

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Sistema de monitoreo y transferencia inalámbrica de datos en tiempo real utilizando sensores digitales para la producción de chayote [*Sechium edule* (Jacq) Sw.] var. *virens levis*

Real-time wireless monitoring and data transfer system using digital sensors for chayote production [*Sechium edule* (Jacq) Sw.] var. *virens levis*

Authors/Autores: Vichique Alegría, M., Calzada-Lara, G., Ortiz Laurel, H., Contreras Oliva, A.

ID: e1908

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e1908>

Received/Fecha de recepción: February 11th 2025

Accepted /Fecha de aceptación: November 12th 2025

Available online/Fecha de publicación: December 15th 2025

Please cite this article as/Como citar este artículo: Vichique Alegría, M., Calzada-Lara, G., Ortiz Laurel, H., Contreras Oliva, A. (2025). Real-time wireless monitoring and data transfer system using digital sensors for chayote production [*Sechium edule* (Jacq) Sw.] var. *virens levis*. *Revista Bio Ciencias*, 13, e1908. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e1908>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.




Artículo original

Sistema de monitoreo y transferencia inalámbrica de datos en tiempo real utilizando sensores digitales para la producción de chayote [*Sechium edule* (Jacq) Sw.] var. *virens levis*

Real-time wireless monitoring and data transfer system using digital sensors for chayote production [*Sechium edule* (Jacq) Sw.] var. *virens levis*

Sistema de monitoreo electrónico a distancia para la producción de chayote/

Remote electronic monitoring system for chayote production

Vichique Alegría, M. ¹() , Calzada-Lara, G. ^{2*} () , Ortiz Laurel, H. ¹ () , Contreras Oliva, A. ¹ ()

¹Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, Posgrado en Innovación Agroalimentaria Sustentable, Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953, vichique.manuel@colpos.mx, hlaurel@colpos.mx, contreras.oliva@colpos.mx

²Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí, Posgrado en Innovación en Manejo de Recursos Naturales, Iturbide No. 73, San Agustín, C. P. 78622, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México, calzada.gabriel@colpos.mx

*** Corresponding Author:**

Calzada-Lara, G. Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí, Posgrado en Innovación en Manejo de Recursos Naturales, Iturbide No. 73, San Agustín, C. P. 78622, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México, calzada.gabriel@colpos.mx

RESUMEN

Este trabajo describe el proceso de diseño, construcción e instalación de un sistema de monitoreo remoto basado en el microcontrolador ESP8266, con el fin de registrar información ambiental y de producción durante el desarrollo de la planta y el fruto del chayote verde liso (*Sechium edule* var. *virens levis*). Este proceso involucró la integración de tecnologías de hardware y software; se inició con la construcción e instalación de sondas para el registro del peso de la biomasa de los frutos en la producción del chayote sobre la estructura aérea que es utilizada para ese fin, la cual tiene una configuración de 8 m x 8 m (4 secciones cuadradas de 4 metros de lado cada una, formada por 9 postes de soporte). Los datos ambientales recopilados incluyeron: temperatura de bulbo seco, humedad relativa y exposición lumínica; mientras que, para el peso de biomasa, se determinó generar una programación para rastrear la variación de su desarrollo, lo cual permite observar el crecimiento y podas de la planta (se pretende que esta información ayude a estimar con precisión el momento óptimo para cosechar los frutos). Este sistema de monitoreo constante aportará información relevante para predecir el rendimiento de este cultivo, además de identificar aquellas causales que lo limiten y que puedan corregirse a tiempo. La información obtenida puede ayudar a los productores en la toma de decisiones (irrigación, insumos agrícolas, mano de obra, tiempo de cosecha); además de que la tecnología utilizada puede extrapolarse a otras hortalizas.

PALABRAS CLAVE:

Automatización, agricultura inteligente, productividad agrícola, control de procesos, cultivo de chayote, internet de las cosas, monitoreo de cultivos agrícolas, instrumentación electrónica, telecomunicaciones.

Introducción

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2024) estima que para el año 2030 habrá 582 millones de personas con un alto índice de desnutrición; una de las estrategias para combatir dicho índice podría ser la transformación de los sistemas agroalimentarios para fortalecer su resiliencia y atender las desigualdades, con el objetivo de que todos puedan acceder a una dieta saludable y asequible. Sin embargo, hoy en día la industria agroalimentaria enfrenta diversos desafíos, que incluyen: cambios climáticos, crecimiento del entorno urbano, falta de agricultores calificados y disponibilidad de mano de obra. Asimismo, existe la necesidad de aplicar nuevas prácticas para garantizar una agricultura sostenible y un suministro de alimentos adecuados. Debido a esto, se deben mejorar las prácticas agrícolas mediante la transición hacia la agricultura inteligente (ElBeheiry & Balog, 2023). Una forma de recopilar la mayor cantidad de información posible en los procesos productivos es utilizar herramientas tecnológicas de captura de datos precisas, las cuales a pesar de estar disponibles desde hace tiempo en otras aplicaciones, tienen un valioso potencial aún desconocido en la agricultura. Ejemplo de lo anterior, es el caso del internet de las cosas o IoT (Khan et al., 2021), o el uso de la inteligencia artificial, la cual permite generar modelos para optimizar el uso de recursos, predicción de rendimiento de cosecha, aplicación de técnicas para disminuir los desperdicios, detectar los cambios en el clima, monitorear el crecimiento de la biomasa, gestionar el riego, definir el tiempo de cosecha, proteger a los cultivos y monitoreo de malezas. Utilizar este tipo de tecnologías puede incrementar la sustentabilidad de la actividad agrícola (Sachithra & Subhashini, 2023).

La implementación de las técnicas antes mencionadas en ambientes controlados es crucial para mejorar tanto la calidad como la cantidad de los productos agrícolas (Dhanaraju et al., 2022). Pero, para tener la capacidad de recolectar múltiples datos y acoplar los sistemas de decisión autónoma en ambientes no controlados, se requiere adecuar los servicios y preparar las herramientas e instrumentos que registrarán la información en campo, todo esto con la finalidad de contribuir con el desarrollo de las personas, agrupaciones e instituciones, quienes serán los usuarios finales de estas tecnologías (Malik et al., 2022).

Globalmente se han documentado aquellos esfuerzos que aplican innovaciones en el sector agroalimentario, entre los cuales se podrían mencionar a Chen & Yang (2019), quienes propusieron una plataforma para visualizar y analizar la información relevante en el sistema productivo del río Jinsha; se monitorearon variables ambientales, condiciones climáticas y control integrado, entre otros, para generar un sistema que pudiera mitigar y prevenir desastres e incrementar la eficiencia global de los sistemas de producción. Mientras que Huang et al. (2020), desarrollaron el concepto de agricultura fotovoltaica con internet de las cosas (PAIoT - por sus siglas en inglés), donde se utilizan modelos de agricultura inteligente en conjunto con sistemas fotovoltaicos, proponiendo el PAIoT como un siguiente paso en los sistemas de producción alimentaria. Effah et al. (2024) evaluaron la robustez de un sistema basado en hardware de bajo costo para un sistema de producción en campo, evaluando también la relación energía-eficiencia de diferentes configuraciones de hardware. Asimismo, Hu et al. (2020) proponen el MDFC-ResNet, un sistema que combina cámaras de video, modelos de aprendizaje profundo y dispositivos de salida finales (teléfonos inteligentes de usuarios), con la finalidad de informar a los agricultores sobre el estado de salud de sus cultivos. Núñez et al. (2017) utilizaron sensores a distancia para recolectar datos del ambiente como: humedad ambiental, temperatura y humedad del suelo; esta información fue usada para proponer mejoras al proceso de un cultivo. Por otro lado, Trongtorkid & Pramokchon (2018) analizaron plagas y enfermedades de mango y, solucionaron el bajo rendimiento del cultivo ocasionados por estos vectores. Se recopilaron imágenes de los mangos y utilizaron un árbol de

decisión para construir un modelo que fue utilizado en la toma de decisiones para identificar las enfermedades del mango y las plagas. Igualmente, Ma et al. (2022) integraron un sistema que permite cultivar y predecir necesidades en un sistema de bucle cerrado utilizando visión artificial, sensores y programando un sistema de toma de decisiones.

El chayote es un cultivo de alta importancia económica y alimentaria. Se han generado diversos esfuerzos para su domesticación y cuidado de su diversidad biológica, con el objetivo de generar cultivares que cumplan con normativas para exportación. Para diseñar y generar un sistema de monitoreo remoto adecuado para el cultivo de chayote verde liso es importante considerar los requerimientos ambientales para su adecuado desarrollo, tales como: la temperatura ambiente, humedad relativa y exposición a la luz (Avendaño-Arrazate et al., 2010).

El cultivo de chayote tiene propiedades nutraceuticas, además de que gran parte de su biomasa (frutos, tallos, hojas y raíz) se considera comestible (Cadena-Iñiguez, 2010). La producción de este cultivo está basada en estructuras tecnificadas, conocidos como “tapancos”. La instalación es amigable con el ambiente y satisface los requerimientos de los consumidores locales (Ortiz et al., 2019; Cadena-Iñiguez, 2018; Cadena-Iñiguez et al., 2021). México suministra 53 % del chayote verde liso importado por Estados Unidos, compitiendo constantemente con Costa Rica. Durante el año 2022 se cosecharon 196,465.85 toneladas de este fruto, generando un valor de producción de \$65,121,192 USD. El estado de Veracruz ha sido un referente en la domesticación, producción y exportación de chayote, siendo el primer lugar en producción nacional con más del 80 % (SIAP, 2023). Sin embargo, se han identificado necesidades para tecnificar y mejorar la eficiencia de la cadena productiva, las cuales están propuestas en el Plan Estratégico de Investigación del Chayote - el cual continúa vigente - (Cadena-Iñiguez & Arévalo-Galarza, 2010). El objetivo de este trabajo es dar a conocer el avance a detalle respecto al desarrollo de herramientas tecnológicas de captura, transferencia y análisis de datos que pretenden ser un apoyo en la producción de chayote.

Material y Métodos

Área experimental

La Figura 1 muestra el área experimental, la cual se encuentra en el Municipio de Coscomatepec, Veracruz, dentro del rancho La Noria, calle 16 de septiembre número 1 colonia Lázaro Cárdenas, en las coordenadas N 19°04'33" y O 97°01'38" a 1500 msnm, a cargo del señor productor de chayote José Miguel Martínez González.

El experimento se desarrolló sobre una instalación aérea denominada “tapanco” de 8 m x 8 m, la cual está constituida por 9 postes de plástico de sección transversal cuadrada de 95.25 mm por lado y una longitud de 2.5 m, generando 4 cuadrantes de 4 m por 4 m cada uno, para la producción de la variedad de chayote *virens levis*. Los postes están unidos a través de su sección superior por alambre de púas de 3.26 mm de diámetro (awg #8) y alambre galvanizado de un diámetro de 3.26 mm (awg #8). La planta de chayote fue sembrada en el centro geométrico del tapanco y a un costado del poste central. La Figura 2 muestra una vista del área experimental, se trata de la primera fotografía tomada en el área experimental mediante los sistemas instalados.

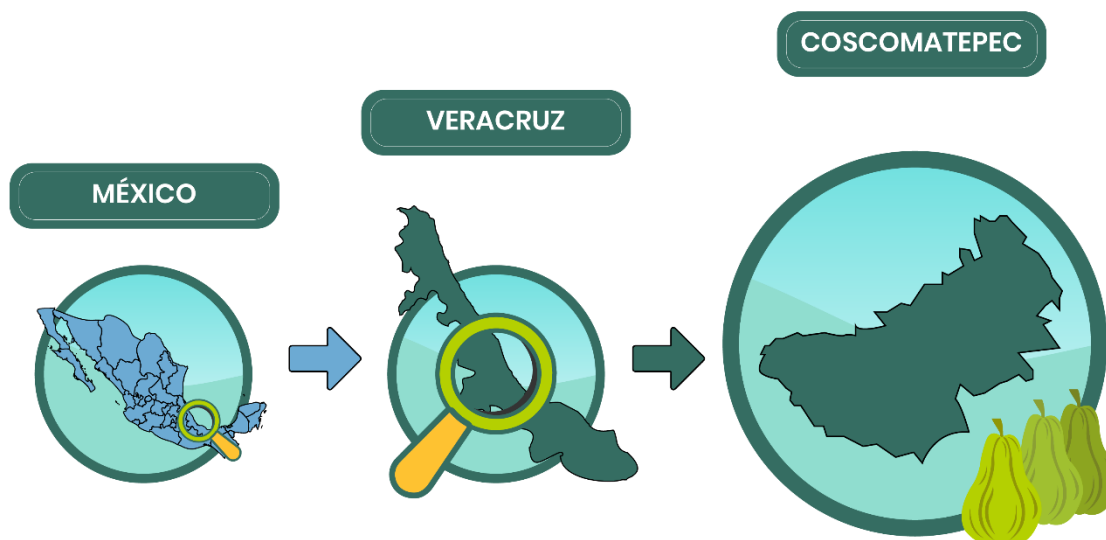


Figura 1. Ubicación de la zona experimental en México.



Figura 2. Primera fotografía tomada en el tapanco experimental mediante cámara de seguimiento.

Consideraciones iniciales para el experimento

Este experimento tiene la finalidad de recopilar información en campo, dicha información será utilizada para establecer la relación entre las condiciones ambientales y la productividad de una planta de chayote.

Durante el mes de enero del 2024 se realizó una propuesta de plataforma de instrumentación y transmisión de datos considerando las necesidades, capacidades y especificaciones de los instrumentos, sensores y servicios requeridos para registrar de manera continua la información de variables ambientales. Debido a las condiciones en las que se realizaría el experimento y tomando

en cuenta los resultados que se querían alcanzar, se plantearon diversas alternativas de infraestructura para cumplir con los objetivos. En la Figura 3 se muestra la disposición inicial de diversos elementos candidatos, también se aprecia un robot supervisor, el cual se tiene planeado para recolección de datos (imágenes) y está previsto como una herramienta alternativa para desarrollar a futuro. Algunos componentes que se propusieron para montar el experimento en campo fueron: un servicio de almacenamiento en la nube, un mecanismo de almacenamiento en el sitio (mediante memorias SD o similares), la infraestructura para el suministro de energía eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), o la posibilidad de una autogeneración de energía eléctrica por medio de paneles solares. Asimismo, se debía desarrollar hardware específico para la adquisición de información de algunas variables en campo tales como humedad relativa, temperatura ambiente, exposición a la radiación solar de algunos sectores del tapanco y finalmente el registro del peso sobre los alambres de la estructura, los cuales actúan como soporte para el follaje vegetal de la planta de chayote. Esto último con la finalidad de relacionar el peso registrado con el crecimiento de la biomasa.

Se propone utilizar elementos electromecánicos (galgas extensiométricas) para registrar los cambios en el peso del tapanco sin afectar su funcionamiento, y a través de un sistema de adquisición de datos se transferirá la información recopilada a la plataforma de visualización que se seleccione. La Figura 4 muestra un acercamiento al instrumento de adquisición de datos y la galga, la cual al tener acoplado un alambre estructural del tapanco, permite medir la variación en el peso de éste.

Durante una visita al sitio experimental, se identificó la ubicación, así como la construcción y orientación espacial del tapanco, por lo que se definieron las necesidades técnicas para el proyecto, entre éstas se encontraron: a) la construcción de sondas individuales para registrar la cantidad de biomasa (carga), así como la necesidad de transferir la información recopilada a un almacenamiento en la nube; b) se gestionó la instalación de una red local para facilitar el acceso a los datos desde cualquier sitio con internet, con el objetivo de que no fuera necesario estar físicamente en el sitio experimental para descargar la información de los sensores. Respecto al suministro de energía eléctrica, se descartó el uso de paneles solares con baterías y sistemas de inversión de corriente, por lo que, se decidió utilizar el suministro doméstico de energía. Se identificaron algunas necesidades en cuanto a componentes se refiere, así como las especificaciones de materiales para la instalación y construcción de los instrumentos de registro de condiciones ambientales; también se definieron las características de los materiales para la alimentación de la energía eléctrica como cable eléctrico bipolar de diámetro de 1.02 mm (awg #18), conectores rápidos, fuente de tensión de 5 V a 20 A, cable multipropósito con diámetro 1.63 mm (awg #14) y componentes de sujeción para uso exterior.

Diseño y construcción de los instrumentos para registro de datos en campo

En el diseño de los instrumentos para el registro de la información en campo se consideró que fueran capaces de resistir las inclemencias del tiempo, así como que se pudiera efectuar un diagnóstico rápido para su mantenimiento, reprogramación o reemplazo de componentes con facilidad. Se utilizó un diseño para una tarjeta de desarrollo tipo Wemos D1 Mini R2 la cual contiene un microcontrolador ESP8266. Esta tarjeta administra la interpretación y transferencia de la información registrada por los sensores ambientales a través de Wifi a un servicio de almacenamiento y visualización de información. Los sensores seleccionados fueron: el AHT30, una fotorresistencia configurada como divisor de voltaje en serie con una resistencia comercial de 1 k Ω a ¼ de Watt y una galga extensiométrica modelo Sen-10245 con una capacidad de 50 kg, conectada en configuración individual al módulo amplificador HX711. También se incluyó en el diseño una pantalla oled SSD1306 (128 x 32 pixeles) para visualizar los datos de la sonda en tiempo real de

forma local, además de un cargador de baterías de litio modelo TP4056 con capacidad de carga de 1 A, conectado en paralelo a 3 baterías de litio modelo 18650.

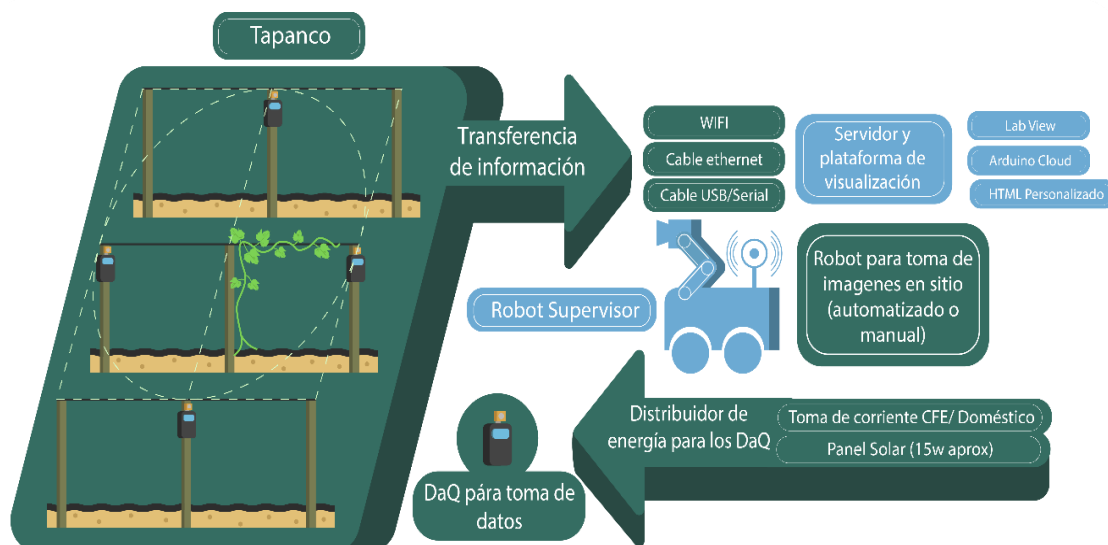


Figura 3. Disposición de los elementos para el monitoreo y cosecha del fruto de chayote.

La Figura 5 muestra el diagrama de conexiones utilizado en los instrumentos para registrar la información de las condiciones ambientales. También se diseñó una placa de circuito impreso para facilitar el ensamble de cada unidad electrónica en los instrumentos de registro de datos. En la Figura 6 se ilustra el modelo para el diseño de la placa de circuito impreso junto con su renderización en el programa EASY EDA (Easy Eda, 2013) y finalmente, la placa de circuito impreso ya ensamblada.



Figura 4. Acercamiento a sonda para registro de datos (abajo).

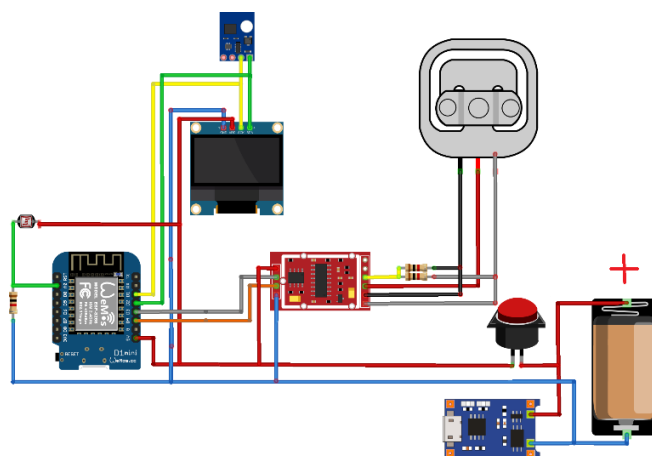


Figura 5. Circuito de los componentes electrónicos de los instrumentos de adquisición de datos (Fritzing, 2009).

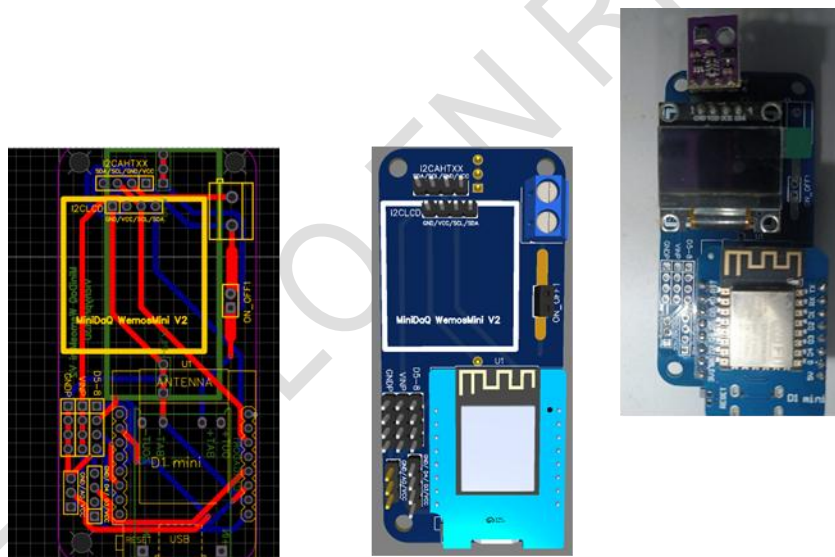


Figura 6. Diseño de circuito para instrumentos de adquisición de datos. De izquierda a derecha; vista de PCB en programa EASY EDA, renderización en 3D del programa EASY EDA y resultado final.

Una vez ensambladas las placas de circuito impreso, se procedió a verificar el comportamiento de cada una de las galgas extensiométricas que serían utilizadas en cada módulo de adquisición de datos. Cada galga fue sometida a una prueba de tensión, por medio de una máquina que fue construida específicamente para el proyecto (esta máquina se puede apreciar en la Figura 7). Este mecanismo fue diseñado para suministrar un esfuerzo similar al que se someterán los instrumentos montados en el tapanco experimental, aplicando tensión en un rango de 0 hasta 412 N (equivalentes a 42 kg). La fuerza de tensión aplicada a cada galga en los ensayos fue de 392 N en promedio por prueba, la cual fue corroborada con el valor de tensión generado por el módulo amplificador HX711.

Todas las galgas utilizadas mostraron un comportamiento lineal, donde la lectura exhibida fue directamente proporcional respecto a la tensión aplicada. Se realizaron 6 pruebas de tensión, iniciando con una carga de 9.8 N; para su registro se utilizó la plataforma de Arduino Cloud (Arduino, 2024), monitoreando los cambios del módulo HX711 en una variable dedicada para almacenar esta información.

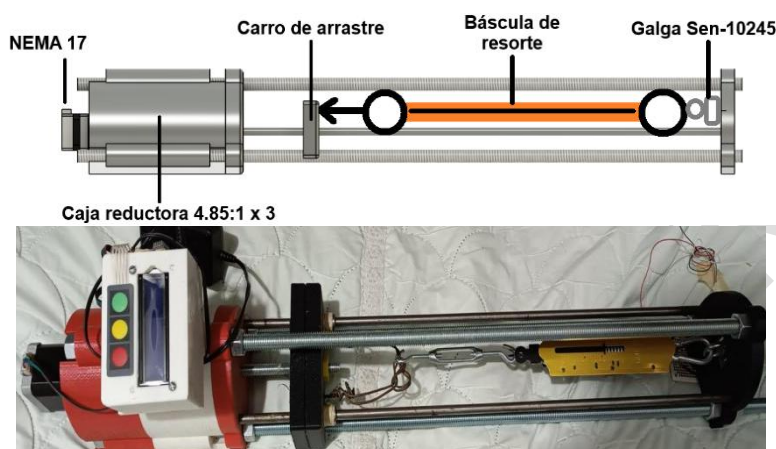


Figura 7. Esquema de la máquina de tensión utilizada en las pruebas de las galgas (arriba) y fotografía de ésta (abajo).

Se generó un reporte para cada galga haciendo uso de las librerías “*pandas*” y “*ggplot*” con el software de uso libre PyCharm Community (JetBrains j.r.o, 2024). A partir de los datos recopilados para cada galga, mediante la plataforma de registro de información en línea de Arduino Cloud se procedió con el análisis de la información tabulando los puntos de lectura cada 60 segundos. Cada prueba tuvo una duración de 120 minutos en promedio, que incluye la aplicación y liberación de la tensión. Este comportamiento es similar al que se someten las galgas Sen-10245 en el tapanco experimental, por lo que, al examinar los datos recopilados de su deformación, será posible determinar el aumento o disminución de biomasa en el alambrado de la estructura que sostiene al follaje y frutos de la planta de chayote.

En la Figura 8 se muestra el reporte de la prueba de tensión aplicada a la galga 1, donde se aprecian los datos de interés para llevar a cabo la programación de la sonda. Para esta etapa del experimento se utilizó la función “*map*” de Arduino, considerando valores a mapear que son equivalentes a un rango de 1 a 41 kg (-131 a 41 unidades del amplificador HX711).

Tomando como ejemplo el análisis del comportamiento de la primera galga, se plantea que el peso aplicado puede ser la variable x , $N = 98$ es el número de lecturas totales, y_i es el vector de valor incremental de la galga con 49 lecturas y finalmente y_f es el vector de valor descendente con 49 lecturas (se considera también que $\bar{y} = -48.62$). Con el objetivo de conocer el incremento por cada una de las 49 secciones de los vectores y se plantea la ecuación 2. Se inició la prueba de tensión con una carga equivalente de $P_i = 1$ kg, y se incrementó de forma constante hasta llegar a $P_f = 41.5$ kg. Como se describe en la ecuación 2, se tuvo un total de incremento por lectura de $Lec = 0.847$ Kg por cada una de las $N/2$ lecturas aproximadamente, este dato sirve para generar el vector x_i el cual describe el comportamiento del peso en el ensayo ($x_i = [1.847, 2.294, 3.6541, \dots, 41.5]$ en kg). Finalmente, para la ecuación 3, y_f representa el vector de salida, m es la pendiente de la línea, y b

es la intersección para generar una línea ajustada mediante el promedio de y_i y y_j , este valor fue calculado haciendo uso del comando `geom_smooth(method="lm")` de la librería `plotnine`. Una vez obtenidos estos datos, se generó un gráfico que ayuda a cotejar visualmente el comportamiento lineal de la galga. Todo esto se dibuja con ayuda de las librerías `"plotnine"` y `"ggplot"` en `pycharm`.

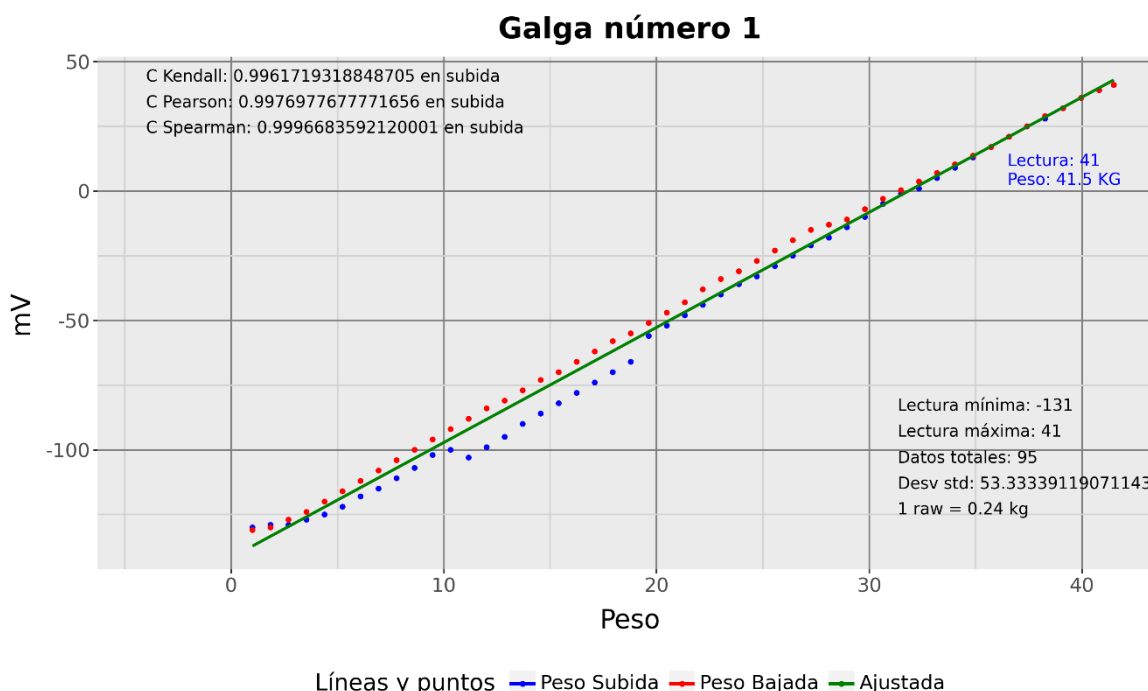


Figura 8. Comportamiento de la galga Sen-10245 de la sonda 1 al aplicarse una tensión de 1 a 45 kg generada con programación.

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i + \sum y_j}{N} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$\frac{N}{2} (Lec) = P_f - P_i \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$y_f = m Lec + b \quad \text{Ecuación (3)}$$

A partir de estos ensayos, se pudo comprobar que existe un comportamiento lineal en las gráficas de todas las galgas Sen-10245 utilizadas en el experimento, tanto para los valores de carga como para los de descarga. La plataforma de Arduino Cloud permite registrar y visualizar información relevante para el experimento en cualquier lugar con acceso a internet; así como descargar los datos para proponer modelos de predicción que puedan auxiliar a los productores de chayote.

Debido a que todo el instrumental electrónico del proyecto estará expuesto a condiciones climáticas adversas, sus contenedores deben evitar el ingreso de partículas de polvo y agua, además de proteger de la radiación solar. Se diseñaron e imprimieron con tecnología FDM 3D y PETG las tapas de los contenedores de los instrumentos para el registro de la información. Parte del diseño y resultado final de estos componentes se muestran en la Figura 9. La construcción de la tapa permite montar la placa de circuito impreso encima de ella, permite la interacción del sensor AHT30 con el

ambiente y ayuda a visualizar los datos en sitio directamente del instrumento con la pantalla OLED SSD1306. La tapa protege a los componentes electrónicos de la sonda permitiendo un cierre hermético que impide el contacto con agua de lluvia, granizo, humedad y demás factores que deben estar alejados del interior de la sonda.

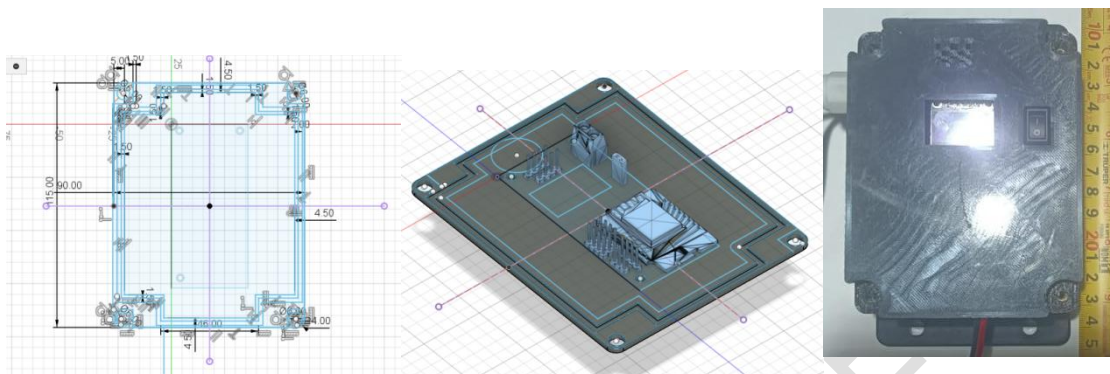


Figura 9. Diseño de la tapa para sostener la placa de circuito impreso en la caja plástica para exterior (izquierda y centro) y resultado final (derecha).

Por otro lado, la Figura 10 muestra la base para sujetar las galgas Sen-10245 a los postes del tapanco. La base fue impresa en 3D con material PETG a 265°C. Este material exhibe una mayor resistencia a la deformación y puede estar expuesto en el exterior sin ser afectado por la luz ultravioleta o humedad ambiental.

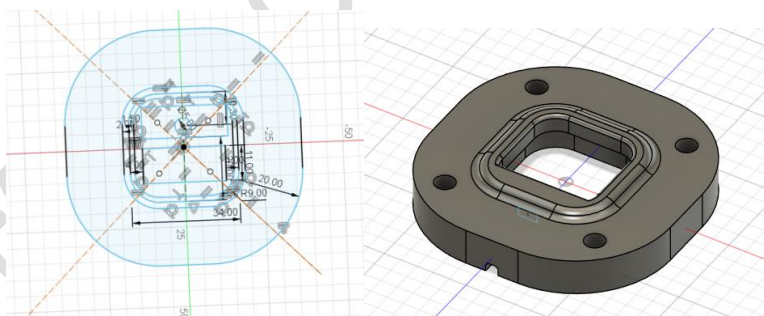


Figura 10. Diseño y renderizado del soporte para la galga modelo Sen-10245.

Instalación de servicios e instrumental en campo

Los servicios de internet y alimentación eléctrica se instauraron en el mes de junio de 2024. Se incluyó la instalación de cable doble de aluminio de 4.11 mm de diámetro (awg #6) con una longitud de 210 m, el cual inició desde un punto de conexión monofásica de 127 VCA en la casa del productor, afianzándose sobre algunos postes previamente colocados, hasta llegar a un punto final de conexión a 8 m del tapanco experimental. A partir de este punto, se efectuó la distribución con accesorios para suministrar energía a una fuente de voltaje de 12 VDC, con capacidad de suministrar hasta 20 A, instalada a un costado del tapanco experimental. Estos servicios instalados están representados por las líneas roja y azul de la Figura 11, la cual es una vista aérea de la zona experimental.

Respecto a la red de comunicaciones, se utilizaron diversos componentes que garantizan una conexión constante a internet de hasta 80 Mbps. En operación, la red permite transferir los datos del tapanco hacia el usuario de manera ininterrumpida. La Figura 12 muestra de qué manera están comunicados los componentes de la red para el experimento.

Una vez instalados los servicios de alimentación de energía y comunicación, se procedió a fijar los instrumentos para el registro de la información de las condiciones ambientales en los postes que dan forma al tapanco tal como se muestra en la Figura 13. Para llevar a cabo el ensamble del cable estructural con las galgas, se utilizó en cada una de éstas una argolla de acero inoxidable y un tensor de 9.53 mm ($\frac{3}{8}$ de pulgada). Los soportes para galga (amarillo) se instalaron en los postes del tapanco con pijas multiusos de 38 mm de largo.

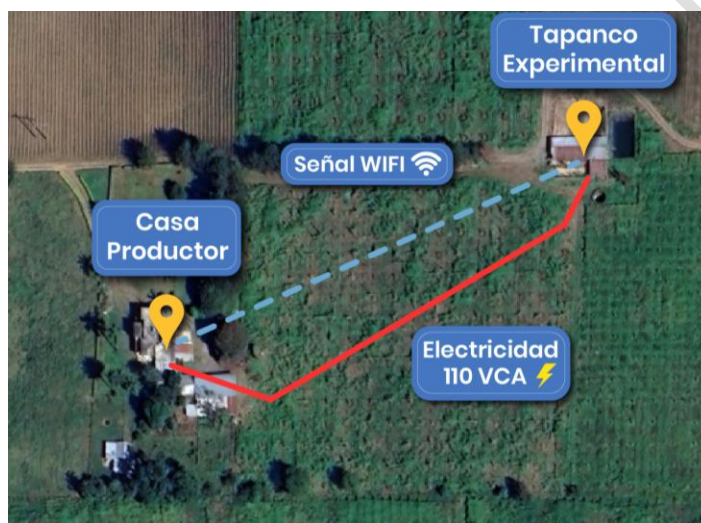


Figura 11. Vista aérea del área experimental y servicios instalados

El suministro de energía para cada instrumento se efectuó con cable bipolar de 0.6440 mm de diámetro (awg #22) el cual fue fijado al tapanco con ayuda de accesorios de distribución. Finalmente, como apoyo para el monitoreo visual en tiempo real del tapanco, se instaló una cámara Wifi, la cual permite grabar y tomar fotografías de manera constante.

Resultados y Discusión

La Figura 14 ilustra el modelo completo del módulo experimental, donde se describe la instalación de 6 dispositivos para la adquisición de datos (cada uno con una "S" mayúscula y un número de identificación); las líneas rojas representan las conexiones estructurales de los alambres, las cuales son monitoreadas por su respectiva galga Sen-10245. Cada óvalo negro representa la posición donde se ubica un módulo. Esta configuración permite registrar los datos ambientales que influyen en el desarrollo de la biomasa de la planta para posteriormente ejecutar un proceso de correlación junto con el peso registrado en cada alambre para finalmente obtener un estimado de la producción de frutos de chayote. Cada uno de los postes del tapanco está representado por un cuadrado verde oscuro, las líneas verdes representan el alambrado donde se sostiene la planta; las líneas más delgadas forman el emparrillado que soporta la biomasa al interior y finalmente, las

líneas más gruesas forman la estructura de carga del tapanco. Por otro lado, se indica la ubicación de la cámara instalada para el monitoreo visual del experimento.

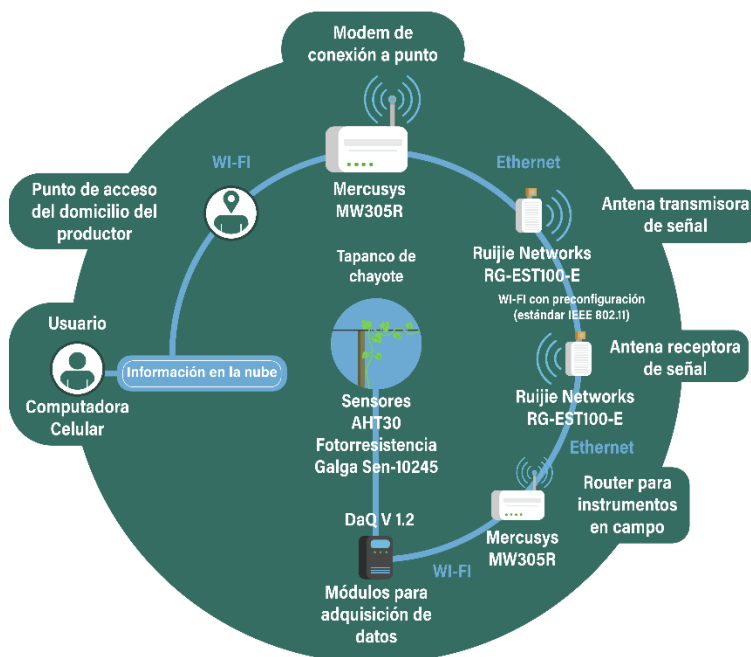


Figura 12. Red de comunicación para la transferencia de información desde el tapanco experimental hasta el usuario final.



Figura 13. Instalación de los instrumentos para el registro de la información en el tapanco experimental.

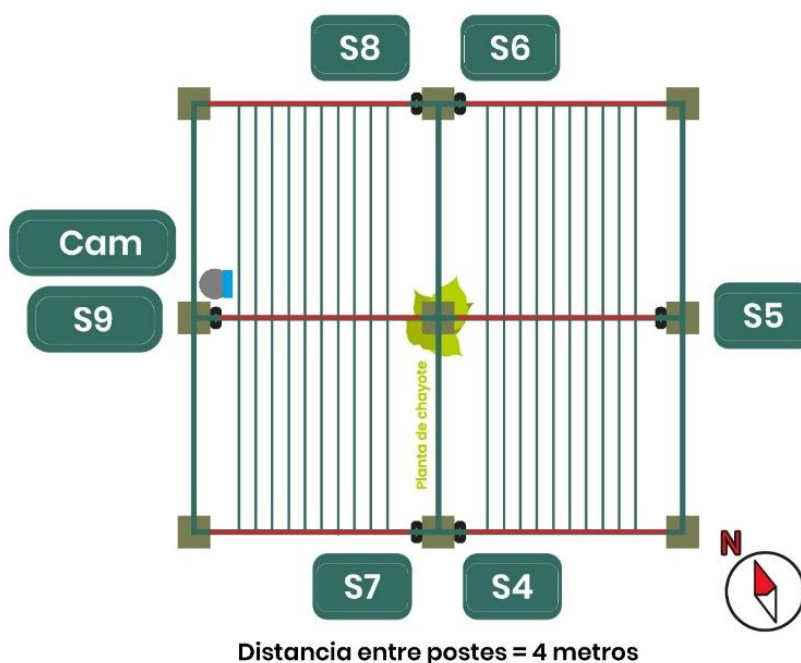


Figura 14. Tapanco experimental con sondas para registro de información y cámara

A través de la interfaz de Arduino Cloud es posible observar y agrupar el registro de los datos de los instrumentos, además de generar interfaces que permitan visualizar la información relevante para el usuario. Se muestran ejemplos de las carátulas de los registros de datos recabados mediante el sistema implementado. Se asignó para cada sensor un indicador que permite visualizar el valor en tiempo real de la variable monitoreada de acuerdo con la lectura de su respectivo sensor. Para este ejemplo (Figura 14), se enumeraron las sondas de S4 a S9, asignando el mismo número a los sensores AHT30 y al arreglo de fotorresistencia correspondiente a cada dispositivo. La plataforma utilizada permite guardar y emparejar los datos de un mismo tipo en un histograma, el cual permite visualizar rápidamente un registro histórico. Cabe mencionar que esta información también puede ser visualizada en dispositivos móviles que permitan el acceso a internet abriendo el portal de Arduino Cloud, o bien, con la aplicación propia de esta plataforma.

En la Figura 15 se aprecian los datos de humedad de las sondas 7, 8 y 9. Los datos de porcentaje son las lecturas en tiempo real de los sensores AHT30 de cada sonda, mientras que debajo de ellas se tiene un histograma integrado por la recopilación de esos mismos 3 sensores. La página web donde se ve la información permite visualizar un histórico, así como descargar los datos en formato .xlsx para poder trabajar con ellos de forma independiente.

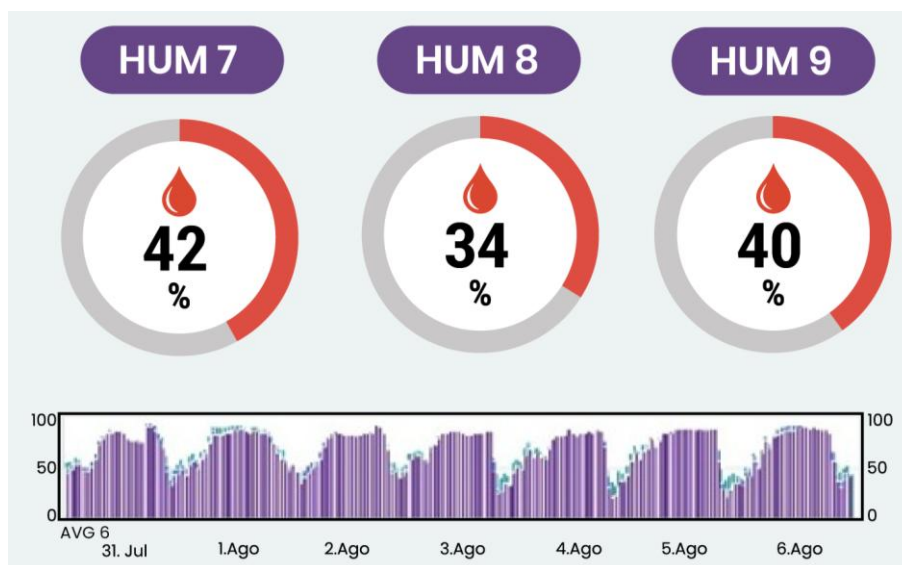


Figura 15. Recolección de información de 7 días de monitoreo de la humedad relativa por medio del sensor AHT30 en 3 puntos del tapanco experimental. Arriba se muestra la visualización de datos en tiempo real y abajo se muestra el gráfico de 7 días de monitoreo.

La Figura 16 muestra un porcentaje de exposición solar de las sondas 7, 8 y 9. Los datos de porcentaje son las lecturas en tiempo real de los sensores, mientras que debajo de ellas se tiene una gráfica con 7 días de lectura de esos mismos 3 sensores.

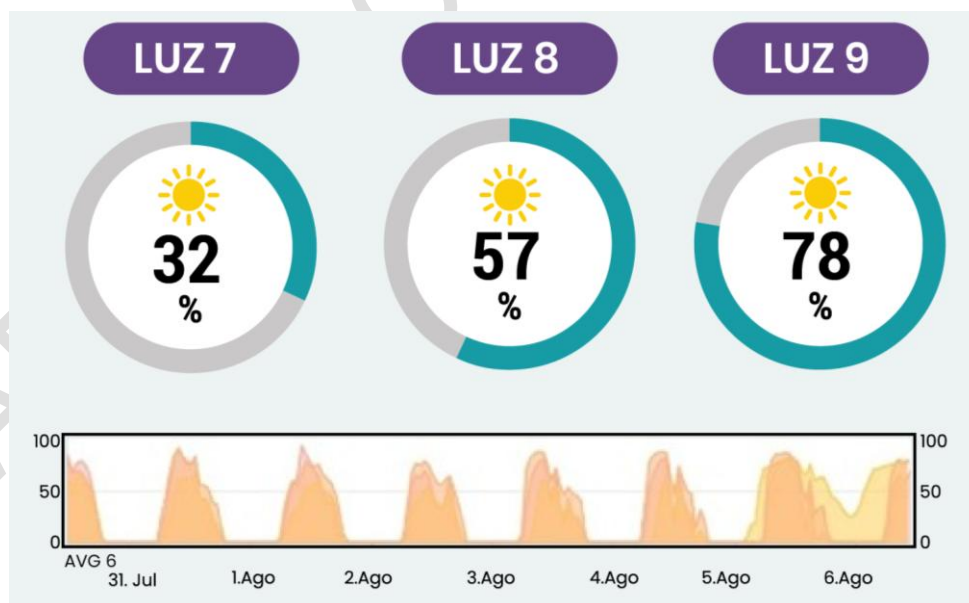


Figura 16. Recolección de información de 7 días de monitoreo de la exposición a la luz por medio de fotorresistencia con arreglo en divisor de voltaje. Arriba se muestra la visualización de datos en tiempo real y abajo se muestra el gráfico de 7 días de monitoreo.

Finalmente, en la Figura 17 se muestra la información respecto a la temperatura ambiente. Los datos de porcentaje son las lecturas en tiempo real de los sensores AHT30 de cada sonda, mientras que debajo de ellas se tiene un histograma integrando la recopilación de esos mismos 3 sensores.

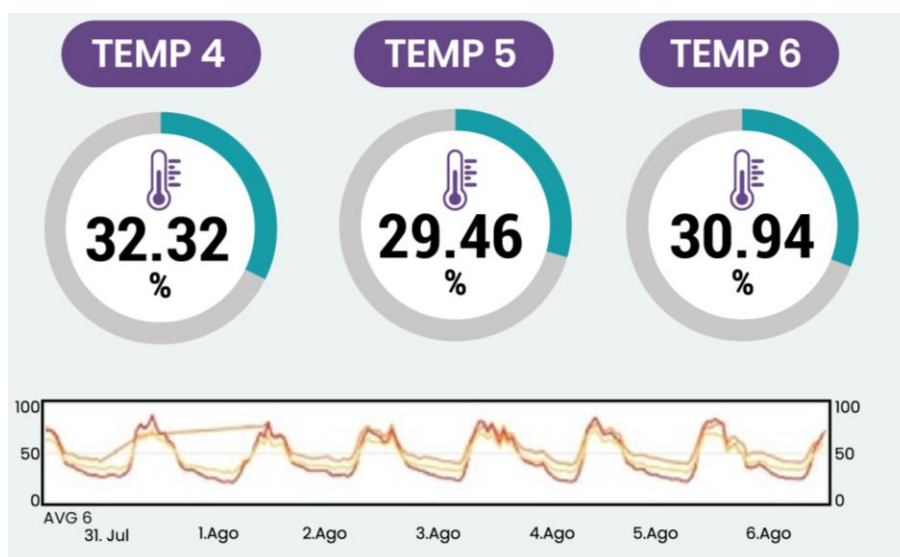


Figura 17. Recolección de información de 7 días de monitoreo de la temperatura ambiente por medio del sensor AHT30 en 3 puntos del tapanco experimental. Arriba se muestra el último dato registrado por los sensores y abajo se muestra el gráfico de 7 días de monitoreo.

Debido a que se implementó con éxito una red de comunicaciones inalámbrica en campo, fue posible adquirir, almacenar, procesar y visualizar en tiempo real los datos recopilados por los sensores electrónicos instalados; con la ventaja de que además se puede acceder a los datos vía remota a través de una plataforma en línea por internet. Esto demuestra que la tecnología necesaria para desarrollar este tipo de aplicaciones es accesible y puede ser implementada por personal sin una especialización profunda en sistemas de telecomunicaciones. La arquitectura de hardware presentada en este trabajo podría servir como un modelo aplicable a otros estudios que actualmente tengan una problemática de comunicación similar.

Los datos obtenidos de las variables de interés por los sensores electrónicos de bajo costo fueron comparados con otros instrumentos de medición, llegando a la conclusión de que tienen una precisión y tiempo de respuesta adecuados para la aplicación, por lo que la propuesta de este trabajo tiene validez y los resultados son comparables con los de otras investigaciones a nivel internacional.

Aunque los instrumentos utilizados para la recopilación de datos no son una novedad en el mercado, la finalidad y el uso de los datos registrados sí tiene un enfoque innovador. Como se mencionó al principio de este trabajo, la finalidad de este experimento es contribuir a la creación de un modelo capaz de predecir el rendimiento de un cultivo a partir de datos obtenidos en campo, lo cual podría

contribuir significativamente a los objetivos de sustentabilidad en la actividad productiva del cultivo de chayote.

Conclusiones

El proceso metodológico fue exitoso, ya que fue posible diseñar y construir un sistema confiable y replicable, el cual puede ser perfeccionado añadiendo accesorios o componentes que ayuden a resistir de mejor manera las adversidades del entorno dónde se instalen los instrumentos de medición y de comunicación. El sistema propuesto puede registrar información importante que influye en la producción del chayote verde liso, además de que tiene la funcionalidad de reprogramarse de acuerdo con requisitos específicos del lugar de funcionamiento y las características del cultivo. La tecnología desarrollada permite observar y monitorear el crecimiento de las plantas, además de aportar información para llevar a cabo tanto simulaciones como predicciones. Debido a que el sistema propuesto se basa en componentes de bajo costo, y a que es posible trabajar con instrumentos de registro de datos en diferentes plataformas digitales, se abre la oportunidad de aplicar esta metodología a otros cultivos para fortalecer el eje de innovación agroalimentaria en México; trasladando la tecnología a diferentes cultivos de importancia económica en las diferentes regiones, así como se realizó con el chayote en el estado de Veracruz.

La metodología para adquirir la información de las galgas Sen-10245 permite interpretar de manera precisa la información generada por estos componentes respecto al peso en el alambrado del tapanco. Esto puede servir para posteriormente realizar conjeturas respecto al comportamiento del cultivo en general, lo que ofrece oportunidades como seguimiento a crecimiento de biomasa, alertas en caso de daños por condiciones climáticas e inclusive la implementación de un sistema integral en el cual de forma semiautomatizada o automatizada se pueda llevar a cabo la cosecha del chayote. Cabe mencionar que el proceso de calibración y el código construido para realizar los reportes puede ser aplicable para otros fines, tales como calibrar sensores que no cuenten con una curva de calibración o usar la estructura del programa para validar otras variables del experimento (crecimiento de biomasa, gráficas que muestren el desarrollo de la fructificación, entre otros).

Finalmente se recuerda que el objetivo a futuro del proyecto es implementar modelos predictivos basados en estadística, los cuales puedan servir de apoyo a los productores de chayote (y de otros cultivos) en su toma de decisiones; así como construir herramientas tecnológicas (robots teledirigidos y/o autónomos) que permitan auxiliar en la cosecha del chayote.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo: VAM, OLH, CLG; desarrollo de la metodología: VAM, OLH, CLG, COA; manejo de software: VAM; validación experimental VAM, OLH, CLG; análisis de resultados: VAM, OLH, CLG, COA; manejo de datos: VAM, OLH, CLG; escritura y preparación del manuscrito: VAM, CLG, OLH, COA; redacción, revisión y edición: VAM, CLG, OLH, COA; administrador de proyectos: OLH; adquisición de fondos: VAM, OLH.

“Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.”

Financiamiento

"Esta investigación fue financiada con fondos propios".

Agradecimientos

Se agradece a SECIHTI por la beca otorgada. Se agradece al señor José Miguel Martínez González por las facilidades para trabajar en su propiedad.

Conflicto de interés

"Los autores declaran no tener conflicto de interés".

Referencias

- Arduino SA. (2024). Arduino Cloud (Version 1.0) [Software]. <https://cloud.arduino.cc/>
- Avendaño-Arrazate, C., Cadena-Iñiguez, J., Arévalo-Galarza, M., Campos-Rojas, E., Cisneros-Solano, V., & Aguirre-Medina, J. (2010). Las variedades del chayote mexicano, recurso ancestral con potencial de comercialización. México: Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en México, A.C. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/231856/Las_variedades_del_chayote_mexicano.pdf
- Cadena-Iñiguez, J., & Arévalo-Galarza, M. (2010). GISEM: Rescatando y Aprovechando los Recursos Fitogenéticos de Mesoamérica Volumen 1: Chayote. Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en México, A.C.; Colegio de Postgraduados. ISBN 978-607-7533-80-1. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/231857/El_chayote_volumen_1.pdf
- Cadena-Iñiguez, J. (2010). El chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw., importante recurso fitogenético mesoamericano. Agro Productividad, 3(2). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/589>
- Cadena-Iñiguez, J. (2018). Uso de chayotes mexicanos para tratamiento de enfermedades de interés público. Agro Productividad, 9(11-B). <https://doi.org/10.32854/agrop.v9i11-B.893>
- Cadena-Iñiguez, J., Arévalo-Galarza, M., Avendaño-Arrazate, C., Ventura-Valerio, V., & Ruiz-Posadas, L. (2021). Diseño y transferencia de la variedad vegetal de chayote [*Sechium edule* (Jacq.) Sw.] var. *virans levis* "VENTLALI". *Agro-Divulgación*, 1(1). <https://doi.org/10.54767/ad.v1i2.32>
- Chen, J., & Yang, A. (2019). Intelligent agriculture and its key technologies based on Internet of Things architecture. *IEEE Access*, 7, 77134-77141. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921391>
- Dhanaraju, M., Chenniappan, P., Ramalingam, K., Pazhanivelan, S., & Kaliaperumal, R. (2022). Smart farming: Internet of Things (IoT)-based sustainable agriculture. *Agriculture*, 12(10), 1745. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>
- Easy Eda (2013). (Versión 6.5.41) [Software]. Disponible en <https://u.easyeda.com/>
- Effah, E., Thiare, O., & Wyglinski, A. M. (2024). Hardware evaluation of cluster-based agricultural IoT network. *IEEE Access*, 12, 33628-33651. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3370230>
- ElBeheiry, N., & Balog, R. (2023). Technologies driving the shift to smart farming: A review. *IEEE Sensors Journal*, 23(3), 1752-1769. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3225183>
- FAO [Food and Agriculture Organization of the United Nations]. (2024). The state of food security and nutrition in the world 2024: Financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms. <https://doi.org/10.4060/cd1254en>
- Fritzing (2009). Fritzing (Versión 0.9.10) [Software]. Disponible en <https://fritzing.org>

- Huang, K., Shu, L., Li, K., Yang, F., Han, G., Wang, X., & Pearson, S. (2020). Photovoltaic agricultural Internet of Things towards realizing the next generation of smart farming. *IEEE Access*, 8, 76300-76312. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988663>
- Hu, W., Fan, J., Du, Y., Li, B., Xiong, N., & Bekkering, E. (2020). MDfC-ResNet: An agricultural IoT system to accurately recognize crop diseases. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001237>
- Núñez, J., Fonthal, F., & Quezada, Y. (2017). Design and implementation of WSN for precision agriculture in white cabbage crops. In proc. 2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON) (pp. 1-4). <https://doi.org/10.1109/INTERCON.2017.8079671>
- JetBrains s.r.o. (2024). PyCharm Community Edition (Version 2024.1) [Software]. <https://www.jetbrains.com/pycharm>
- Khan, N., Ray, R. L., Sargani, G. R., Ihtisham, M., Khayyam, M., & Ismail, S. (2021). Current progress and future prospects of agriculture technology: Gateway to sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(9), 4883. <https://doi.org/10.3390/su13094883>
- Malik, P., Singh, R., Gehlot, A., Akram, S., & Das, P. (2022). Village 4.0: Digitalization of village with smart Internet of Things technologies. *Computers & Industrial Engineering*, 165, 107938. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107938>
- Ma, Y., Chen, J., & Shih, C. (2022). An automatic and intelligent Internet of Things for future agriculture. *IT Professional*, 24(6), 74-80. <https://doi.org/10.1109/MITP.2022.3205707>
- Ortiz, H., Rosas-Calleja, D., & Debernardi-de-la-Vequeia, H. (2019). Descripción de la estructura de soporte para el cultivo de chayote (*Sechium edule* (Jacq). Swartz), y propuesta de un nuevo modelo. *Agro Productividad*, 12(9). <https://doi.org/10.32854/agrop.v12i9.1193>
- Sachithra, V. & Subhashini, L. (2023). How artificial intelligence uses to achieve the agriculture sustainability: Systematic review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 8, 46-59. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2023.04.002>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2023). Valor de la producción nacional, módulo agrícola producción estatal producción anual de chayote sin clasificar. SIACON. [Software]. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/documentos/siacon-ng-161430>
- Trongtorkid, C., & Pramokchon, P. (2018). Expert system for diagnosis mango diseases using leaf symptoms analysis. In Proc. of the International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT 2018) (pp. 59-64). <https://doi.org/10.1109/ICDAMT.2018.8376496>