



DISEÑO Y DESPLIEGUE DE UN SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN IOT PARA CULTIVOS HIDROPONICOS

DESIGN AND DEPLOYMENT OF AN IOT-BASED MONITORING SYSTEM FOR HYDROPONIC CROPS

Manuel Montaña-Blacio^{1,*} , Jorge González-Escarabay² ,
 Óscar Jiménez-Sarango³ , Leydi Mingo-Morocho³ , César Carrión-Aguirre³ 

Recibido: 18-11-2022, Recibido tras revisión: 15-12-2022, Aceptado: 02-02-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

El IoT es tendencia tecnológica que hace posible sistemas inteligentes entre cosas conectadas. Su aplicación se encuentra en diferentes campos, uno de ellos es la agricultura, donde el uso de nuevas técnicas, como la hidroponía, está en auge. Es importante abordar esta área, porque la población mundial alcanzará un aproximado de 9600 millones de habitantes para el 2050, por ende, para satisfacer esta demanda se necesita que el ritmo industrial agrícola sea aún más rápido y preciso. Además, el aumento de la temperatura ambiente y los cambios climáticos por el calentamiento global también están afectando negativamente a la producción agraria. En esta investigación se presenta un sistema de monitoreo IoT escalable basado en la tecnología Sigfox con capacidades de predicción del 89,37 % a través de redes neuronales para aplicaciones agrícolas. Se proporciona una arquitectura efectiva de cuatro capas que consta de percepción, red, middleware y aplicación. Para la validación, el sistema fue construido, probado experimentalmente y validado mediante el monitoreo de la temperatura, humedad y control de la recirculación de nutrientes, en un sistema hidropónico de la ciudad de Loja en Ecuador, durante cinco meses. El sistema desarrollado es lo suficientemente inteligente para proporcionar la acción de control adecuada para el entorno hidropónico, en función de los múltiples parámetros de entrada recopilados, facilitando una gestión efectiva para los agricultores, por ende, mejorando su producción.

Palabras clave: hidroponía, Sigfox, redes neuronales, Ufox, Internet de las cosas, agricultura inteligente

Abstract

The IoT is a technological trend that enables the application of intelligent systems between connected things. IoT is being applied in different fields, including agriculture, where new techniques such as hydroponics are booming. As the increase in ambient temperature and climate changes caused by global warming have negatively affected agricultural production and the rapid growth of the world's population, which will reach approximately 9.6 billion by 2050, the industrial pace of agriculture needs to be even faster and more precise. This research presents a scalable IoT monitoring system based on Sigfox technology with 89.37% prediction capabilities through neural networks for agricultural applications. An effective four-layer architecture consisting of perception, network, middleware, and application is provided. The system was experimentally tested and validated for five months by monitoring temperature, humidity, and nutrient recirculation control in a hydroponic system in Loja, Ecuador. The developed system is smart enough to adequately control the hydroponic environment based on the multiple input parameters collected, facilitating effective management for farmers and improving production.

Keywords: Hydroponics, Sigfox, Neural Networks, Ufox, Internet of Things, Smart Agriculture

^{1,*}Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: mmontano@upse.edu.ec.

²Facultad de la Educación, el Arte, y la Comunicación, Universidad Nacional de Loja, Ecuador.

³Tecnología Superior en Electrónica, Instituto Superior Tecnológico Sudamericano, Loja, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Montaña-Blacio, M.; González-Escarabay, J.; Jiménez-Sarango, O.; Mingo-Morocho, L. y Carrión-Aguirre, C. "Diseño y despliegue de un sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos hidropónicos," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 30, pp. 9-18, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.01>.

1. Introducción

El Internet de las cosas (IoT) es una tecnología de vanguardia que en los últimos años ha traído múltiples prestaciones para la población en general y organizaciones. Uno de los principales beneficios del uso de esta tecnología como innovación es la capacidad de producir y consumir servicios en tiempo real. IoT ofrece soluciones en diferentes escenarios como tráfico, atención médica, seguridad, hogares inteligentes, ciudades inteligentes y agricultura [1–3]. En el campo de la agricultura, la tecnología IoT se utiliza en diferentes áreas y niveles de la producción industrial agrícola [4]. El principal aporte parte del monitoreo que ayuda a la automatización y recolección de información para generar cultivos e invernaderos controlados a precisión [5]. La agricultura de precisión tiene como objetivo proporcionar un sistema de apoyo a la toma de decisiones que ayude a los agricultores a implementar prácticas agrícolas eficientes, con el propósito de aumentar la rentabilidad, reducir los riesgos ambientales y preservar los recursos naturales [6, 7].

Las aplicaciones de monitoreo agrícola se realizan a través de sensores o dispositivos con el objeto de ayudar a los agricultores a recopilar datos relevantes que aporten significativamente al crecimiento y producción de los cultivos. Algunas propuestas basadas en IoT analizan y procesan los datos remotamente mediante la aplicación de servicios en la nube [8–10], lo que ayuda a los investigadores y agricultores a tomar mejores decisiones. Un caso práctico de gestión de IoT se propone en [11] que monitorea variables como el viento, el suelo, la atmósfera y el agua en un área extensa. Identifican soluciones de monitoreo agrícola en función de las áreas o subdominios que son el monitoreo del suelo, aire, temperatura, agua, enfermedades, ubicación, condiciones ambientales, plagas y la fertilización. Además, dan a conocer cómo el paradigma IoT mejora la interacción humana en el mundo físico a través de dispositivos electrónicos, protocolos de comunicación de bajo costo y tecnologías de comunicación.

Un caso particular es la tecnología de comunicación inalámbrica Sigfox, es una tecnología emergente de área amplia de baja potencia (LPWAN), que ofrece un largo alcance, transmisión de datos segura y un bajo consumo de energía [12]. Utiliza espectro de radio sin licencia en las bandas industrial, científica y médica (ISM). Además, permite la comunicación bidireccional entre usuarios y sensores a nivel individual o grupal. Por lo tanto, Sigfox es adecuado para las aplicaciones de IoT que solo requieren la transmisión de pequeños paquetes de datos y un bajo consumo de energía. Un caso relevante presentan Hernández *et al.* [9], diseñan un sistema de monitoreo escalable basado en IoT con capacidades de predicción para aplicaciones agrícolas. Proporcionan una arquitectura efectiva de cuatro capas e implementan la conectividad de los dispositivos

del sistema de monitorización de invernadero sobre la red Sigfox.

A pesar de los avances recientes en las tecnologías de IoT, su implementación en la agricultura presenta muchos desafíos que limitan su adopción. Uno de los principales problemas es, por supuesto, combatir la variabilidad de las condiciones climáticas dentro de los invernaderos o cultivos debido al fuerte impacto en su productividad. Es necesario colocar de manera eficiente varios puntos de medición dentro de los campos para obtener una mejor información sobre el comportamiento de las condiciones ambientales. Es por ello por lo que este trabajo tiene como objetivo el diseño y la implementación de un sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos hidropónicos utilizando una arquitectura de sistema escalable, modular y de bajo costo.

El sistema se enfoca en monitorear las condiciones del clima y los factores de riesgo que afectan al crecimiento de los cultivos, entre ellos se tiene la temperatura y humedad como variables relevantes. Se construye un dispositivo IoT personalizado usando la red Sigfox para enviar los datos a Internet. Se utiliza la plataforma ThingSpeak para el análisis y visualización de datos, así mismo, se crea un algoritmo de aprendizaje automático para predecir la temperatura en función de la humedad con los datos recopilados por el sistema con el fin de simular el cambio de variables climáticas para el futuro. La validación del sistema se realizó durante una prueba a un sistema hidropónico de lechuga en la ciudad de Loja. El principal aporte de la investigación es proponer un sistema práctico y escalable aplicado para monitorear y controlar los factores climáticos en cultivos. La estructura de IoT consta de una arquitectura de cuatro capas que incluye una capa de percepción para recopilar información del cultivo, una capa de red para hacer posibles las conexiones a Internet, una capa de *software* intermedio para habilitar los servicios en la nube, y la capa de aplicación para entregar información específica a los usuarios.

La sección 2 presenta los materiales y métodos utilizados. La sección 3 detalla la arquitectura del sistema de monitoreo IoT propuesto. La sección 4 describe el diseño y la implementación de los componentes del sistema. La sección 5 muestra la validación experimental del sistema de monitoreo implementado. Después del despliegue, los resultados experimentales verifican la efectividad del monitoreo y pronóstico de las condiciones climáticas del sistema hidropónico. Finalmente, la sección 6 da a conocer las conclusiones y líneas futuras de la presente investigación.

2. Materiales y métodos

La presente investigación se realizó en las instalaciones de la escuela Marieta de Veintimilla de la ciudad de

Loja, con un enfoque experimental cuantitativo, misma que se basa en el desarrollo e implementación de un sistema IoT para el monitoreo y predicción de variables ambientales tales como temperatura, humedad y radiación UV, para llevar a cabo la investigación se planteó un modelo por fases de acuerdo con la arquitectura propuesta.

La primera fase radicó en el desarrollo del prototipo IoT basado en tecnología Sigfox y componentes electrónicos de software y hardware libre. La segunda fase fue la adquisición de datos de temperatura y humedad, donde se utilizó un sensor DTH22 y un sensor UV ML8511 para determinar radiación UV. Como módulo central se contó con un controlador Ufox sincronizado a una unidad de reloj de tiempo real (RTC), que cumple con la función de activación y desactivación de una bomba de agua, misma que dota de líquido y nutrientes a un sistema de cultivo hidropónico, la parte medular del proyecto consistió en el uso de la tecnología Sigfox para transferir la información en tiempo real hacia la plataforma de IoT ThingSpeak.

La tercera fase se enfoca en un método de análisis de datos, basado en redes neuronales; la información recopilada por los sensores es la base para el modelo de aprendizaje, que tiene como objetivo la predicción de variables afines al sistema, con el propósito de predecir las condiciones del ambiente que afectan al crecimiento de las plantas. La fase final consintió en la presentación

de datos para el usuario, donde se puede monitorear el estado de los sensores, así también, encontrar su correlación, citando como ejemplo la proporcionalidad inversa que se pudo verificar entre las variables de temperatura y humedad, mismas que son importantes para determinar parámetros de cultivo en el sistema hidropónico.

2.1. Arquitectura del sistema

El estudio del Internet de las cosas (IoT) ha traído consigo una extensa literatura científica. Existen múltiples arquitecturas, marcos o modelos conceptuales para los sistemas IoT [13–17]. Sin embargo, no existe una arquitectura de referencia estándar única que abarque una variedad de tecnologías. En particular, la incorporación de tecnologías IoT para la agricultura sostenible ha atraído una atención significativa y relevante en [18,19].

La Figura 1 muestra la arquitectura multicapa propuesta para el sistema de monitoreo hidropónico basado en IoT. El diseño consta de cuatro capas, correspondientes a la capa de percepción, red, middleware y aplicación. Se enfoca en ofrecer agilidad en los procesos de producción bajo un sistema práctico y escalable. Esto significa que la arquitectura permite monitorear varias variables o un proceso completo a un costo mínimo, que beneficiará al mejoramiento y eficacia en el proceso de cultivo a través de sistemas hidropónicos o agricultura inteligente.

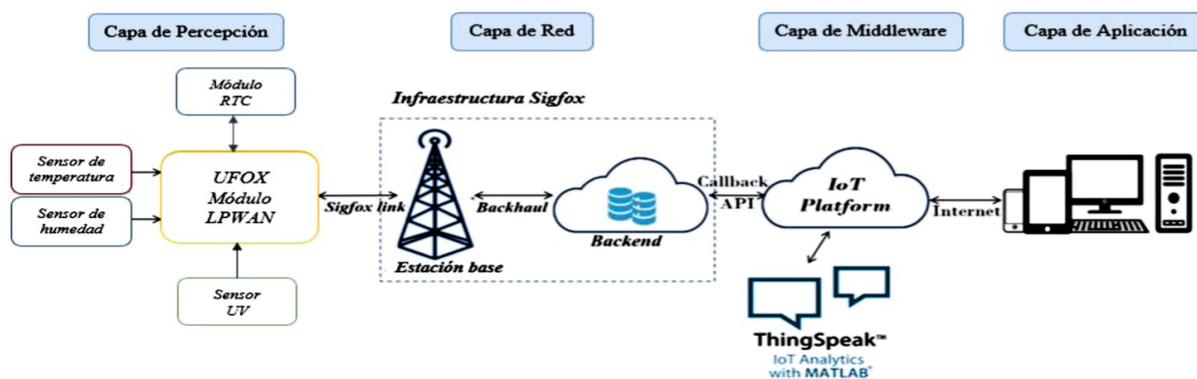


Figura 1. Arquitectura propuesta para el sistema de monitoreo

Las condiciones óptimas de crecimiento de las plantas dependerán de las necesidades y requerimientos de cada tipo de planta. Por lo tanto, un sistema de monitoreo ambiental es clave para maximizar la producción de cultivos de manera efectiva y sostenible. La capa de percepción representa los sensores y dispositivos conectados que permiten el monitoreo remoto del clima. Por lo general, los parámetros microclimáticos que determinan el rendimiento de los cultivos deben monitorearse y controlarse continuamente para garantizar que se cree un entorno óptimo. Sin embargo, la heterogenei-

dad climática puede causar diferencias significativas en cuanto a las características cuantitativas y cualitativas de las plantas, la productividad, así como el desarrollo de diversas enfermedades.

Algunos factores ambientales que afectan el crecimiento de las plantas son comúnmente la temperatura, la humedad relativa, el CO₂, la luz y el agua [20]. Para el caso de estudio, el dispositivo IoT incluye solo los sensores de temperatura, humedad relativa, radiación UV y control de agua y nutrientes, que están conectados a una entrada digital, analógica y PWM, respec-

tivamente, de un microcontrolador Ufox que contiene integrador el módulo Sigfox para la comunicación. El módulo RTC se conecta con interfaz I2C al controlador, se encarga del control en tiempo para la recirculación de nutrientes al sistema, cuenta con un calendario en tiempo real que enciende una bomba cada cuatro horas por un tiempo de diez minutos, tiempo suficiente para un crecimiento efectivo de las plantas de lechuga.

Las tecnologías de comunicación tienen un papel importante para una implementación exitosa de los sistemas IoT. Existen varios estándares para la transmisión de datos entre sensores y plataformas IoT. Se pueden clasificar como redes inalámbricas de corto alcance (por ejemplo, Zigbee, Bluetooth, Z-Wave, Wifi, etc.) o redes inalámbricas de largo alcance (GPRS, 3G, 4G y 5G). Las redes de corto alcance son muy restrictivas a la hora de ofrecer una cobertura global, mientras que las soluciones de red convencionales de largo alcance son caras y requieren mucha potencia. En consecuencia, las aplicaciones de IoT han impulsado la aparición de un nuevo tipo de tecnología inalámbrica denominada red de área amplia de baja potencia (LPWAN) [21]. Estas nuevas comunicaciones inalámbricas se adaptan mejor a las necesidades de dispositivos de máquina a máquina (M2M) y de IoT, donde LoRaWAN, Sigfox y NB-IoT se encuentran entre las tecnologías LPWAN líderes para implementaciones de IoT. Según el caso de uso, cada actividad comercial impone diferentes requisitos sobre el tipo de especificaciones de conectividad de IoT, como cobertura, rendimiento, tamaño de paquete, consumo de energía, costo, etc.

Para el problema de las aplicaciones de monitoreo de sistemas hidropónicos es fundamental construir conexiones que permitan principalmente el uso de hardware de bajo costo, cobertura de larga distancia, bajo consumo de energía y escalabilidad. Con estas premisas, se implementa la conectividad al dispositivo IoT del sistema propuesto sobre una red Sigfox. Una vez que los datos se recopilan en el dispositivo IoT, utiliza el módulo LPWAN para enviar datos a Internet utilizando la red Sigfox. La comunicación de datos sigue el protocolo Sigfox, donde cada dispositivo tiene una identificación única para enrutar y firmar los mensajes.

La capa de middleware, o capa de servicio, es el paso donde se crean y administran los servicios o aplicaciones de software de los usuarios. La adopción del análisis de datos en la agricultura es un desafío que implica involucrar a los pequeños y medianos agricultores en la creación de servicios de procesamiento de datos. Por lo tanto, se necesita más información y trabajo en el uso de la analítica de datos en la agricultura para optimizar el ciclo productivo de los cultivos. En este

contexto, integramos una capa de middleware escalable con la flexibilidad para el desarrollo, implementación y operaciones de software, misma que se realiza bajo el uso de la plataforma de ThingSpeak, que nos brinda el apoyo para la gestión de servicios y procesamiento de datos.

Se propone una interfaz de usuario del sistema IoT que permite el monitoreo, visualización e interpretación de los datos provenientes de los sensores del sistema. En este caso, una interfaz de aplicación web que está integrada a la plataforma back-end de Sigfox a través de sus interfaces de programación de aplicaciones (API). La integración de la API de red se basa en solicitudes HTTPS REST bajo el método POST y proporciona la interfaz desde la pila de protocolos hasta la aplicación. Por lo tanto, la aplicación web muestra las medidas recopiladas de los sensores activando llamadas a través de la API REST de Sigfox, y para agilizar este proceso se hace uso de la interfaz de la plataforma ThingSpeak tal como se aprecia en la Figura 2.



Figura 2. Visualización y monitoreo de datos

2.2. Implementación del sistema de monitoreo basado en IoT

La Figura 3 presenta el esquemático del dispositivo IoT construido para monitorear la temperatura, la humedad y radiación UV. Este prototipo consta de cuatro componentes principales: módulo de comunicación, sensor de temperatura y humedad, sensor de radiación UV y control RTC. Como dato importante, el dispositivo puede ser alimentado por batería o por electricidad de la red. En la Figura 4 se muestra el dispositivo IoT implementado, donde el módulo de comunicación Ufox se muestra en un rectángulo amarillo y permite la conexión inalámbrica a la nube, a través del servicio de red Sigfox.

La validación de los datos del dispositivo propuesto se lo realiza mediante la comparación de los datos extraídos de humedad, temperatura y radiación UV del proyecto TuData (<http://tudata.info/>), que consiste en una iniciativa de adquisición de datos meteorológicos para la provincia de Loja.

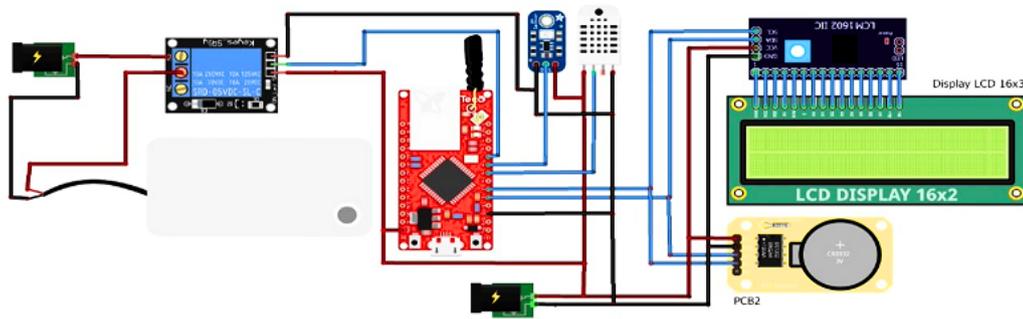


Figura 3. Esquemático del dispositivo IoT



Figura 4. Implementación del dispositivo IoT

La Figura 5 y Figura 6 guardan una estrecha relación de los datos adquiridos en el mes de enero, por ende, el sensor IoT está enviando información coherente y válida en relación con el sistema de medición metodológica TuData.

El sensor DHT22 se utiliza como una interfaz digital para medir la humedad y la temperatura. Incorpora un sensor capacitivo para medir el porcentaje de humedad relativa en el aire, y un microcontrolador para convertir valores analógicos a digitales. Tiene un rango de medición para la humedad de 0 a 100 % con una precisión de 2 %. El rango de medición de la temperatura oscila entre -40 a 80 grados centígrados, con una precisión de medición menor ± 0.5 grados centígrados a una resolución de 0.1 grados, el tiempo de sensado es de 2 segundos.

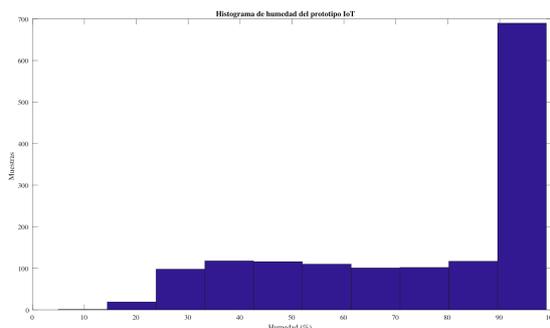


Figura 5. Histograma de humedad del dispositivo IoT creado

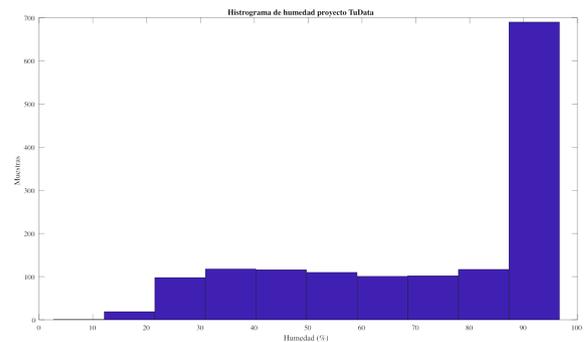


Figura 6. Histograma de humedad relativa del proyecto TuData

El rango de alimentación es de 3 a 6 voltios de corriente continua. Para la conexión con el microcontrolador es necesario solo un hilo o cable conductor, se recomienda que este cable no exceda los 20 metros.

2.3. Predicción

Debido a los diferentes usos que las redes neuronales artificiales (RNA) tienen en la actualidad y a las ventajas que ofrecen, como el aprendizaje adaptativo, tolerancia a fallos y operaciones en tiempo real [22], dentro de análisis de datos, su campo de aplicación ha crecido considerablemente en relación con ciencias adjuntas. Las predicciones de variables climáticas es un ejemplo de aquello, donde el uso de RNA es comúnmente utilizado en la predicción de ambientes de tipo invernadero y las variables implícitas como humedad, temperatura, altitud, etc. Las técnicas de RNA están basadas en modelos matemáticos que simulan los principios de las redes neuronales biológicas, teniendo como principal característica la habilidad de aprender de su entorno [23]. Generalmente, están distribuidas en capas e interconectadas mediante una arquitectura de red [24] donde se pueden distinguir tres tipos definidos como capa de entrada, capa oculta y capa de salida. Otros enfoques de Machine Learning (ML) como la máquina de soporte vectorial, lógica difusa, modelos genéticos, etc. Pueden ser utilizados ampliamente en la predicción de variables climáticas, pero el modelo de

RNA ha demostrado obtener una mejor armonía entre rendimiento y complejidad para este problema [25] con la ventaja de una estructura de simple implementación. En función de un análisis supervisado, se definió un algoritmo de ML mediante el lenguaje R para el análisis de los patrones presentes en un sistema hidropónico, con el objetivo de predecir la temperatura en función de la humedad siguiendo un modelo de tres capas (capa de entrada, capa oculta y capa de salida) [23], debido a que dicha estructura es acorde con la teoría de Kolmogorov, la cual establece que cualquier función continua puede ser aproximada mediante una red con una capa oculta [26]. La RNA de tres capas implementada se puede observar en la Figura 7.

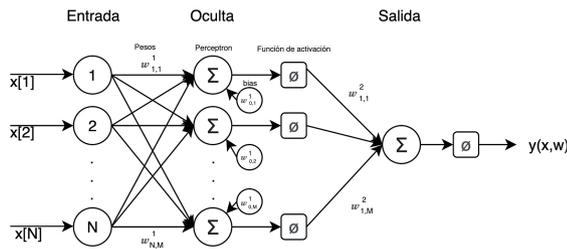


Figura 7. Estructura de la red neuronal propuesta

La predicción de la temperatura (x) en el tiempo (m) se expresa como [26], usando la ecuación (1).

$$\hat{x}[m] = \sum_{j=0}^M w_{j,1}^{(2)} \phi(a_j) \quad (1)$$

Con (2):

$$a_j = \begin{cases} 0 & \text{si } j = 0 \\ \sum_{i=0}^N \omega_{i,j}^{(1)} x[i] = X^T W_j^{(1)} & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (2)$$

Donde, $\phi(a_j)$ es la salida de la j -ésima neurona con función de activación, $\phi(a_j) = \text{tahn}(a_j)$, $x = (1, x[1], \dots, x[N])^T$ el vector de señales de entrada, y $w = \{w_1^{(\iota)}, \dots, w_M^{(\iota)}\}$, con $W_j^{(\iota)} = (W_{1,j}^{(\iota)}, \dots, W_{N,j}^{(\iota)})^T$ para $\iota = 1, 2$, los conjuntos de todos los parámetros de peso y sesgo de la red. La transposición de un vector está denotada por $()^T$ mientras la función de activación de identidad $f(z) = z$ determina la salida total de la red neuronal. Por último, la red es entrenada con un algoritmo de retropropagación (Resilient Backpropagation) para calcular el gradiente del error.

3. Resultados y discusión

El sistema de monitoreo IoT propuesto se implementó en un sistema hidropónico dedicado al cultivo de lechugas en la ciudad de Loja – Ecuador. Los cultivos sin suelo se están convirtiendo en una técnica eficaz para el sembrío de ciertas hortalizas. En general, las temperaturas óptimas para el desarrollo de la lechuga son los climas fríos que oscilan entre 15 y 18 grados centígrados y máximas temperaturas entre 18 y 24 grados centígrados, y humedad relativa del 70 % [27]. Se destaca que nuestro análisis cuantitativo tiene como objetivo proporcionar información sobre la comprensión actual de las nuevas tecnologías de IoT y su impacto en los métodos de producción existentes.

El tamaño del sistema hidropónico estudiado es de aproximadamente de 400 plantas, como se muestra en la Figura 8. Las mediciones de temperatura y humedad ambiente se tomaron cada 10 minutos, con un total equivalente a 144 muestras por día, durante un período de 5 meses entre enero y mayo del 2022. Sin embargo, debido a algunas fallas de comunicación, energía u otras, faltaron muestras. Para resolver este problema, estimamos las muestras faltantes usando el-vecino más cercano como técnica de imputación.



Figura 8. Caso de estudio sistema hidropónico

Se utilizó la aplicación de ThingView como interfaz de usuario móvil para monitoreo, interpretación y visualización en tiempo real. Sirve como interfaz de interacción entre el usuario y el sistema para el control y monitoreo a precisión del cultivo. La Figura 9 muestra el conjunto de datos de mediciones resultantes en la interfaz de usuario web.

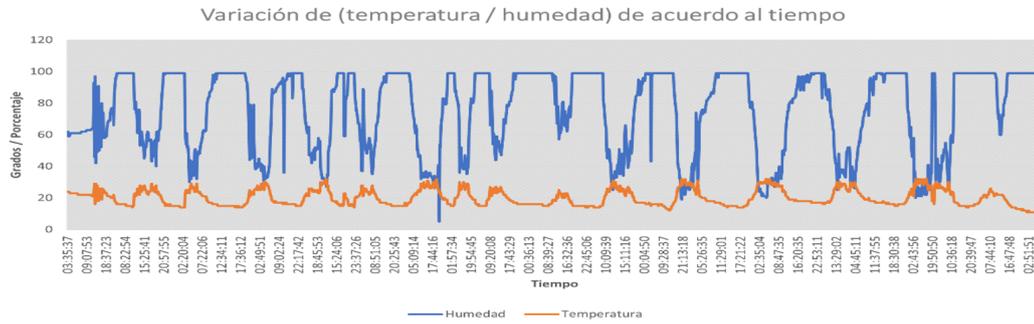


Figura 9. Mediciones de la temperatura y humedad

3.1. Entrenamiento y pruebas de RNA

Previo al proceso de entrenamiento y prueba necesaria para el ajuste del modelo de predicción, es necesario puntualizar el origen de los datos, los cuales fueron tomados desde sensores con tecnología IoT. Dichos datos fueron transmitidos y capturados en tiempo real durante los meses de enero-mayo del 2022, teniendo en cuenta que dicha época del año corresponde a la temporada de invierno según la zona climática. Debido a esta lógica de abstracción de información del entorno, se pudieron recopilar 6000 registros, que luego de un proceso de limpieza y validación fueron depurados hasta obtener un total de 5063 registros base para la experimentación, que sirvieron como insumo principal de la red neuronal.

Los datos de entrenamiento toman en cuenta el 70 % del total de los registros validados, mientras que el 30 % restante fue utilizado en las pruebas, también, como buena práctica de experimentación, se realizó un proceso de normalización de datos para obtener un mejor acoplamiento del modelo sobre los datos, como se detalla a continuación, donde d_{max} es el valor más alto del conjunto de datos y d_{min} el más bajo, mientras que los valores de $r_{max} = 1$ y $r_{min} = -1$ representan el valor máximo y mínimo para el mapeo del rango correspondientemente.

$$\bar{d}_s [kT] = \left[\frac{d_s [kt] - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} (r_{max} - r_{min}) \right] + r_{min} \quad (3)$$

Luego del proceso de entrenamiento se realizó el cálculo de precisión de los pesos optimizados y los sesgos de la RNA, se evaluó el conjunto de datos de prueba usando el error cuadrático medio (RMSE) y una matriz de confusión para evaluar la precisión de las predicciones, siguiendo un análisis supervisado. El RMSE establece el nivel de ajuste absoluto que el modelo generó sobre los datos, comparando el valor predicho por el modelo de ML con el valor real del conjunto de datos [28], está definida por la ecuación (4).

En donde \hat{y} es un vector que contiene un conjunto de datos de n predicciones y y es el vector de los valo-

res verdaderos, para finalmente evaluar los resultados de la predicción desnormalizados comparándolos con los datos simulados sin escalar.

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (4)$$

3.2. Resultados de la predicción

Para la generación de resultados fue necesario realizar un diseño de experimentos homogéneos, en donde la variable principal analizada fue la cantidad de neuronas a establecer en la capa oculta de la red, para determinar el escenario con mejor comportamiento. También, se realizó una validación de variables mediante índices de correlación, los cuales establecen el nivel de asociación dentro de dos variables aleatorias cuantitativas, se considera que existe un grado de correlación cuando los datos de una variable varían sistemáticamente con los valores de la otra [29].

Como se puede observar en la Figura 10 existe un índice de correlación significativo de tipo negativo entre las variables de temperatura y humedad correspondiente a -0.95 el cual puede ser denotado como una correlación negativa fuerte.

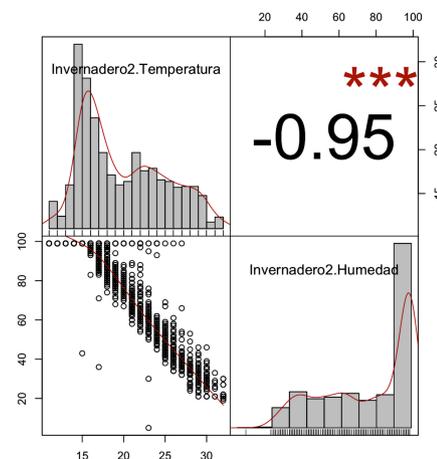


Figura 10. Índice de correlación

4. Conclusiones

En este documento se presenta una solución práctica de sistema de monitoreo basada en IoT para la agricultura inteligente, que está diseñada e implementada para brindar condiciones óptimas y soluciones rentables para los métodos de cultivo de plantas y los ciclos de vida de los sistemas hidropónicos. Se discutió a detalle el diseño y la implementación del sistema, junto con la aplicación del aprendizaje automático para la predicción ambiental. El sistema IoT fue validado experimentalmente mediante el monitoreo de temperatura y humedad durante cinco meses. El porcentaje de disponibilidad del sistema durante este período fue del 85 % aproximadamente, debido a fallas humanas y pérdida de paquetes. Para el caso de estudio, se muestra que se puede lograr una cobertura espacial del sistema de un 100 % con solo un dispositivo IoT para un hidropónico con capacidades de cuatrocientas plantas. Así mismo, se logró un control automático preciso para la recirculación de nutrientes, dando como resultado una funcionalidad del 100 % a través del control del módulo RTC.

También se profundizó cómo se puede desarrollar aún más el sistema IoT para integrar los conceptos emergentes de la agricultura inteligente. En particular, implementamos un modelo de predicción basado en datos utilizando una red neuronal artificial. Estos resultados mostraron que el modelo RNA se puede usar con éxito para hacer un pronóstico de temperatura en función de la humedad, dando como resultado una eficiencia de la temperatura podría ser predicha con un 89.37 % con un RNA simple de tres capas y cuatro neuronas en la capa oculta. En comparación con otras soluciones similares en la literatura, el marco de IoT propuesto es más flexible e incluye las características principales para optimizar la productividad y la sostenibilidad a través de comunicación emergente. Los estudios posteriores se centrarán en realizar validaciones experimentales para invernaderos mediante el uso de control automático y perdiciones de temperatura y humedad a largo plazo. Otra dirección de investigación futura relevante es la implementación y evaluación de operaciones específicas y/o toma de decisiones estratégicas utilizando la arquitectura del sistema IoT propuesto.

Referencias

- [1] M. A. Montaño Blacio, J. E. Briceño Sarmiento, O. G. Jiménez Sarango, and E. E. González Malla, "Sistema integral de hogar inteligente basado en home assistant y raspberry PI," *Tecnología e innovación frente a los desafíos de un siglo en curso*, pp. 101–126, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3IoQjYn>
- [2] S. Chen, H. Xu, D. Liu, B. Hu, and H. Wang, "A vision of IoT: Applications, challenges, and opportunities with china perspective," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 4, pp. 349–359, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2337336>
- [3] S. Singh, P. K. Sharma, B. Yoon, M. Shojafar, G. H. Cho, and I.-H. Ra, "Convergence of blockchain and artificial intelligence in IoT network for the sustainable smart city," *Sustainable Cities and Society*, vol. 63, p. 102364, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102364>
- [4] A. Medela, B. Cendón, L. González, R. Crespo, and I. Nevares, "IoT multiplatform networking to monitor and control wineries and vineyards," in *2013 Future Network & Mobile Summit*, 2013, pp. 1–10. [Online]. Available: <https://bit.ly/3E6vwGx>
- [5] M. S. Farooq, S. Riaz, A. Abid, T. Umer, and Y. B. Zikria, "Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review," *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 319, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics9020319>
- [6] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret, and P. Lorenz, "IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture," *Sensors*, vol. 20, no. 4, p. 1042, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- [7] N. Zhang, M. Wang, and N. Wang, "Precision agriculture a worldwide overview," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 36, no. 2, pp. 113–132, 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)
- [8] M. Monica, B. Yeshika, G. S. Abhishek, H. A. Sanjay, and S. Dasiga, "IoT based control and automation of smart irrigation system: An automated irrigation system using sensors, GSM, bluetooth and cloud technology," in *2017 International Conference on Recent Innovations in Signal processing and Embedded Systems (RISE)*, 2017, pp. 601–607. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xlFgsv>
- [9] C. A. Hernández-Morales, J. M. Luna-Rivera, and R. Pérez-Jiménez, "Design and deployment of a practical IoT-based monitoring system for protected cultivations," *Computer Communications*, vol. 186, pp. 51–64, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.01.009>
- [10] M. R. Ramli, P. T. Daely, D.-S. Kim, and J. M. Lee, "IoT-based adaptive network mechanism for reliable smart farm system,"

- Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 170, p. 105287, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105287>
- [11] R. Zheng, T. Zhang, Z. Liu, and H. Wang, “An EIoT system designed for ecological and environmental management of the xianghe segment of China’s Grand Canal,” *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, vol. 23, no. 4, pp. 372–380, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/13504509.2015.1124470>
- [12] C. Gómez, J. C. Veras, R. Vidal, L. Casals, and J. Paradells, “A sigfox energy consumption model,” *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 681, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s19030681>
- [13] M. Montañó, R. Torres, P. Ludeña, and F. Sandoval, “IoT management analysis using SDN: Survey,” in *Applied Technologies*, M. Botto-Tobar, S. Montes León, O. Camacho, D. Chávez, P. Torres-Carrión, and M. Zambrano Vizuite, Eds. Springer International Publishing, 2021, pp. 574–589. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-71503-8_45
- [14] R. K. Singh, R. Berkvens, and M. Weyn, “Agrifusion: An architecture for IoT and emerging technologies based on a precision agriculture survey,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136 253–136 283, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3116814>
- [15] G. Codeluppi, A. Cilfone, L. Davoli, and G. Ferrari, “Lorafarm: A lorawan-based smart farming modular iot architecture,” *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 2028, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s20072028>
- [16] V. P. Kour and S. Arora, “Recent developments of the internet of things in agriculture: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 129 924–129 957, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009298>
- [17] X. Shi, X. An, Q. Zhao, H. Liu, L. Xia, X. Sun, and Y. Guo, “State-of-the-art internet of things in protected agriculture,” *Sensors*, vol. 19, no. 8, p. 1833, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s19081833>
- [18] Y. Liu, X. Ma, L. Shu, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, “From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 6, pp. 4322–4334, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>
- [19] S. Santiteerakul, A. Sopadang, K. Yaibuathet Tip-payawong, and K. Tamvimol, “The role of smart technology in sustainable agriculture: A case study of wangree plant factory,” *Sustainability*, vol. 12, no. 11, p. 4640, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su12114640>
- [20] R. Pertierra Lazo and J. Quispe Gonzabay, “Análisis económico de lechugas hidropónicas bajo sistema raíz flotante en clima semiárido,” *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, vol. 31, no. 1, pp. 118–130, 2020. [Online]. Available: <http://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.09>
- [21] D. D. Olatinwo, A. Abu-Mahfouz, and G. Hancke, “A survey on LPWAN technologies in WBAN for remote health-care monitoring,” *Sensors*, vol. 19, no. 23, p. 5268, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s19235268>
- [22] C. A. Ruiz and D. J. Matich, *Redes neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones*. Universidades Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, 2001. [Online]. Available: <https://bit.ly/418PqDY>
- [23] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/3k6Ct3o>
- [24] I. Ullah, M. Fayaz, N. Naveed, and D. Kim, “ANN based learning to kalman filter algorithm for indoor environment prediction in smart greenhouse,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 159 371–159 388, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016277>
- [25] D.-H. Jung, H. S. Kim, C. Jhin, H.-J. Kim, and S. H. Park, “Time-serial analysis of deep neural network models for prediction of climatic conditions inside a greenhouse,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 173, p. 105402, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105402>
- [26] R. O. Duda, P. E. Hart, and D. G. Stork, *Pattern Classification*. John Wiley & Sons, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3RZpY6g>
- [27] G. Saavedra, F. Corradini, A. Antúnez, S. Felmer, P. Estay, and P. Sepúlveda, *Manual de producción de lechuga*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3RY6lf3>
- [28] E. L. Lehmann and G. Casella, *Theory of Point Estimation*. Springer Science & Business Media, 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/3jX6XFb>
- [29] S. van Dongen and A. J. Enright, “Metric distances derived from cosine similarity and Pearson and Spearman correlations,” 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1208.3145>