

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE IRRIGACIÓN PARA TECHOS VERDES CONSIDERANDO CONDICIONES DE CLIMA CÁLIDO TROPICAL

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SMART IRRIGATION SYSTEM FOR GREEN ROOFS CONSIDERING WARM-TROPICAL

 Ing. Andrés Cristancho-Juliao*,  Ph.D. German Osma-Pinto*,
 Ph.D. César Duarte-Gualdrón*

* **Universidad Industrial de Santander**, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Carrera 27 Calle 9 – Ciudadela Universitaria, 680002, Bucaramanga, Santander, Colombia.
Tel.: +57-6076344000.
E-mail: cristanchojuliao@gmail.com, {gealosma, cedagua}@uis.edu.co

Cómo citar: Cristancho Juliao, A. M., Osma Pinto, G. A., & Duarte Gualdrón, C. A. (2023). Diseño e implementación de un sistema inteligente de irrigación para techos verdes considerando condiciones de clima cálido tropical. REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGÍAS DE AVANZADA (RCTA), 2(42), 131–140. Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/1296>

Esta obra está bajo una licencia internacional
[Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).



Resumen: La irrigación de techos verdes demanda estrategias activas como sistemas automatizados de irrigación para garantizar el uso racional de agua. Sin embargo, estos sistemas deben propender por atender retos de los techos verdes como la horticultura y la integración de tecnologías de la información. Este artículo presenta el diseño e implementación de un sistema inteligente de irrigación para dos techos verdes en un edificio universitario. El sistema de irrigación opera basado en la humedad del sustrato por zona. Las variables monitorizadas son humedad y temperatura del sustrato. El comportamiento en tiempo real y los datos históricos puede ser visualizados por medio de una plataforma web usando IoT. Los resultados muestran que el sistema mejora el uso racional de agua, la humedad del sustrato influye en la temperatura de éste y la operación por zona permite la integración de diversos cultivos con diferentes necesidades de irrigación.

Palabras clave: Sistema de irrigación, techo verde, uso racional del agua.

Abstract: The irrigation of green roofs requires active strategies such as automated irrigation systems to ensure the rational use of water. However, these systems must evolve to address green roof challenges such as horticulture and information technology integration. This paper presents the design and implementation of a smart irrigation system for the two green roofs of a university building. The irrigation system operates based on the moisture content of the substrate per zone. The monitored variables are the moisture content and the substrate temperature. The real-time behavior and historical data of the irrigation system can be visualized by a platform (web page) using the Internet of Things (IoT). Results show that the smart irrigation system improves the rational use of water, the substrate moisture content influences the substrate temperature, and the zoning operation allows the integration of different types of crops with different irrigation needs.

Keywords: Irrigation system, green roof, IoT, rational use of water.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el rápido crecimiento de la población está reduciendo las zonas verdes en las ciudades. Por lo tanto, los techos verdes son alternativas útiles para mitigar el impacto negativo anterior. Este tipo de techos proporcionan beneficios tales como control de la contaminación del aire, mejora en el rendimiento energético de los edificios, disminución de la temperatura interna de los edificios en climas cálidos (Susca 2019), (Osma-Pinto and Ordóñez-Plata 2019), y desarrollo de la agricultura urbana (Paraskevopoulou et al. 2020). Los espacios verdes están aumentando rápidamente en las ciudades para mantener una atmósfera limpia y verde (Halgamuge et al. 2021). Estos beneficios se pueden mejorar mediante la integración de sistemas de riego en los tejados (Cook and Larsen 2021; Zluwa and Pitha 2021).

Los sistemas de riego automatizados ayudan a garantizar un uso racional y eficiente del agua, que es un bien esencial, y proporcionan la cantidad correcta de agua para el crecimiento de las plantas (Seidel et al. 2017). Therefore, such systems are essential for improving agricultural activities, and they apply several control approaches such as rules-based artificial intelligence (Halgamuge et al. 2021; Jha et al. 2019).

El rendimiento de los sistemas de riego se puede mejorar mediante la integración de la Internet de las cosas (IoT), proporcionando flexibilidad, control en tiempo real, y la infraestructura de comunicación, y técnicas analíticas, que pueden convertirse en sistemas inteligentes (Halgamuge et al. 2021; Jha et al. 2019). Los sensores inalámbricos y el IoT se pueden utilizar para desarrollar herramientas para monitorear y controlar el riego de cultivos (Kamienski et al. 2019; Muangprathub et al. 2019).

Por lo tanto, es prometedor considerar la aplicación de sistemas de riego inteligentes basados en IoT en la agricultura (Kashyap et al. 2021; Phasinam et al. 2022; Rawal 2017) y techos verdes (Halgamuge et al. 2021; Shaheen, Priya, and Harsha 2021), especialmente considerando la horticultura urbana, que puede ayudar a desarrollar una alimentación saludable y mejorar la salud física y psicológica de los ciudadanos (George et al. 2015).

Sin embargo, faltan estudios sobre el desarrollo de sistemas de riego inteligentes para techos verdes utilizados para cultivar varias especies vegetales con diferentes necesidades de agua.

Por lo tanto, este estudio desarrolló un sistema de riego inteligente basado en IoT para los dos techos verdes de un edificio universitario (Edificio de Ingeniería Eléctrica, EEB), ubicado en la Universidad Industrial de Santander (UIS) (Bucaramanga, Colombia). Las dos cubiertas verdes se dividen en ocho zonas con diferentes cultivos (hortícola, aromática y ornamental).

El sistema de riego tiene una estructura modular formada por un módulo central (coordinador) y cuatro módulos secundarios, y cada uno de los módulos secundarios monitorea el contenido de temperatura y humedad en el sustrato y controla el suministro de agua para dos zonas. Para lograr esto, el hardware está compuesto por un Arduino UNO, una tarjeta Dragino Yun Shield, cinco XBee S2, cuatro módulos Arduino Nano, ocho sensores de humedad de sustrato, catorce PT-100 y ocho electroválvulas solenoides, entre otros.

Este artículo describe el diseño, implementación y operación de este sistema de riego de bajo costo, que incluye modos de operación manuales y automáticos, visualización del comportamiento histórico y en tiempo real del sistema y un servidor de almacenamiento de datos.

2. METODOLOGÍA

2.1 Cubierta vegetal

El EEB es un proyecto piloto de construcción ecológica cuyo objetivo es estudiar el desempeño de varias estrategias verdes para reducir el uso de energía y agua dulce considerando un clima cálido-tropical. El UIS se encuentra en la ciudad de Bucaramanga (Colombia) a 960 m sobre el nivel del mar, con una temperatura media diaria de 24 °C y una temperatura máxima media de 31 °C (Osma-Pinto and Amado-Duarte 2021).

Este edificio tiene dos tejados verdes: el primero se encuentra en el quinto piso con una superficie de 120 m², y la segunda es la azotea superior ubicada en el sexto piso. La segunda azotea tiene un área de aproximadamente 460 m² y una zona verde efectiva de aproximadamente 340 m² (excluidos los caminos peatonales). Para garantizar una presión de agua adecuada durante el riego, los tejados se dividen en ocho zonas, que se riegan en secuencia.

En el quinto piso (terraza inferior), las zonas 1 y 2 tienen cultivos de girasol, amapola, lechuga

crestada, amaranto, pino ornamental y cacahuete forrajero. En el sexto piso (terrazza superior), las zonas 3 y 4 tienen frijoles, berenjenas, tomates y pimentón; las zonas 5 y 6 contienen menta y albahaca; la zona 7 contiene tomates, limones, menta, albahaca, duranta y guasca; y la zona 8 tiene tomates, perejil, pimentón, menta y lechuga crestada. Las zonas anteriores se muestran en la Fig. 1.

2.2 Descripción de hardware

El sistema diseñado consta de un módulo central y cuatro módulos secundarios. El módulo central controla el funcionamiento del sistema de riego. Los

módulos secundarios adquieren los datos monitorizados y ejecutan las acciones desde el módulo central. Fig. 2 muestra un esquema de la funcionalidad del sistema de riego, así como la comunicación de datos entre los componentes.

El módulo coordinador es una estructura modular formada por: (i) un Arduino UNO, que recibe información de los módulos secundarios y define la zona a regar; (ii) una tarjeta Dragino Yun Shield, que establece la comunicación Ethernet entre el sistema de riego y el servidor; (iii) un módulo XBee S2, que establece la comunicación inalámbrica entre los módulos secundarios y el módulo central; y (iv) un escudo inalámbrico, que ayuda a integrar el módulo XBee S2 y la tarjeta Arduino UNO.



Fig. 1. zonas de riego.

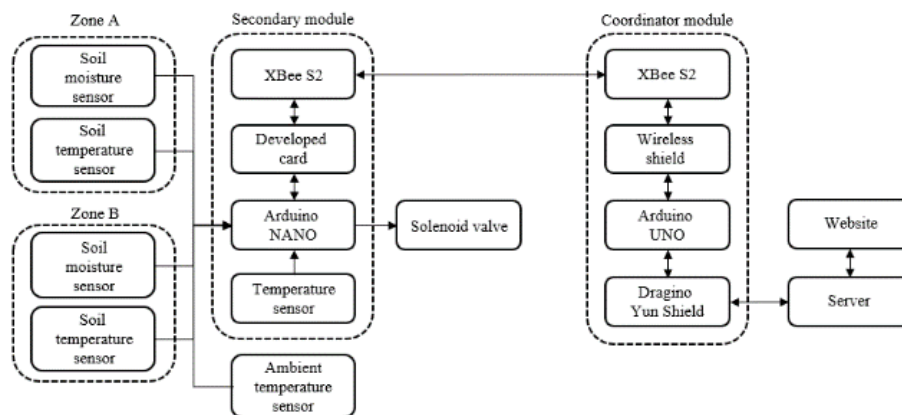


Fig. 2. Diagrama de comunicación de componentes y funcionamiento del sistema de riego.

Cada módulo secundario realiza las siguientes funciones: lectura de datos de los sensores de dos zonas, envío y recepción de datos del módulo central, y activación o desactivación de las válvulas solenoides. Para lograr lo anterior, los módulos secundarios incluyen lo siguiente: (i) una tarjeta Arduino NANO, que gestiona la lectura de los datos de los sensores y ejecuta los comandos desde el

módulo central, (ii) un módulo XBee S2 para la comunicación inalámbrica, y (iii) una tarjeta de acoplamiento desarrollada con una fuente de alimentación de 9 Vdc, que lee los datos de los sensores de dos zonas, activa o desactiva las válvulas solenoides de estas zonas y combina la tarjeta Arduino NANO, el módulo XBee S2 y su fuente de alimentación.

Del mismo modo, el contenido de humedad del sustrato se monitoriza mediante sensores Vegetronix VH400, que permiten determinar el contenido volumétrico de agua (VWC) del sustrato. Además, para controlar el suelo, la temperatura ambiente y la temperatura interna de los módulos, se utilizan sensores PT100. En el cuadro 1 figuran las especificaciones técnicas de los sensores utilizados.

Teniendo en cuenta el número de zonas y los sensores a utilizar, el sistema de control tiene un total de 22 entradas analógicas. Estos comprenden ocho sensores de humedad de sustrato, ocho PT-100 para temperatura de sustrato, cuatro PT-100 para temperatura interna de los módulos secundarios y dos PT-100 para temperatura ambiente. El sistema de control también tiene ocho salidas digitales (ocho válvulas solenoides, una por zona). Esto apoya el uso de una tarjeta de Arduino NANO para los módulos secundarios, porque esta tarjeta tiene ocho entradas analógicas. La tabla 2 muestra los sensores utilizados en cada módulo secundario.

Table 1: Especificaciones técnicas de los sensores utilizados.

Sensor	VH-400	PT-100
Measured data	Soil moisture	Soil temperature, ambient, and internal module
Output	0–3 V	0.4–4.4 V
Range	0–60% VWC	–20 to 105 °C
Resolution	0.1%	0.1 °C
Accuracy	±2% a 25 °C	±0.15 °C
Supply voltage range	3.5–20 Vdc	-

Table 2. Sensores por cada módulo secundario.

Sensor	Secondary module			
	1	2	3	4
Soil moisture (VH400)	2	2	2	2
Substrate temperature (PT100)	2	2	2	2
Ambient temperature (PT100)	1	0	1	0
Inner module temperature (PT100)	1	1	1	1

2.3 Manual de instrucciones

El sistema de riego tiene modos de funcionamiento automático y manual que se utilizan a través de un sitio web. El modo automático funciona según el contenido de humedad del suelo de cada zona. En el modo manual, los usuarios pueden activar el riego de las áreas de acuerdo con sus criterios. Sin embargo, el riego de las zonas se lleva a cabo de forma secuencial.

El módulo central o el coordinador controla todo el sistema y recibe información de configuración del

servidor y datos de los módulos secundarios a través de los módulos XBee S2, como se muestra en la Fig. 3.



Fig. 3. Componentes del módulo central.

El módulo central permite que una electroválvula inicie el riego en el área correspondiente. En general, el coordinador realiza lo siguiente: (i) recibe datos de los módulos, (ii) trabaja en una operación programada en el servidor, (iii) envía información a los módulos, (iv) envía y recibe datos del servidor, y (v) reasigna variables. Los módulos secundarios reciben información de los sensores de cada zona utilizando la tarjeta desarrollada. Los datos adquiridos se envían al módulo central mediante comunicación inalámbrica mediante el módulo XBee S2, y la válvula solenoide se activa o desactiva en función de la humedad del suelo y la disponibilidad de riego. Fig. 4 muestra un módulo secundario montado con la tarjeta desarrollada. Además, cada módulo secundario sale a 24 Vac (transformador) y 120 Vac (toma eléctrica) para suministrar la válvula solenoide y otros componentes, respectivamente.

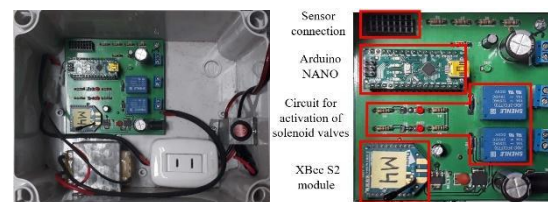


Fig. 4. Módulo secundario.

El sistema tiene dos tipos de comunicación: inalámbrica y Ethernet. La comunicación inalámbrica permite el intercambio de información entre los módulos secundario y central a través de los módulos XBee S2. Dragon Shield Yun establece una comunicación Ethernet entre el sistema y el servidor; esta tarjeta está configurada para conectarse a una red de Internet específica, y proporciona una rutina que permite escribir/leer datos en el servidor.

Cada módulo maneja información de dos zonas. Fig. 5 muestra las ubicaciones de los módulos en la zona

verde de la quinta planta y la terraza superior, así como las zonas controladas por cada módulo.

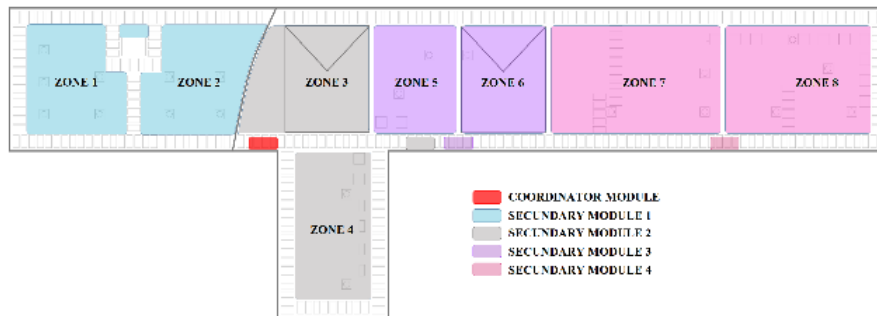


Fig. 5. Ubicación de los módulos del sistema de control.

2.4 Red de riego

En cada zona, la red de riego tiene una caja de paso (acero galvanizado con aislamiento térmico) que contiene una llave de paso manual, filtro de malla y electroválvula Rain Bird. Un mango de polietileno de 3/4" se extiende fuera de cada caja, que tiene ramas cada 0,5 m con una línea de goteo de 16 mm con cuentagotas cada 0,5 m, formando una red de goteo de 0,5 m 0,5 m. Para reducir el tiempo de goteo, también se instala un rociador central en cada zona. Figs. 6(a) y (b) muestran una parte de la red de riego y los elementos de una caja de pasaje, respectivamente.



(a) Colocación de la red de riego.



(b) Válvula de bola de tubo de agua, filtro de agua y electroválvula de agua.



(c) Caja de válvula de agua.
Fig. 6. El proceso de instalación de la red de riego.

2.5 Visualización y configuración

El sistema de riego tiene una plataforma con acceso a Internet. La interfaz del sistema permite la configuración del funcionamiento del sistema, visualización de variables (nivel de humedad, temperatura del suelo de cada zona, temperaturas internas de los módulos de control, temperatura ambiente y condición de las válvulas solenoides), y la descarga de datos para un período específico de días.

Además, la plataforma permite la administración del sistema de riego configurando los parámetros de control, como los niveles mínimos y máximos de humedad del suelo en cada área, así como el tiempo necesario para enviar los datos al servidor.

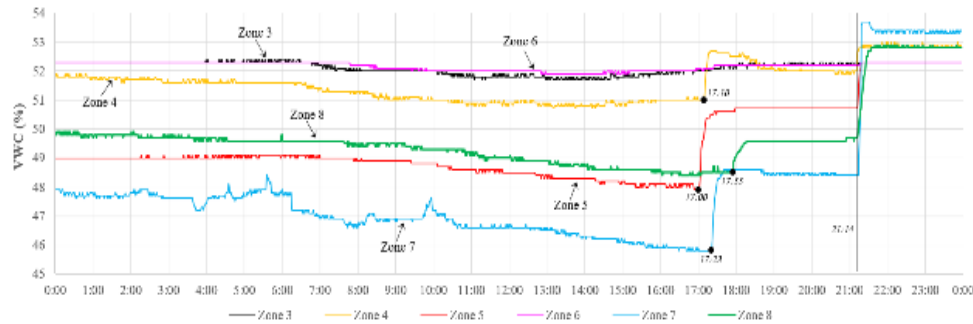
3. RESULTADOS

3.1 Funcionamiento del sistema de riego

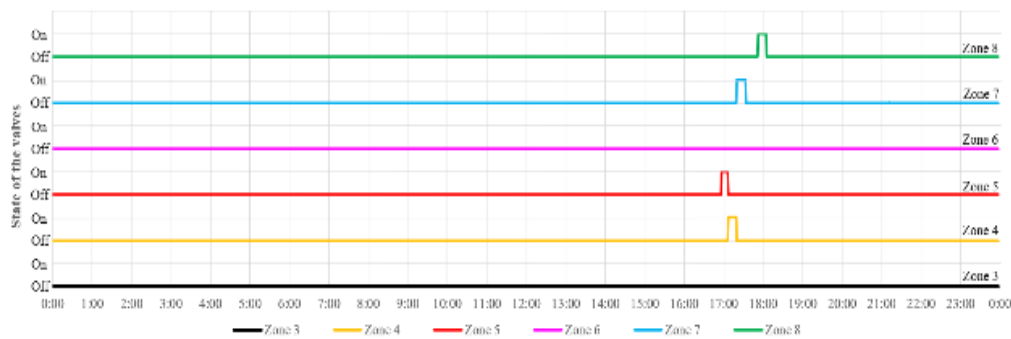
El sitio web creado para este sistema permite consultar su funcionamiento y descargar datos para realizar análisis complementarios. Figs. 7(a) y (b) muestran el comportamiento diario del nivel de humedad del suelo y los estados de las válvulas

solenoides de cada zona (3-8) desde la terraza superior durante un día típico, respectivamente. Fig.

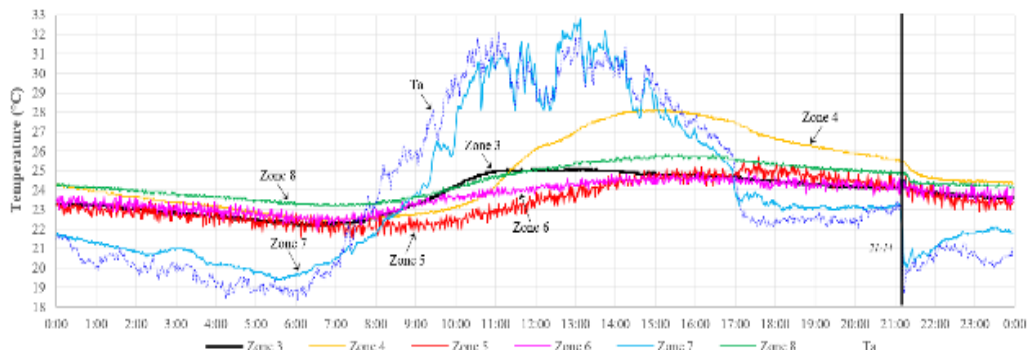
7(c) muestra las temperaturas del suelo para estas seis zonas.



a. Nivel de humedad del suelo de cada zona.



b. Estados de las válvulas electromagnéticas.



c. Temperaturas, del suelo de cada zona, ambiente e interior de los módulos.

Fig. 7. Seguimiento diario del sistema de riego.

En el día seleccionado, el sistema detectó bajos niveles de VWC en las zonas 4, 5, 7 y 8, y posteriormente activó las válvulas correspondientes a las 5:07 p.m., 4:57 p.m., 5:20 p.m., y 5:52 p.m., respectivamente.

Cabe señalar que el sistema puede registrar eventos como la lluvia indirectamente a partir del aumento de los niveles de VWC y la disminución de la temperatura del suelo, a pesar de la desactivación de las válvulas solenoides. Para el día considerado, estas variaciones ocurrieron a las 9:14 p.m.

3.2 Humedad

Debido a la diversidad de las texturas del suelo presentes en las zonas estudiadas y sus respectivos cultivos, fue necesario establecer límites específicos del VWC para cada zona, en función de los requisitos de la especie vegetal.

La capa de sustrato presenta un cambio continuo en el VWC. Esta variación se debe a la trayectoria del agua desde la superficie hasta donde se aplica a la

parte inferior del sustrato, así como a la evaporación del agua causada por la temperatura ambiente. El sistema comienza a registrar el aumento en el nivel de VWC aproximadamente 2-3 min después de la activación de la válvula solenoide.

Fig. 8 muestra la creciente variación en el VWC al considerar el mismo instante de tiempo, lo que permite comprender la acumulación transitoria de agua en el suelo. En general, el tiempo de riego requerido por cada zona varía entre 9 y 12 min, y el registro de dicha variación puede tardar aproximadamente 15 min.

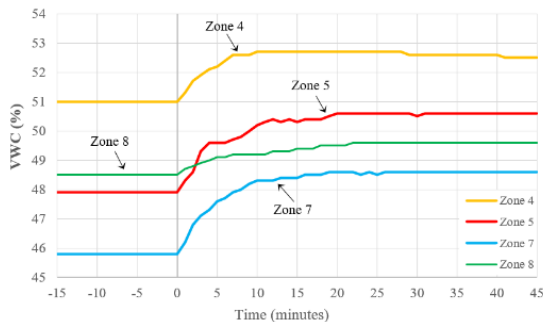


Fig. 8. Aumento de la humedad del suelo debido al riego.

Eq. (1) calcula el comportamiento normalizado del VWC en cada zona (VWC_n), cuando $t1$ es el momento en que se activa la válvula solenoide (inicio transitorio), $t2$ es el tiempo cuando el VWC se vuelve estable (extremo transitorio), VWC_t es el VWC entre $t1$ y $t2$, VWC_{t1} es VWC al $t1$, y VWC_{t2} es el VWC al $t2$.

$$VWC_n = \frac{VWC_t - VWC_{t1}}{VWC_{t2} - VWC_{t1}} 100\% \quad (1)$$

Fig. 9 muestra el VWC_n por zonas 4, 5, 7, y 8, que permite compararlos, mostrando específicamente un almacenamiento transitorio de agua en el suelo, similar a un condensador de carga. Es posible estimar VWC_n usando la función, $VWC_n = 1 - e^{-t/\tau}$, donde τ esta entre 2.5 y 9.0 min.

Fig. 10 presenta boxplots para caracterizar las poblaciones del suelo VWC de las zonas 4, 5, 7, y 8 bajo dos condiciones: sin precipitaciones (A: datos de 12:00 a.m. a 9:13 p.m.) y con precipitaciones (B: datos de 12:00 a.m. a 11:59 p.m.). Los A-boxplots indican los valores permisibles del VWC que definen el funcionamiento del sistema de riego. Los B-boxplots presentan los posibles valores VWC con los que una zona puede experimentar. El sistema no puede controlar el aumento de la humedad del suelo

causado por la lluvia; sin embargo, puede monitorear el impacto de la lluvia en el suelo. El VWC depende de la capacidad de retención, la profundidad del suelo y las propiedades del sustrato (Cook and Larsen 2021).

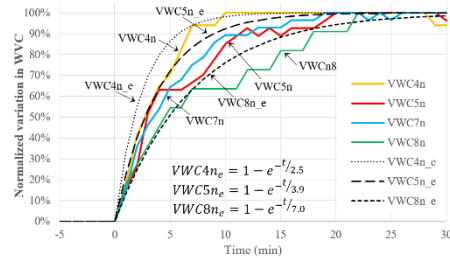


Fig. 9. Comportamiento de la humedad del suelo normalizada debido al riego.

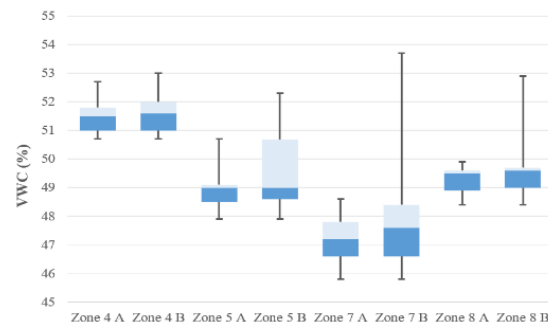


Fig. 10. Boxplots de la humedad del suelo para las zonas 4, 5, 7 y 8 con y sin efecto de la lluvia durante un día.

Los datos recogidos por el sistema también permiten analizar la relación entre la humedad del suelo y la temperatura del suelo, como se muestra en la Fig. 11. En general, la temperatura del suelo disminuye cuando aumenta la humedad del suelo, lo que ocurre en las zonas 3, 5, 6 y 8. Las zonas 4 y 7 no presentan esta tendencia, lo que amerita un análisis complementario.

3.3 Temperatura del suelo

Los datos de temperatura del suelo adquiridos ayudan a entender el rendimiento del techo verde del EEB y las condiciones de las raíces de las plantas. Fig. 7(c), Fig. 12, y Tabla III presentan el comportamiento de la temperatura del suelo durante un día. La tabla III enumera los valores (mínimo, promedio, máximo y diferencias) de la temperatura del suelo para las ocho zonas, cajas y condiciones ambientales.

La temperatura ambiente influye fuertemente en las zonas 1 y 7, lo que podría deberse a una ubicación incorrecta del sensor (exposición

parcial al ambiente) o a la reducción del espesor del suelo. Las raíces de las plantas de estas zonas experimentaron una variación de temperatura

entre 18 °C and 33 °C ($\Delta T \approx 15$ °C), que debe ser estudiado para determinar si causa estrés térmico y afecta el crecimiento de la planta.

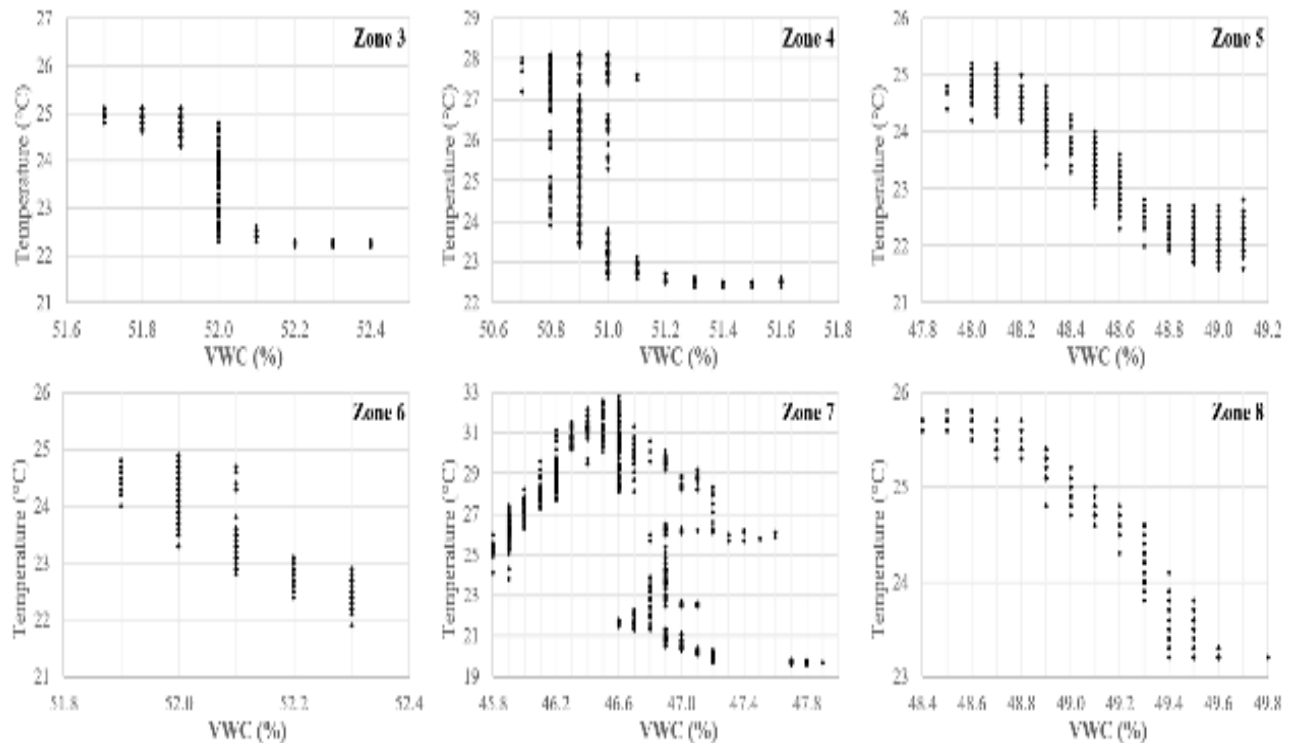


Figure 11. Relaciones entre la humedad del suelo y la temperatura del suelo para las zonas 3-8.

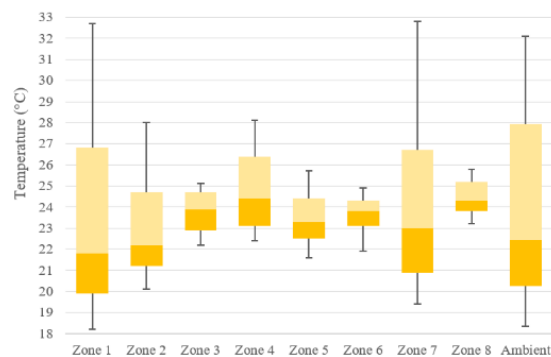


Fig. 12. Boxplots de la temperatura del suelo y la temperatura ambiente.

Table 3: Valores de la temperatura del suelo para zonas, cajas y temperatura ambiente.

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Box	Amb.
Min	18.2	20.1	22.2	22.4	21.6	21.9	19.4	23.2	16.3	18.4
Aver.	23.4	23.0	23.8	24.9	23.4	23.7	23.9	24.5	23.4	23.8
Max.	32.7	28.0	25.1	28.1	25.7	24.9	32.8	25.8	34.4	32.1
Diff.	14.5	7.9	2.9	5.7	4.1	3.0	13.4	2.6	18.1	13.7

En comparación, las temperaturas del suelo de las zonas 3, 5, 6 y 8 varían solo entre 22 °C y 26 °C, lo

que garantiza condiciones estables para el crecimiento de las plantas, específicamente con diferencias de temperatura de 2.9 °C, 3.0 °C y 4.1 °C, respectivamente.

La temperatura interna de la caja de válvulas de agua varió entre 16.3 °C y 34.4 °C ($\Delta T = 18.1$ °C), reflejando las condiciones de funcionamiento del módulo secundario y la válvula solenoide.

Fig. 13 muestra la diferencia entre la temperatura del suelo y la temperatura ambiente. Las zonas 3, 5, 6 y 8 proporcionan aislamiento térmico al techo de hormigón; los suelos están entre 3 °C y 5 °C por encima de la temperatura ambiente de 12 a.m. a 6 a.m. y logran una reducción de temperatura de hasta 9 °C durante las horas de sol.

Fig. 7 muestra que la lluvia (9:14 p.m.) reduce la temperatura del aire de aproximadamente 23 °C a 19 °C en menos de 3 min; sin embargo, las temperaturas de las zonas 3, 5, 6 y 8 solo caen por debajo de 1 °C después de 15 min.

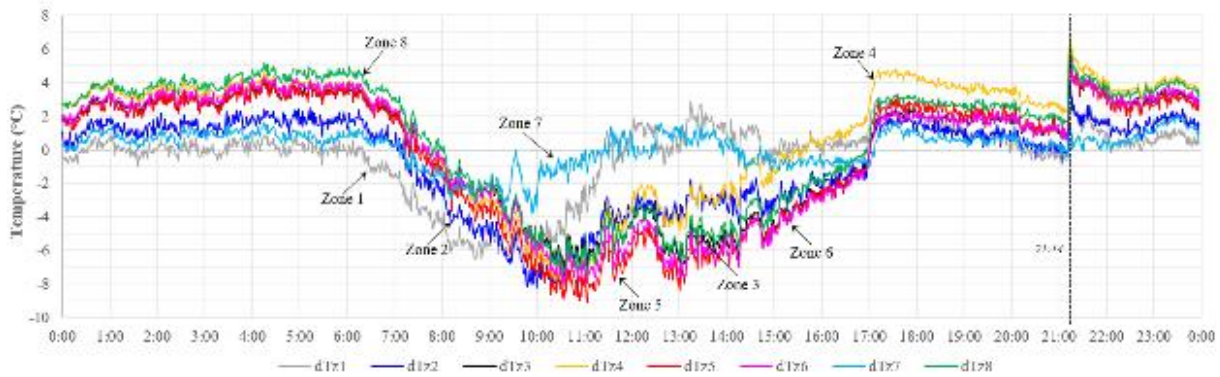


Fig. 13 . Variación de la temperatura del suelo en relación con la temperatura ambiente.

3.4 Discusión

La conservación del agua es fundamental en la agricultura; por lo tanto, este sistema de riego inteligente tiene como objetivo minimizar el uso del agua mediante la aplicación de riego por goteo y el monitoreo de la humedad del suelo.

El riego de cultivos es relevante para la productividad de los cultivos; por lo tanto, es necesario asegurar que el sistema de riego se establezca en función de las especies de plantas y el nivel de humedad favorable (Phasinam et al. 2022).

El tiempo de riego de cada zona se ve afectado por factores como la consistencia del sustrato y la separación entre las líneas de goteo. Para reducir el tiempo de riego, se instalan aspersores centrales en las zonas 7 y 8.

Este sistema de riego utiliza sensores y el IoT, que permite la interacción entre un techo verde físico y la plataforma de Internet; además, los datos recopilados ayudan a caracterizar la evolución del suelo y las plantas.

Se desarrolló una interfaz que permite configurar los parámetros operativos del sistema de riego, visualizar datos históricos y obtener el comportamiento en tiempo real de la operación del sistema mediante una página web. Además, el sistema emite una serie de alertas que advierten de un posible mal funcionamiento causado por un valor VWC que excede el rango razonable o por un exceso de tiempo de riego.

Si bien algunos estudios (Morillo et al. 2015; Nolz et al. 2016) han sugerido que el monitoreo correcto del nivel de humedad del suelo requiere la instalación de sensores de humedad a diferentes profundidades, esto es inviable para cubiertas

verdes extensas, cuyo espesor del sustrato varía principalmente entre 10 y 20 cm.

Durante un estudio de seguimiento para determinar los valores límite de funcionamiento del sistema, se encontró que es imposible generalizar las ubicaciones de los sensores de humedad. Esto se debe a que su lectura depende de factores como la profundidad del sustrato y su consistencia.

Los datos anteriores obtenidos por el sistema permiten inferir la salud y eficacia de un techo verde para el crecimiento de cultivos y el aislamiento térmico de edificios.

Aunque el sistema está diseñado en base a las condiciones de cubierta verde del EEB, puede ser implementado en invernaderos y huertos.

4. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un sistema de riego controlado y operado con dispositivos de bajo costo. El sistema desarrollado permite, la visualización de datos históricos, así como el comportamiento en tiempo real de la operación del sistema, utilizando una plataforma web. También facilita la configuración de los parámetros de funcionamiento.

El seguimiento de la variación temporal en el VWC en el sustrato de las zonas permite una gestión adecuada del sistema de riego, mejorando así el uso del agua. También se encuentra que el VWC tiene un efecto significativo en el rendimiento general del sistema, influyendo en su funcionamiento y la duración del riego en cada zona. Las curvas VWC exhiben un comportamiento dinámico, que se ve afectado por varios factores, incluyendo la heterogeneidad del suelo y las características del cultivo. Lo anterior está directamente relacionado

con la frecuencia de activación del riego en las zonas; este último también se ve alterado por factores climáticos.

REFERENCES

- Cook, Lauren M., and Tove A. Larsen. 2021. "Towards a Performance-Based Approach for Multifunctional Green Roofs: An Interdisciplinary Review." *Building and Environment* 188(December 2020):107489.
- George, Daniel R., Liza S. Rovniak, Jennifer L. Kraschnewski, Ryan Hanson, and Christopher N. Sciamanna. 2015. "A Growing Opportunity: Community Gardens Affiliated with US Hospitals and Academic Health Centers." *Preventive Medicine Reports* 2:35–39.
- Halgamuge, Malka N., Alexe Bojovschi, Peter M. J. Fisher, Tu C. Le, Samuel Adeleju, and Susan Murphy. 2021. "Urban Forestry & Urban Greening Internet of Things and Autonomous Control for Vertical Cultivation Walls towards Smart Food Growing: A Review." 61(March).
- Jha, Kirtan, Aalap Doshi, Poojan Patel, and Manan Shah. 2019. "A Comprehensive Review on Automation in Agriculture Using Artificial Intelligence." *Artificial Intelligence in Agriculture* 2:1–12.
- Kamienski, Carlos, Juha Pekka Soininen, Markus Taumberger, Ramide Dantas, Attilio Toscano, Tullio Salmon Cinotti, Rodrigo Filev Maia, and André Torre Neto. 2019. "Smart Water Management Platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture." *Sensors (Switzerland)* 19(2).
- Kashyap, Pankaj Kumar, Sushil Kumar, Ankita Jaiswal, Mukesh Prasad, and Amir H. Gandomi. 2021. "Towards Precision Agriculture: IoT-Enabled Intelligent Irrigation Systems Using Deep Learning Neural Network." *IEEE Sensors Journal* 21(16):17479–91.
- Morillo, J. García, M. Martín, E. Camacho, J. A. Rodríguez, Díaz, and P. Montesinos. 2015. "Toward Precision Irrigation for Intensive Strawberry Cultivation." *Agricultural Water Management* 151:43–51.
- Muangprathub, Jirapond, Nathaphon Boonnam, Siriwan Kajonkasirat, Narongsak Lekbangpong, Apirat Wanichsombat, and Pichetwut Nillaor. 2019. "IoT and Agriculture Data Analysis for Smart Farm." *Computers and Electronics in Agriculture* 156(June 2018):467–74.
- Nolz, R., P. Cepuder, J. Balas, and W. Loiskandl. 2016. "Soil Water Monitoring in a Vineyard and Assessment of Unsaturated Hydraulic Parameters as Thresholds for Irrigation Management." *Agricultural Water Management* 164:235–42.
- Osma-Pinto, G., and G. Ordóñez-Plata. 2019. "Measuring Factors Influencing Performance of Rooftop PV Panels in Warm Tropical Climates." *Solar Energy* 185.
- Osma-Pinto, German, and Laura Amado-Duarte. 2021. "Selection of the Control Alternative with the Minimum Energy Consumption for the Hybrid Illumination System of Inner Spaces." *Journal of Building Engineering* 35(April 2020):102046.
- Paraskevopoulou, Angeliki T., Panagiotis Tsarouchas, Paraskevi A. Londra, and Athanasios P. Kamoutsis. 2020. "The Effect of Irrigation Treatment on the Growth of Lavender Species in an Extensive Green Roof System." *Water* 12(863):1–18.
- Phasinam, Khongdet, Thanwamas Kassanuk, Priyanka P. Shinde, Chetan M. Thakar, Dilip Kumar Sharma, Khaja Mohiddin, and Abdul Wahab Rahmani. 2022. "Application of IoT and Cloud Computing in Automation of Agriculture Irrigation." *Journal of Food Quality* 2022:1–8.
- Rawal, Srishti. 2017. "IOT Based Smart Irrigation System." *International Journal of Computer Applications* 159(8):7–11.
- Seidel, S. J., S. Werisch, N. Schütze, and H. Laber. 2017. "Impact of Irrigation on Plant Growth and Development of White Cabbage." *Agricultural Water Management* 187:99–111.
- Shaheen, Sk Safiya, S. Bhagya Priya, and S. Harsha. 2021. "Smart Irrigation System Based on IoT." *International Journal of Trend in Innovative Research (IJTIIR)* 3(3):28–31.
- Susca, Tiziana. 2019. "Green Roofs to Reduce Building Energy Use? A Review on Key Structural Factors of Green Roofs and Their Effects on Urban Climate." *Building and Environment* 162.
- Zluwa, Irene, and Ulrike Pitha. 2021. "The Combination of Building Greenery and Photovoltaic Energy Production — A Discussion of Challenges and Opportunities in Design." *Sustainability* 13(1537):1–29.