

Aplicación de internet de las cosas (IoT) para entornos de invernadero optimizados

Application of internet of things (IoT) for optimized greenhouse environments

Chrysanthos Maraveas  y Thomas Bartzanas† 



Acceso Abierto

Correspondencia:

t.bartzanas@aua.gr
Laboratorio de Estructuras Agrícolas,
Departamento de Recursos Naturales
e Ingeniería Agrícola, Universidad
Agrícola de Atenas, 11855 Atenas,
Grecia.

Sometido:
09-01-2022
Aceptado para publicación:
17-10-2022
Publicado on line:
01-12-2022

Palabras clave:

Agricultura; agricultura
inteligente; Internet de las
Cosas; invernaderos;
tecnología.

Keywords:

Agriculture; greenhouses;
intelligent farming; Internet of
Things; technology.

Citación:

Maraveas C, Bartzanas T. Aplicación de internet de las cosas (IoT) para entornos de invernadero optimizados. *Magna Scientia UCEVA* 2022; 2:2 260-275. <https://doi.org/10.54502/msuceva.v2n2a11>

Resumen

Esta revisión presenta la investigación más avanzada sobre sistemas IoT para entornos de invernadero optimizados. Los datos fueron analizados usando métodos descriptivos y estadísticos para inferir relaciones entre Internet de las cosas (IoT), tecnologías emergentes, agricultura de precisión, agricultura 4.0 y mejoras en la agricultura comercial. La discusión se sitúa en el contexto más amplio de IoT en la mitigación de los efectos adversos del cambio climático y el calentamiento global en la agricultura a través de la optimización de parámetros críticos como la temperatura y la humedad, la adquisición inteligente de datos, el control basado en reglas y la resolución de las barreras para la adopción comercial de sistemas IoT en la agricultura. Los recientes eventos meteorológicos severos e inesperados han contribuido a los bajos rendimientos y pérdidas agrícolas; este es un desafío que se puede resolver a través de la agricultura de precisión mediada por tecnología. Los avances tecnológicos han contribuido con el tiempo al desarrollo de sensores para la prevención de heladas, el control remoto de cultivos, la prevención de riesgos de incendio, el control preciso de nutrientes en cultivos de invernadero sin suelo, la autonomía energética mediante el uso de energía solar y la alimentación, el sombreado y la iluminación inteligentes. control para mejorar los rendimientos y reducir los costos operativos. Sin embargo, abundan los desafíos particulares, incluida la adopción limitada de tecnologías inteligentes en la agricultura comercial, el precio y la precisión de los sensores. Las barreras y los desafíos deberían ayudar a guiar futuros proyectos de investigación y desarrollo y aplicaciones comerciales.

Abstract

This review presents the state-of-the-art research on IoT systems for optimized greenhouse environments. The data were analyzed using descriptive and statistical methods to infer relationships between the Internet of Things (IoT), emerging technologies, precision agriculture, agriculture 4.0, and improvements in commercial farming. The discussion is situated in the broader context of IoT in mitigating the adverse effects of climate change and global warming in agriculture through the optimization of critical parameters such as temperature and humidity, intelligent data acquisition, rule-based control, and resolving the barriers to the commercial adoption of IoT systems in agriculture. The recent unexpected and severe weather events have contributed to low agricultural yields and losses; this is a challenge that can be resolved through technology-mediated precision agriculture. Advances in technology have over time contributed to the development of sensors for frost prevention, remote crop monitoring, fire hazard prevention, precise control of nutrients in soilless greenhouse cultivation, power autonomy through the use of solar energy, and intelligent feeding, shading, and lighting control to improve yields and reduce operational costs. However, particular challenges abound, including the limited uptake of smart technologies in commercial agriculture, price, and accuracy of the sensors. The barriers and challenges should help guide future Research & Development projects and commercial applications.



Introducción

Este artículo de revisión sintetiza la investigación académica actual sobre la aplicación de IoT para entornos de invernadero optimizados con énfasis en microclimas optimizados y mediados por IoT para la producción de cultivos. El enfoque en IoT se basa en la inmensa contribución de la tecnología a las civilizaciones modernas después de las computadoras e Internet [1].

La inmensa contribución de IoT en la agricultura y los invernaderos comerciales podría vincularse a la integración de máquinas inteligentes, actuadores, sensores, sistemas aéreos no tripulados, dispositivos de identificación por radiofrecuencia (RFID), análisis de big data, inteligencia artificial y satélites [2], y esto ha facilitado su aplicación generalizada en diversas agriculturas y aplicaciones no agrícolas, incluida la agricultura inteligente y la prevención de heladas en invernaderos [3], control inteligente de estructuras de invernaderos [4], prevención de riesgos de incendio [5], transición a la agricultura 4.0 [6], control preciso de nutrientes en invernaderos sin suelo cultivo [7], ciudades inteligentes [8,9], monitoreo de emisiones [10], almacenamiento de energía distribuido/descentralizado, sensores alimentados por energía solar [11], alimentación inteligente, control de iluminación y sombreado, y seguridad [12-14]. La adopción generalizada de IoT en invernaderos inteligentes y agricultura de precisión se ha visto incrementada en parte por el desarrollo de protocolos de comunicación altamente eficientes como el Protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), que ha eliminado gradualmente HTTP (Protocolo de transferencia de hipertexto) [15]. MQTT es capaz de ejecutarse en un ancho de banda más bajo, lo que se traduce en protocolos de sobrecarga más bajos.

A pesar de la adopción generalizada de los sistemas IoT en los invernaderos inteligentes, no se ha entendido bien cómo la tecnología puede optimizar los entornos de los invernaderos, especialmente en las regiones tropicales que experimentan fluctuaciones severas de temperatura. La mayor parte de la investigación y el desarrollo se ha localizado en países desarrollados, con acceso directo a sistemas y recursos de IoT. Además de las lagunas en la comprensión, la contribución de los sistemas IoT en invernaderos inteligentes en regiones tropicales es inadecuada.

Tecnologías inteligentes emergentes y sus efectos dominó en la agricultura de precisión

Existen múltiples tecnologías emergentes que se prevé tendrán un impacto significativo en el futuro de la agricultura de precisión. Las tecnologías que tendrían el impacto más notable incluyen computación en la nube, computación de borde, computación de nube, software integrado, sistemas integrados, sistemas ciberfísicos (CPS), redes de sensores inalámbricos (WSN), puerta de enlace de Big Data, máquina a máquina (M2M), humano a máquina (H2M), protocolo LoRa (LoRaWAN), identificación por radiofrecuencia ZigBee/Z-Wave (RFID), servicio general de radio por paquetes de puerta de enlace (GPRS), interfaz de programación de aplicaciones (API), estándar de cifrado avanzado (AES) y Gemelos digitales. La intersección de las diferentes TIC, computación en la nube, WSN, geolocalización, satélites e interfaces de computadora a humano que se ilustra en la figura 1. El papel potencial de estas tecnologías en la conservación del agua y la energía y los beneficios a largo plazo. en los invernaderos se consideran brevemente.

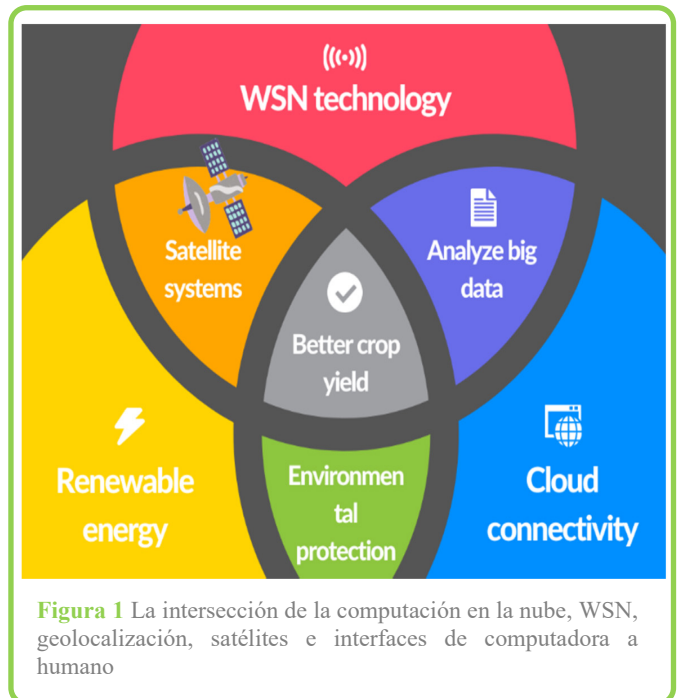


Figura 1 La intersección de la computación en la nube, WSN, geolocalización, satélites e interfaces de computadora a humano

Se ha demostrado que la computación en la nube es útil en invernaderos inteligentes y agricultura de precisión [16-19]. El almacenamiento de datos de sensores en la nube y la integración con tecnologías inteligentes para el monitoreo remoto de los niveles de agua de las plantas, el

contenido nutricional, el pH del suelo, la humedad y la temperatura se ha traducido en importantes ahorros de costos y mejoras en los rendimientos [18]. Los caminos hacia una mayor eficiencia son multidimensionales. Por ejemplo, los agricultores pueden acceder a datos históricos de análisis predictivo de instituciones [20] y utilizar los datos para establecer tendencias de oferta y demanda en diferentes mercados de productos. Los datos predictivos también brindan a los agricultores información en tiempo real sobre las condiciones climáticas, mitigando así los efectos adversos del cambio climático y el calentamiento global. Sin embargo, existen inconvenientes críticos asociados con el uso extendido de la computación en la nube en áreas con cobertura de red insuficiente y bajas velocidades de Internet.

La carga y descarga frecuente de datos da como resultado una transmisión lenta de los datos. El desafío puede compensarse en parte mediante la incorporación de la computación perimetral. Zhang et al. [21] confirmaron que la computación perimetral podría compensar la tensión en la infraestructura de la red al compartir la carga del servidor en la nube; esto, a su vez, se tradujo en una menor demora. La eliminación de las limitaciones tecnológicas aumenta las áreas potenciales de aplicación de IoT, especialmente en la gestión inteligente de cultivos y maquinaria agrícola, la seguridad en la trazabilidad de los productos agrícolas e identificación de plagas. La evaluación positiva del papel de la computación perimetral por parte de Zhang et al. [21] es consistente con Akhtar et al. [22] y O'Grady et al. [23]. Ambos estudios coincidieron en que la informática perimetral tendría un impacto positivo en la industria agrícola. A diferencia de la computación en la nube en la agricultura, que está bien fundamentada, la computación perimetral es una aplicación emergente; la computación de borde es un campo naciente. En 2021, los primeros prototipos de computación de borde aún estaban en desarrollo. Además, no existía una validación confiable y generalizada de los servicios basados de computación de borde en las granjas. Incluso si las tecnologías estuvieran disponibles, surgirían nuevos desafíos especialmente en la estandarización de las plataformas IoT [23]. La novedad de la computación perimetral junto con los inconvenientes de la computación en la nube ilustra claramente que el futuro de la IoT en la agricultura depende de los avances tecnológicos globales y las inversiones en investigación y desarrollo.

IoT y la mitigación de los efectos adversos del cambio climático en la agricultura

La agricultura tradicional se caracteriza por una interacción humana innecesaria que resulta en costos laborales más altos y susceptibilidad a eventos climáticos severos debido a la integración limitada de los sistemas de soporte de decisiones basados en datos. IoT ofrece un respiro a través de medidas de ahorro de agua y energía basadas en la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, las operaciones agrícolas automatizadas y mecanización para resolver los desafíos de monitoreo de los cultivos [24,25]. El papel de la tecnología en el futuro de la agricultura no puede negarse a la luz de los efectos adversos del calentamiento global y el cambio climático en la producción mundial de alimentos y la seguridad alimentaria. Eventos climáticos inusuales como las temperaturas extremas y las precipitaciones, se han asociado con una reducción significativa en la producción agrícola de los EE.UU. y otras naciones.

En 2012, los agricultores de cerezas en el Estado de Michigan-EE.UU., perdieron aproximadamente 220 millones de dólares estadounidenses debido a cambios climáticos severos [26]. Se anticipa que las pérdidas agrícolas relacionadas con el clima persistirán a largo plazo, considerando que las plagas, los hongos y las bacterias prosperan mejor en condiciones de clima cálido. Estimaciones conservadoras indican que los agricultores gastarían 11000 millones de dólares más cada año para combatir plagas y enfermedades debido al cambio climático [26]. Cualquier aumento en el costo de producción, tendría un mayor efecto adverso en las comunidades agrarias de los países en desarrollo [27]. El impacto de los factores relacionados con el clima en la agricultura no se limitaría a los agricultores, dado que los costos adicionales se trasladarían a los consumidores. El problema no era exclusivo de Estados Unidos o de las economías avanzadas del hemisferio occidental. Kava et al. observó desafíos similares observados en Grecia, donde la superficie de tierra cultivable ha disminuido [28]. La alteración de los patrones meteorológicos relacionada con el cambio climático, junto con factores sociodemográficos, ha contribuido a una grave escasez de alimentos y desnutrición [27]. La diversidad de los desafíos en las naciones desarrolladas y emergentes subraya la necesidad de soluciones innovadoras y tecnológicas para mitigar las perturbaciones en la agricultura inducidas por el cambio climático.

Se han explorado múltiples opciones en el pasado reciente, incluida la agricultura basada en invernaderos. A partir de 2021, existen 60000 acres de invernaderos en Grecia, y la distribución se concentró en áreas que se vieron significativamente afectadas por el cambio climático y el calentamiento global, como Messara, Ierapetra y Creta [28,29]. Las naciones del Golfo con tierras cultivables limitadas adoptaron modelos similares. A partir de 2016, 3019 ha estaban bajo invernaderos en Arabia Saudita, produciendo alrededor de 252 824 toneladas de hortalizas y frutales [7]. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC), pronostica que los precios de la producción agrícola aumentarán entre un 1% y un 29% para el año 2050 [30].

Los desafíos asociados con el cambio climático en la agricultura podrían compensarse en parte con la optimización de los entornos de invernaderos que utilizan IoT; esto significa que las tecnologías avanzadas serían indispensables para las cadenas mundiales de suministro de alimentos [28].

Las posibles soluciones basadas en IoT para los desafíos agrícolas modernos se centrarían en las cuatro áreas críticas de la aplicación de sistemas IoT en agricultura e invernaderos inteligentes, a saber, el mantenimiento de un microclima ideal para el crecimiento ideal de las plantas, mejores prácticas de riego y fertilización, control de infecciones y mayor seguridad [31]. La seguridad en la producción agrícola podría lograrse utilizando cámaras infrarrojas, vehículos/sistemas aéreos no tripulados para monitoreo remoto [2], monitores ópticos, infrarrojos y sensores térmicos colocados estratégicamente en grandes fincas para mitigar las pérdidas de cultivos debido a la invasión de vida silvestre (como aves, cabras y búfalos) [32,33]. El uso de la seguridad inteligente como una herramienta de solución informática, está en aumento debido a consideraciones de costos: los sensores para el monitoreo remoto junto con la robótica y los grandes datos son asequibles y eficientes en comparación con el trabajo humano [34]. Los sensores disponibles comercialmente han demostrado que era factible reducir costos y mejorar la eficiencia a través de la tecnología.

Un objetivo clave para avanzar sería minimizar las intervenciones manuales, mejorar los rendimientos y optimizar el uso de recursos y agroquímicos [35,36]. Sin embargo, la actualización de los beneficios potenciales asociados a los sensores, dependería de la optimización de parámetros específicos y la integración de sensores precisos para monitorear el contenido de agua y humedad

así como la fisiología de la planta [35]. Los hallazgos preliminares muestran que los sistemas IoT ofrecen una gran promesa en la agricultura de precisión. Por ejemplo, los sistemas de apoyo a la toma de decisiones basados en datos meteorológicos alertaron a los agricultores cuándo era más apropiado aplicar fungicidas [37]. La aplicación oportuna de fungicidas ayudó a mitigar el riesgo de tizón, y esto se tradujo en un ahorro significativo de costos directos alrededor de 500 USD/acre [37]. Se documentaron beneficios similares con la adopción de sistemas de apoyo a la toma de decisiones basados en datos meteorológicos junto con sensores de capacitancia eléctrica para el balance suelo-agua y contenido suelo-agua. El diseño se tradujo en un ahorro del 25% en los costos de riego para los productores de trigo. La tecnología también resultó útil en la aplicación de fertilizantes utilizando sensores ópticos que analizaban el contenido de clorofila de la planta (un predictor de los niveles de nitrógeno de la planta). Las plantas con mayor deficiencia significativa de nitrógeno, recibía mayores cantidades de fertilizante rico en nitrógeno [37]; esto resultó en la utilización óptima de fertilizantes y mayores rendimientos.

Khudoyberdiev et al. y la evaluación de Miller y Cappuccio [35-38] de la relación costo-beneficio de los sensores en invernaderos está en línea con lo reportado por Agrawal y Kate [39], quienes afirmaron el vínculo entre los sensores y el rendimiento del producto. En promedio, la producción agrícola basada en invernaderos, mejora los rendimientos entre un 10 y un 12% [5]; esto está respaldado por la evidencia empírica: los invernaderos en Arabia Saudita produjeron 252824 toneladas de hortalizas y frutas en 2016 [7]. Las formas actuales de sistemas IoT para la agricultura de precisión estaban menos adaptadas a las regiones semiáridas [40]; esto significa que la funcionalidad de los sensores en las zonas desérticas sigue siendo motivo de preocupación. En el lado negativo, existe poca evidencia de adopción de tecnología y agricultura de precisión en los países en desarrollo [41]. La mala adopción de las innovaciones emergentes en los países en desarrollo ayuda a explicar los bajos rendimientos constantes, lo que contribuye a las brechas en la seguridad alimentaria entre las naciones desarrolladas y emergentes. El encomiable progreso documentado en Grecia, Arabia Saudita [7] y otros países, a pesar de las limitaciones tecnológicas relacionadas con el clima y el clima, valida la necesidad de una agricultura inteligente e inteligente para mejorar el rendimiento de los cultivos en países emergentes y países desarrollados con variaciones extremas de temperatura.

El caso de soluciones e intervenciones personalizadas se vio reforzado por las posibles mejoras en los rendimientos. Las mejoras estándar en los rendimientos oscilan entre el 10 y el 12% [5], pero se puede lograr un mejor rendimiento mediante la optimización de los factores de crecimiento de las plantas, los avances tecnológicos en la confiabilidad de los sensores y el control de costos. Por ejemplo, las explotaciones con invernaderos dispersos podrían verse obligadas a adoptar un sistema disperso en lugar de que el despliegue intenso de sensores debido a consideraciones de costos [42]. Las preocupaciones sobre el costo de IoT en la agricultura estaban en línea con la investigación llevada a cabo por Zamora-Izquierdo et al. [40] sobre el vínculo entre la agricultura de precisión y el costo. En la mayoría de los casos, IoT en la agricultura era costoso y estaba fuera del alcance de los pequeños agricultores, quienes son la columna vertebral del sistema agrícola mundial [43].

La incapacidad de los pequeños agricultores para invertir en tecnologías IoT podría atribuirse a la incertidumbre reinante sobre los precios de venta de los productos agrícolas debido a las variaciones en los precios del mercado, la falta de parámetros definidos sobre las asignaciones y uso de agua y energía [24]. Los márgenes de producción ajustados brindan un incentivo mínimo para que los pequeños agricultores inviertan en nuevas tecnologías como IoT; esto contrasta con grandes productores comerciales que pueden adquirir fácilmente sistemas IoT. El análisis comparativo de los dos indica claramente que el costo fue un impedimento crítico para el uso generalizado de la infraestructura de IoT [24]. Los desafíos identificados por Villa-Henriksen et al. [24] fueron corroborados por Madushanki et al. [25]. En el último caso, se postuló que los beneficios superaban los riesgos dado el potencial de la infraestructura IoT para catalizar la agricultura inteligente y la ecologización urbana. Bajo un intenso despliegue de sensores, un invernadero/granja está equipado con múltiples nodos de sensores interconectados en diferentes puntos, lo que facilita el monitoreo en tiempo real de las áreas de interés utilizando WSN [42]. Por el contrario, una configuración dispersa, se caracteriza por la distribución menos intensa de sensores para ahorrar costos. Sin embargo, los ahorros de costos implican una compensación con la precisión y la respuesta autónoma del sistema IoT; esto significa que es posible que no se capturen los datos clave. La perspectiva de Sharma et al. [42] con respecto a la precisión y la respuesta autónoma del sistema IoT, personifica las preocupaciones planteadas por diferentes partes interesadas sobre agricultura de precisión. Los

intentos de abordar estos problemas incluyeron modelos de promedio móvil integrado autorregresivo (ARIMA) para predecir y pronosticar anomalías relacionadas con la falla del sensor [44]. Alternativamente, los sensores obsoletos o defectuosos podrían repararse de forma semiautomática utilizando la innovación SensorTalk que integra la interfaz gráfica de usuario (GUI) AgriTalk y los dispositivos cibernéticos de calibración de temperatura [44]. La reparación autónoma y remota de sensores es una solución viable para los pequeños agricultores y las grandes explotaciones comerciales.

Investigación actual sobre IoT en invernaderos

Optimización de Sistemas IoT para Invernaderos Inteligentes y Agricultura Inteligente

Existe un amplio consenso entre los académicos de que la optimización de los sistemas IoT para invernaderos requiere una cuidadosa selección de sensores, adquisición de datos, optimización, determinación de la configuración deseada y control basado en reglas (ver figura 2) [35,36,45]. Teniendo en cuenta que las condiciones deben optimizarse para diferentes cultivos hortícolas, existe la necesidad de técnicas avanzadas para la adquisición de datos utilizando la predicción del filtro de Kalman y técnicas relacionadas; técnicas que pueden pronosticar condiciones ambientales futuras utilizando datos históricos. En realidad, la regulación de cada parámetro (temperatura, humedad, pH, pesticidas, humedad, radiación UV, lluvia, CO₂ y presión) en invernaderos inteligentes es un desafío [38, 46], especialmente en los casos en que no existen datos históricos adecuados.

Sensores basados en IoT para invernaderos inteligentes

En la actualidad, existen una amplia gama de sensores basados en IoT para invernaderos inteligentes, incluidos los sensores de crecimiento de plantas, sensores de temperatura y humedad, sensores de detección de insectos, sensores de temperatura del suelo, pH y humedad, y radiación solar, presión atmosférica, velocidad del viento y Sensores de CO₂ (y otros gases), que se basan en tecnologías Bragg, piezoeléctricas, electroquímicas, electromagnéticas [31] y de fibra óptica para una evaluación precisa de los parámetros deseados [47] (ver tabla 1).

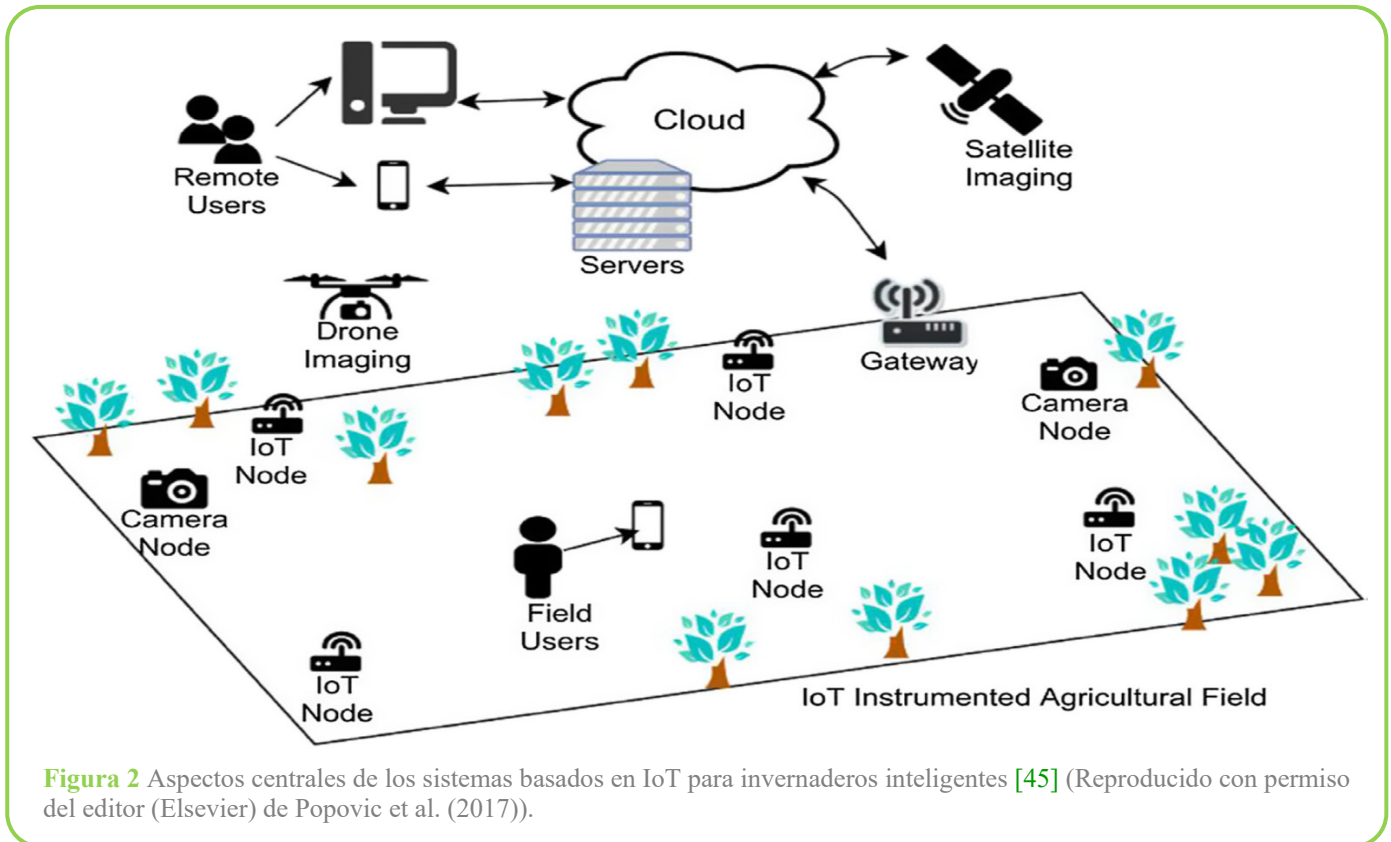


Figura 2 Aspectos centrales de los sistemas basados en IoT para invernaderos inteligentes [45] (Reproducido con permiso del editor (Elsevier) de Popovic et al. (2017)).

Tabla 1 Tipos comunes de sensores utilizados en invernaderos inteligentes [30]

	Aplicación de sensores	Modelos de sensores y fabricantes
Monitoreo del cultivo	Crecimiento vegetal	Cyber-shot DSC-QX100 (Sony Electronics Inc., Tokyo, Japan), Parrot Sequoia (MicaSense Inc., Seattle, WA, USA)
	Detección de insectos y enfermedades	FLIR Blackfly 23S6C (FLIR Systems, Wilsonville, OR, USA)
	Sensor del canopy activo	ACS-430, ACS-470 (Holland Scientific, Inc., Lincoln, NE, USA)
Monitoreo del sustrato	Temperatura del suelo; humedad del suelo	DS18B20 (Maxim Integrated, San Jose, CA, USA), VH400 (Vegetronix, Salt Lake City, UT, USA), HL-69, ECH2O-10HS (METER Group, Pullman, WA, USA)
	pH	E-201 (Shanghai REX Sensor Technology Co, Shanghai, China)
	Elementos químicos (nitrato, nitrógeno, etc.)	SEN0244 (DFROBOTS, Shanghai, China)
Monitoreo del ambiente	Temperatura del aire; humedad del aire; radiación solar	DHT11, DHT22 (AM2302, Aosong Electronics Co., Ltd., Guangzhou, China) SQ-110 (Apogee Instruments, Inc., Logan, UT, USA)
	Lluvia	YF-S402 (Graylogix, Bangalore, Karnataka, India), YL-83 (Vaisala Corp., Helsinki, Finland) SE-WS700D (Lufft Inc., Berlin, Germany)
	Luminosidad	BH1750 (Rohm Semiconductor, Kyoto, Japan), TSL2561 (Adafruit Industries, New York City, NY, USA)
	Presión atmosférica	MPL3115A2 (NXP Semiconductors, Eindhoven, The Netherlands)
	Dirección y velocidad del viento	WS-3000 (Ambient Weather, Chandler, AZ, USA), (SparkFun Electronics, Niwot, CO, USA)
	Concentración de CO ₂	MG-811 (Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., Zhengzhou, China), MQ135 (Waveshare Electronics, Shenzhen, China)
	Otro	Rastreo
Localización		UM220-III (Unicore Communication Inc., Beijing, China)

Los parámetros de interés incluyen diferentes longitudes de onda de luz, fotocorriente, intensidad de fluorescencia, señal fluorescente emitida por la clorofila vegetal, densidad óptica y señal electroquímica generada por la reacción redox catalizada por enzimas (principio SHA) [1]. Los avances en la investigación y el diseño han dado como resultado el desarrollo de sensores electromagnéticos para analizar valores de clorofila y concentración de nitrógeno en plantas; este enfoque se basa en la reflectancia de la luz y los diodos láser pulsantes [31]. La técnica también demostró ser útil para medir la fisiología de la planta en tiempo real, incluido el índice vegetativo de la planta, los requisitos nutricionales, la conductividad eléctrica y la susceptibilidad y conductividad magnéticas (fase cuádruple) [31].

La regulación y el control de las condiciones ambientales en un invernadero son fundamentales teniendo en cuenta que el exceso de calor o humedad se traduce en daños a las plantas a gran escala. La temperatura ambiente ideal de la planta y la humedad relativa para el crecimiento óptimo de la planta fueron 35°C y 95%, respectivamente [39]. El exceso de temperatura y humedad son perjudiciales para el crecimiento óptimo de las plantas, ya que perjudican la polinización, la fotosíntesis, el crecimiento de las hojas y el rendimiento [41]. La optimización de estos parámetros en los invernaderos inteligentes se ve afectada en parte por la precisión limitada de los sensores disponibles. La precisión de los sensores seleccionados está limitada al 2-25% [48]. Estos bajos niveles de precisión podrían tener consecuencias desastrosas en la regulación de microclimas de invernadero, especialmente la mitigación de heladas [3, 49]. En otros casos, la precisión de los sensores IoT es del 99% [4]. Se lograron altos niveles de precisión con sensores inteligentes de barra que brindan información de monitoreo en vivo sobre la humedad y la temperatura del suelo. La información extraída de los sensores de los palos inteligentes se sincroniza con dispositivos inteligentes para obtener transmisiones en vivo sobre las variaciones en los parámetros físicos. Las observaciones realizadas por Rayhana et al. [4] sobre la alta precisión de los sensores inteligentes para invernaderos, estuvieron alineados con lo expuesto por Castañeda-Miranda et al. [49]. En este último caso, la precisión de los sensores para la supresión de heladas estuvo relacionada con la confiabilidad de la memoria asociativa difusa (FAM) y las redes neuronales artificiales (ANN) [49].

La temperatura interna en un invernadero se midió usando ANN, mientras que las temperaturas del suelo del cultivo, se analizaron usando fuzzy control, y esto resultó en la activación de la bomba de agua. Los datos experimentales confirmaron que el sistema IoT para la mitigación de heladas basado en ANN y FAM tenía una precisión superior al 90% en relación con el análisis estadístico de Fourier de los datos horarios [49]. La confiabilidad de los datos fue corroborada por medidas estadísticas inferenciales.

Una nueva investigación ha demostrado que era práctico mantener los altos niveles de precisión informados por Rayhana et al. [4] a través de la optimización de la resolución del sensor (cambios minúsculos en la señal de entrada que se pueden detectar) y la precisión (reproducibilidad de la misma salida con una entrada similar) utilizando técnicas de calibración automatizadas como la detección, identificación y acomodación de fallas del sensor (FDIA) en la tecnología SensorTalk [32]. Teniendo en cuenta que Rayhana et al. [4] y Castañeda-Miranda et al. [49] observaron que los sensores IoT lograron un rendimiento superior en la optimización del microclima del invernadero; la baja precisión reportada por Ryder et al. [48] podría atribuirse a las propiedades del sensor o al control deficiente de las variables externas. Estos inconvenientes se pueden compensar con el mantenimiento y la calibración del sistema con espectrofotómetros [1] y la personalización del sistema para adaptarse a las condiciones ambientales locales. Alternativamente, el despliegue continuo de la red 5G catalizaría la expansión de la infraestructura IoT y el despliegue de sensores avanzados con mayor precisión [37]. Desde otra perspectiva, la evidencia contradictoria sobre la precisión de los sensores documentada por Ryder et al. [48] y Wang et al. [1] plantean preguntas fundamentales sobre la confiabilidad de los sensores para aplicaciones agrícolas, lo que podría, a su vez, afectar la aceptación comercial de los sensores. El papel central de los datos de sensores precisos en la integración de datos de la plataforma IoT, la visualización en tiempo real y la creación de prototipos de aplicaciones, se ilustra en la figura 3.

Tras la crítica de varios argumentos relacionados con la confiabilidad de los sensores [50-53], el investigador señala que la precisión de los sensores de IoT en entornos agrícolas, estuvo influenciada por factores específicos de la aplicación y el contexto.

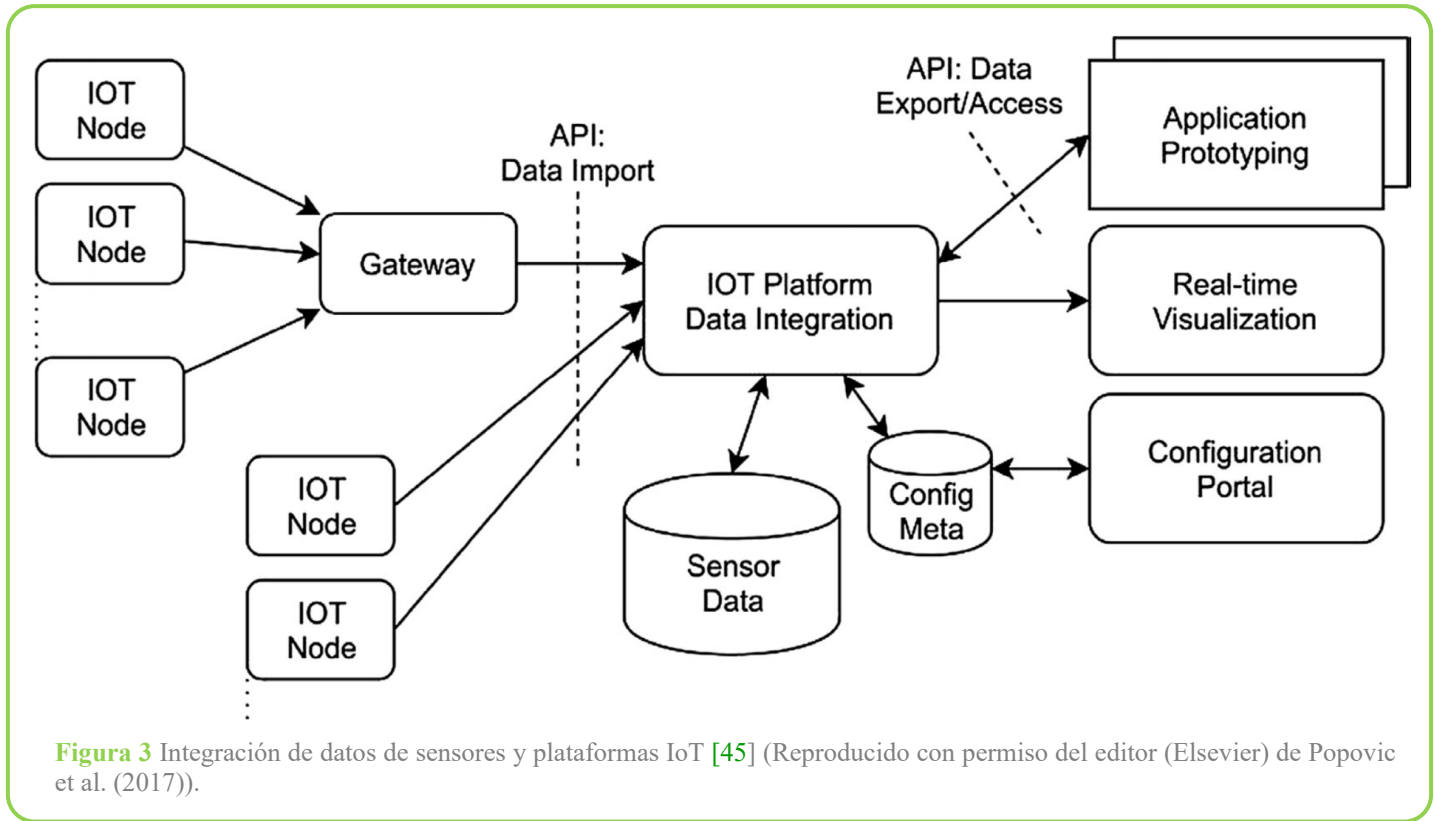


Figura 3 Integración de datos de sensores y plataformas IoT [45] (Reproducido con permiso del editor (Elsevier) de Popovic et al. (2017)).

La cosmovisión es corroborada por Wang et al. [1], quienes reportaron alta precisión en sensores diseñados para medir parámetros biológicos en granjas de microalgas. La alta precisión de los sensores se vinculó con una óptima configuración de diseño [1]. Por ejemplo, el posible efecto adverso asociado con la temperatura exterior y otras variables, se compensó con la integración de dispositivos de control de temperatura, incluido un diodo-fotodiodo láser de longitud de onda múltiple para la estimación de la concentración celular [1]. Esta última evidencia subraya la necesidad de elegir los tipos correctos de sensores y optimizar el rendimiento a través de la integración de láser de múltiples longitudes de onda, fotodiodos de diodo, biosensores de ARNr, chips microfluídicos con fotoelectroquímica mejorada con nanocavidades (nanopartículas de Cu y el electrodo de Cu) y chips multisonda [1].

La necesidad de optimizar el rendimiento de los sensores se valida por las implicaciones de costos asociados con los errores. Por ejemplo, los errores del sensor podrían resultar en un mayor uso de energía en la regulación del microclima del invernadero [54]. En casos aislados, los errores del sensor pueden tener un impacto beneficioso en el cultivo; una evaluación deficiente del contenido

nutricional de los cultivos podría traducirse en una aplicación excesiva de fertilizantes y micronutrientes, y esto se traduciría automáticamente en mejores rendimientos de los cultivos. Los beneficios inesperados asociados con los errores de los sensores se demostraron en un estudio de sensores agrícolas en invernaderos holandeses [54]. En realidad, es imperativo apreciar el hecho de que dichos beneficios suelen estar aislados. A pesar de la disponibilidad comercial de múltiples sensores, el proceso de selección está guiado por ciertas consideraciones como el costo, la precisión, los requisitos de energía, las propiedades del material, la funcionalidad en condiciones extremas (exceso de humedad y precipitación), la integración con diferentes componentes y tecnologías como redes neuronales y aprendizaje automático [31,55-67]. El rendimiento de diferentes clases de sensores en condiciones extremas se ha mejorado mediante el desarrollo de membranas de polímero para proteger los componentes del sensor de partículas contaminantes, polvo y agua, que pueden comprometer la precisión y el tiempo de respuesta [48]. Se han demostrado diseños de prueba de concepto para sensores alimentados por energía solar para invernaderos inteligentes. Saharaei et al [35] señaló que tales sensores eran adecuados para áreas remotas sin conexión a la red.

Más allá de la satisfacción de los requisitos energéticos inherentes, los sensores alimentados por energía fotovoltaica contribuyen a la autonomía energética y la miniaturización de los dispositivos inteligentes para invernaderos, lo que a su vez se traduce en una mejor ahorro de costes. Aunque las necesidades de energía se han resuelto mediante la adopción de sensores fotovoltaicos autónomos, como señalaron Sahraei et al. [35], abundan otros desafíos.

Los materiales emergentes como el grafeno han demostrado ser materiales ideales para sensores para aplicaciones agrícolas debido a su alta resistencia a la tracción, peso ligero, flexibilidad y respeto al medio ambiente [58]. Sin embargo, el uso generalizado se ve inhibido por la ausencia de métodos escalables para la síntesis comercial de los materiales [58,59]. Las reservas hacia los materiales novedosos se ven reforzadas por hechos empíricos y datos de mercado. A pesar del encomiable progreso realizado por las empresas emergentes en I+D de grafeno, se han presentado inconsistencias significativas en las propiedades de los materiales de grafeno producido a escala industrial frente al grafeno a escala de laboratorio [60]. La incapacidad de replicar y reproducir materiales de calidad sigue siendo un impedimento crítico más allá de los límites de los materiales y tecnologías emergentes. Existen varios inconvenientes que limitan la ubicación óptima de las notas de los sensores para una mejor cobertura y comunicación entre los sensores [42]. Los desafíos enumerados presentan consecuencias prácticas en los sensores de invernadero para el análisis del suelo y el agua. Aunque el progreso tecnológico ofrece soluciones prometedoras, la precisión de los sensores sigue siendo un desafío, ya que la precisión de los sensores se ve afectada por señales parásitas asociadas con la presión, la luz y la humedad [48]. Aunque la optimización de capas ofrece una solución práctica, no se ha explorado en detalle.

Barreras a la Comercialización de Tecnologías IoT para Invernaderos: Conectividad a Internet, Costo y Limitaciones Tecnológicas

El desarrollo de diferentes clases de sensores por parte de Unicore Communication, Ambient Weather, Chandler, NXP Semiconductors y Apogee Instruments, entre otros fabricantes [38], abre un camino hacia la comercialización de sistemas IoT para invernaderos. Sin embargo, se deben resolver las barreras clave para la aceptación de la tecnología. El informe de CISCO y la

Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) clasificó las barreras en dominios políticos y técnicos (consulte la figura 4) [61]. La intersección de los dos dominios introdujo una tercera dimensión específica para las restricciones de espectro y ancho de banda, privacidad, seguridad, interoperabilidad y estándares. Por ejemplo, la tecnología de Internet 3G y 4G se rige por los estándares UMTS y CDMA 2000. Por el contrario, IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4, regulan la operacionalización de las redes WiFi y LR-WPAN, respectivamente. Teniendo en cuenta que estas redes tienen diferentes frecuencias, velocidades de datos y requisitos de potencia [24], se convierte en un desafío para estandarizar la infraestructura de IoT en el sector agrícola.

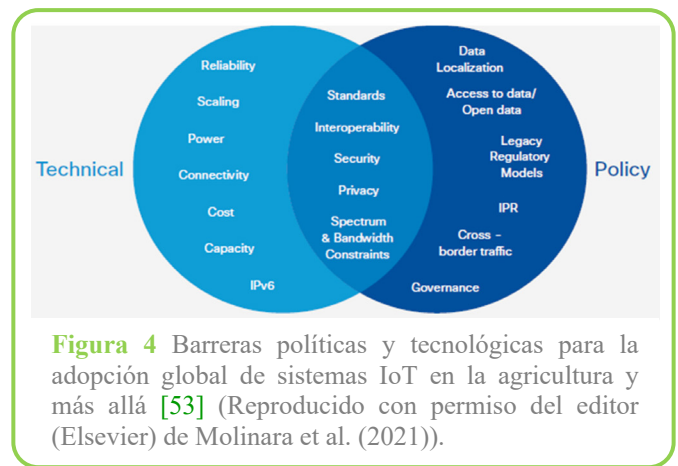


Figura 4 Barreras políticas y tecnológicas para la adopción global de sistemas IoT en la agricultura y más allá [53] (Reproducido con permiso del editor (Elsevier) de Molinara et al. (2021)).

Como señalaron CISCO y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) [61], la confiabilidad de los sistemas IoT fue un factor crítico. En la agricultura de invernadero, la fiabilidad se predijo mediante la precisión y fiabilidad de los sensores para evaluar el contenido de clorofila de la planta y la regulación rentable de las propiedades del suelo y la mejora del potencial de rendimiento [1,40,44]. En la actualidad, los sistemas de IoT para la agricultura se basan en tecnologías disponibles en otras industrias, como el posicionamiento GPS para la navegación de sistemas aéreos no tripulados, la espectroscopia de reflectancia y la detección de microondas para sensores agrícolas, pero las infraestructuras de IoT están distribuidas de manera desigual en países desarrollados y emergentes [62]; esto introduce nuevas restricciones en términos de espectro, ancho de banda, interoperabilidad y estándares [61]. Dado que las economías avanzadas tenían mejores mecanismos para superar las barreras a la aceptación de la tecnología, la comercialización de sistemas IoT en invernaderos era factible. En el lado negativo, la

implementación de IoT en países en desarrollo y áreas rurales, sigue siendo un desafío debido a los costos-beneficios asociados con la comercialización de infraestructuras de IoT, como lo señalaron Ruan et al. [65]. Las últimas observaciones fueron respaldadas por datos de la industria y la penetración de Internet [64]. Desde el comienzo de la revolución de Internet en la década de 1990 y principios de la de 2000, la comunidad mundial ha necesitado un período prolongado para construir infraestructuras de Internet estables. Sin embargo, para el cuarto trimestre de 2021, solo el 56% de la población mundial tenía acceso a Internet [63]; esto significa que la mitad de la población mundial no pudo desbloquear los beneficios de IoT en la agricultura de precisión. El desafío podría resolverse a largo plazo utilizando una constelación de órbita terrestre baja (LEO), que proporciona el potencial para la conectividad global a Internet con una latencia reducida [64]. Las empresas OneWeb y Starlink están en camino de brindar Internet de banda ancha de baja latencia y alta velocidad con una latencia baja que es ideal para áreas rurales y remotas [65,66]. Sin embargo, la implementación de LEO se ha retrasado y existen diversas preocupaciones sobre la adopción global.

Los desafíos tecnológicos tuvieron un impacto más profundo en los pequeños agricultores y las grandes corporaciones agrícolas en áreas rurales y naciones con bajas tasas (<25%) de conectividad a Internet, como Afganistán, Nepal, Pakistán, República Centroafricana y Turkmenistán [63]. El escaso desarrollo de la infraestructura de redes clave en estas regiones tiene consecuencias prácticas en el futuro de la producción agrícola en el país, dado que la agricultura tradicional ha seguido siendo el pilar de la República Centroafricana y otras naciones pobres. La agricultura representa casi la mitad (49%) del PIB de la República Centroafricana [67]. Ruán et al. [62] sugirieron que la expansión de la infraestructura IoT existente para aplicaciones agrícolas sería necesaria dado que las cargas y conexiones existentes no pueden ser suficientes. Sin embargo, La construcción de infraestructura IoT para agricultura de precisión en campo abierto sigue siendo un desafío debido al bajo retorno de inversión para entidades privadas y el gobierno. Ante la ausencia de suficientes incentivos económicos, no queda claro si los inversores estarían dispuestos a comprometer recursos significativos para el despliegue de infraestructuras IoT [63]. Los desafíos relacionados con la infraestructura se ven agravados por la necesidad de sensores precisos con capacidades avanzadas y la urgencia de resolver las

desventajas asociadas con varios protocolos de IoT, como Zigbee, Bluetooth Low Energy (BLE) y la red de área amplia de baja potencia (LPWAN) de Sigfox, entre otras redes. Las preocupaciones planteadas por Ruan et al. [62] y otros académicos sobre el costo y la distribución desigual de la infraestructura de IoT en todo el mundo pueden contrarrestarse con beneficios emergentes. Antonio et al. [37] afirmaron que existían beneficios directos asociados con el despliegue de infraestructuras IoT en granjas.

Desde la visión del mundo del investigador, garantizar que las redes IoT existentes sean compatibles con otros protocolos, abordar la interferencia de señales, la incompatibilidad con dispositivos de alta potencia y la falta de infraestructura de soporte en ciertos países requeriría importantes recursos financieros [37]. Se podría incentivar a las partes interesadas clave para que apoyen la expansión de la infraestructura a través de los beneficios demostrados. Estudios previos habían demostrado que la infraestructura IoT podría generar ahorros de costos de hasta 500 USD/acre por ciclo de cultivo con los sistemas de soporte de decisiones basados en datos meteorológicos y sensores de capacitancia eléctrica para predecir el momento óptimo para la aplicación de fungicidas, análisis del equilibrio suelo-agua y suelo-contenido de agua, riego de cultivos inteligente e impulsado por la demanda, y aplicación de fertilizantes en función de las necesidades de nitrógeno de la planta [37]. Este último ahorro de costos podría ayudar a compensar las barreras tecnológicas para el uso de IoT en invernaderos. La configuración y los sistemas centrales integrados en los dispositivos IoT para invernaderos muestran que la transición de sistemas manuales a autónomos requiere muchos recursos [35]; este hace que sea un desafío para las granjas comerciales iniciar la transición sin una prueba de concepto demostrada. El caso del uso intensivo de recursos de IoT y otros sistemas en agricultura comercial contrasta con Lara et al., quienes señalaron que era práctico desarrollar materiales inteligentes asequibles/de bajo costo para estructuras de invernadero; esto se logró en parte mediante la integración de sistemas avanzados como Wireless Sensor Red (WSN) integrada con tecnología 5G, WAN o WiFi, para una recopilación y transmisión de datos sin inconvenientes. Acumulativamente, se desarrolló con éxito un prototipo de IoT a un costo de 16 USD [29]; esto es loable considerando que el costo es un factor crítico en la producción agrícola.

Las observaciones realizadas por Lara et al [29] sobre la

disponibilidad de sensores de bajo costo para invernaderos fue corroborada por Placidi et al. [41], quienes señalaron que los recientes esfuerzos de investigación y desarrollo habían facilitado el desarrollo de dispositivos sensores de bajo costo capaces de transducir los parámetros físicos y el posprocesamiento de datos sin procesar para obtener información confiable y cumplir con las regulaciones existentes; “Se ha reducido el tamaño y el coste de los sensores, haciendo WSN, el principal impulsor de la agricultura de precisión”. No obstante, la supuesta reducción en el costo de la tecnología fue específica de la aplicación. Los recientes avances en I+D no se habían traducido hacia el desarrollo de sensores de bajo costo para monitorear el contenido de agua del suelo. Los sensores precisos del contenido de agua del suelo varían entre 150 USD y 5000 USD, según Placidi et al. [41]; esto excede el costo promedio estimado de un invernadero en países en desarrollo [27], y no es económico invertir en costosos sensores de contenido de agua en el suelo.

La última evidencia demuestra que la reducción de costos percibida fue específica del sensor; este desafío podría compensarse en parte mediante la investigación y la comercialización de las innovaciones existentes. Se demostraron los beneficios de costos específicos de la aplicación de la tecnología de sensores en un informe conjunto preparado por CISCO y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) sobre el aprovechamiento de IoT para el desarrollo sostenible global [61]. Los datos de comparación de costos se exponen en la tabla 2, donde queda en evidencia que los sensores con características técnicas avanzadas, como conectividad WiFi, eran costosos (>150 USD/sensor).

Otros temas fundamentales de interés incluyen la necesidad de alinear las prácticas agrícolas corporativas con los patrones globales para mejorar la relevancia comercial. Las principales partes interesadas de la industria, incluido Mordor Intelligence (2021), postularon que el crecimiento del mercado de invernaderos inteligentes se segmentaría en diferentes categorías (como sistemas de riego inteligentes, válvulas y bombas de agua, sensores y cámaras, sistemas de control, HVAC, luces LED y tecnologías hidropónicas/no hidropónicas) y geografías (la mayor parte del crecimiento se registraría en economías avanzadas como EE. UU., Canadá, Reino Unido, Francia, Alemania, India, China y Japón).

A pesar de que la segmentación de los invernaderos ha sido poco investigada en la investigación académica, proporciona bases convincentes para futuras investigaciones y el desarrollo de tecnologías inteligentes para invernaderos. En otros casos, el costo es una barrera menor para la adopción de IoT en invernaderos inteligentes en relación con las preocupaciones sobre la utilidad de la tecnología. Las reservas expresadas por los usuarios de nuevas tecnologías muestran que los sistemas basados en IoT deben superar las actitudes sociales hacia las tecnologías avanzadas en la agricultura. Las preocupaciones relacionadas con la tecnología entre los usuarios finales de las tecnologías podrían estar vinculadas a beneficios menos demostrados.

Agrovoltaica y Blockchain

La agrovoltaica es también una revolución tecnológica emergente relacionada con IoT que tiene aplicaciones promotoras en la producción sostenible de alimentos y energía. Los desarrollos emergentes incluyen la transmisión de luz y la vida útil prolongada mediante módulos fotovoltaicos plegables y paneles solares [16] y sistemas integrados de generación de energía eléctrica y térmica [68-70]. Un inconveniente clave es el nacimiento de los sistemas agrovoltaicos [71-73]. A partir de 2020, el único sistema agrovoltaico funcional estaba en Bélgica [73]. La novedad de la agrovoltaica es un factor limitante dadas las barreras para la adopción de nuevas tecnologías. Las últimas ideas extraídas de esta revisión tienen un significado práctico en la agricultura comercial. Además, se ha avanzado más en la comercialización de módulos fotovoltaicos y tejas solares en All-Russian Research Institute of Electrification of Agriculture [69].

Más allá de Rusia y Bélgica, se prevé que la demanda de agrovoltaicos crezca exponencialmente en línea con la transición a energías renovables en la agricultura. Más allá de la agrovoltaica, la integración de blockchain en sistemas basados en IoT para la agricultura es un área emergente que merece mayor atención en I+D [74,75]. El Blockchain ayudaría a mejorar la seguridad en los sistemas agrícolas y descentralizaría la generación y el uso de energía solar.

Tabla 2. Comparación de costos de diferentes tipos de sensores [49] (Reproducido con permiso del editor (Elsevier) de Castañeda-Miranda et al (2020))

Tipo de sensor	Costo aproximado en USD
Sensor WiFi de alta temperatura integrado	24
Sensor WiFi de humedad integrado	180
Sensor de fuerza de doble rango	110
Telémetro ultrasónico; sensor de CO ₂	100
Sensor de presión de gas	83
Detector de movimiento Vernier	75
Sensor de oxígeno	60
Sensor de velocidad del viento	45
Sensor de temperatura y humedad	42
Sensor de gas multicanal; sensor de nivel de líquido; humedad y temperatura del suelo; sensor de nivel de líquido; Sensor de ruptura de GPS; Módulo GPS portátil	40
Sensor G5de flujo de agua; Lector RFID; módulo sensor RFID; Telémetro ultrasónico Lite; Placa sensora de temperatura y humedad	30
Sensor de corriente CA de alto amperaje	12
Detector de sonido	11
Sensor táctil capacitivo; Sensor de carga (hasta 50 kg); sensor de calidad del aire; Receptor FM; Sonda de temperatura y humedad; Sensor barométrico y de temperatura; sensor de altitud; Índice UV digital/IR/Visible	10
Sensor de luz; sensor de luz de proximidad; medidor de flujo de líquido; Sensor de corriente del sensor de movimiento PIR; Sensor de movimiento PIR; sensor de colisión; Sensor HP de temperatura y humedad	9
Sensor de luz RGP; sensor de alcoholemia; Sensor de color RGB y filtro IR	8
Sensor de disparo infrarrojo; sensor de corriente CA; sensor de luz digital HDR; Amplificador de micrófono	7
Sensor de luminosidad; Sensor de volumen	6
Sensor reflectante de infrarrojos; Cápsula RFID; Sensor de luz ambiental; Sensor de humedad; sensor de sonido	5
Sensor de vibración; sensor de agua	3

Conclusiones

El cuerpo de conocimiento afirmó los beneficios prácticos y los límites de diferentes sensores IoT para la optimización del microclima del invernadero. El progreso actual en la investigación ha demostrado que era factible monitorear de forma remota el contenido nutricional del suelo, agua/humedad y temperatura, y fisiología vegetal en tiempo real (índice vegetativo, requisitos nutricionales, conductividad eléctrica y la

susceptibilidad magnética) utilizando sensores avanzados que cuentan con tecnologías Bragg, piezoeléctricas, electroquímicas, electromagnéticas y de fibra óptica. Los recientes avances tecnológicos han contribuido al desarrollo de sensores avanzados hechos de materiales de grafeno, diodos-fotodiodos láser de múltiples longitudes de onda, biosensores de ARNr, chips multisonda y chips de microfluidos con fotoelectroquímica mejorada con nanocavidades (nanopartículas de Cu y electrodos de Cu). Por el lado negativo, abundan ciertos desafíos que incluyen la precisión variable. Por un lado, había sensores de invernaderos altamente confiables para aplicaciones comerciales. Dichos sensores se habían traducido en mejoras significativas en el rendimiento de los cultivos y ahorros de costos a través de los sistemas de soporte de decisiones basados en datos que brindaban alertas sobre cuándo era más apropiado aplicar fertilizantes, fungicidas y pesticidas e irrigar cultivos que requerían menos agua para un crecimiento óptimo.

Los datos preliminares extraídos de estudios publicados sugieren que fue posible lograr ahorros de hasta 500 USD por acre cultivado. Teniendo en cuenta que los costos se basaron en un caso de estudio aislado, los ahorros acumulados podrían ser mayores o menores según los cultivos, el tipo de sensores y el nivel de inversión en sistemas de apoyo a la toma de decisiones basados en datos. Por otro lado, había una clase de sensores con baja precisión de 2 al 25%, que era inadecuada. La baja precisión de los sensores fue una barrera crítica para la comercialización de sensores IoT, y el problema se amplificó por el progreso limitado realizado en el desarrollo de sensores ultrasensibles y la disponibilidad desigual de infraestructura IoT en países emergentes y desarrollados, y la falta de incentivos suficientes para facilitar las inversiones en tecnología en áreas rurales. Por ejemplo, la conexión a Internet en los países pobres/de ingresos medios-bajos de Asia y África estaba por debajo del 25 %, por lo que no era práctico para los inversores privados instalar sistemas IoT en invernaderos inteligentes. Los desafíos relacionados con la innovación podrían resolverse a través de I+D. Sin embargo, no hubo una solución inmediata a los desafíos de infraestructura de TIC en las naciones emergentes. A la luz de la brecha digital, la aplicación de Internet de las cosas para entornos de invernadero optimizados seguiría siendo un coto exclusivo de las naciones desarrolladas con recursos avanzados; esto es evidente a partir de la inversión en tecnologías de invernadero en Grecia, Arabia Saudita, Europa y América del Norte. Las

inversiones desiguales en invernaderos inteligentes tendrían implicaciones a largo plazo en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola en estas regiones, considerando que el calentamiento global y el cambio climático, se traducen en una inflación en el costo de los productos agrícolas. La inflación se atribuyó a la inflación en el costo de los productos agrícolas y eventos climáticos severos inesperados.

Limitaciones

Los sistemas IoT para la optimización de los microclimas de los invernaderos son diversos. Por ejemplo, los sensores basados en tecnologías de fibra óptica o diodo-fotodiodo láser de múltiples longitudes de onda, biosensores de ARN, chips microfluídicos con fotoelectroquímica mejorada con nanocavidad (nanopartículas de Cu y el electrodo de Cu) o sensores basados en grafeno ofrecen ventajas e inconvenientes distintos en comparación con Bragg, los sensores piezoeléctricos, electroquímicos y electromagnéticos dependiendo de los parámetros a medir, la influencia de variables externas y los cultivos bajo cultivo. El discurso actual no revisó exhaustivamente cada clase de sensor, dado que el enfoque principal estaba en la aplicación de IoT para entornos de invernadero optimizados y microclimas para la producción de cultivos. El alcance de la discusión se limitó a los temas dominantes en la literatura. El discurso actual sobre la agricultura de precisión se centra en la computación en la nube, IoT y otras tecnologías para la agricultura de precisión [40] y las aplicaciones comercialmente viables son nuevas, caras o mal adaptadas a las condiciones semiáridas. El alto costo de la aplicación de IoT en la optimización del microclima del invernadero impidió la comercialización de la tecnología por parte de los pequeños agricultores.

Perspectivas a futuro

Aunque se presentaron diversos desafíos y barreras para el despliegue de sensores y sistemas IoT e invernaderos inteligentes, el progreso en I+D se traduciría en la disponibilidad generalizada de sensores precisos y de bajo costo para el monitoreo del agua, la nutrición del suelo, la temperatura y la humedad. La perspectiva positiva está respaldada por el desarrollo del grafeno (un material con alta resistencia a la tracción, peso ligero, flexibilidad y compatibilidad ecológica), biosensores de ARNr de alta precisión y chips de microfluidos con fotoelectroquímica mejorada con nanocavidades. Sin

embargo, no está claro si las tecnologías futuras ayudarían a reducir el costo de los sensores con mayor funcionalidad (como la interoperabilidad de soluciones, implementación a escala industrial, implementación a largo plazo y mediciones exactas y precisas). En la actualidad, la inclusión de tales capacidades en los sensores cuesta 1000 USD o más en un sensor [61]. Las tecnologías emergentes, como la constelación LEO, ayudarían a proporcionar cobertura global de Internet de banda ancha en errores remotos, eliminando así las barreras de capital e infraestructura para la adopción masiva de IoT en la agricultura comercial.

Consentimiento para publicación

los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no poseer ningún tipo de conflicto de interés. Este documento solo refleja sus puntos de vista y no de las instituciones a las cuales pertenecen.

Perfil de autoría

Chrysanthos Maraveas

El Dr. Maraveas obtuvo su PhD en Ingeniería Civil de la Universidad de Manchester, Reino Unido, en 2015; MSc. en Ingeniería del Imperial College de Londres, Reino Unido, de la Universidad de Swansea, Reino Unido, y de la Universidad Demócrito de Tracia, Grecia. Fue investigador posdoctoral en la Universidad de Lieja y la Universidad de Patras. Cuenta con una experiencia de más de 20 años como consultor de ingeniería estructural y director técnico de infraestructuras. Es miembro de la Institución de Ingenieros Civiles del Reino Unido e ingeniero del colegiado en Grecia y el Reino Unido. Es profesor asistente en el Departamento de Recursos Naturales e Ingeniería Agrícola de la Universidad Agrícola de Atenas.



Thomas Bartzanas

Profesor Asociado y Director del Laboratorio de Estructuras Agrícolas en la Universidad Agrícola de Atenas (AUA) en Grecia e Investigador colaborador en el Instituto de Bioeconomía y Agrotecnología (IBO) del Centro de Investigación y Tecnología-Hellas (CERTH). Su área de investigación se centra en sistemas agrícolas de ambiente controlado (cultivos y ganadería), análisis y modelado de sistemas en agricultura y evaluación de impacto ambiental de sistemas agrícolas utilizando el enfoque del ciclo de vida. Actúa actualmente como presidente en la acción COST de LivAge que se ocupa de las emisiones para edificios de ganado y vicepresidente y representante de organizaciones académicas/de investigación en la plataforma tecnológica Food for Life en Grecia coordinada por la Federación de industrias alimentarias griegas (SEVT).



Referencias

- [1] Wang, K.; Shiong Khoo, K.; Leong, H.Y.; Nagarajan, D.; Chew, K.W.; Ting, H.Y.; Selvarajoo, A.; Chang, J.-S.; Show, P.L. How does the Internet of Things (IoT) help in microalgae biorefinery? *Biotechnol. Adv.* 2021, 107819. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107819>
- [2] Lova Raju, K.; Vijayaraghavan, V. IoT Technologies in Agricultural Environment: A Survey. *Wirel. Pers. Commun.* 2020, 113, 2415–2446. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07334-x>
- [3] Castañeda-Miranda, A.; Castaño-Meneses, V.M. Internet of things for smart farming and frost intelligent control in greenhouses. *Comput. Electron. Agric.* 2020, 176, 105614. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105614>
- [4] Rayhana, R.; Xiao, G.; Liu, Z. Internet of Things Empowered Smart Greenhouse Farming. *IEEE J. Radio Freq. Identif.* 2020, 4, 195–211. <https://doi.org/10.1109/JRFID.2020.2984391>
- [5] Zhang, Y.; Geng, P.; Sivaparthipan, C.B.; Muthu, B.A. Big data and artificial intelligence based early risk warning system of fire hazard for smart cities. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2021, 45, 100986. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100986>
- [6] Raj, M.; Gupta, S.; Chamola, V.; Elhence, A.; Garg, T.; Atiqzaman, M.; Niyato, D. A survey on the role of Internet of Things for adopting and promoting Agriculture 4.0. *J. Netw. Comput. Appl.* 2021, 187, 103107. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103107>
- [7] Sagheer, A.; Mohammed, M.; Riad, K.; Alhajhoj, M. A Cloud-Based IoT Platform for Precision Control of Soilless Greenhouse Cultivation. *Sensors* 2020, 21, 223. <https://doi.org/10.3390/s21010223>
- [8] Allam, Z.; Dhunny, Z.A. On big data, artificial intelligence and smart cities. *Cities* 2019, 89, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.032>
- [9] Ullah, Z.; Al-Turjman, F.; Mostarda, L.; Gagliardi, R. Applications of Artificial Intelligence and Machine learning in smart cities. *Comput. Commun.* 2020, 154, 313–323. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.02.069>
- [10] Gai, H.; Beath, J.; Fang, J.; Lou, H.H. Alternative emission monitoring technologies and industrial internet of things-based process monitoring technologies for achieving operational excellence. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2020, 23, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.04.009>
- [11] Sahraei, N.; Watson, S.; Sofia, S.; Pennes, A.; Buonassisi, T.; Peters, I.M. Persistent and adaptive power system for solar powered sensors of Internet of Things (IoT). *Energy Procedia* 2017, 143, 739–741. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.755>
- [12] Agrawal, H.; Prieto, J.; Ramos, C.; Corchado, J.M. Smart feeding in farming through IoT in silos. *Adv. Intell. Syst. Comput.* 2016, 530, 355–366. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47952-1_28
- [13] Singh, R.K.; Berkvens, R.; Weyn, M. Energy Efficient Wireless Communication for IoT Enabled Greenhouses. In Proceedings of the 2020 International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS), Bengaluru, India, 7–11 January 2020; 2020, pp. 885–887.
- [14] Chiesa, G.; Di Vita, D.; Ghadirzadeh, A.; Muñoz Herrera, A.H.; Leon Rodriguez, J.C. A fuzzy-logic IoT lighting and shading control system for smart buildings. *Autom. Constr.* 2020, 120, 103397. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103397>
- [15] Syafarinda, Y.; Akhadin, F.; Fitri, Z.E.; Yogiswara Widiawan, B.; Rosdiana, E. The Precision Agriculture Based on Wireless Sensor Network with MQTT Protocol. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2018, 207, 012059. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/207/1/012059>
- [16] Bo, Y.; Wang, H. The application of cloud computing and the internet of things in agriculture and forestry. In Proceedings of the 2011 International Joint Conference on Service Sciences, Taipei, Taiwan, 25–27 May 2011; Volume 2011, pp. 168–172.
- [17] Patil, V.C.; Al-Gaadi, K.A.; Biradar, D.P.; Rangaswamy, M. Internet of Things (IoT) and Cloud Computing for Agriculture: An Overview. In Proceedings of the Agro-Informatics and Precision Agriculture (AIPA 2012), Raichur, India; 2012; pp. 292–296.
- [18] Rojas, A. Smart Agriculture IoT with Cloud Computing. *Rev. Hist. América* 2015, 29, 37–66.
- [19] Choudhary, S.; Jadoun, R.; Mandoriya, H. Role of Cloud Computing Technology in Agriculture Fields. *Computing* 2016, 7, 1–7.
- [20] Ferkoun, M. Cloud computing helps agriculture industry grow, IBM. 2015. <https://www.ibm.com/blogs/cloud-computing/2015/01/23/cloud-computing-helps-agriculture-industry-grow/>
- [21] Zhang, X.; Cao, Z.; Dong, W. Overview of Edge Computing in the Agricultural Internet of Things: Key Technologies, Applications, Challenges. *IEEE Access* 2020, 8, 141748–141761. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013005>
- [22] Akhtar, M.N.; Shaikh, A.J.; Khan, A.; Awais, H.; Bakar, E.A.; Othman, A.R. Smart sensing with edge computing in precision agriculture for soil assessment and heavy metal monitoring: A review. *Agriculture* 2021, 11, 475. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060475>
- [23] O’Grady, M.J.; Langton, D.; O’Hare, G.M.P. Edge computing: A tractable model for smart agriculture? *Artif. Intell. Agric.* 2019, 3, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.iiia.2019.12.001>
- [24] Villa-Henriksen, A.; Edwards, G.T.C.; Pesonen, L.A.; Green, O.; Sørensen, C.A.G. Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. *Biosyst. Eng.* 2020, 191, 60–84. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013>
- [25] Madushanki, A.A.R.; Halgamuge, M.N.; Wirasagoda, W.A.H.S.; Syed, A. Adoption of the Internet of Things (IoT) in agriculture and smart farming towards urban greening: A review. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 2019, 10, 11–28. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100402>
- [26] US Environmental Protection Agency, Climate Impacts on Agriculture and Food Supply. 2020. https://19january2017snapshot.epa.gov/climate-impacts/climate-impacts-agriculture-and-food-supply_.html
- [27] Pack, M.; Mehta, K. Design of affordable greenhouses for East Africa. In Proceedings of the 2012 IEEE Global Humanitarian Technology Conference, Seattle, WA, USA, 21–24 October 2012; Volume 2012, pp. 104–110.
- [28] Kavga, A.; Thomopoulos, V.; Barouchas, P.; Stefanakis, N.; Liopa-Tsakalidi, A. Research on innovative training on smart greenhouse technologies for economic and environmental sustainability. *Sustainability* 2021, 13, 10536. <https://doi.org/10.3390/su131910536>
- [29] Lara, J.C.D.; Francisco, G.; Rodríguez, S. Low Cost Greenhouse Monitoring System Based on Internet of Things. In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV), Boca del

Rio, Mexico, 14–17 October 2019; pp. 1–10.

- [30] Intergovernmental Panel on Climate Change, Food Security. 2020. <https://www.ipcc.ch/srcl/chapter/chapter-5/>.
- [31] Ratnaparkhi, S.; Khan, S.; Arya, C.; Khapre, S.; Singh, P. Smart agriculture sensors in IOT: A review. *Mater. Today Proc.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.138>
- [32] Gross, E.M.; Lahkar, B.P.; Subedi, N.; Nyirenda, V.R.; Lichtenfeld, L.L.; Jakoby, O. Seasonality, crop type and crop phenology influence crop damage by wildlife herbivores in Africa and Asia. *Biodivers. Conserv.* 2018, 27, 2029–2050. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1523-0>
- [33] Conover, M.R.; Butikofer, E.; Decker, D.J. “Wildlife damage to crops: Perceptions of agricultural and wildlife leaders in 1957, 1987, and 2017. *Wildl. Soc. Bull.* 2018, 42, 551–558. <https://doi.org/10.1002/wsb.930>
- [34] Saiz-rubio, V. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy* 2020, 10, 207. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>
- [35] Khudoyberdiyev, A.; Ullah, I.; Kim, D. Optimization-assisted water supplement mechanism with energy efficiency in IoT based greenhouse. *J. Intell. Fuzzy Syst.* 2021, 40, 10163–10182. <https://doi.org/10.3233/JIFS-200618>
- [36] Ullah, I.; Fayaz, M.; Aman, M.; Kim, D.H. An optimization scheme for IoT based smart greenhouse climate control with efficient energy consumption. *Computing* 2021, 1–25. <https://doi.org/10.1007/s00607-021-00963-5>
- [37] Antony, A.P.; Leith, K.; Jolley, C.; Lu, J.; Sweeney, D.J. A review of practice and implementation of the internet of things (IoT) for smallholder agriculture. *Sustainability* 2020, 12, 3750. <https://doi.org/10.3390/su12093750>
- [38] Miller, M.A.; Cappuccio, F.P. “A systematic review of COVID-19 and obstructive sleep apnoea. *Sleep Med. Rev.* 2021, 55, 101382. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2020.101382>
- [39] Agrawal, N.; Katna, R. Applications of Computing, Automation and Wireless Systems in Electrical Engineering; Springer: Singapore, 2019; Volume 553.
- [40] Zamora-Izquierdo, M.A.; Marti, J.A.; Skarmeta, A.F. Intelligent Systems for Environmental Applications Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing. *Biosyst. Eng.* 2018, 177, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.014>
- [41] Placidi, P.; Morbidelli, R.; Fortunati, D.; Papini, N.; Gobbi, F.; Scorzoni, A. Monitoring soil and ambient parameters in the IoT precision agriculture scenario: An original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors. *Sensors* 2021, 21, 5110. <https://doi.org/10.3390/s21155110>
- [42] Sharma, A.; Singh, P.K.; Kumar, Y. An integrated fire detection system using IoT and image processing technique for smart cities. *Sustain. Cities Soc.* 2020, 61, 102332. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102332>
- [43] Terlau, W.; Hirsch, D.; Blanke, M. Smallholder farmers as a backbone for the implementation of the Sustainable Development Goals. *Sustain. Dev.* 2019, 27, 523–529. <https://doi.org/10.1002/sd.1907>
- [44] Lin, Y.; Lin, Y.; Lin, J.; Hung, H. SensorTalk: An IoT device failure detection and calibration mechanism for smart farming. *Sensors* 2019, 19, 4788. <https://doi.org/10.3390/s19214788>
- [45] Popović, T.; Latinović, N.; Pešić, A.; Zečević, Ž.; Krstajić, B.; Djukanović, S. Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study. *Comput. Electron. Agric.* 2017, 140, 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.008>
- [46] Navarro, E.; Costa, N.; Pereira, A. A systematic review of IoT solutions for smart farming. *Sensors* 2020, 15, 4231. <https://doi.org/10.3390/s20154231>
- [47] Maraveas, C.; Bartzanas, T. Sensors for structural health monitoring of agricultural structures. *Sensors* 2021, 21, 314. <https://doi.org/10.3390/s21010314>
- [48] Ryder, N.L.; Geiman, J.A.; Weckman, E.J. Hierarchical Temporal Memory Continuous Learning Algorithms for Fire State Determination. *Fire Technol.* 2021, 57, 2905–2928. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01055-0>
- [49] Castañeda-Miranda, A.; Castaño-Meneses, V.M. Smart frost measurement for anti-disaster intelligent control in greenhouses via embedding IoT and hybrid AI methods. *Measurement* 2020, 164, 108043. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108043>
- [50] Teymori-omran, M.; Motevali, A.; Reza, S.; Seyedi, M.; Montazeri, M. Numerical simulation and experimental validation of a photovoltaic thermal system: Performance comparison inside and outside greenhouse. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2021, 46, 101271. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101271>
- [51] Ruan, J.; Hu, X.; Huo, X.; Shi, Y.; Chan, F.T.S.; Wang, X.; Mastorakis, G.; Mavromoustakis, C.X.; Zhao, X. “An IoT-based E-business model of intelligent vegetable greenhouses and its key operations management issues. *Neural Comput. Appl.* 2020, 32, 15341–15356. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04123-x>
- [52] Dahlgvist, M.; Nilsson-Hedman, T. Self-Aligning Solar Panel: Construction of a self-aligning platform for solar panels. 2015. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:916222/FULLTEXT01.pdf>.
- [53] Molinara, M.; Bria, A.; De Vito, S.; Marrocco, C. Artificial intelligence for distributed smart systems. *Pattern Recognit. Lett.* 2021, 142, 48–50. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.12.006>
- [54] Bontsema, J.; Van Henten, E.J.; Gieling, T.H.; Swinkels, G.L.A.M. The effect of sensor errors on production and energy consumption in greenhouse horticulture. *Comput. Electron. Agric.* 2011, 79, 63–66. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.08.008>
- [55] Mtz-Enriqueza, A.I.; Padmasreea, K.P.; Olivab, A.I.; Gomez-Solisc, C.; Coutino-Gonzalezd, E.; Garciae, C.R.; Esparzaf, D.; Olivag, J. Tailoring the detection sensitivity of graphene based flexible smoke sensors by decorating with ceramic microparticles. *Sens. Actuators B Chem.* 2020, 305, 127466. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127466>
- [56] Wan, X.; Zhang, F.; Liu, Y.; Leng, J. CNT-based electro-responsive shape memory functionalized 3D printed nanocomposites for liquid sensors. *Carbon* 2019, 155, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.08.047>
- [57] Shamshiri, R.R.; Hameed, I.A.; Thorp, K.R.; Balasundram, S.K.; Shafian, S.; Fatemeh, M.; Sultan, M.; Mahns, B.; Samiei, S. Greenhouse Automation Using Wireless Sensors and IoT Instruments Integrated with Artificial Intelligence. In Next-Generation Greenhouses for Food Security; Intechopen: London, UK, 2020; pp. 1–20.
- [58] Ren, W.; Cheng, H.-M. The global growth of graphene. *Nat. Nanotechnol.* 2014, 9, 726–730. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.229>
- [59] Zhong, Y.L.; Tian, Z.; Simon, G.P.; Li, D. Scalable production of graphene via wet chemistry: Progress and challenges. *Mater. Today* 2015, 18, 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.matod.2014.08.019>

- [60] Deng, B.; Liu, Z.; Peng, H. Toward Mass Production of CVD Graphene Films. *Adv. Mater.* 2019, 31, 1800996. <https://doi.org/10.1002/adma.201800996>
- [61] Cisco and the International Telecommunication Union (ITU), Harnessing the Internet of Things for Global Development. 2015. [Internet]. <https://www.itu.int/en/action/broadband/Documents/Harnessing-IoT-Global-Development.pdf>
- [62] Ruan, J.; Jiang, H.; Zhu, C.; Hu, X.; Shi, Y.; Liu, T.; Rao, W.; Chan, F.T.S. Agriculture IoT: Emerging Trends, Cooperation Networks, and Outlook. *IEEE Wirel. Commun.* 2019, 26, 56–63. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900096>
- [63] World Bank. Individuals Using the internet (% of population); World Bank: Washington, DC, USA, 2020. [Internet]. <https://data.worldbank.org/indicator/IT.NET.USER.ZS>. <https://doi.org/10.1051/nss/2015034>
- [64] Goedde, L.; Katz, J.; Ménard, A.; Revellat, J. “Agriculture’s Connected Future: How Technology can Yield New Growth,” McKinsey and Company. 2020. [Internet]. <https://www.mckinsey.com/industries/agriculture/our-insights/agriculturesconnected-future-how-technology-can-yield-new-growth>
- [65] OneWeb. Connect with Confidence. 2021. [Internet]. <https://oneweb.net/our-markets>
- [66] Starlink. High-Speed, Low Latency Broadband Internet. 2020. [Internet]. <https://www.starlink.com/>
- [67] Sinha, A.; Shrivastava, G.; Kumar, P. Architecting user-centric internet of things for smart agriculture. *Sustain. Comput. Inform. Syst.* 2019, 23, 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2019.07.001>
- [68] Mordor Intelligence. Smart Greenhouse Market—Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021—2026). 2021. [Internet]. <https://www.researchandmarkets.com/reports/4472754/global-smart-homes-market-growth-trends-covid>
- [69] Panchenko, V.; Izmailov, A.; Kharchenko, V.; Lobachevskiy, Y. Photovoltaic Solar Modules of Different Types and Designs for Energy Supply. *Int. J. Energy Optim. Eng.* 2020, 9, 74–94. <https://doi.org/10.4018/IJEOE.2020040106>
- [70] Kharchenko, V.; Panchenko, V.; Tikhonov, P.V.; Vasant, P. Cogenerative PV Thermal Modules of Different Design for Autonomous Heat and Electricity Supply. In Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2018.
- [71] Jain, P.; Raina, G.; Sinha, S.; Malik, P.; Mathur, S. Agrovoltatics: Step towards sustainable energy-food combination. *Bioresour Technol. Rep.* 2021, 15, 100766. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100766>
- [72] Schindele, S.; Trommsdorff, M.; Schlaak, A.; Obergfell, T.; Bopp, G.; Reise, C.; Braun, C.; Weselek, A.; Bauerle, A.; Högy, P.; et al. Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Appl. Energy* 2020, 265, 114737. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>
- [73] Willockx, B. Combining photovoltaic modules and food crops: First agrovoltaic prototype in Belgium. *Eur Assoc Dev Renew Energies Environ Power Qual* 2020, 18. <https://doi.org/10.24084/repqj18.291>
- [74] Caro, M.P.; Ali, M.S.; Vecchio, M.; Giaffreda, R. Blockchain-based traceability in Agri-Food supply chain management: A practical implementation. In Proceedings of the 2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture—Tuscany (IOT Tuscany), Tuscany, Italy, 8–9 May 2018; pp. 1–4.
- [75] Ferrag, M.A.; Shu, L.; Yang, X.; Derhab, A.; Maglaras, L. Security and Privacy for Green IoT-Based Agriculture: Review, Blockchain Solutions, and Challenges. *IEEE Access* 2020, 8, 32031–32053. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973178>