

Sistema IoT-MQTT para la monitorización y notificación de alertas microclimáticas en cultivos agrícolas



Colaboración

Carlos Eduardo Rincón García, Patricia Elizabeth Figueroa Millán, Ismael Amezcua Valdovinos, Ramona Evelia Chávez Valdez; J. Reyes Benavides Delgado, Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán

Fecha de recepción: 25 de septiembre 2025

Fecha de aceptación: 28 de septiembre de 2025

RESUMEN: En México, la producción de limón alcanzó 3.2 millones de toneladas en 2023, lo que representó un incremento del 4.5 % respecto al año anterior. Esta cifra posiciona al país como el segundo productor y exportador de limón a nivel mundial. Sin embargo, el cultivo es altamente sensible a variaciones microclimáticas que pueden comprometer su productividad. En este contexto, se desarrolló un sistema inteligente capaz de monitorear variables ambientales en tiempo real y generar alertas ante condiciones críticas que afectan al cultivo. El sistema, basado en una arquitectura IoT con comunicación MQTT, recopila datos desde una estación meteorológica, los analiza mediante un filtro de Kalman y detecta eventos como valores atípicos, cambios abruptos o fallas de comunicación. Las alertas generadas se notifican al productor por SMS y se visualizan en una plataforma web diseñada para apoyar la toma de decisiones agronómicas de forma precisa y oportuna.

PALABRAS CLAVE: alertas microclimáticas, cultivos agrícolas, IoT, monitorización, MQTT.

ABSTRACT: In Mexico, lemon production reached 3.2 million tons in 2023, reflecting a 4.5% increase compared to the previous year. This figure places the country as the second largest producer and export of lemons worldwide. However, lemon crops are highly sensitive to microclimatic variations which can compromise its productivity. In this context, an intelligent system was developed capable of monitoring environmental variables in real time and generating alerts when critical conditions affect the crop. The system, based on an IoT architecture with MQTT communication, collects data from a weather station, analyzes it using a Kalman filter, and detects events such as outliers, abrupt changes, or communication failures. The generated alerts are notified to the producer via SMS and displayed on a web platform designed to support accurate and timely agronomic decision-making.

KEYWORDS: Microclimatic alerts, agricultural crops, IoT, monitoring, MQTT.

INTRODUCCIÓN

La agricultura, base de la economía y la seguridad alimentaria global, aportó 4.3 % del PIB mundial en 2022 y creció 2.6 % en 2023 [1]. En México, solo el 26 % de la superficie agrícola cuenta con riego, mientras que el 74 % restante, de temporal, se encuentra altamente expuesta a variaciones climáticas. En consecuencia, el 61 % de las unidades de producción registró pérdidas por factores climáticos o biológicos [2], y al 15 de agosto de 2024, el 34.7 % del territorio nacional presentaba sequía de moderada a excepcional [3]. En el cultivo de limón, el Gobierno Federal repor-

tó una disminución del rendimiento de 8.03 a 7.82 t/ha entre 2023 y 2024 [4]. En el estado de Colima, el limón es el cultivo perenne líder, con 22 651 ha y una producción de 231 843 t según el censo 2022 [5].

El impacto climático en la agricultura mexicana es evidente, sobre todo en los cultivos de temporal y cítricos. Las sequías prolongadas y las altas temperaturas han reducido la productividad de granos básicos como maíz y frijol [6], mientras que el cambio climático altera los patrones de lluvia y provoca pérdidas económicas significativas [7]. En el caso del limón, la producción nacional registró una caída cercana al 5 % en el ciclo 2023/2024, atribuida a la sequía y temperaturas extremas [8]. Dichas variaciones climáticas inciden directamente en los procesos fisiológicos del limón: la inducción floral se estimula con temperaturas frescas y déficit hídrico previo a la brotación, mientras que las altas temperaturas prolongadas afectan la floración y el cuajado, reduciendo el amarre de fruto [9]. En regiones del Pacífico mexicano, como Tecomán, Colima, la temperatura mínima y máxima regula el crecimiento y desarrollo del fruto [10]. Asimismo, la alta humedad y las noches húmedas tras el inicio de lluvias favorecen la aparición de *Alternaria* (mancha parda) [11],[12], mientras que los ambientes cálidos y secos incrementan la incidencia del ácaro rojo (*Panonychus citri*), plaga de relevancia regional [13]. El déficit hídrico del suelo durante la floración y el cuajado incrementa la abscisión y reduce el calibre y rendimiento del fruto; sin embargo, estudios en limón 'Fino' demuestran que el riego deficitario regulado (RDI) puede optimizar el uso del agua sin afectar la producción si se aplica fuera de las etapas críticas [14]. Por su parte, las rachas y vientos secos provocan la caída de flores y frutos y daños por roce en la cáscara, por lo que se recomienda el uso de cortinas rompevientos, especialmente cuando coinciden con altas temperaturas o sequía [15], [16]. Un desarrollo agrícola sólido es esencial para reducir la pobreza y garantizar la alimentación de una población mundial en crecimiento hacia 2050 [17]. Sin embargo, los métodos agrícolas tradicionales por sí solos no bastan, lo que ha impulsado una transformación digital del sector [18]. En México, la adopción de tecnologías digitales en las parcelas sigue siendo un reto; por ello, el Gobierno Federal promueve indicadores para acelerar la transferencia tecnológica y su adopción por los productores, esfuerzo reforzado por las iniciativas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), orientadas a medir y detonar la adopción tecnológica ante el cambio climático [19].

En este contexto, la agricultura experimenta una transformación digital acelerada bajo el paradigma de la Agricultura 4.0, impulsada principalmente por la adopción del Internet de las Cosas (IoT). El IoT se define como una red de dispositivos físicos, sensores y actuadores interconectados que recopilan, envían y analizan datos en tiempo real a través de internet, permitiendo

una toma de decisiones basada en información precisa en lugar de métodos empíricos tradicionales [20].

Durante la última década, diversos estudios han demostrado el potencial del IoT para revolucionar la gestión agrícola mediante la monitorización ambiental en tiempo real. Por ejemplo, [21] presenta una plataforma IoT de bajo costo y código abierto con control de actuadores y notificaciones casi en tiempo real; [22] y [23] implementaron sistemas similares en huertos urbanos e hidropónicos; mientras que [24] desarrolló una red de sensores IoT para invernaderos, mejorando la eficiencia y las decisiones productivas. En conjunto, la literatura y organismos internacionales coinciden en que el IoT constituye un pilar clave para incrementar la productividad agrícola de manera sostenible [25]. La integración de sensores de suelo y clima con plataformas digitales permite el monitoreo continuo del microclima (temperatura, humedad, velocidad del viento, entre otros). Diversos estudios demuestran que esta vigilancia constante optimiza el uso de agua e insumos y favorece respuestas oportunas a las condiciones ambientales, incrementando la eficiencia y productividad de los cultivos [22],[23]. Además, la comunicación inalámbrica de estos sensores se implementa mediante protocolos ligeros como MQTT, bajo una arquitectura publicista-suscriptor que asegura una transmisión fiable y de baja latencia, incluso en dispositivos con recursos limitados [26]. En conjunto, la evidencia respalda que el IoT y los protocolos de telemetría como MQTT constituyen la base de la agricultura inteligente para el monitoreo ambiental y la generación de alertas en tiempo real. No obstante, persiste una brecha significativa en la adopción de tecnologías digitales dentro del sector agrícola. A pesar de los avances, gran parte de los productores aún opera bajo esquemas tradicionales con monitoreo limitado, sin vigilancia en tiempo real de variables microclimáticas críticas como temperatura, humedad o velocidad del viento, lo que dificulta la respuesta oportuna ante cambios del entorno. Las decisiones de riego, fertilización y control de plagas continúan basándose en observaciones empíricas, sin datos actualizados, lo que deriva en una gestión ineficiente de recursos y respuestas tardías ante condiciones adversas [27].

Este contexto evidencia una brecha operativa y tecnológica: la limitada adopción de soluciones de monitoreo y alertas en tiempo real a nivel de cultivo. Los indicadores nacionales, las condiciones climáticas y la literatura revisada confirman esta brecha y respaldan la necesidad de evolucionar hacia sistemas agrícolas basados en datos. En respuesta, el presente trabajo propone un sistema IoT-MQTT para la monitorización y notificación automática de variables microclimáticas en cultivos de limón, mediante una red de sensores de bajo costo que registra en tiempo real temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y velocidad del viento, transmitiendo los datos a un bróker MQTT. A diferencia de enfoques previos, el sistema integra alertas automatizadas

cuando una variable excede los umbrales definidos, enviando notificaciones inmediatas a un cliente web supervisado por los responsables del cultivo.

En el caso del limón mexicano, cultivo estratégico para Colima, esta necesidad ha sido señalada por el Consejo Estatal de Productores de Limón (COEPLIM), ante las pérdidas derivadas de sequías, vientos cálidos y plagas favorecidas por dichas condiciones. La implementación busca promover acciones preventivas sistemáticas en lugar de correctivas, justificando así el desarrollo de un sistema IoT-MQTT con alertas microclimáticas, capaz de proporcionar información precisa y oportuna que fortalezca la resiliencia productiva del sector cítrico regional.

Revisión de la literatura

A continuación, se presenta un análisis de trabajos relacionados con el monitoreo de variables climáticas mediante IoT y protocolos como MQTT.

En [28] se evaluó un sistema inteligente de riego en plantaciones de limón, que combinó IoT y un sistema de apoyo a decisiones (DSS) para optimizar el riego a partir de datos de temperatura y humedad; sin embargo, su arquitectura dependía de conectividad móvil y presentó baja escalabilidad al operar con un solo nodo. En [29] se desarrolló un sistema IoT autónomo con sensores de pH, humedad y temperatura del suelo, transmisión vía ESP8266 y energía solar, cuyos datos se visualizaron en ThingSpeak; aunque funcional, carecía de análisis de anomalías, alertas y cobertura amplia.

Por su parte en [30] se propuso un sistema de riego inteligente con IoT, LoRa y Edge Computing, empleando la ecuación de Penman-Monteith y monitoreo vía MQTT; pese a su escalabilidad, no incluyó alertas ante eventos climáticos ni visualización histórica.

En [31] se presentó un sistema IoT con sensores multiparámetro y una aplicación basada en IA (Plantix) para recomendaciones agronómicas, aunque limitado a un solo cultivo (arroz) y dependiente de Wi-Fi.

Finalmente, en [32] se diseñó una plataforma de riego con IoT y LoRaWAN aplicada a olivares, logrando reducir el consumo de agua, pero sin incorporar sensores climáticos, detección de fallos o alertas automatizadas. A partir de las limitaciones identificadas en la literatura, la presente investigación propone un sistema de monitoreo y notificación de alertas microclimáticas que mejora la precisión, autonomía y capacidad de respuesta frente a condiciones críticas en cultivos agrícolas. A diferencia de estudios anteriores, el sistema integra sensores, análisis con filtro de Kalman unidimensional que se describe en la siguiente sección y un mecanismo de alertas en tiempo cuasi real por MQTT y SMS, cubriendo fallas de comunicación, valores fuera de rango y valores atípicos. Además, incorpora un cliente web con

visualización por periodos del día, historial de alertas y generación de reportes, aportando una solución escalable, adaptable y centrada en la toma de decisiones informadas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Como caso de estudio del presente trabajo se consideró al Consejo Estatal de Productores de Limón (COEPLIM), ubicado en Tecomán, Colima, México, organismo que agrupa a productores cítricos y colabora con instituciones de investigación para la transferencia de tecnología agrícola orientada a mejorar la productividad mediante prácticas innovadoras [33]; acorde con el cual y dada la influencia de las condiciones microclimáticas en el desarrollo de los cítricos, se identificó la necesidad de un sistema de monitoreo y alertas que apoye la toma de decisiones oportunas en el manejo del cultivo. La investigación se enmarca en el enfoque de investigación tecnológica propuesto por [34], orientado a la creación o mejora de sistemas y procesos, que sigue seis fases secuenciales:

- Planteamiento del estudio, donde se definieron el problema, objetivos y justificación;
- Marco teórico, que integró antecedentes y bases conceptuales;
- Hipótesis, con soluciones tentativas al problema planteado;
- Metodología, que estableció el plan de diseño y recursos;
- Implementación, correspondiente a la construcción y ejecución del sistema; y
- Evaluación, enfocada en la validación del prototipo y la comprobación de la hipótesis mediante resultados funcionales.

Para la fase de diseño e implementación del sistema, se adoptó el modelo de desarrollo en espiral propuesto en [35], por su carácter iterativo, su capacidad de gestionar riesgos tempranos y su flexibilidad para integrar mejoras progresivas. Este enfoque estructuró el desarrollo en cinco iteraciones que abarcaron planificación, análisis, prototipado, verificación y evaluación acumulativa.

En la fase inicial se definieron los objetivos, variables a medir y restricciones técnicas del sistema, identificando como necesidad principal el fortalecimiento del monitoreo microclimático en plantaciones de limón y la generación oportuna de alertas para la toma de decisiones agronómicas. Se realizó un análisis de riesgos que contempló posibles fallas de comunicación, errores de transmisión, ruido en las señales y pérdida de sincronización entre módulos, estableciendo como medidas correctivas la aplicación de un filtro de Kalman unidimensional y la implementación de alertas ante fallas de comunicación.

El filtro de Kalman es un algoritmo recursivo que estima el estado del sistema a partir de una secuencia de me-

diciones. Su objetivo es generar estimaciones óptimas de un proceso modelizado a partir de datos derivados de mediciones de procesos ruidosos Gaussianos [36]. El modelo dinámico del filtro de Kalman unidimensional viene definido por la ecuación de estado o transición (1, 2) y la ecuación de medición (3, 4, 5):

$$x_{t+1} = A x_t + B u_t \quad \text{Ec. (1)}$$

$$P_{t+1} = P_t + Q \quad \text{Ec. (2)}$$

$$K = \frac{P_t}{(P_t + R)} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$x_t = x_{t-1} + K(z_t - x_{t-1}) \quad \text{Ec. (4)}$$

$$P_t = (1 - K)P_t \quad \text{Ec. (5)}$$

En la etapa de ecuación de estado o transición, obtenemos una medición con ruido (1) y actualizamos el error de covarianza (2). Los parámetros de ruido y covarianza vienen dados por la sensibilidad del sensor DHT22 utilizado en el prototipo. Para la humedad se tiene margen de error de $\pm 5\%$, mientras que para la temperatura es de $\pm 0.2^\circ\text{C}$. Por lo tanto, la covarianza de cada una de las mediciones es 25 para la humedad y 0.04 para temperatura respectivamente.

Por otro lado, la etapa de medición actualiza la ganancia de Kalman (3), se realiza la actualización del estado tomando en cuenta la ganancia de Kalman, la medición actual z_t y el estado anterior x_{t-1} (4), y por último se actualiza la covarianza del sistema (5).

El filtro de Kalman es utilizado para evitar el envío de notificaciones cuando mediciones atípicas suceden en el sistema. Por ejemplo, La siguiente figura muestra el comportamiento inicial del sensor de temperatura antes de aplicar un estímulo, reflejando lecturas estables y sin variaciones significativas en las mediciones.

```
Datos sin filtrar: {
  temperature: "31.24",
  atmPressure: "1008.74",
  relHumidity: "60.35",
  windSpeed: "2.12",
  soilMoisture: "8.77"
}
Datos filtrados: {
  temperature: "31.23",
  atmPressure: "1008.59",
  relHumidity: "60.95",
  windSpeed: "2.13",
  soilMoisture: "8.77"
}
```

Figura 1. Medición de temperatura antes del estímulo.
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se aplicó un estímulo térmico controlado sobre el sensor para evaluar su respuesta. Como se observa en la siguiente figura, la temperatura ambiental se incrementó abruptamente tras la aplicación del estímulo, evidenciando la sensibilidad del sensor y el impacto de una perturbación directa en la variable física.

```
Datos sin filtrar: {
  temperature: "35.57",
  atmPressure: "1008.74",
  relHumidity: "56.14",
  windSpeed: "2.08",
  soilMoisture: "8.77"
}
Datos filtrados: {
  temperature: "34.39",
  atmPressure: "1008.72",
  relHumidity: "57.60",
  windSpeed: "2.11",
  soilMoisture: "8.77"
}
```

Figura 2. Medición de la temperatura durante el estímulo.
Fuente: Elaboración propia.

Para estabilizar las lecturas, se aplicó el filtro de Kalman unidimensional, cuyo propósito es suavizar las mediciones entrantes mediante la estimación basada en observaciones previas.

Este procedimiento permite reducir la variabilidad provocada por el ruido y distinguir incrementos reales en la variable medida respecto a fluctuaciones espurias.

En la siguiente figura se observa la respuesta del sistema después de aplicar el filtro, donde los datos se presentan más estables y coherentes con el comportamiento esperado.

```
Datos sin filtrar: {
  temperature: "39.56",
  atmPressure: "1008.74",
  relHumidity: "57.87",
  windSpeed: "2.33",
  soilMoisture: "8.77"
}
Datos filtrados: {
  temperature: "39.43",
  atmPressure: "1008.74",
  relHumidity: "57.64",
  windSpeed: "2.31",
  soilMoisture: "8.77"
}
```

Figura 3. Medición de temperatura después del suavizamiento de los datos con filtro de Kalman.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la comparación entre los datos sin filtrar y filtrados se muestra en la Figura 4. Se aprecia que el

filtro de Kalman amortigua las desviaciones bruscas y suaviza las variaciones rápidas causadas por ruido, evitando posibles alertas falsas y mejorando la fiabilidad del monitoreo microclimático del sistema IoT-MQTT.

Este comportamiento confirma la eficacia del algoritmo para mantener la coherencia de las lecturas y la estabilidad del sistema bajo condiciones de estímulo directo.

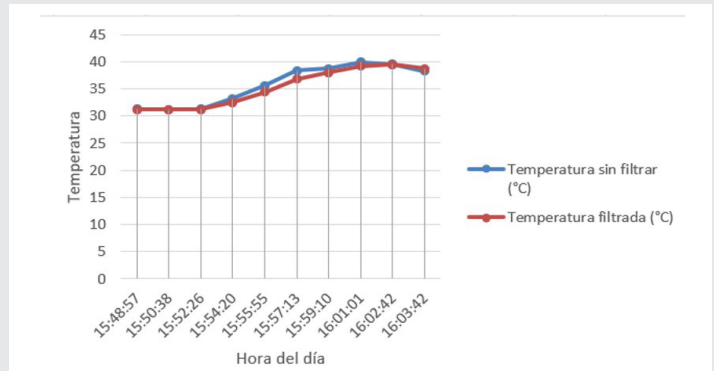


Figura 4. Gráfica de comportamiento del filtro de Kalman ante estímulo directo en el sensor de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el desarrollo técnico se estructuró en cinco iteraciones consecutivas:

Iteración 1. Construcción del primer prototipo funcional de la estación meteorológica con sensores y datalogger integrado. Se configuró la publicación de datos en formato JSON mediante MQTT y se desarrolló una versión inicial del cliente web conectada a una base de datos Supabase a través de una Raspberry Pi actuando como suscriptor.

Iteración 2. Mejora de la conectividad y gestión de datos, incorporando soporte Wi-Fi/GSM y un mecanismo inicial de notificaciones por MQTT y SMS. El cliente web integró la visualización del historial de alertas.

Iteración 3. Implementación del filtro de Kalman para suavizar lecturas y reducir ruido. Se optimizó la interfaz del cliente web, mejorando la visualización y las notificaciones en tiempo real.

Iteración 4. Consolidación de funcionalidades mediante la clasificación de alertas (valores fuera de rango, lecturas atípicas y fallas de comunicación) y ajuste de umbrales. Se fortaleció el cliente web con reportes, navegación histórica y pruebas continuas en campo.

Iteración 5. Incorporación de autenticación de usuarios y despliegue del sistema en producción (Vercel), habilitando el acceso remoto seguro y consolidando su operación como plataforma funcional para el COEPLIM.

Finalizadas las iteraciones, se avanzó a las fases de verificación, integración y pruebas funcionales, donde se

evaluó la estabilidad del sistema, la precisión del análisis de datos y la eficiencia en la entrega de alertas en tiempo real. Los resultados permitieron validar su aplicabilidad en campo y su contribución al manejo agrónomo del cultivo.

Alcance experimental

El diseño experimental del estudio se enfocó en la validación funcional del sistema IoT-MQTT en condiciones reales experimentales, pero aún no operativas de cultivo, con el objetivo de comprobar la estabilidad operativa, la integridad de la comunicación y la generación oportuna de alertas ante variaciones inducidas mediante estímulos físicos. En esta fase se evaluó la coherencia y fiabilidad del sistema, alcanzando un nivel de madurez tecnológica TRL-5, y se definió que la comparación con observaciones manuales se realizará como parte del trabajo futuro. Las lecturas de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y velocidad del viento se contrastaron con umbrales agronómicos de referencia documentados en la literatura (ver Introducción), validando el comportamiento esperado del sistema y delimitando su alcance tecnológico actual.

Arquitectura del sistema

En la Figura 5 se presenta el modelo conceptual del sistema, que describe la interacción entre sus componentes y el flujo de datos desde la adquisición de variables microclimáticas hasta la generación de alertas al usuario final.

El sistema se diseñó bajo una arquitectura publicista-suscriptor basado en IoT y MQTT, para garantizar la recolección precisa, el análisis en tiempo real y la notificación oportuna de alertas.

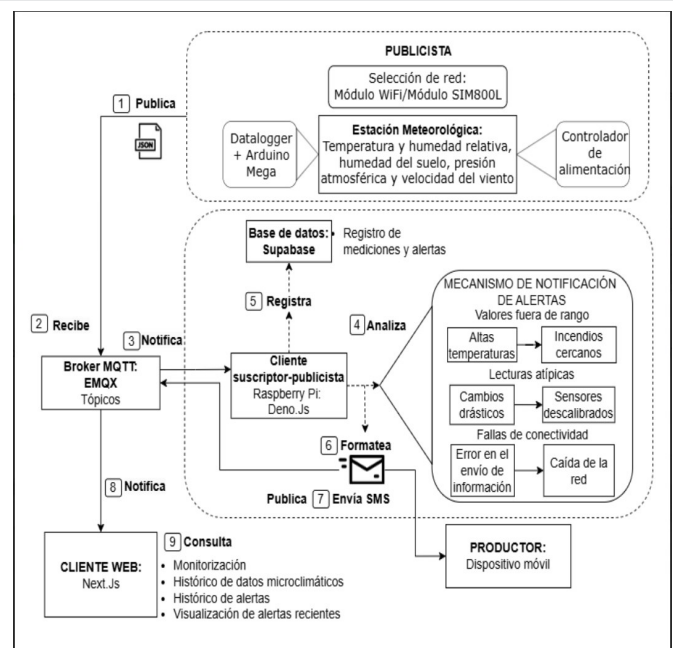


Figura 5. Arquitectura del sistema IoT.

Fuente: elaboración propia.

La estación meteorológica, con sensores de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, presión atmosférica y velocidad del viento conectados a un Arduino Mega, estructura las lecturas en JSON y las transmite vía Wi-Fi o SIM800L hacia un broker MQTT (EMQX), publicando los datos (1) en un tópico de sensor. El broker recibe (2) y distribuye (3) los mensajes a los suscriptores.

Una Raspberry Pi, programada en Deno.js, actúa como suscriptor, recibiendo los datos en tiempo real (3) y procesándolos (4) mediante un filtro de Kalman, que reduce el ruido y mejora la detección de eventos críticos. Posteriormente, el sistema compara los valores con umbrales preestablecidos y genera alertas clasificadas en tres tipos: valores fuera de rango, lecturas atípicas y fallas de conectividad.

Las lecturas y alertas se registran (5) automáticamente en una base de datos en la nube (Supabase), conformando un historial para análisis posterior. Las alertas se formatean (6) y publican (7) en un tópico MQTT exclusivo de notificaciones, permitiendo una suscripción diferenciada. De forma redundante, el sistema envía SMS al productor, asegurando la recepción aun con conectividad limitada. El broker reenvía las alertas (8) al cliente web.

El cliente web, desarrollado en Next.js, se suscribe al tópico de alertas y consulta (9) la base de datos para mostrar datos actuales e históricos. Su interfaz permite monitorear variables por periodos del día, visualizar notificaciones en tiempo real y generar reportes técnicos a partir de los registros almacenados.

Es importante destacar que la solución IoT descrita se apoya en la incorporación adicional de comunicación Wi-Fi considerando las condiciones típicas de campos agrícolas tecnificados y no tecnificados. La Tabla 1 presenta una comparación técnica de distintas tecnologías de comunicación igualmente viables para estos entornos, siempre que su selección se base en la infraestructura disponible.

Tabla 1: Comparativa de protocolos de comunicación inalámbrica.

Tabla 1. Fuentes de datos y herramientas utilizadas.

Fuente	Descripción	Propósito
NOAA GOES-R	Imágenes satelitales multiespectrales	Vigilancia atmosférica y oceánica
NOMADS	Modelos numéricos GFS	Análisis sinóptico y predicciones
Python + Satpy y Metpy	Procesamiento de imágenes satelitales	Generación de productos visuales
Django	Framework web backend	Interfaz de visualización PWA
React.js	Framework frontend	Interfaz de visualización de la PWA
PostgreSQL	Base de datos relacional	Almacenamiento de productos

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, Wi-Fi ofrece un bajo costo operativo cuando existe infraestructura disponible, razón por la cual se seleccionó para el caso de estudio. Aunque su consumo energético es elevado, se compensa mediante paneles solares que otorgan autonomía a la estación meteorológica y permiten un despliegue sencillo frente a otras tecnologías. Por su parte, la Tabla 2 muestra protocolos de aplicación alternativos; no obstante, se emplea MQTT por su eficiencia y escalabilidad, cualidades que fortalecen la arquitectura del sistema propuesto.

Tabla 2: Comparativa de protocolos de la capa de aplicación.

Criterio	MQTT [41]	CoAP [42]	HTTP [43]
Arquitectura	Publicista-suscriptor	Cliente-servidor Opción observe en GET	Cliente-servidor
Transporte	TCP	UDP	TCP
Escalabilidad	Alta - brokers con agrupamiento o balanceo, separación clara de roles	Media - para redes ligeras sin broker	Baja - dependencia de arquitectura de servidores HTTP
Integración de hardware	Alta - solo implementación de cliente MQTT y apuntar al broker	Media - cada dispositivo requiere gestionar sus propios endpoints observe	Baja - cada nodo necesita configuración de endpoint y pila HTTP limitando despliegues masivos
Acceso a recursos	Tópicos jerárquicos (sensores/1)	URI de recurso (/sensor)	URI de recurso (/sensores)
Garantía de entrega	QoS 0, 1 y 2 + garantías de TCP	CON/ACK	Garantías de TCP
Persistencia	Retención de mensajes/QoS persistente	No retiene notificaciones	Caché HTTP (opcional)
Overhead de cabecera	2 bytes	4 bytes	> 100 bytes
Consumo energético	Medio (keep alive + pub/sub)	Bajo	Alto (stateless + verboso)
Despliegue	Alto (brokers open source)	Medio (DTLS, menos librerías)	Muy alto (nativo web)

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Los resultados del sistema IoT-MQTT se enfocaron en la validación funcional y operativa del sistema para comprobar su viabilidad y estabilidad en condiciones experimentales reales, abarcando la recolección, procesamiento, transmisión y notificación de alertas microclimáticas. En esta fase, el estudio no contempló comparaciones con métodos tradicionales, dado que su alcance experimental (TRL-5) se centró en evaluar el desempeño tecnológico y la coherencia de los registros en tiempo real, más que en establecer métricas de precisión frente a observaciones manuales. Los resultados se agrupan en tres componentes: 1) Funcionamiento del sistema, basado en una arquitectura publicista-suscriptor, donde la estación meteorológica envía en tiempo real las variables microclimáticas; 2) Procesamiento y validación de datos en la Raspberry Pi, que registra información en Supabase, aplica un filtro de Kalman para reducir ruido y clasificar alertas, y

gestiona las notificaciones por SMS y MQTT mediante Twilio; 3) Visualización web, que presenta un tablero de indicadores y gráficos por variable, permitiendo interpretar tendencias y tomar decisiones con base en la información procesada.

La estación meteorológica envía en tiempo real las variables microclimáticas, registradas en tres periodos: mañana (7:00–8:00 h), tarde (14:00–15:00 h) y noche (19:00–20:00 h). Para garantizar la transmisión, se implementó un script de selección de red que detecta automáticamente la disponibilidad de Wi-Fi o red celular, evitando pérdida de información. Además, el sistema cuenta con un datalogger que almacena temporalmente los datos cuando no hay conectividad, asegurando su posterior envío.

Está compuesta (Figura 6) por un soporte de montaje con panel solar de 10 W/12 V, caja NEMA, y sensores DHT22 (temperatura y humedad relativa), BMP180 (presión atmosférica), SEN0170 (velocidad del viento) y CS625 (humedad del suelo). Incluye además un controlador de alimentación, un Arduino Mega para la gestión de señales, un módulo SIM800L con chip Telcel y antena externa para envío de SMS, y componentes de potencia asociados.



Figura 6. Construcción de estación meteorológica y sus componentes.

Fuente: Elaboración propia.

El cliente web permite visualizar las mediciones en tiempo real y consultar registros históricos, mediante un tablero interactivo (Figura 7) que muestra cada variable en tarjetas dinámicas con su valor actual.

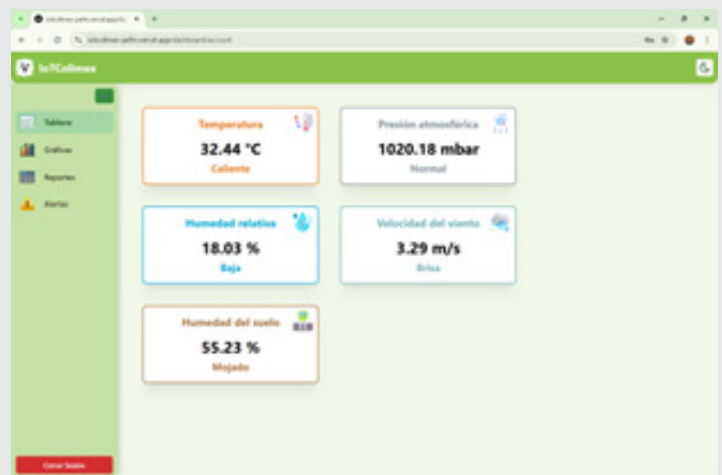


Figura 7. Dashboard de variables microclimáticas.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, el sistema dispone de un mecanismo de notificaciones flotantes (Figura 8) que alerta de condiciones anómalas detectadas en las mediciones. Las alertas recibidas desde el tópico MQTT se muestran de inmediato en la interfaz, indicando el tipo, variable afectada y valor registrado, para facilitar una respuesta rápida del usuario.



Figura 8. Notificación flotante de alerta registrada.

Fuente: Elaboración propia.

Pruebas experimentales

La validación del sistema se realizó en un entorno relevante, demostrando su viabilidad operativa y el correcto lanzamiento de alertas ante valores fuera del umbral permitido. Para ello, se aplicaron estímulos físicos a las variables de humedad del suelo y temperatura ambiental, con el fin de verificar el flujo completo de comunicación en la arquitectura MQTT, desde el publicista hasta el cliente web y móvil.

En la Figura 9 se muestra la disposición física del sensor de humedad del suelo, colocado en condiciones de

baja humedad, lo que provocó el envío de una alerta por valor fuera de rango al alcanzar un nivel inferior al 20 % de humedad.

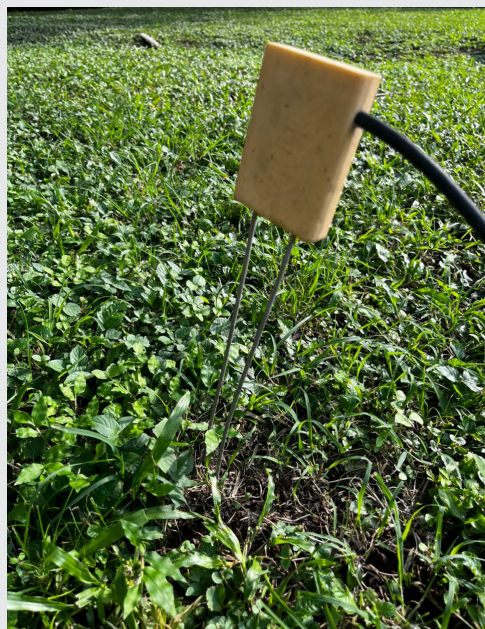


Figura 9. Sensor de humedad de suelo en estado de baja humedad.

Fuente: Elaboración propia.

Para esto, el cliente MQTT publicista (estación meteorológica) envía mediante publicación los datos muestreados de los sensores. Esta publicación se realiza en el tópic `GsmClientTest/data`. El cambio en el tópic permite que el broker EMQX realice la notificación al suscriptor, en este caso una Raspberry Pi, el cual analiza y procesa los datos para su registro, validación y generación de alertas. Considerando el cambio del sensor a una posición de baja humedad provocando una medición de 18.35 % de humedad, fuera del umbral establecido, el suscriptor generó la "alerta por valor fuera de rango", como se muestra en la Figura 10.

```
Mensaje publicado en IoTColimexAlert/data: [
{
  alert_id: 2,
  alert_type: 5,
  description: "Variable: Humedad del suelo,\n" +
    "Descripción: Humedad del suelo por debajo del rango permitido: 18.35%"
}
]
Mensaje enviado por WhatsApp.
(9/10/2025, 1:31:04 p.m.): Registro insertado desde estación
Alertas insertadas en Supabase correctamente.
(2025-10-09T13:31:04): Última alerta insertada
```

Figura 10. Formato de alerta visible para pruebas funcionales en consola de comandos de la Raspberry Pi.

Fuente: Elaboración propia.

El suscriptor detecta un valor por debajo del umbral permitido en la humedad del suelo y formatea un mensaje tipo JSON para lanzarlo como alerta cambiando su rol a publicista y publicar la alerta en el tópic `IoT-`

`ColimexAlert/data`. El cambio de estado en este tópic permite que el broker notifique al cliente Web, que implementa un cliente MQTT suscriptor, sobre la alerta como se observa en la Figura 11.

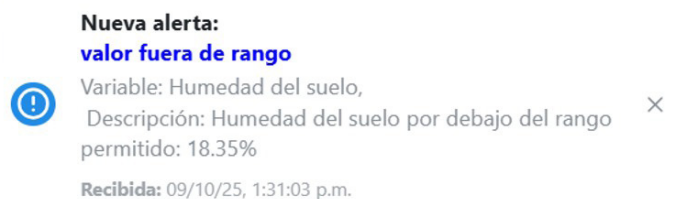


Figura 11. Captura de recepción de alerta por humedad del suelo baja en cliente web (notificación flotante).

Fuente: Elaboración propia.

La alerta se visualiza en el cliente web, mostrando un valor de 18.35% de humedad del suelo. Por otro lado, de manera paralela, se envía a través del servicio de Twilio desde la Raspberry Pi la alerta por Whatsapp, como se evidencia en la Figura 12.



Figura 12. Notificación por WhatsApp de alerta por humedad del suelo baja.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 12 muestra la recepción de alertas por WhatsApp, donde se visualizan los datos, fecha y hora de emisión, así como la hora de recepción en el dispositivo móvil, registrando un tiempo de respuesta de 4 s entre ambos eventos. Asimismo, se realizó una prueba de temperatura fuera de rango, aplicando un estímulo térmico con un mechero sobre el sensor instalado en la estación, como se observa en la Figura 13.

El estímulo provocado por el acercamiento del mechero a la zona de medición del sensor de temperatura, genera un aumento en la temperatura ambiental. Al realizarse durante un periodo de tiempo continuo, el sensor detecta valores que, al compararse con los umbrales establecidos, resultan elevados y fuera del

rango normal de medición; provocando así, que el sistema lance una alerta por temperatura fuera de rango permitido superando los 38.6°C.



Figura 13. Sensor de temperatura con estímulo para elevar la temperatura ambiental.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 14 muestra la alerta por temperatura elevada en el cliente web como notificación flotante. Ésta, al igual que para cualquier categoría y/o variable es visible en todas las secciones del cliente web. Se pueden apreciar los detalles de la alerta junto con el valor registrado, así como la estampa de tiempo en la que se recibió la alerta.



Figura 14. Alerta recibida en cliente web por temperatura fuera de rango.
Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo, la alerta también se recibe por WhatsApp tal y como se muestra a continuación.

Como se observa en la Figura 15, la alerta se recibe en WhatsApp con la información relacionada a la variable y sus valores capturados para el lanzamiento de la misma. Se aprecia, además, la fecha y hora de lanzamiento de la alerta dentro del mensaje y, además, se puede comparar con la hora de recepción del mismo mensaje de WhatsApp.



Figura 15. Notificación por WhatsApp de alerta por temperatura elevada.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Con el fin de resaltar las principales diferencias entre el sistema propuesto y las soluciones revisadas en la literatura, se elaboró una tabla comparativa. Esta muestra las funcionalidades clave implementadas en este trabajo y que no están presentes en los estudios seleccionados, evidenciando los aportes específicos de esta investigación en términos de análisis, notificación y visualización de datos microclimáticos.

Tabla 3. Datos comparativos.

Características	[28]	[29]	[30]	[31]	[32]	Sistema IoT propuesto
Detección de fallas de comunicación	X	X	X	X	X	✓
Análisis con filtro de Kalman	X	X	X	X	X	✓
Alertas por MQTT y SMS	X	X	X	X	X	✓
Segmentación temporal de datos	X	X	X	X	X	✓
Historial de alertas y mediciones	X	X	X	X	X	✓
Generación de reportes	X	X	X	X	X	✓
Visualización en dashboard web	X	X	✓	✓	✓	✓
Adaptabilidad a otros cultivos	X	X	✓	✓	✓	✓
Monitoreo de variables climáticas	✓	X	✓	X	X	✓

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los criterios comparativos seleccionados, se evidencia que el sistema propuesto incorpora elementos que no están presentes de manera conjunta en los trabajos revisados, como el análisis con filtro de Kalman, la detección de fallas de comunicación, la emisión de alertas en tiempo real mediante MQTT y SMS, y la segmentación temporal para la visualización de

datos. Estas características, sumadas a la integración de sensores ambientales, así como a una interfaz web con historial y generación de reportes, consolidan una solución robusta, adaptable y centrada en la mejora del proceso de toma de decisiones agronómicas.

CONCLUSIONES

Se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo y notificación de alertas microclimáticas para cultivos de limón, que integra tecnologías IoT, MQTT, junto con procesamiento de datos mediante un filtro de Kalman y mecanismos de alerta. El sistema detecta en tiempo real valores fuera de rango, lecturas atípicas y fallas de comunicación, notificando al usuario por Whatsapp y a través de una interfaz web con tablero de indicadores, visualización por periodos del día, historial y generación de reportes.

La validación funcional del sistema acorde con el nivel TLR-5 de maduración tecnológica, demostró la viabilidad operativa, estabilidad y coherencia de las mediciones en condiciones experimentales reales. Se comprobó un tiempo promedio de respuesta de 4 segundos entra la emisión y recepción de alertas, así como la reducción de ruido gracias a la implementación del filtro de Kalman, evitando falsas notificaciones y confirmando la confiabilidad del sistema hasta el momento. Estos resultados evidencian que la propuesta alcanza el objetivo propuesto y es viable técnicamente, proporcionando una arquitectura escalable, de bajo costo y de fácil extrapolación a otros cultivos agrícolas, fortaleciendo con esto su potencial en distintos escenarios agrícolas.

Como trabajo futuro, se contempla la validación agronómica en campo operativo de limón mexicano, integrando observaciones manuales y registros productivos para comparar la precisión del sistema frente a métodos tradicionales. Asimismo, se desarrollará un análisis estadístico de desempeño (errores, correlaciones y sensibilidad del filtro), la incorporación de modelos predictivos de eventos climáticos y la implementación de módulos inteligentes de recomendación técnica. Estos avances permitirán evolucionar el sistema hacia una plataforma integral de agricultura de precisión para el sector citrícola nacional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al SECIHTI, al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico de Colima y al comité académico por el apoyo brindado, en especial a la directora de tesis por su valiosa orientación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] FAO, "Gross domestic product and agriculture value added 2013–2022: Global and regional trends," Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2024. [Online]. Available: <https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-de->

[tail/gross-domestic-product-and-agriculture-value-added-2013-2022.-global-and-regional-trends/en](https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-de-tail/gross-domestic-product-and-agriculture-value-added-2013-2022.-global-and-regional-trends/en).

[2] INEGI, "Cuentas de Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca 2022," Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Comunicado de Prensa Núm. 431/23, Aguascalientes, México, 2023. [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_Def/CA_Def2022.pdf. [Accessed: Oct. 16, 2025].

[3] CONAGUA y SMN, "Monitor de Sequía en México, 15 de agosto de 2024," Comisión Nacional del Agua y Servicio Meteorológico Nacional, México, 2024. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/953281/Monitor_de_Sequ_a-15-Agosto-2024.pdf.

[4] SADER y SIAP, "Expectativas de Producción Agropecuaria: Limón, julio de 2024," Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural y Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, México, 2024. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/938466/Lim_n_Julio.pdf.

[5] INEGI, "Cuentas de Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca 2022. Colima," Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Comunicado de Prensa Núm. 432/23, Aguascalientes, México, 2023. [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_Def/CA_Def2022_Col.pdf.

[6] Cámara de Diputados, "Maíz y frijol: así los impacta la sequía en la agricultura", Revista Comunicación Social, Cámara de Diputados, México, 2024. [Online]. Available: <https://comunicacionsocial.diputados.gob.mx/revista/index.php/nuestros-centros/maiz-y-frijol-asi-los-impacta-la-sequia-en-la-agricultura>.

[7] PINCC-UNAM, "Afecta cambio climático agricultura de temporal en México," Programa de Investigación en Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, 2024. [Online]. Available: <https://www.pincc.unam.mx/afecta-cambio-climatico-agricultura-de-temporal-en-mexico/>.

[8] E. Morales, "Producción mexicana de cítricos disminuiría 1.5 %," El Economista, 4 de enero de 2024. [Online]. Available: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Produccion-mexicana-de-citricos-disminuiria-1.5-20240104-0086.html>.

[9] M. Agustí, C. Reig, A. Martínez-Fuentes, and C. Mesejo, "Advances in citrus flowering: A review," *Frontiers in Plant Science*, vol. 13, art. 868831, pp. 1–13, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.868831>.

- [10] INIFAP, "Biología y manejo integrado de antracnósis del limón mexicano en el trópico seco de México," *Compucampo.com*, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México, 2006. [Online]. Available: <https://www.compucampo.com/tecnicos/biologiamanejointegradoantracnósis-limonmexicano.pdf>.
- [11] M. M. Dewdney, "2024–2025 Florida Citrus Production Guide: Alternaria Brown Spot," EDIS, CPG ch. 37, CG021/PP-147, rev. 8/2025, University of Florida, Gainesville, FL, USA, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32473/edis-cg021-2023>.
- [12] M. Orozco-Santos, M. Robles, J. Velázquez-Monreal, M. Manzanilla-Ramírez, M. Bermúdez-Guzmán, S. Medrano, M. Medina-Urrutia, L. Hernández-Fuentes, R. Gómez-Jaimes, G. Manzo-Sánchez, J. Farías-Larios, D. Nieto-Angel, E. Mijangos-Hernández, J. Torre, and S. Varela-Fuentes, "El limón mexicano," Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México, 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/379052951_EL_LIMON_MEXICANO.
- [13] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, "Plagas y enfermedades comunes del limón," *gob.mx*, México, 2021. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/plagas-y-enfermedades-comunes-del-limon>.
- [14] J. G. Pérez-Pérez, J. M. Robles, F. García-Sánchez, and P. Botía, "Comparison of deficit and saline irrigation strategies to confront water restriction in lemon trees grown in semi-arid regions," *Agricultural Water Management*, vol. 164, pp. 46–57, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.015>.
- [15] University of California, "Fruit drop of citrus," *Ucanr.edu*, Statewide Integrated Pest Management Program, 2025. [Online]. Available: <https://ipm.ucanr.edu/home-and-landscape/fruit-drop-of-citrus/>.
- [16] UF/IFAS, "Windbreaks2 – Citrus Research and Education Center (CREC) – University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences," *Ufl.edu*, University of Florida, Gainesville, FL, USA, 2025. [Online]. Available: <https://crec.ifas.ufl.edu/extension/windbreaks2/>.
- [17] Banco Mundial, "Agricultura y alimentación: Panorama general," *worldbank.org*, 2024. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/topic/agriculture/overview#1>.
- [18] H. Majeed, W. Azeem, A. A. Malik, U. Ahmad, and H. Sultan, "Cultivating innovation: An in-depth exploration of IoT and AI in smart agriculture," *Pakistan Journal of Scientific Research*, vol. 4, no. 1 Suppl., pp. 119–130, 2024.
- [19] INIFAP, "Adopción tecnológica ante el cambio climático y la seguridad alimentaria," Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México, 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/inifap/articulos/adopcion-tecnologica-ante-el-cambio-climatico-y-la-seguridad-alimentaria>.
- [20] Amazon Web Services (AWS), "¿Qué es IoT? – Internet de las cosas explicado," *aws.amazon.com*, [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/>.
- [21] N. N. Thilakarathne, M. S. Abu Bakar, P. E. Abas, and H. Yassin, "Towards making the fields talk: A real-time cloud enabled IoT crop management platform for smart agriculture," *Frontiers in Plant Science*, vol. 13, art. 1030168, pp. 1–12, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030168>.
- [22] G.-E. Chanchí-Golondrino, M.-A. Ospina-Alarcón, and M. Saba, "Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana," *Revista Científica*, vol. 44, no. 2, pp. 257–271, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14483/23448350.18470>.
- [23] M. Montaña-Blacio, J. González-Escarabay, O. Jiménez-Sarango, L. Mingo-Morocho, and C. Carrión-Aguirre, "Diseño y despliegue de un sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos hidropónicos," *Ingenius*, no. 30, pp. 9–18, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.01>. [Accessed: Oct. 16, 2025].
- [24] D.-I. Săcăleanu, M.-G. Matache, Ș.-G. Roșu, B.-C. Florea, I.-P. Manciu, and L.-A. Perișoară, "IoT-Enhanced Decision Support System for Real-Time Greenhouse Microclimate Monitoring and Control," *Technologies*, vol. 12, no. 11, art. 230, pp. 1–17, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/technologies12110230>.
- [25] Food and Agriculture Organization (FAO), "Possibilities of the Internet of Things (IoT) in agriculture," *FAO e-Agriculture*, 2017. [Online]. Available: <https://www.fao.org/e-agriculture/news/possibilities-internet-things-iot-agriculture>.
- [26] C. E. Blázquez Gutiérrez, P. E. Figueroa Millán, I. Amezcua Valdovinos, R. E. Chávez Valdez, and S. Arceo Díaz, "Diseño arquitectural de sistema IoT para monitorización de condiciones climáticas en cultivos de limón mexicano," *FE-*

GLININ, vol. 3, no. 4, pp. 56–62, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/375606175>.

[27] M. C. Abad Alay, M. A. Méndez García, and O. Erazo Moreta, "Tecnología de Internet de las Cosas en el monitoreo de cultivos agrícolas," *Revista Odigos*, vol. 4, no. 3, pp. 69–93, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35290/ro.v4n3.2023.939>.

[28] H. Zia, A. Rehman, N. R. Harris, S. Fatima, and M. Khurram, "An experimental comparison of IoT-based and traditional irrigation scheduling on a flood-irrigated subtropical lemon farm," *Sensors*, vol. 21, no. 12, art. 4175, pp. 1–14, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s21124175>.

[29] D. Sabu, P. Alagumariappan, V. Sankaran, and P. S. K. R. Pittu, "Design and development of Internet of Things-based smart sensors for monitoring agricultural lands," *Engineering Proceedings*, vol. 58, no. 13, art. 16207, pp. 1–6, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16207>. [Accessed: Oct. 16, 2025].

[30] Y. Zhang, X. Wang, L. Jin, J. Ni, Y. Zhu, W. Cao, and X. Jiang, "Research and development of an IoT smart irrigation system for farmland based on LoRa and edge computing," *Agronomy*, vol. 15, no. 2, art. 366, pp. 1–15, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/agronomy15020366>. [Accessed: Oct. 16, 2025].

[31] H. Shahab, M. Naeem, M. Iqbal, M. Aqeel, and S. S. Ullah, "IoT-driven smart agricultural technology for real-time soil and crop optimization," *Smart Agricultural Technology*, vol. 10, art. 100847, pp. 1–11, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100847>. [Accessed: Oct. 16, 2025].

[32] A. Liopa-Tsakalidi, V. Thomopoulos, P. Barouchas, A. D. Boursianis, and S. K. Goudos, "A LoRaWAN-based IoT platform for smart irrigation in olive groves," *Smart Agricultural Technology*, vol. 9, art. 100673, pp. 1–12, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100673>. [Accessed: Oct. 16, 2025].

[33] Consejo Estatal de Productores de Limón, "Nosotros," COEPLIM, [Online]. Available: <https://www.coeplimcolima.com/nosotros>. [Accessed: Mar. 28, 2025].

[34] C. De la Cruz Casaño, "Metodología de la investigación tecnológica en ingeniería," *Revista Ingenium*, vol. 1, no. 1, pp. 43–46, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.18259/ing.2016007>.

[35] B. W. Boehm, "A spiral model of software development and enhancement," *IEEE Computer*, vol. 21, no. 5, pp. 61–72, 1988. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/2.59>.

[36] I. Christakis, O. Tsakiridis, D. Kandris, and I. Stavrakas, "A Kalman Filter Scheme for the Optimization of Low-Cost Gas Sensor Measurements," *Electronics*, vol. 13, no. 1, art. 25, pp. 1–15, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics13010025>.

[37] LoRaWAN®, "The Things Network," [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>.

[38] Digi International, "What is Zigbee? Learn about Zigbee wireless mesh technology," *digi.com*, Jul. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.digi.com/solutions/by-technology/zigbee-wireless-standard>.

[39] IEEE Standards Association (IEEE SA), "The Evolution of Wi-Fi Technology and Standards," *ieee.org*, 2023. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/beyond-standards/the-evolution-of-wi-fi-technology-and-standards/>.

[40] A. S. Gillis, D. Jones, and K. Beaver, "LTE (long-term evolution)," *Search Mobile Computing*, TechTarget, Mar. 9, 2023. [Online]. Available: <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/Long-Term-Evolution-LTE>.

[41] "MQTT – The Standard for IoT Messaging," *mqtt.org*, [Online]. Available: <https://mqtt.org/>.

[42] "CoAP Protocol: Features, use cases, pros & cons for IoT," *emqx.com*, [Online]. Available: <https://www.emqx.com/en/blog/coap-protocol>.

