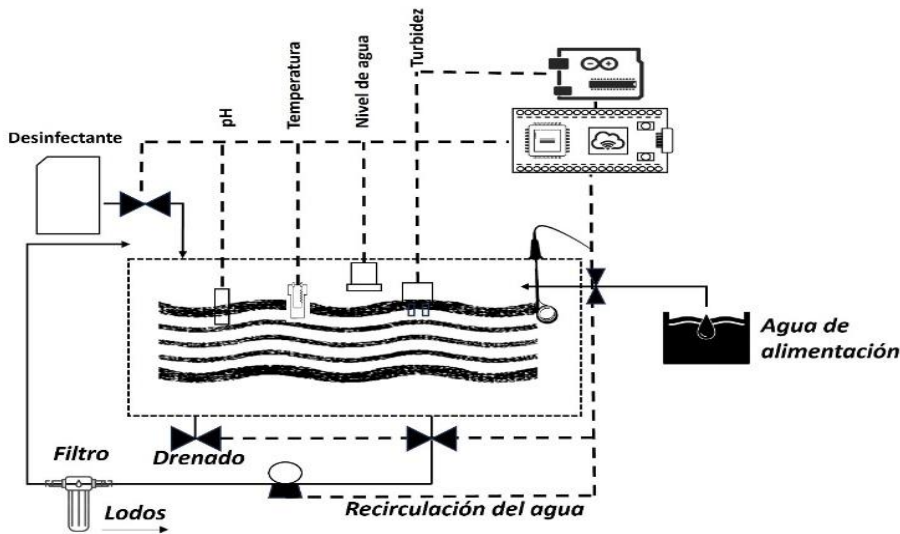


Figura 3. Esquema general del sistema de desinfección de frutas y hortalizas.

Elementos de control y actuadores

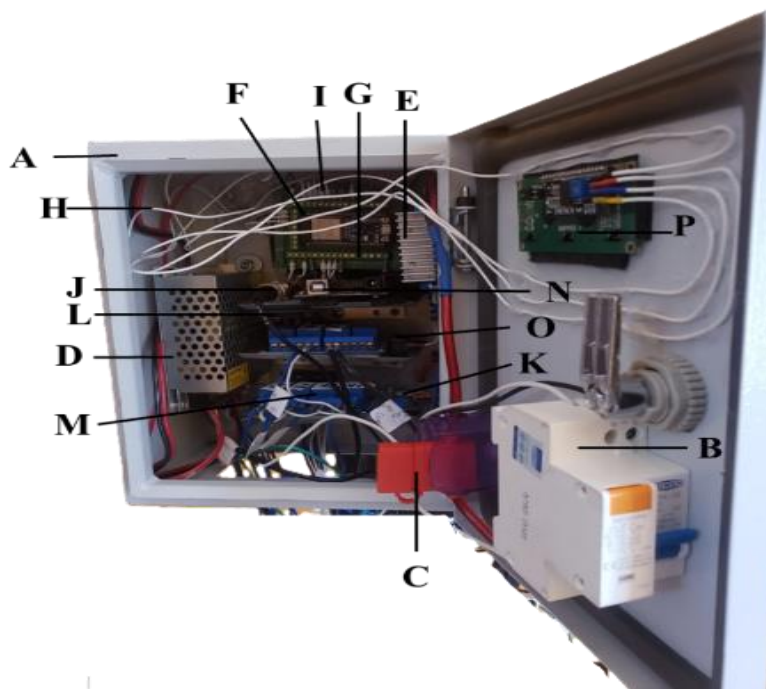
El sistema está controlado principalmente por el microcontrolador ESP32 (*F*), el cual recibe información del *sensor de nivel de agua*, *sensor de temperatura*, sensor de pH (*J*) y sensor de turbidez (*K*), permitiendo tomar decisiones automatizadas. En primer lugar, el sensor de nivel de agua mide la cantidad de líquido disponible que se encuentra en el depósito-contenedor y, si el nivel es bajo, el ESP32 acciona la válvula solenoide de llenado mediante un módulo relé para iniciar el abastecimiento; cuando se alcanza el nivel óptimo, la válvula solenoide de llenado se cierra.

El sensor de temperatura monitorea la temperatura del agua y, si ésta se encuentra por debajo del umbral establecido, el ESP32 activa el calentador de agua a través del módulo relé hasta alcanzar la temperatura óptima, momento en el cual se desactiva el calentador de agua.

El sensor de pH mide la acidez o alcalinidad y, si detecta que el nivel es inferior al valor establecido, el ESP32 ordena la apertura de la válvula solenoide del desinfectante, permitiendo la dosificación hasta alcanzar el valor adecuado; entonces, la válvula solenoide del desinfectante se cierra.

El sensor de turbidez monitorea los sólidos suspendidos del agua con desinfectante y manda la lectura al microcontrolador Arduino Uno, que a su vez envía la información al ESP32 para la toma de decisiones. Si la turbidez es mayor o igual a 2394 NTU (Turbidez alta) el ESP32 acciona la válvula solenoide de desagüe a través del módulo relé. Si la turbidez es mayor o igual a 1288 NTU (Turbidez media), el ESP32 activa la válvula solenoide de recirculación y la bomba de agua a través de los módulos relés para que el agua junto con el desinfectante recircule por la instalación hidráulica que incluye un filtro donde se quedan atorados los sólidos suspendidos y poder reutilizar el agua junto con el desinfectante en el depósito de agua de origen. Si la turbidez es menor que 1288 NTU (Turbidez baja) el ESP32 mantiene cerrada la válvula solenoide de recirculación, la bomba de agua y la válvula solenoide de desagüe para que la operación de desinfección de frutas y hortalizas se mantenga estable.

Todos los componentes electrónicos como la placa de Arduino Uno (*N*), el ESP32 (*F*), módulos de sensores (*J*, *K*), los módulos relé (*M*), la tarjeta SD (*N*), el buzzer (*O*) y la pantalla (*P*), están dentro de un gabinete (Figura 4). Finalmente, los datos recopilados por los sensores se procesan en tiempo real y se envían a la nube de Arduino IoT Cloud, permitiendo su monitoreo remoto a través de un tablero de indicadores (Figura 5).



A) Gabinete metálico; *B)* Disyuntor diferencial 10 amp; *C)* Fusible automotriz 10 apm; *D)* Fuente de volaje de 12V; *E)* Regulador de voltaje de 5V; *F)* Placa ESP32; *G)* Shield Clemas Conexion Tornillo Montaje Riel Din; *H)* Cable estañado calibre 22; *I)* Terminal tipo crimpador; *J)* Módulo del sensor de pH; *K)* Módulo del sensor de Turbidez; *L)* Tarjeta SD; *M)* Relés; *N)* Arduino Uno; *O)* Buzzer activo 5v; *P)* Pantalla LCD 16x2.

Figura 4. Componentes electrónicos de control dentro de un gabinete metálico.



Figura 5. Tablero de indicadores relacionado con los variables de control.

Las conexiones de los componentes electrónicos se concentran en un microcontrolador —ESP32— de 38 pines. La Tabla 1 describe la relación de conexiones entre los elementos que integran el sistema y el ESP32 que funciona como controlador principal.

Tabla 1. Relación de conexiones de componentes electrónicos al ESP32.

Elemento		ESP32
Nombre	Pin	Pin ESP32
Módulo de Sensor de nivel	TrigPin	IO14
Módulo de Sensor de nivel	EchoPin	IO15
Sensor de temperatura	OurWire	IO0
Módulo de sensor de pH	Po	IO34
Arduino Uno	Tx	Rx
Arduino Uno	Rx	Tx
Módulo tarjeta SD Card	Miso	IO19
Módulo tarjeta SD Card	SCK	IO18
Módulo tarjeta SD Card	Mosi	IO23
Módulo tarjeta SD Card	Cs	IO05
Relevador 1	Relay 1	IO17
Relevador 1	Relay 2	IO25
Relevador 1	Relay 3	IO26
Relevador 1	Relay 4	IO27
Relevador 2	Relay 2	IO33
Relevador 2	Relay 3	IO16
Pantalla LCD	Sda	IO21
Pantalla LCD	Scl	IO22
Buzzer	Positivo	IO32

Con esta configuración de conexiones, el ESP32 gestiona todo el sistema de desinfección de frutas y hortalizas, asegurando un control eficiente de los parámetros mediante la integración de sensores, actuadores, almacenamiento en tarjeta SD y comunicación con la nube mediante IoT. En la Tabla 2, se describen las conexiones que se realizan a la placa de Arduino Uno, donde se conecta el sensor de turbidez por medio del módulo de turbidez.

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

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

La Figura 6 representa las conexiones de los actuadores (válvulas, bomba de agua, calentador de agua). Las válvulas se conectaron con los 4 bloques del relevador 1, conectándose también con los voltajes positivo y negativo 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.

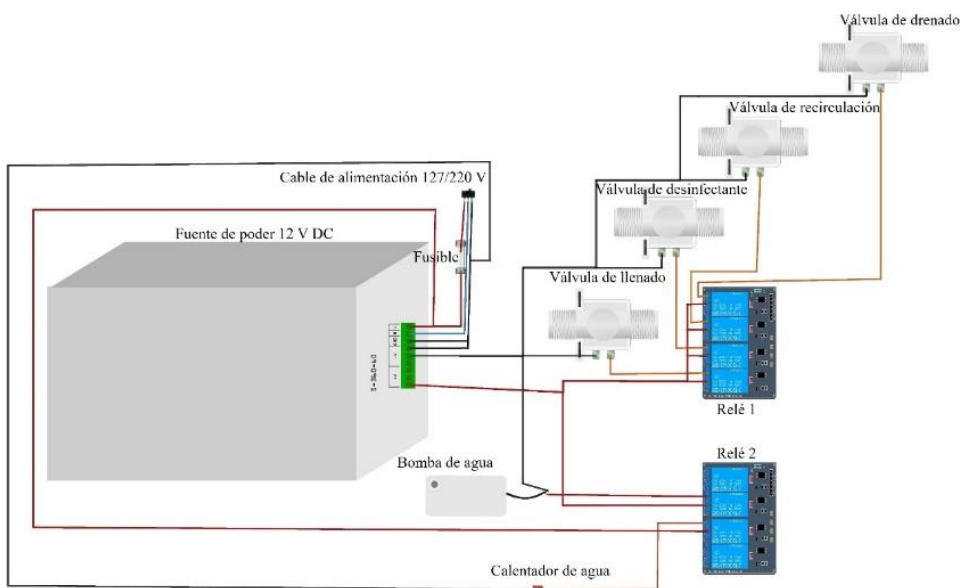


Figura 6. Conexión general de los actuadores.

Fuente: Elaboración propia con apoyo del Software Fritzing.

Los sensores, para su correcta operación, se calibran contra un estándar La Tabla 3 detalla este proceso de calibración.

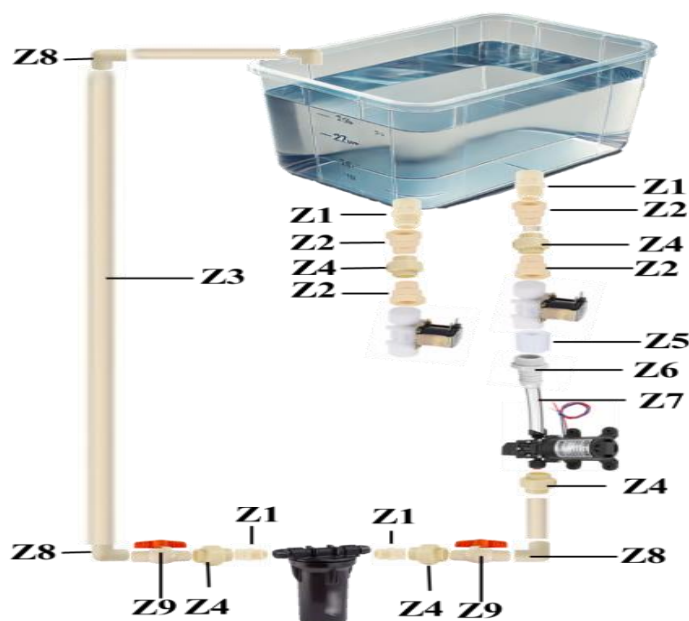
Tabla 3. Calibración de los sensores.

Sensor	Estándar
pH	Se utilizaron tres soluciones buffer: 4; 7, y 10.
Distancia	Se compara la distancia del sensor con un flexómetro Truper FCN-8M.
Temperatura	Se compara la temperatura del sensor con un instrumento termómetro digital calibrado Marca Cole-Parmer/Traceable/Código 90205-26.
Turbidez~Trasmittancia	Se preparan soluciones colorantes a diferentes grados de saturación, y se contrastan con soluciones de agua limpia. La ecuación: $-1120.4 * (\text{voltaje}) + 5742.3 * (\text{voltaje}) - 4352.9$, se utiliza para la calibración del sensor de turbidez TS-300B

Los microcontroladores, sensores y actuadores seleccionados al propósito del Sistema de Desinfección de Frutas y Verduras fueron: ESP32, Arduino Uno, Sensor ultrasonico de distancia, Sensor de temperatura, Módulo de sensor de pH, Módulo del sensor de Turbidez, Módulo de tarjeta SD, Fuente poder de 12V, Regulador de voltaje a 5V, Dos relevadores de 4 bloques cada uno, Fusible, Porta fusible, Pantalla LCD, Buzzer y Disyuntor diferencial. Particularmente el sensor de temperatura y el sensor de distancia no se conectan con algún módulo, sino que se conectan directamente al ESP32 a través del cable que emite la señal.

Infraestructura hidráulica

En la Figura 7 se muestran los diferentes componentes y conexiones que integran la instalación hidráulica. La unión de cada pieza de conexión, se recomienda utilizar cinta teflón con el ajuste necesario sin exigirle al roscado.



Z1) Adaptador macho cpvc, Z2) Adaptador hembra cpvc, Z3) Tubo cpvc, Z4) Unión universal cpvc, Z5) Adaptador hembra pvc, Z6) Adaptador espiga pvc, Z7) Manguera de nivel, Z8) Codo 90° cpvc, Z9) Válvula esfera soldable ½ cpvc

Figura 7. Instalación hidráulica.

Lógica del funcionamiento

La Figura 8 presenta el flujo lógico que permite comprender el funcionamiento y lógica del sistema de desinfección de frutas y hortalizas desde el funcionamiento del sensado y actuadores; todos éstos controlados por el microcontrolador ESP32. El flujo inicia con la lectura del nivel de agua; si es bajo, se abre la válvula de alimentación hasta alcanzar el nivel adecuado. Posteriormente, se mide la temperatura y, si es baja, se activa el calentador de agua. Una vez estabilizada la temperatura, se procede a la medición del pH; si el valor es inferior al umbral establecido, se abre la válvula de ácido peracético y se monitorea nuevamente el pH hasta corregirlo. Finalmente, se evalúa la turbidez del agua: si es baja, se apagan los dispositivos de recirculación; si es media, se activan válvula y bomba de recirculación; y si es alta, se abre la válvula de drenado.

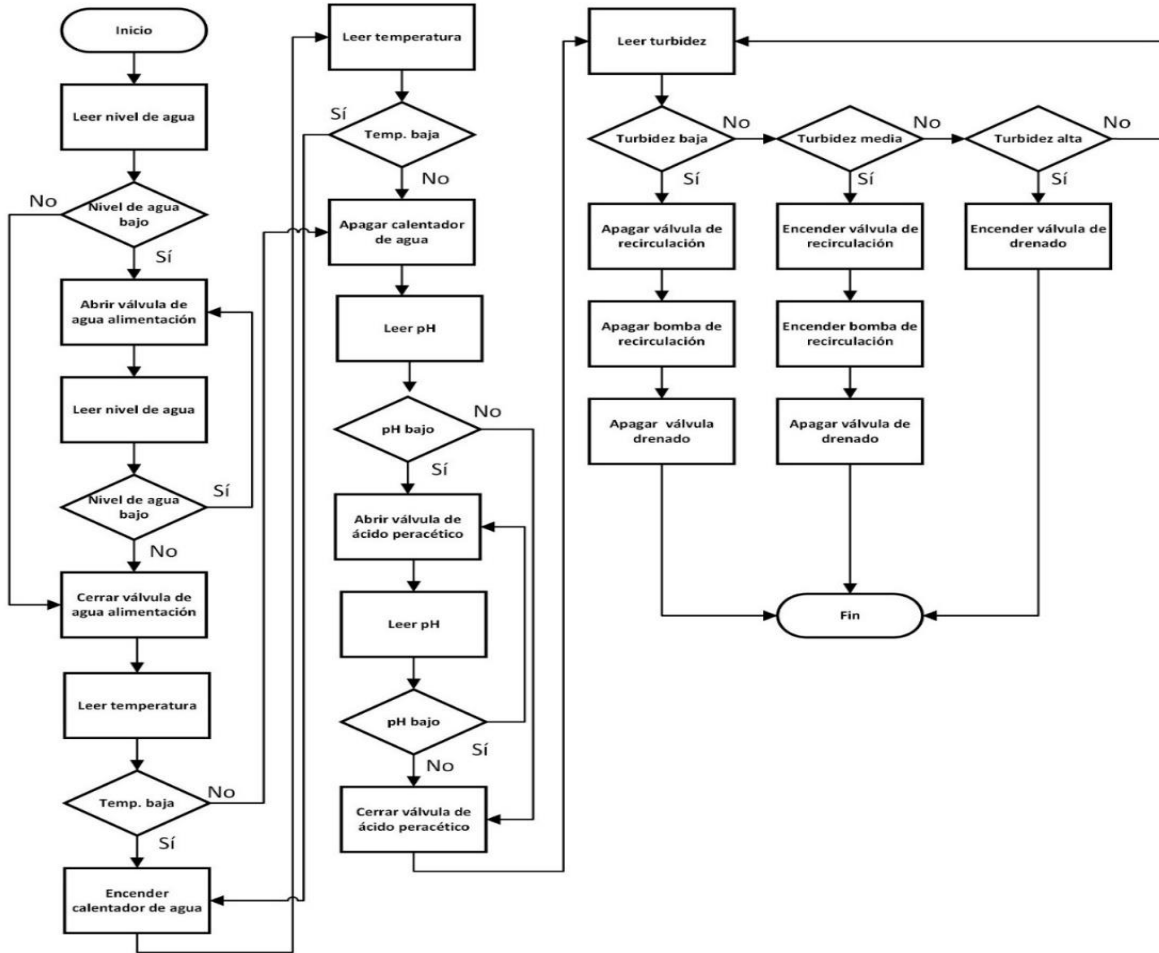


Figura 8. Diagrama de flujo del sistema lógico.

Fuente: Elaboración propia con apoyo del Software Visio.

Código fuente

El código fuente realizó en dos etapas: En primer lugar, se desarrolló un código inicial específico para la placa Arduino Uno, cuya función principal fue la lectura del nivel de turbidez del agua. Este código fue diseñado para adquirir los datos desde el sensor de turbidez y transmitirlos a través de comunicación serial al microcontrolador principal. Posteriormente, se elaboró el código fuente que integra y controla todo el sistema. Este segundo código fue compilado y cargado en la placa ESP32, la cual actúa como unidad central del proyecto. El ESP32 se recibe la información de Arduino Uno mediante comunicación serial, interpretar las lecturas de todos los sensores involucrados (nivel, temperatura, pH y turbidez de agua), y controlar los diferentes actuadores (válvulas, bomba, calentador) de acuerdo con la lógica definida en el diagrama de flujo que muestra la Figura 8.

El código del ESP32 está diseñado para establecer conexión con la plataforma Arduino Cloud, lo cual permite enviar en tiempo real los datos recolectados por los sensores y el estado del sistema a la nube. Esto facilita la visualización remota del funcionamiento del sistema desde una computadora o dispositivo móvil, así como el almacenamiento de los datos históricos del proceso que opera la desinfección de frutas y hortalizas.

Para que esta tecnología portátil para la desinfección de frutas y hortalizas pueda conectarse con la web, es necesario realizar una serie de pasos a través de la plataforma Arduino Cloud: primero, se crea una cuenta en dicha plataforma; posteriormente, se registra el microcontrolador ESP32 como dispositivo principal y se carga en él el código fuente del sistema. Luego, se ingresan el nombre y la contraseña de la red *Wi-Fi* a la que se conectará el dispositivo para habilitar la comunicación con la nube. Una vez conectado, el sistema permite visualizar en tiempo real los datos de los sensores desde un *dashboard* interactivo, así como almacenar automáticamente los datos históricos de operación.

Pruebas y ajuste

La Tabla 4 muestra datos históricos registrados por el sistema de desinfección de frutas y hortalizas en relación con los parámetros de nivel de agua (A), temperatura (B), pH (C) y turbidez (D). El sensor de nivel de agua (A) registra lecturas de la distancia que existe entre la posición del sensor de nivel y la superficie del agua en el depósito; en donde la distancia va disminuyendo a medida que el depósito de agua se va llenando hasta alcanzar la distancia de 15 cm (valor óptimo programado). En cuanto a la temperatura (B) los datos que se muestran corresponden a la temperatura del agua en el depósito antes, durante y después del calentamiento de agua por medio del calentador de agua que se desactiva al llegar al valor óptimo programado de 24.00 grados Celsius, temperatura a la cual se desempeña mejor el medio de desinfección.

El sensor de pH (C) registra el valor del pH del agua antes, durante y después de la dosificación de desinfectante por medio de una válvula de dosificación que se desactiva hasta llegar entre 8 y 9. Finalmente los datos registrados de turbidez (D) corresponden a la turbidez del agua durante la operación de desinfección de frutas y hortalizas. Al inicio, cuando el agua está limpia, los valores registrados son bajos. Conforme avanza el proceso y se acumulan sólidos suspendidos en el depósito de agua, la turbidez aumenta, reflejando que el agua se vuelve más opaca.

Tabla 4. Datos históricos de parámetros del sistema de desinfección de frutas y hortalizas.

Datos históricos capturados por el sistema				
Nivel de agua-cm (A)	Temperatura-°C (B)	pH (C)	Turbidez (NTU) (D)	% Turbidez
28.55	18.20	6.81	800.00	27
27.30	18.26	6.87	812.38	27
26.62	18.39	6.92	882.34	29
26.32	18.77	6.92	890.12	30
25.60	18.88	7.01	902.65	30
25.14	19.28	7.01	912.29	30
24.85	19.60	7.08	938.78	31
24.16	19.82	7.16	957.25	32
23.98	19.99	7.29	958.73	32
23.73	20.12	7.33	991.30	33
23.01	20.33	7.44	995.96	33
22.27	20.56	7.48	1016.20	34
21.74	20.77	7.52	1042.23	35
21.15	21.02	7.67	1059.42	35
21.00	21.25	7.88	1059.89	35
20.47	21.64	7.89	1066.82	36
20.92	22.30	8.04	1069.57	36
20.28	22.59	8.10	1093.60	36
19.44	22.75	8.12	1098.05	37
18.69	22.91	8.23	1106.93	37
18.04	23.27	8.31	1142.07	38
17.12	23.72	8.45	1159.37	39
16.86	23.88	8.69	1173.81	39
16.24	24.03	8.83	1180.02	39
15.47	24.20	8.90	1199.45	40
15.00*	24.00*	8.00*	1288.66	43
14.91	24.50	9.01	1639.25	55

*Valor optimo programado.

Fuente: Registros del sistema de desinfección.

La Figura 9 es una representación gráfica el funcionamiento del sistema de desinfección de frutas y verduras, en el que el agua entra a un depósito monitoreado en todo momento por los sensores de nivel de agua (A), temperatura (B), pH (C) y turbidez (D) que en conjunto con actuadores se controla la operación de la desinfección de frutas y hortalizas.

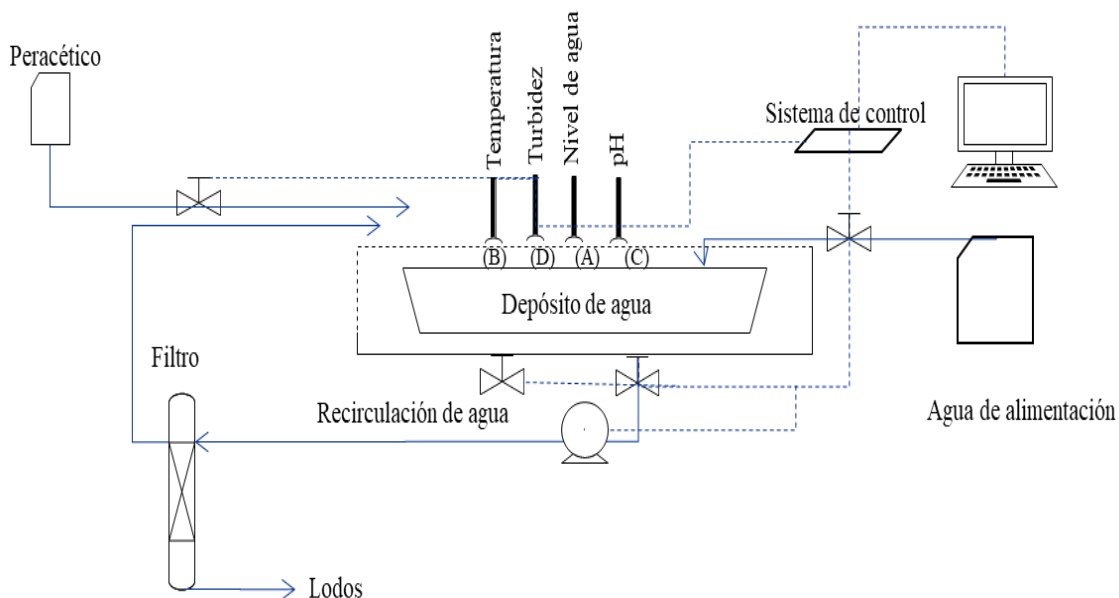


Figura 9. Diagrama esquemático del sistema de desinfección de frutas y hortalizas.

Costo de inversión en la fabricación del Sistema de Desinfección de Frutas y Hortalizas

En la Tabla 5 se describen los componentes y cantidades utilizados para la construcción del prototipo portátil diseñado para la desinfección de frutas y hortalizas, el monto total fue de \$11,975.83.

Tabla 5. Componentes del sistema portátil de desinfección de frutas y hortalizas.

Cantidad	Descripción
1	Arduino Uno
1	Esp32 Wifi + Bluetooth Esp32-wroom-32u Antena Externa 38 Pin
1	Shield Clemas conexión Tornillo Montaje Riel Din Esp32
1	Sensor de temperatura
1	Sensor De Distancia Ultrasonico A Prueba De Agua JSN-SR04T-2.0
1	Sensor de pH
1	Sensor de Turbidez
1	Módulo De Lectura Sd Card Para Arduino
1	Tarjeta de memoria Adata AUSDX64GUICL10A1-RA1 Premier con adaptador SD 64GB
1	Pantalla LCD 16x2 1602 con respaldo azul y módulo I2C para Arduino
2	Módulo de 4 relevadores
1	Walfront 5-30V a 1.25-30V DC Módulo De Fuente De Alimentación, DC-DC Step Up/Down Buck Convertidor Boost Converter, Regulador De Voltaje Convertidor Module
1	Fuente De Poder 12v 5a 60w -110/220Eliminador De Voltaje
1	Porta Fusible Clavija Reforzado Ensamblable Cal 14 Importado
5	Fusible automotriz 10A
1	Cable alimentación 127/220V
20	Tuerca hexagonal
20	Tornillo
2	Cable Estañado Un Polo Tira Led Calibre 22 10Metros Blanco
1	Rollo de Soldadura de estaño
1	Gabinete metálico para proyecto

1	Batería portátil
1	Modem 4G
2	Tina plástica 24 L
3	Adaptador macho 1/2 PVC
2	Adaptador hembra 1/2 PVC
3	Tubo PVC 1/2 Pulgada (m)
4	Unión universal cpvc
4	2 Pzas Electroválvula 1/2 Válvula Agua Solenoide 12v Arduino
1	Adaptador hembra PVC
1	Adaptador espiga PVC
1	Manguera de nivel (m)
1	Bomba De Agua De 12 Voltios 130Psi Autoprim Diafragma
1	Calentador de agua
6	Codo de unión PVC 1/2 Pulgada
1	Filtro de agua
1	Soporte de metal
1	Conector Glándula Pg11 Para Juntas Cable Contra Tuerca 25pz
1	Switch Rojo Con Luz Piloto Pack 10Piezas
1	Software Arduino IDE (Acceso libre)
1	Software Fritzing (Acceso libre)

Conclusiones

El desarrollo de la arquitectura portátil para el proceso de desinfección de frutas y hortalizas demuestra ser una alternativa viable y accesible frente a las tecnologías industriales de alto costo y complejidad. El sistema integró sensores, actuadores y microcontroladores que permitieron controlar en tiempo real parámetros críticos como nivel de agua, temperatura, pH y turbidez, asegurando condiciones óptimas de operación y reduciendo el consumo de agua mediante recirculación. La conexión con la nube a través de Arduino IoT Cloud facilitó el monitoreo remoto y el almacenamiento de datos históricos, lo que incrementa la trazabilidad y confiabilidad del proceso. Con un costo total de fabricación de 11,975.83 MXN, el sistema resulta significativamente más accesible que las soluciones comerciales centralizadas, lo que refuerza su potencial de adopción por productores rurales de pequeña escala que buscan mejorar la inocuidad alimentaria de sus productos. En este sentido, la tecnología propuesta no sólo aporta una solución técnica, sino que también representa una oportunidad estratégica para fortalecer la inserción de comunidades agrícolas en cadenas agroalimentarias más exigentes y competitivas.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada con el proyecto TECNM 22343.26-PD.

Referencias bibliográficas

- Barajas-Rodríguez, Marina; Nora Itzel Soto-Núñez; Adanely Escudero-Barrenechea; Fabiola Sánchez-Galván; Quirino Hernández-Santiago; Horacio Bautista-Santos. (2021) Análisis de la cadena de suministro de la flor de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.); caso de estudio. *Agro Productividad*, 13(3). <https://doi.org/10.32854/agrop.v13i3.1847>
- Bautista-Baños, S., Correa-Pacheco, Z. N., Ventura-Aguilar, R. I., Landa-Salgado, P., Cortés-Higareda, M., & Ramos-García, M. d. L. (2025). Traditional and recent alternatives for controlling bacterial foodborne pathogens in fresh horticultural commodities—A review. *Coatings*, 15(5), 597. <https://doi.org/10.3390/coatings15050597>
- Bautista-Santos, H., Sánchez-Galván, F., Sánchez-Partida, D., Martínez-Flores, JL., Ireta-Paredes, ADR (2021). Cadenas cortas inclusivas como estrategia para generar resiliencia en la actividad económica agrícola. En: Reducción del Riesgo de Desastres en México. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67295-9_16
- Bautista-Santos, Horacio; Joel Rodríguez Zúñiga; Yair Romero Romero; Fabiola Sánchez Galván & Gregorio Fernández Lambert. (2025). Agricultural Backyard Production in the Food Security Framework: A Case Study of a Microregion of Chicontepec Veracruz, Mexico. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v18i1.3104>
- Bernardino-Hernández, H. U., Martínez-Ortiz, S., Sánchez-Quintero, B., & Cruz-Castro, D. L. (2024). Pesticide exposure in the cultivation of *Carica papaya* L. and *Capsicum annuum* L. in Oaxaca: Active ingredients, knowledge, behaviors, and acute poisoning symptoms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(8), 1061. <https://doi.org/10.3390/ijerph21081061>
- Fernández-Echeverría, E., Lavoignet-Ruiz, M., García-Santamaría, L. E., Fernández-Lambert, G., Ruvalcaba-Sánchez, L., Bautista-Santos, H. & Romero-Romero, Y. (2024). Management of citrus cultivation in emerging rural communities in Mexico: Practices and challenges in the central-northern region of Veracruz. *Sustainability*, 16(20), 8732. <https://doi.org/10.3390/su16208732>
- Jin, Y., & Adhikari, A. (2025). Emerging and innovative technologies for the sanitization of fresh produce: Advances, mechanisms, and applications for enhancing food safety and quality. *Foods*, 14(11), 1924. <https://doi.org/10.3390/foods14111924>

- Montalvo-Romero, N., Montiel-Rosales, A., Fernández-Lambert, G., Aguilar-Lasserre, A. A., & García-Santamaria, L. E. (2024). Modelos Productivos de Agricultura Protegida desde la Agricultura Familiar. *AACINI - Revista Internacional De Ingeniería Industrial*, 3(2), 144-151. Recuperado a partir de <https://acortar.link/wsZNHt>
- Mordor Intelligence. (2025). *Mexican fruits and vegetables market—Growth, trends, and forecast (2025–2030)*. Mordor Intelligence. <https://acortar.link/SNM4ZF>
- Sánchez-Galván, Fabiola; Horacio Bautista-Santos; José Luis Martínez-Flores; Arely del Rocío Ireta-Paredes & Diana Sánchez-Partida. (2020) Cadena de suministro de productos agrícolas de traspatio. (2020). *Agro Productividad*, 13(8). <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1705>
- Sánchez-Galván, F., Bautista-Santos, H., Martínez-Flores, J. L., Sánchez-Partida, D., Ireta-Paredes, A. d. R. & Fernández-Lambert, G. (2019). Backyard Agricultural Production as a Strategy for Strengthening Local Economy: The Case of Chontla and Tempoal, Mexico. *Sustainability*, 11(19), 5400. <https://doi.org/10.3390/su11195400>
- SENASICA. (2025). *Heads up for producers and copackers of fresh produce in Mexico: Program for the surveillance of microbiological contaminants in vegetables from family farms and local growers*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/senasica>
- Soto Núñez, N. I., Escudero Barrenechea, A., Sánchez Galván, F., & Bautista Santos, H. (2020). Potencial económico de agricultura de traspatio a partir de un sistema de información geográfica en una microrregión de Tantoyuca, Veracruz. *EDUCATECONCIENCIA*, 27(28), 195–217. <https://doi.org/10.58299/edu.v27i28.276>
- USDA ERS. (2024). *Growth in Mexico’s horticultural exports to the United States continued even as new U.S. food safety laws took effect*. USDA Economic Research Service. <https://acortar.link/BQBraW>
- USDA Foreign Agricultural Service (FAS). (2024). *Mexico: Organic production and trade*. Global Agricultural Information Network (GAIN) Report No. MX2024-0030. United States Department of Agriculture. Disponible en: <https://www.fas.usda.gov/data>