



Implementación de un sistema de monitoreo medioambiental mediante sensores inalámbricos y tecnologías IoT para el centro experimental Sacha Wiwa

Implementation of an environmental monitoring system using wireless sensors and IoT technologies for the Sacha Wiwa experimental center

Jonathan Alexis Montaguano Toaqui¹ , Manuel Asdrual Montaña Blacio¹ 

¹Universidad península de santa Elena, Santa Elena – Ecuador

Correo de correspondencia: jonathan.montaguanotoaqui9896@upse.edu.ec, mmontano@upse.edu.ec

Recibido: 15/06/2025

Aceptado: 15/07/2025

Publicado: 15/08/2025

Resumen

Este estudio presenta la implementación de un sistema de monitoreo ambiental en el centro experimental Sacha Wiwa, Ecuador, utilizando sensores inalámbricos y tecnologías del Internet de las Cosas (IoT). Ante los desafíos del crecimiento poblacional y el cambio climático en la agricultura, se desplegó el modelo de estación meteorológica Ecowitt GW1100 en una parcela de café ubicada dentro del centro experimental Sacha Wiwa. Durante abril de 2024, se recopilaban datos de temperatura, humedad y radiación solar cada 5 minutos. Los resultados revelaron temperaturas promedio de 28.81°C, humedad del 74.07% y radiación solar media de 320.38 W/m², evidenciando variabilidad en las condiciones ambientales. Estos datos permitieron realizar una gestión agrícola más informada, optimizando recursos y permiten mejorar la sostenibilidad. Además, se implementó un modelo de predicción de Random Forest para estimar el estrés hídrico de los cultivos, con un Error Cuadrático Medio de 0.7246, Error Absoluto Medio de 0.5952, demostrando su efectividad al realizar la estimación por medio de Machine Learning. La discusión destaca la viabilidad técnica y económica de la Agricultura 4.0 en entornos rurales para abordar desafíos globales. Este estudio permitió sentar las bases para futuras implementaciones de IoT en agricultura, impulsando su transformación digital hacia un futuro más perdurable y sostenible.

Palabras clave: Monitoreo ambiental, Sensores inalámbricos, Internet de las Cosas (IoT), Agricultura 4.0, Random Forest, estrés hídrico

Abstract

This study presents the implementation of an environmental monitoring system at the Sacha Wiwa experimental center, Ecuador, using wireless sensors and Internet of Things (IoT) technologies. Faced with the challenges of population growth and climate change in agriculture, the Ecowitt GW1100 weather station model was deployed in a coffee plot located within the Sacha Wiwa experimental center. During April 2024, temperature, humidity, and solar radiation data were collected every 5 minutes. The results revealed average temperatures of 28.81°C, humidity of 74.07% and average solar radiation of 320.38 W/m², evidencing variability in environmental conditions. These data allowed for more informed agricultural management, optimizing resources and improving sustainability. In addition, a Random Forest prediction model was implemented to estimate the water stress of crops, with a Mean Square Error of 0.7246, Mean Absolute Error of 0.5952, demonstrating its effectiveness when estimating through Machine Learning. The discussion highlights the technical and economic feasibility of Agriculture 4.0 in rural settings to address global challenges. This study allowed us to lay the foundations for future implementations of IoT in agriculture, promoting its digital transformation towards a more durable and sustainable future.



Keywords: *Environmental monitoring, Wireless sensors, Internet of Things (IoT), Agriculture 4.0, Random Forest, water stress*

Cómo citarr: Paredes Lascano, P., Mejía Ortiz, R., Toapanta Yugcha, I., & Pilco Chicaiza, S. (2025). Etiología de los brotes epidémicos de neumonía grave en pacientes pediátricos menores de 5 años postpandemia. *Investigación Y Desarrollo*, 21(2), 15. Recuperado a partir de <https://revistas.uta.edu.ec/erevista/index.php/dide/article/view/3029>

INTRODUCCIÓN

Ante el crecimiento de la población mundial y los efectos palpables del cambio climático, la agricultura se enfrenta a retos sin precedentes en su historia (Calicioglu et al., 2019). Estos desafíos incluyen la necesidad de aumentar la productividad de los cultivos de manera sostenible, mientras se minimizan los impactos ambientales negativos y se conservan recursos esenciales como el agua y el suelo (Tilman et al., 2018). En este contexto, la integración de nuevas tecnologías en las prácticas agrícolas, conocida como Agricultura 4.0, se presenta como una solución prometedora que promete mejorar la forma en que se cultivan, monitorean y mantienen los cultivos (Klerkx et al., 2019).

El concepto de Agricultura 4.0, que abarca la digitalización y automatización de los procesos agrícolas a través del uso de Internet de las Cosas (IoT), sensores inalámbricos, análisis de datos en tiempo real, y otras tecnologías emergentes, tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia, productividad y sostenibilidad de la producción agrícola (Shamshiri et al., 2018). Estos nuevos procesos tecnológicos permiten un monitoreo constante de las condiciones medioambientales, facilitando una gestión agrícola más informada y proactiva (Khanna & Kaur, 2019).

En el corazón de esta revolución se encuentra la implementación de sistemas de monitoreo medioambiental que utilizan sensores inalámbricos y tecnología IoT para recolectar datos importantes del ambiente (Talavera et al., 2017). Estos sistemas son capaces de medir variables como temperatura, humedad, niveles de luz, concentración de CO₂, y más, ofreciendo una imagen detallada de las condiciones que enfrentan los cultivos (Kour & Arora, 2020). La utilización de esta información para la toma de decisiones agronómicas puede conducir a mejoras palpables en la salud de los cultivos, optimización del uso de recursos y buscando lograr incrementos en la producción de los mismos (Dhanaraju et al., 2022).

El centro experimental Sacha Wiwa se sitúa en este contexto como un campo de prueba ideal para explorar y validar las capacidades de estas nuevas tecnologías (Dlodlo & Kalezhi, 2015). Ubicado en la parroquia Guasaganda, en una región que posee condiciones topográficas que facilitan los cultivos de Cacao y Café, Sacha Wiwa ofrece la oportunidad para evaluar cómo los sistemas de monitoreo medioambiental basados en IoT, que pueden ser adaptados y optimizados para mejorar las prácticas agrícolas locales (Giler Meza & Pinela Martínez, 2023). La investigación desarrollada en este centro busca no solo demostrar la viabilidad técnica y económica de estas tecnologías sino también explorar su impacto en la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas de producción agrícola (Kim et al., 2020).

Este estudio aborda la implementación de un sistema de monitoreo medioambiental en Sacha Wiwa, detallando el diseño, implementación y evaluación del sistema (Marques & Pitarma, 2018). A través de una metodología comprensiva, se examinan las variables ambientales que influyen en el rendimiento de los cultivos y se evalúa el impacto de las tecnologías IoT en la gestión agrícola (Yascaribay et al., 2022). El



proyecto no solo tiene la intención de contribuir significativamente a la literatura científica en el campo de la agricultura inteligente y sostenible sino también servir como un referente para la implementación de tecnologías similares en otros contextos agrícolas, marcando así un punto de partida en la realización práctica de la Agricultura 4.0.

Estado del Arte

La agricultura enfrenta desafíos sin precedentes ante el crecimiento poblacional y el cambio climático, requiriendo aumentar la productividad de manera sostenible mientras se minimizan los impactos ambientales negativos. En este contexto (Vos & Bellù, 2019) manifiesta que la Agricultura 4.0, que integra nuevas tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), sensores inalámbricos y análisis de datos en tiempo real, promete mejorar significativamente la eficiencia, productividad y sostenibilidad agrícola.

Los sistemas de monitoreo medioambiental basados en IoT y sensores inalámbricos son fundamentales en esta revolución agrícola. Estos recolectan datos clave como temperatura, humedad, luz y concentración de CO₂, proporcionando información detallada sobre las condiciones que enfrentan los cultivos según los estudios realizados por (Javaid et al., 2022) y (Li et al., 2021), además el uso de estos datos para la toma de decisiones agronómicas puede conducir a mejoras en la salud de los cultivos, optimización de recursos e incrementos en la producción según (Yusianto et al., 2020).

La estación meteorológica Ecowitt, en particular el modelo GW1100, se destaca por su capacidad para recopilar datos precisos de temperatura, humedad, presión barométrica, velocidad y dirección del viento, y precipitación (Al-Rawi, 2024). Su integración con tecnologías IoT permite la transmisión inalámbrica de datos a plataformas en la nube para su análisis y visualización en tiempo real. Estudios como el de (Yavari et al., 2022) han demostrado la efectividad de las estaciones Ecowitt en el monitoreo de condiciones ambientales para la agricultura de precisión.

Por otro lado, la estación Netatmo Weather Station se caracteriza por su diseño compacto y fácil instalación, lo que la hace adecuada para su implementación en entornos agrícolas (Trilles et al., 2020). Esta estación mide parámetros como temperatura, humedad, presión barométrica, calidad del aire y niveles de CO₂, y transmite los datos a través de Wi-Fi a una aplicación móvil y a la nube. Investigaciones como la (Hahn et al., 2022) han utilizado la estación Netatmo Weather Station para el monitoreo microclimático en viñedos, demostrando su utilidad en la optimización del manejo de cultivos.

La estación Davis Vantage Pro2, a su vez, es reconocida por su robustez y confiabilidad en condiciones climáticas adversas (García et al., 2015). Esta estación meteorológica profesional mide una amplia gama de variables, incluyendo temperatura, humedad, presión barométrica, velocidad y dirección del viento, precipitación, radiación solar y evapotranspiración. Su capacidad para transmitir datos inalámbricamente a través de tecnologías IoT la convierte en una herramienta valiosa para el monitoreo ambiental en agricultura. Estudios como el de Asseng et al. (Ishaque et al., 2023) han utilizado la Davis Vantage Pro2 para evaluar el impacto del cambio climático en la producción de trigo, resaltando su utilidad en la investigación agrícola.

La inclusión de estos modelos en el estado del arte proporcionará una visión más completa de las soluciones tecnológicas disponibles para el monitoreo ambiental en agricultura. Al analizar sus características y aplicaciones exitosas en estudios previos, se sentarán las bases para la selección y implementación de un sistema de monitoreo adecuado para el centro experimental Sacha Wiwa.



Diversas investigaciones han explorado la aplicación de IoT en agricultura. Por ejemplo, en (Sinha & Dhanalakshmi, 2022) revisaron aplicaciones de IoT en campos agroindustriales y ambientales, resaltando su potencial, también (Terence & Purushothaman, 2020) examinaron desarrollos recientes de IoT en agricultura de precisión, además (Gómez-Chabla et al., 2019) analizaron la agricultura inteligente basada en IoT para una producción sostenible. Estos estudios destacan la viabilidad y beneficios de estas tecnologías.

El centro experimental Sacha Wiwa, ubicado en una región propicia para cultivos de cacao y café en Ecuador, se presenta como un escenario ideal para validar estas tecnologías y su adaptación a prácticas agrícolas locales, como lo menciona (Tzounis et al., 2017) cuando implementaron un sistema web de análisis de datos ambientales para apoyar la toma de decisiones en plantaciones de cacao.

(Madushanki et al., 2019) revisaron aplicaciones de IoT para automatización agrícola, mientras que (Abbasi et al., 2019) desarrollaron un sistema de monitoreo agrícola usando redes de sensores inalámbricos e IoT. (Zhang et al., 2018) evaluaron el rendimiento de sistemas de comunicación usados para IoT en agricultura. Estos trabajos sientan bases para la implementación práctica de la Agricultura 4.0.

METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo, en primera instancia se realizó una revisión de la literatura relacionada con sistemas de monitoreo medioambiental basados en sensores inalámbricos y tecnologías IoT, que se aprecia en la Tabla 1. Esta revisión permitió identificar algunos modelos relevantes en el mercado, como Ecowitt, Netatmo Weather Station y Davis Vantage Pro2.

| Autor(es) | Título | Revista/Publicación | Año |
|---------------------------|--|---|------|
| Talavera et al. | Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields | Computers and Electronics in Agriculture | 2017 |
| Kour and Arora | Recent Developments of the Internet of Things in Agriculture: A Survey | IEEE Access | 2020 |
| Khanna and Kaur | Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture | Computers and Electronics in Agriculture | 2019 |
| Tzounis et al. | Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges | Biosystems Engineering | 2017 |
| Abbasi et al. | Internet of Things in agriculture: A survey | Proceedings of 3rd International Conference on Internet of Things and Applications | 2019 |
| Terence and Purushothaman | Systematic review of Internet of Things in smart farming | Transactions on Emerging Telecommunications Technologies | 2020 |
| Madushanki et al. | Adoption of the Internet of Things (IoT) in agriculture and smart farming towards urban greening: A review | International Journal of Advanced Computer Science and Applications | 2019 |
| Dlodlo and Kalezhi | The internet of things in agriculture for sustainable rural development | Proceedings of 2015 International Conference on Emerging Trends in Networks and Computer Communications | 2015 |
| Gómez-Chabla et al. | IoT Applications in Agriculture: A Systematic Literature Review | Advances in Intelligent Systems and Computing | 2019 |
| Sinha and Dhanalakshmi | Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey | Future Generation Computer Systems | 2022 |



| | | | |
|---------------------|---|--|------|
| Zhang et al. | Internet of Things Applications for Agriculture | Internet of Things A to Z | 2018 |
| Marques and Pitarma | Agricultural environment monitoring system using wireless sensor networks and IoT | Iberian Conference on Information Systems and Technologies | 2018 |
| Yusianto et al. | IOT BASED SMART AGRO-INDUSTRIAL TECHNOLOGY WITH SPATIAL ANALYSIS | Jurnal Teknologi Industri Pertanian | 2020 |
| Javaid et al. | Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies | International Journal of Intelligent Networks | 2022 |
| Li et al. | Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things | Computers and Electronics in Agriculture | 2021 |

Tabla 1. Revisión de Literatura

Arquitectura de IoT para la Monitorización Agroambiental con Ecowitt GW1100

En este proyecto se implementó una arquitectura de Internet de las Cosas (IoT) utilizando la estación meteorológica Ecowitt GW1100, diseñada para proporcionar una monitorización precisa y en tiempo real de las condiciones agroambientales en cultivos de cacao y café.

Componentes de la Arquitectura

Sensores y Actuadores

Estación Meteorológica Ecowitt GW1100:

Sensores Integrados: Mide temperatura, humedad y presión barométrica.

Compatibilidad con Sensores Adicionales: Equipada con capacidades para conectar anemómetros, pluviómetros, sensores de suelo y sensores de radiación solar, proporcionando una visión holística de las condiciones meteorológicas y del suelo.

Pantalla LCD: Facilita la visualización in situ de las mediciones ambientales.

Conectividad y Comunicación de Datos

Conectividad Wi-Fi: Permite la transmisión de datos recopilados a un gateway central o directamente a la nube para su análisis.

Gateway Sigfox: Utilizado para recolectar y transmitir datos desde múltiples sensores distribuidos por el campo a la plataforma en la nube, asegurando una comunicación eficiente y de bajo consumo energético.

Plataforma en la Nube

Almacenamiento y Procesamiento de Datos: Los datos se almacenan y procesan en la nube, permitiendo el acceso y análisis a largo plazo.

Interfaz de Usuario: Se proporciona una interfaz gráfica a través de dashboards en línea, donde los agricultores pueden visualizar datos históricos y en tiempo real, y recibir recomendaciones basadas en análisis predictivos.

Automatización y Respuesta

Sistemas de Riego Automatizados: Integración con sistemas de riego que pueden ser controlados automáticamente en respuesta a las señales del modelo de predicción basado en los datos recopilados, optimizando el uso del agua y la respuesta a las necesidades hídricas de los cultivos.

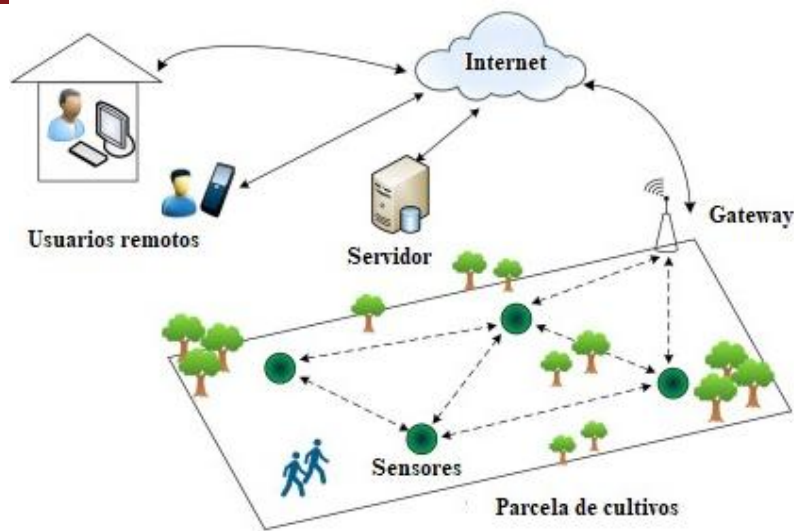


Figura 1. Arquitectura de IoT con Ecowitt GW1100

A continuación, se llevó a cabo un análisis comparativo de las principales características de estos modelos, considerando aspectos como la tecnología que utilizan los sensores, la conectividad, la facilidad de uso, compatibilidad con otros sensores, entre otros. Este análisis permitió seleccionar el modelo Ecowitt GW1100 como el más propicio para su implementación en el centro experimental Sacha Wiwa de la parroquia Guasaganda del cantón La Maná de la provincia de Cotopaxi, debido a que combina un alto rendimiento en relación al costo y las prestaciones otorgadas por este modelo.

| Características | Ecowitt GW1100 | Netatmo Weather Station | Davis Vantage Pro2 |
|---|--|---|---|
| Sensores integrados | Temperatura, humedad, presión barométrica | Temperatura, humedad, presión barométrica | Temperatura, humedad, presión barométrica, velocidad del viento, dirección del viento |
| Conectividad inalámbrica | Wi-Fi | Wi-Fi, Bluetooth | Wi-Fi |
| Gateway | Sigfox | Embebido | Embebido |
| Compatibilidad con sensores adicionales | Sí (anemómetro, pluviómetro, sensor de suelo, sensor de radiación solar) | Sí (módulos adicionales disponibles) | Sí (variedad de sensores profesionales) |
| Pantalla LCD | Sí | Sí | Sí |
| Alimentación | Adaptador de corriente USB, batería de respaldo interna | Adaptador de corriente USB | Adaptador de corriente CA |
| Dimensiones | 1.2" x 3.5" x 6.1" | 7.9" x 6.3" x 3.9" | 8.1" x 7.1" x 6.7" |
| Peso | 0.5 libras | 1.3 libras | 2.8 libras |

Tabla 2. Características de las Estaciones



Figura 2. Implementación del proyecto IoT

Una vez seleccionado el modelo, se procedió a la implementación de una red de sensores del modelo Ecowitt GW1100 en el centro experimental. Esta red se desplegó en diferentes puntos de una parcela para cubrir las áreas de interés, asegurando una recolección de datos representativa de las condiciones agroambientales del lugar.

Ubicación y Tiempo de Estudio. La investigación se llevó a cabo en una parcela del centro experimental Sacha Wiwa, ubicada en la parroquia Guasaganda del cantón La Maná de la provincia de Cotopaxi. La recolección de datos agroambientales fue realizada durante el mes de abril del 2024, con una frecuencia de muestreo de cada 5 minutos.

Materiales. El equipo central utilizado fue la Estación Meteorológica Wi-Fi Ecowitt GW1100, la cual incluye sensores de temperatura, humedad y presión barométrica. Adicionalmente, se integraron sensores de humedad del suelo y de humedad de hoja para una evaluación agronómica detallada. Los datos fueron almacenados y gestionados a través de la plataforma Ecowitt, que permite un análisis remoto en tiempo real.

Procedimientos de Recolección de Datos. La estación Ecowitt se configuró para recopilar datos de las variables ambientales clave para la agricultura 4.0: temperatura ambiente y del suelo, humedad ambiental y del suelo, tasa y acumulación de lluvia, y presión barométrica. La estación se calibró antes del despliegue siguiendo las especificaciones del fabricante y se verificó post-despliegue para asegurar la precisión de los datos.

Diseño experimental. El diseño experimental consistió en un monitoreo continuo a través de los sensores, recopilando un vasto conjunto de datos que reflejan las condiciones microclimáticas del entorno de cultivo. Se utilizó un diseño de investigación observacional, sin manipulación de las variables, para documentar las



condiciones ambientales naturales y su impacto en la producción agrícola.

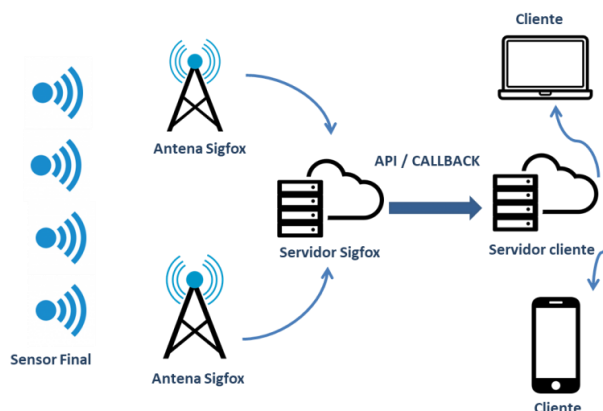


Figura 3. Tecnología utiliza por los sensores Ecowitt(Wang et al., 2023)

También en este estudio, se implementó un modelo de predicción basado en técnicas de Machine Learning, específicamente utilizando un algoritmo de Random Forest para estimar el estrés hídrico de los cultivos o la evapotranspiración potencial basada en estas variables para contextos agrícolas (Granata, 2019), con un enfoque particular en cultivos de alto valor como el cacao y el café. Este modelo se seleccionó debido a su capacidad para manejar grandes conjuntos de datos con múltiples variables de entrada, su robustez frente al overfitting, y su habilidad que posee para modelar interacciones no lineales entre variables meteorológicas y fisiológicas de los cultivos.

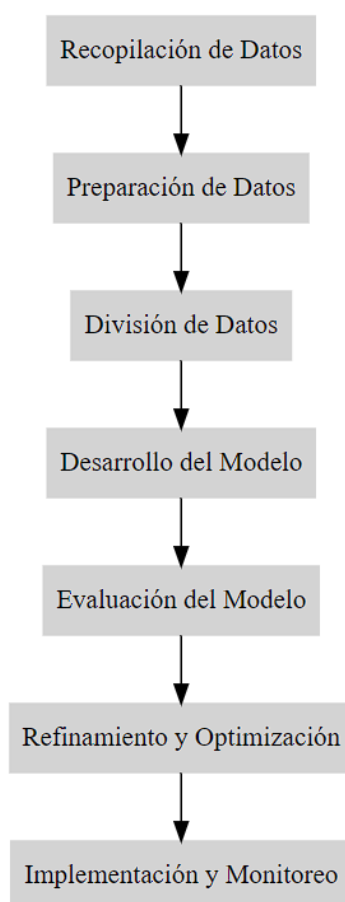


Figura 4. Diagrama de Bloques para el desarrollo de Random Forest



RESULTADOS

La implementación de un sistema de monitoreo medioambiental mediante sensores inalámbricos y tecnologías IoT en el centro experimental Sacha Wiwa ha permitido la recopilación continua y precisa de datos climáticos críticos. Este estudio presenta un análisis de las variables agroambientales como: la temperatura, la humedad y la radiación solar, que son esenciales para la gestión eficiente y sostenible de la agricultura en la región.

Temperatura: Durante el período de estudio, se observaron fluctuaciones significativas en la temperatura ambiente, con un promedio de 28.81°C. La temperatura más baja registrada fue de 24.2°C y la más alta fue de 34.4°C (ver Figura 2). Estos datos sugieren variabilidad diurna y posibles implicaciones para la gestión del estrés térmico en los cultivos, especialmente en cultivos sensibles a extremos térmicos como el cacao y el café, predominantes en esta región.

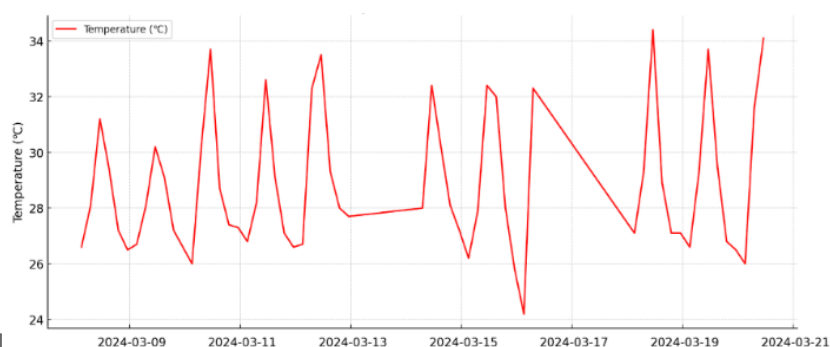


Figura 5. Temperatura a lo largo del tiempo

Humedad: Los valores de humedad mostraron una variabilidad menos pronunciada que la temperatura, con un promedio del 74.07% y oscilaciones entre 60% y 81% (ver Figura 3). Este rango de humedad, adecuado para la mayoría de los cultivos de la zona, subraya la importancia de un monitoreo constante para evitar condiciones que puedan favorecer el desarrollo de enfermedades fúngicas o el estrés hídrico durante períodos más secos.

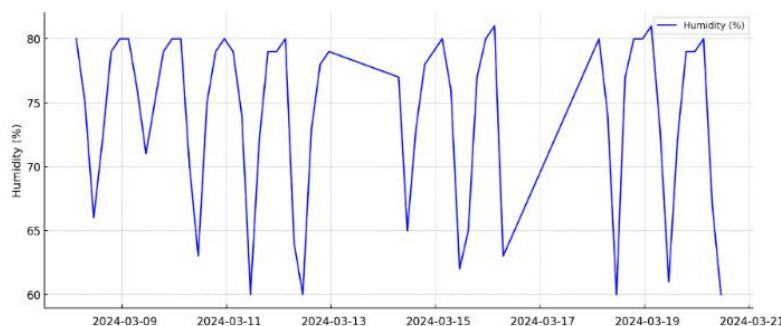


Figura 6. Humedad a lo largo del tiempo

Radiación Solar: La radiación solar presentó variaciones notables a lo largo del día, con un promedio de 320.38 W/m² y un pico de hasta 1112 W/m² (ver Figura 4). Este aspecto es crucial para la fotosíntesis y el crecimiento



vegetal, y la monitorización precisa permite ajustar las prácticas de manejo del cultivo para maximizar la eficiencia fotosintética y evitar daños por insolación en los días de alta radiación.

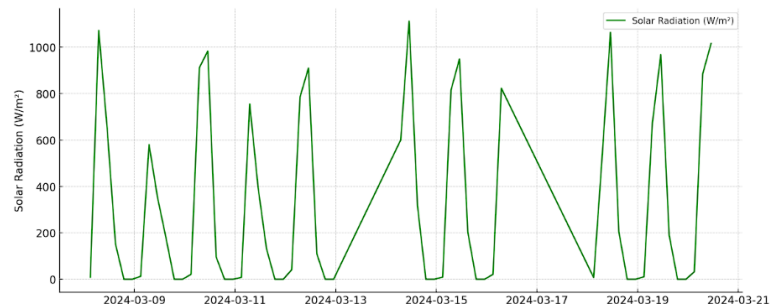


Figura 7. Radiación Solar a lo largo del tiempo

En el desarrollo del modelo de Random Forest para predecir la evapotranspiración en cultivos de cacao y café, se obtuvieron resultados que destacan la efectividad del modelo en capturar las características entre las variables climáticas y la evapotranspiración. Los resultados cuantitativos del modelo se presentan a continuación:

| | |
|---------------------------------|--------|
| Root Mean Squared Error (RMSE): | 0.7246 |
| Mean Absolute Error (MAE): | 0.5952 |

Tabla 3. Resultados Obtenidos con el modelo de Predicción

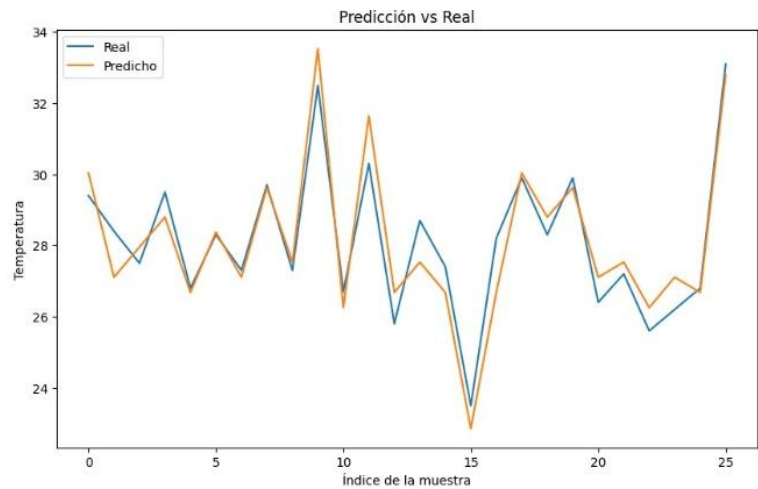


Figura 8. Predicción vs Real

RMSE (0.724582706691928)

El RMSE de 0.7246 indica que, en promedio, las predicciones del modelo se desvían aproximadamente 0.7246 unidades del valor real de evapotranspiración. Dado que este valor es relativamente bajo, sugiere que el modelo tiene una alta precisión en sus predicciones. La magnitud de este error debe ser evaluada en el contexto del rango de valores de evapotranspiración observados para determinar su relevancia práctica

MAE (0.5951699036818283)

El MAE proporciona una medida de los errores entre los valores predichos y los observados, ajustando todos los errores en una escala absoluta. Un MAE de 0.5952 es bastante bajo, lo que refuerza la idea de que el modelo realiza predicciones cercanas a los valores reales la mayoría del tiempo, con desviaciones manejables



DISCUSIÓN

La implementación del sistema de monitoreo medioambiental mediante sensores inalámbricos Ecowitt GW1100 y tecnologías IoT en el centro experimental Sacha Wiwa evidencia el papel fundamental que cumple la Agricultura 4.0 en territorios rurales. Los resultados muestran que la integración de sensores de temperatura, humedad y radiación solar con plataformas de análisis en la nube constituye una estrategia tecnológicamente viable y operativamente eficiente para la toma de decisiones agronómicas. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Talavera et al. (2017) y Javaid et al. (2022), quienes destacan que la recolección continua de datos ambientales mejora significativamente la capacidad de respuesta y la sostenibilidad de los sistemas productivos.

En términos de desempeño técnico, la estación Ecowitt GW1100 mostró un comportamiento adecuado para las condiciones climáticas del centro experimental, registrando datos con estabilidad y sin pérdida de transmisión. Este desempeño es congruente con estudios previos, como el de Yavari et al. (2022), donde las estaciones Ecowitt demuestran alta fiabilidad en escenarios agroambientales. Además, la presencia de variaciones pronunciadas en la radiación solar y la temperatura confirma la necesidad de sistemas de monitoreo en tiempo real para cultivos sensibles como cacao y café. Estas fluctuaciones, que alcanzaron picos de 1112 W/m² y temperaturas superiores a 34 °C, pueden generar estrés hídrico o térmico si no se gestionan adecuadamente. La información generada por el sistema permite anticipar estos eventos y ajustar las actividades agrícolas, reforzando el valor de la digitalización en el campo.

Por otro lado, la humedad relativa promedio del 74.07% sugiere un microclima favorable para los cultivos predominantes. Sin embargo, la variabilidad observada (60–81%) confirma lo señalado por Sinha y Dhanalakshmi (2022) sobre la importancia de monitorear parámetros asociados al desarrollo de plagas y enfermedades, especialmente en ambientes tropicales donde los hongos son frecuentes. En este sentido, la disponibilidad continua de datos habilita estrategias preventivas y reduce la dependencia de inspecciones manuales, mejorando la eficiencia del manejo fitosanitario.

En cuanto al modelo predictivo basado en Random Forest, los valores de RMSE (0.7246) y MAE (0.5952) evidencian que el modelo ofrece una capacidad predictiva aceptable para estimar la evapotranspiración o el estrés hídrico. Estos resultados se encuentran en un rango similar a los reportados por Granata (2019), quien señala que los algoritmos basados en árboles tienden a ofrecer un buen rendimiento para procesos no lineales y multivariados propios de los sistemas agrícolas. La robustez del algoritmo confirma su utilidad práctica como herramienta complementaria dentro de la arquitectura IoT, potenciando la automatización de procesos como el riego, lo que coincide con lo discutido por Li et al. (2021) en invernaderos automatizados.

Adicionalmente, la utilización de tecnologías de comunicación como Wi-Fi y Sigfox en la arquitectura implementada permitió validar su pertinencia en zonas rurales. Aunque redes LPWAN como LoRaWAN o NB-IoT podrían ofrecer mayor cobertura, el uso de Sigfox resultó eficiente para la transmisión de datos de bajo ancho de banda, tal como señalan Wang et al. (2023). La experiencia obtenida en este estudio aporta evidencia práctica sobre la viabilidad de combinar tecnologías de conectividad heterogéneas, ampliando la aplicabilidad del sistema en microclimas diversos como los que caracterizan a Sacha Wiwa.

Un aspecto relevante de esta investigación es su contribución para reducir brechas tecnológicas entre zonas



rurales y entornos urbanos. La digitalización del monitoreo agroambiental permite transformar prácticas tradicionales hacia modelos de gestión más precisos, automatizados y basados en evidencia. Esto coincide con la visión de Klerkx et al. (2019), quienes enfatizan que la Agricultura 4.0 no solo representa una innovación tecnológica, sino también un avance social y económico para los agricultores.

CONCLUSIONES

La implementación de un sistema de monitoreo ambiental basado en sensores inalámbricos Ecowitt GW1100 y tecnologías IoT en el centro experimental Sacha Wiwa ha demostrado ser técnica y económicamente viable. Esta implementación establece un referente para la adopción de soluciones dentro de la Agricultura 4.0 en regiones rurales con condiciones similares.

Los datos recopilados sobre variables importantes como temperatura, humedad y radiación solar proporcionan una base sólida para la toma de decisiones informadas en la gestión agrícola. El análisis de estos parámetros permite optimizar prácticas como la irrigación, fertilización y control de plagas, promoviendo una agricultura más eficiente y sostenible.

La integración del modelo de predicción basado en técnicas de Machine Learning, específicamente Random Forest, para estimar el estrés hídrico de los cultivos o la evapotranspiración potencial, ha demostrado su efectividad en capturar las características e interacciones entre las variables climáticas y fisiológicas de los cultivos. Los resultados cuantitativos obtenidos, con métricas como el Error Cuadrático Medio (RMSE) de 0.7246, el Error Absoluto Medio (MAE) de 0.5952, respaldan la precisión y robustez del modelo.

La integración de tecnologías IoT en el sector agrícola no solo mejora la eficiencia productiva, sino que también contribuye a enfrentar desafíos globales como el cambio climático y la seguridad alimentaria. Al optimizar el uso de recursos y minimizar el impacto ambiental, la Agricultura 4.0 se posiciona como una buena estrategia para la sostenibilidad a largo plazo.

Este estudio de caso muestra la importancia de integrar nuevas tecnologías de monitoreo y análisis en la agricultura para enfrentar los desafíos actuales y futuros en el sector. La metodología y resultados presentados podrán servir como referencia para investigadores, agricultores y tomadores de decisiones interesados en aprovechar el potencial de estas tecnologías.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Jonathan Alexis Montaguano Toaquiza lideró la concepción y diseño del estudio, seleccionó y configuró los sensores Ecowitt GW1100, supervisó el despliegue del sistema IoT en el centro experimental, analizó e interpretó los datos recopilados, redactó el borrador inicial del manuscrito. Manuel Asdrual Montaña Blacio contribuyó a la concepción y diseño del estudio, recopiló y procesó los datos ambientales, asistió en la interpretación de los resultados, realizó una revisión detallada del contenido intelectual del manuscrito, y aprobó la versión final del manuscrito a publicar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento al centro experimental Sacha Wiwa, ubicado en la parroquia Guasaganda del Cantón La Maná de la provincia de Cotopaxi, por brindar el espacio y las

facilidades necesarias para llevar a cabo esta investigación. Su apoyo y colaboración fueron fundamentales para el desarrollo de este estudio sobre la implementación de un sistema de monitoreo medioambiental mediante sensores inalámbricos y tecnologías IoT.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de interés en relación con este trabajo de investigación.

Referencias Bibliográficas

- Abbasi, M., Yaghmaee, M. H., & Rahnama, F. (2019). Internet of Things in agriculture: A survey. *Proceedings of 3rd International Conference on Internet of Things and Applications, IoT 2019*. <https://doi.org/10.1109/IICITA.2019.8808839>
- Al-Rawi, M. A. M. (2024). Low-Cost soil moisture Sensors' assessment for their accuracy after calibration through the Gravimetric Method. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 56(1), 353–369. <https://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.1.32>
- Calicioglu, O., Flammini, A., Bracco, S., Bellù, L., & Sims, R. (2019). The Future Challenges of Food and Agriculture: An Integrated Analysis of Trends and Solutions. *Sustainability* 2019, Vol. 11, Page 222, 11(1), 222. <https://doi.org/10.3390/SU11010222>
- Dhanaraju, M., Chenniappan, P., Ramalingam, K., Pazhanivelan, S., & Kaliaperumal, R. (2022). Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture. *Agriculture* 2022, Vol. 12, Page 1745, 12(10), 1745. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12101745>
- Dlodlo, N., & Kalezhi, J. (2015). The internet of things in agriculture for sustainable rural development. *Proceedings of 2015 International Conference on Emerging Trends in Networks and Computer Communications, ETNCC 2015*, 13–18. <https://doi.org/10.1109/ETNCC.2015.7184801>
- García, G. A., Dreccer, M. F., Miralles, D. J., & Serrago, R. A. (2015). High night temperatures during grain number determination reduce wheat and barley grain yield: a field study. *Global Change Biology*, 21(11), 4153–4164. <https://doi.org/10.1111/GCB.13009>
- Giler Meza, A. Y., & Pinela Martínez, G. E. (2023). Implementación de un sistema web de analítica de datos ambientales para la toma de decisiones en las plantaciones de cacao Sacha Wiwa Guasaganda. <http://localhost/handle/27000/11337>
- Gómez-Chabla, R., Real-Avilés, K., Morán, C., Grijalva, P., & Recalde, T. (2019). IoT Applications in Agriculture: A Systematic Literature Review. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 901, 68–76. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10728-4_8/COVER
- Granata, F. (2019). Evapotranspiration evaluation models based on machine learning algorithms—A comparative study. *Agricultural Water Management*, 217, 303–315. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.03.015>
- Hahn, C., Garcia-Marti, I., Sugier, J., Emsley, F., Beaulant, A. L., Oram, L., Strandberg, E., Lindgren, E., Sunter, M., & Ziska, F. (2022). Observations from Personal Weather Stations—EUMETNET Interests and Experience. *Climate* 2022, Vol. 10, Page 192, 10(12), 192. <https://doi.org/10.3390/CLI10120192>
- Ishaque, W., Osman, R., Hafiza, B. S., Malghani, S., Zhao, B., Xu, M., & Ata-Ul-Karim, S. T. (2023).



- Quantifying the impacts of climate change on wheat phenology, yield, and evapotranspiration under irrigated and rainfed conditions. *Agricultural Water Management*, 275, 108017. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.108017>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. *International Journal of Intelligent Networks*, 3, 150–164. <https://doi.org/10.1016/J.IJIN.2022.09.004>
- Khanna, A., & Kaur, S. (2019). Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 218–231. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2018.12.039>
- Kim, W. S., Lee, W. S., & Kim, Y. J. (2020). A Review of the Applications of the Internet of Things (IoT) for Agricultural Automation. *Journal of Biosystems Engineering*, 45(4), 385–400. <https://doi.org/10.1007/S42853-020-00078-3/METRICS>
- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91, 100315. <https://doi.org/10.1016/J.NJAS.2019.100315>
- Kour, V. P., & Arora, S. (2020). Recent Developments of the Internet of Things in Agriculture: A Survey. *IEEE Access*, 8, 129924–129957. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009298>
- Li, H., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y., & Chow, D. (2021). Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191, 106558. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2021.106558>
- Madushanki, A. A. R., Halgamuge, M. N., Wirasagoda, W. A. H. S., & Syed, A. (2019). Adoption of the Internet of Things (IoT) in agriculture and smart farming towards urban greening: A review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10(4), 11–28. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100402>
- Marques, G., & Pitarma, R. (2018). Agricultural environment monitoring system using wireless sensor networks and IoT. *Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI*, 2018-June, 1–6. <https://doi.org/10.23919/CISTI.2018.8399320>
- Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 1–22. <https://doi.org/10.25165/J.IJABE.20181101.3210>
- Sinha, B. B., & Dhanalakshmi, R. (2022). Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 126, 169–184. <https://doi.org/10.1016/J.FUTURE.2021.08.006>
- Talavera, J. M., Tobón, L. E., Gómez, J. A., Culman, M. A., Aranda, J. M., Parra, D. T., Quiroz, L. A., Hoyos, A., & Garreta, L. E. (2017). Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 283–297. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2017.09.015>
- Terence, S., & Purushothaman, G. (2020). Systematic review of Internet of Things in smart farming. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 31(6), e3958. <https://doi.org/10.1002/ETT.3958>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2018). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(50), 20260–20264.

https://doi.org/10.1073/PNAS.1116437108/SUPPL_FILE/PNAS.201116437SI.PDF

- Trilles, S., Juan, P., Díaz-Avalos, C., Ribeiro, S., & Painho, M. (2020). Reliability Evaluation of the Data Acquisition Potential of a Low-Cost Climatic Network for Applications in Agriculture. *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 6597, 20(22), 6597. <https://doi.org/10.3390/S20226597>
- Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 164, 31–48. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2017.09.007>
- Vos, R., & Bellù, L. G. (2019). Global Trends and Challenges to Food and Agriculture into the 21st Century. *Sustainable Food and Agriculture: An Integrated Approach*, 11–30. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812134-4.00002-9>
- Wang, Y., Gao, X.-Z., Xue, X., Alqurashi, H., Bouabdallah, F., & Khairullah, E. (2023). SCAP SigFox: A Scalable Communication Protocol for Low-Power Wide-Area IoT Networks. *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 3732, 23(7), 3732. <https://doi.org/10.3390/S23073732>
- Yascaribay, G., Huerta, M., Silva, M., & Clotet, R. (2022). Performance Evaluation of Communication Systems Used for Internet of Things in Agriculture. *Agriculture* 2022, Vol. 12, Page 786, 12(6), 786. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12060786>
- Yavari, A. ; , Modica, G. Di, Cucchiatti, F., Bagha, H., Yavari, A., & Georgakopoulos, D. (2022). Hybrid Sensing Platform for IoT-Based Precision Agriculture. *Future Internet* 2022, Vol. 14, Page 233, 14(8), 233. <https://doi.org/10.3390/FI14080233>
- Yusianto, R., Marimin, M., Suprihatin, S., & Hardjomidjojo, H. (2020). IOT BASED SMART AGRO-INDUSTRIAL TECHNOLOGY WITH SPATIAL ANALYSIS. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 30(3), 319–328. <https://doi.org/10.24961/J.TEK.IND.PERT.2020.30.3.319>
- Zhang, L., Dabipi, I. K., & Brown, W. L. (2018). Internet of Things Applications for Agriculture. *Internet of Things A to Z*, 507–528. <https://doi.org/10.1002/9781119456735.CH18>