IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Diseño y Validación de una Estación Meteorológica Autónoma de Bajo Costo para el Sector Cañero

Design and Validation of a Low-Cost Autonomous Weather Station for the Sugarcane Sector

Cárdenas-Magaña, J.A.[1]*
(*jorge.cardenas@tamazula.tecmm.edu.mx)

Recibido: 17-04-2025 Aceptado: 04-06-2025

Resumen

Esta investigación presenta el diseño, desarrollo y validación de una estación de monitoreo ambiental autónoma orientada al sector cañero, con el objetivo de mejorar la eficiencia en la toma de decisiones agrícolas. El sistema integra sensores de temperatura (DS18B20), humedad relativa (DHT11) y precipitación (pluviómetro de balancín con sensor de efecto Hall), gestionados mediante una plataforma Arduino. La estructura fue diseñada en SolidWorks e impresa en 3D con filamento PLA, validada mediante análisis estático para resistir vientos de hasta 25 km/h. La estación opera con un panel solar de 6 W, con un consumo energético diario de 0.07 kWh. Las pruebas de campo demostraron una precisión de ±0.3°C en temperatura, ±4 % HR en humedad y un 97 % de exactitud en la medición de precipitación, con un margen de error del 2.5 % durante lluvias intensas. Los datos se transmiten en tiempo real a una plataforma web para su visualización. El prototipo demostró ser preciso, energéticamente eficiente y de bajo costo, constituyendo una alternativa viable y escalable frente a estaciones meteorológicas comerciales para el monitoreo climático en entornos agrícolas.

Palabras clave: Monitoreo ambiental, Estación meteorológica de bajo costo, Arduino, Pluviómetro digital, Visualización remota de datos.

Abstract

This research presents the design, development, and validation of an autonomous environmental monitoring station for the sugarcane sector, aimed at improving agricultural decision-making. The system integrates temperature (DS18B20), relative humidity (DHT11), and rainfall sensors (tipping bucket rain gauge with Hall effect sensor), managed through an Arduino-based platform. The structure was designed in SolidWorks and manufactured using 3D-printed PLA components, validated th-

[1]Tecnológico Nacional de México/Universidad TENAM (Colegio de Formación Educativa TENAM S.C.), estudiante de Doctorado en Ingeniería Aplicada; docente del Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Tamazula, México.

rough static analysis to withstand wind speeds up to 25 km/h. The station is powered by a 6 W solar panel, with an average daily energy consumption of 0.07 kWh. Field tests demonstrated measurement accuracy of ±0.3°C for temperature, ±4 % RH for humidity, and 97 % precision in rainfall detection, with a 2.5 % error margin during heavy rain events. Data is transmitted in real-time to a web-based visualization platform. The prototype proved to be accurate, energy-efficient, and cost-effective, offering a scalable and viable alternative to commercial weather stations for climate monitoring in agricultural environments.

Keywords: Environmental monitoring, Low-cost weather station, Arduino, Digital rain gauge, Remote data visualization.

Introducción

El monitoreo de variables ambientales es un componente esencial en la agricultura de precisión, ya que permite optimizar actividades como el riego, la fertilización y la cosecha. En cultivos como la caña de azúcar, contar con información climática en tiempo real es esencial para determinar el momento óptimo de corte y planificar operaciones logísticas con mayor eficiencia. En regiones como Tamazula de Gordiano, Jalisco, el monitoreo meteorológico aún se realiza de forma manual, lo que implica retrasos en la toma de decisiones, una alta probabilidad de errores humanos y altos costos asociados al desplazamiento del personal técnico. Esta situación limita el aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles y afecta negativamente la productividad agrícola. Ante esta problemática, se identificó la necesidad de una solución tecnológica accesible, confiable y de bajo costo que automatice la recolección y transmisión de datos ambientales, y que además sea energéticamente autónoma para operar en zonas rurales sin infraestructura eléctrica estable. En los últimos años, la integración de sensores ambientales con plataformas abiertas y tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) ha demostrado ser una estrategia viable para enfrentar estos desafíos. Diversos estudios respaldan el uso de sensores de bajo costo y microcontroladores como Arduino para la recopilación precisa y continua de variables meteorológicas, con resultados satisfactorios en entornos agrícolas. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo diseñar, desarrollar y validar una estación de monitoreo ambiental autónoma, orientada al cultivo de caña de azúcar. El sistema propuesto integra sensores de temperatura, humedad relativa y precipitación, gestionados mediante un microcontrolador Arduino Mega, con visualización remota de datos a través de una plataforma web. Además, se asegura la autonomía energética mediante el uso de un panel solar, y se valida su funcionamiento bajo condiciones reales de campo.

Esta propuesta busca ofrecer una alternativa de bajo costo, adaptable y escalable frente a estaciones meteorológicas comerciales, con la finalidad de fortalecer la toma de decisiones agrícolas con base en datos objetivos y oportunos.

Desarrollo Del Tema

Tendencias en monitoreo ambiental agrícola

El monitoreo climático mediante tecnologías de bajo costo ha ganado relevancia en la agricultura sostenible, especialmente en regiones con acceso limitado a infraestructura tecnológica. Investigaciones recientes han demostrado que la integración de sensores económicos, plataformas IoT y comunicación

https://doi.org/10.36677/rici.v3i2.26210 Julio 2025 ISSN: 2992-7447 págs. 78-94

inalámbrica permite recopilar datos precisos en tiempo real, facilitando la toma de decisiones agronómicas [1]–[4]. Por ejemplo, Medina Vega [1] desarrolló un sistema basado en IoT y energía solar para zonas remotas, mientras que Amin et al. [2] y Rajak et al. [3] documentan el uso de sensores inteligentes para medir humedad, temperatura y lluvia, demostrando precisión aceptable para aplicaciones agrícolas. Patel et al. [4] destacan la escalabilidad de estas soluciones mediante microcontroladores como Arduino o ESP32 y tecnologías de comunicación como Wi-Fi, LoRa o GSM.

Componentes clave para estaciones de bajo costo

En el contexto de sistemas embebidos aplicados al campo, la selección adecuada de sensores, protocolos de transmisión y plataformas de visualización es crítica. Dispositivos como el DS18B20 para temperatura, el DHT11 para humedad relativa y sensores de efecto Hall para medición de precipitación han mostrado un buen equilibrio entre costo y precisión [5]–[6]. En cuanto a la transmisión de datos, tecnologías como Ethernet o LoRa se emplean dependiendo de la disponibilidad de red. En zonas con acceso a infraestructura LAN, el uso de módulos Ethernet W5100 resulta eficaz para garantizar estabilidad y bajo consumo energético [7]. Para la visualización remota, lenguajes como PHP, HTML y librerías como Chart.js permiten construir interfaces web dinámicas que presentan los datos en tiempo real [8]. La adopción de plataformas abiertas como Arduino facilita la programación modular y el manejo de datos en formatos como JSON, además de permitir escalabilidad y replicabilidad. Estas características hacen de Arduino una opción viable para sistemas de monitoreo ambiental autónomo en el sector agrícola [9].

Dispositivos IoT para monitoreo agrícola

Suman y Kumar [10] destacan que los sistemas IoT fortalecen el uso eficiente de recursos en agricultura de precisión. Moreno Perdomo [11] demuestra que el uso del microcontrolador ESP32, junto con algoritmos de aprendizaje automático, mejora la automatización en invernaderos. Díaz et al. [12] y Mejía Aguirre [13] evidencian que estaciones meteorológicas de bajo costo, alimentadas por energía solar y diseñadas con sensores comerciales, son viables para aplicaciones agrícolas, mejorando la sostenibilidad operativa. De forma complementaria, Dhanaraju et al. [14] y García Aldape et al. [15] confirman que el uso continuo de sensores IoT reduce el desperdicio de insumos y mejora la eficiencia en la producción agrícola. Finalmente, Lad et al. [16] proponen un sistema centrado en el monitoreo y control inteligente de cultivos para maximizar la productividad. Por otro lado, el monitoreo continuo de la temperatura y la humedad relativa incide directamente en decisiones clave como la gestión del riego y la prevención de enfermedades en los cultivos [17]. Asimismo, el acceso a datos precisos posibilita ajustes oportunos en el uso de insumos agrícolas, lo cual mejora tanto la eficiencia como la sostenibilidad de las prácticas agrícolas.

A partir de esta revisión, se diseñó un sistema de monitoreo ambiental específicamente adaptado al entorno del cultivo de caña. La estación integra sensores de bajo costo, comunicación Ethernet y una plataforma web para la visualización remota. La elección de un microcontrolador de arquitectura abierta (Arduino Mega), el uso de energía solar y la impresión 3D para el diseño estructural responden a criterios de bajo costo, autonomía y adaptabilidad. A diferencia de soluciones comerciales, el sistema propuesto permite modificar tanto el hardware como el software, lo que lo hace escalable y replicable por productores o instituciones sin necesidad de licencias o soporte especializado. Este enfoque permite atender las necesidades específicas del sector cañero en cuanto a monitoreo climático y toma de decisiones en

campo.

Materiales y Métodos

1. Enfoque Metodológico

El diseño y validación de la estación meteorológica se realizó mediante una metodología iterativa incremental, permitió avanzar de manera estructurada integrando retroalimentación en cada fase del desarrollo para mejorar progresivamente la solución propuesta.

El proceso metodológico se dividió en siete etapas principales: 1. diseño conceptual, 2. selección de sensores, 3. modelado estructural, 4. implementación electrónica, 5. desarrollo de la plataforma web, 6. integración del sistema y 7. pruebas de campo.

La Figura 1 resume gráficamente esta secuencia metodológica.

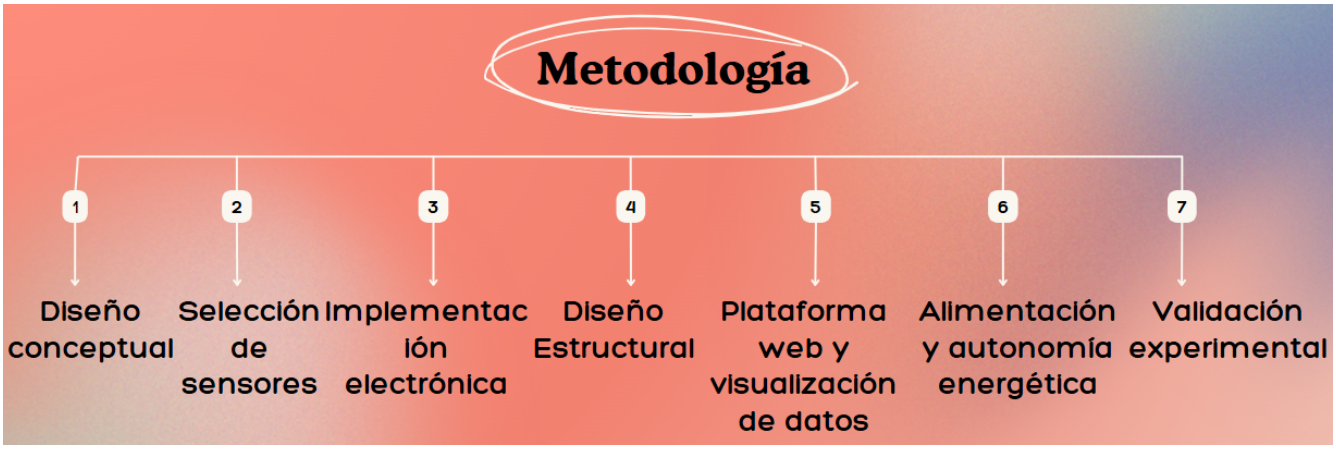


Figura 1: *Metodología implementada. Imagen propia.*

2. Selección de sensores

La selección de sensores se realizó con base en criterios de compatibilidad con plataformas abiertas, bajo costo, facilidad de integración y precisión suficiente para aplicaciones agrícolas en campo abierto. Se priorizaron dispositivos ampliamente utilizados en proyectos de monitoreo ambiental y con documentación técnica robusta que facilitara su implementación.

Para la medición de temperatura, se seleccionó el sensor DS18B20, un dispositivo digital de un solo hilo que ofrece una precisión de $\pm 0.5°C$ y un rango operativo de $-10°C$ a $85°C$. Su bajo consumo energético, facilidad de calibración y compatibilidad directa con microcontroladores Arduino lo convierten en una opción confiable para entornos rurales.

La humedad relativa se midió utilizando el sensor DHT11, que combina temperatura y humedad en un solo módulo, con una precisión de $\pm 2°C$ para temperatura y ± 5 % HR para humedad, adecuado para condiciones ambientales no extremas. Aunque existen sensores más precisos como el DHT22 o el SHT31, el DHT11 fue seleccionado por su menor costo, disponibilidad y desempeño aceptable en condiciones típicas del cultivo de caña.

https://doi.org/10.36677/rici.v3i2.26210 Julio 2025 ISSN: 2992-7447 págs. 78-94

Para la medición de precipitación, se diseñó un pluviómetro de balancín impreso en 3D, equipado con un sensor de efecto Hall, el cual genera una señal digital por cada oscilación del balancín, equivalente a 1 mm de lluvia. Esta solución permite una integración sencilla con el sistema de adquisición de datos y puede ser calibrada fácilmente para distintos volúmenes.

Todos los sensores fueron seleccionados considerando su desempeño documentado en aplicaciones agrícolas similares y su compatibilidad con el entorno físico, eléctrico y computacional del sistema. La elección también contempló la posibilidad de replicación por parte de usuarios no especializados, lo cual favorece su adopción en distintos contextos del sector cañero.

3. Implementación electrónica

El sistema de adquisición fue gestionado mediante un microcontrolador Arduino Mega 2560, que permite múltiples conexiones analógicas y digitales. La elección de esta plataforma se basó en su flexibilidad, bajo costo y compatibilidad con sensores ambientales comunes. Estudios recientes han validado su eficacia en sistemas de monitoreo agrícola, destacando su capacidad para programarse de forma modular, gestionar datos en tiempo real y operar con recursos limitados [12], [13]. Para la transmisión remota de información, se integró un módulo Ethernet Shield W5100, conectado al puerto SPI del Arduino Mega. Este módulo permitió establecer una comunicación estable mediante protocolo HTTP y el envío de datos estructurados en formato JSON hacia un servidor web con base de datos MySQL. La programación se realizó empleando las librerías Ethernet.h, SPI.h y ArduinoJson.h, facilitando la gestión de paquetes y la sincronización de datos. El diseño del circuito electrónico se realizó con la plataforma EasyEDA, permitiendo generar tanto el esquema eléctrico como el diseño de una placa PCB personalizada. La disposición de los componentes fue optimizada para reducir interferencias, facilitar el ensamblaje y garantizar una mayor resistencia mecánica. En la Figura 2 se presenta el diagrama de conexión de los sensores.

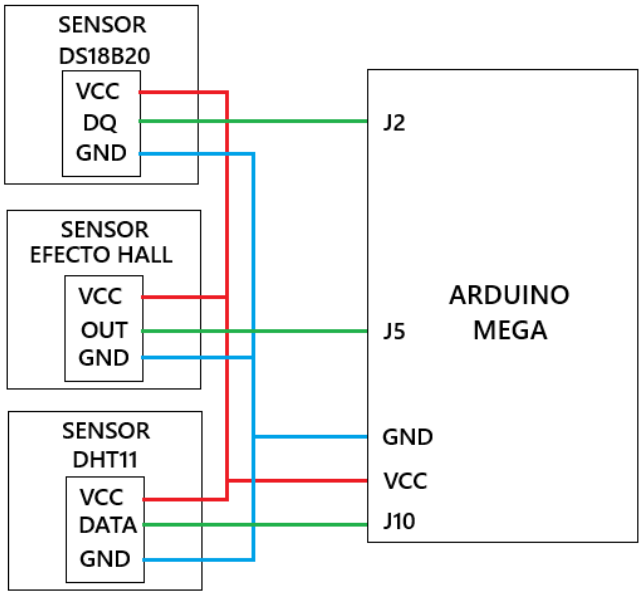


Figura 2: *Diagrama de bloques de conexión de sensores. Elaboración propia.*

La Figura 3 muestra el diseño físico de la placa PCB desarrollada para integrar los componentes del sistema de monitoreo. Esta placa incluye las conexiones del microcontrolador Arduino Mega 2560 con los sensores DS18B20, DHT11 y el sensor de efecto Hall para el pluviómetro, además del módulo Ethernet W5100. Se incorporaron líneas de alimentación reguladas, protección contra inversión de polaridad mediante diodos y capacitores para estabilización del voltaje. La función principal del diseño electrónico es centralizar y organizar el cableado de los sensores, garantizar la correcta distribución de energía y permitir una transmisión de datos estable hacia la plataforma web. Asimismo, el diseño considera una disposición que minimiza interferencias electromagnéticas y facilita el ensamblaje y mantenimiento del sistema.

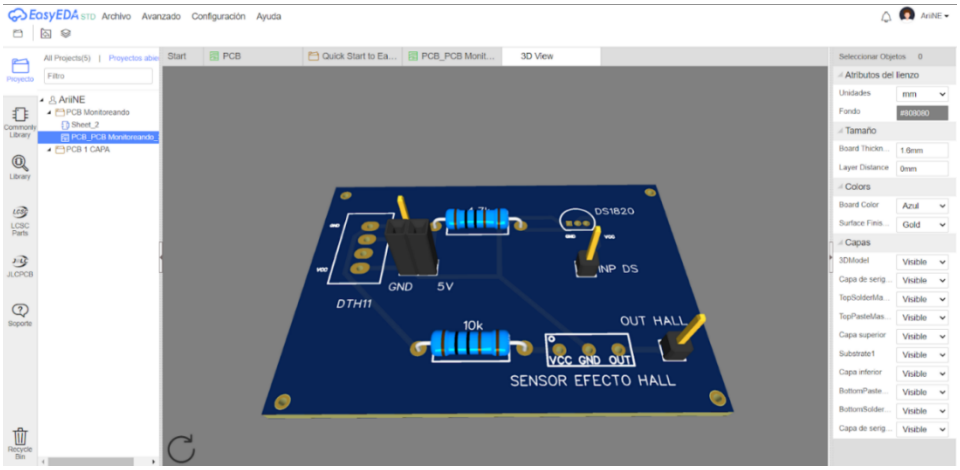


Figura 3: *Diseño de placa PCB. Imagen propia.*

La Tabla 1 resume los principales componentes empleados en el diseño de la estación de monitoreo.

4. Diseño Estructural

La estructura de soporte de la estación fue diseñada utilizando el software de modelado paramétrico SolidWorks, el cual permitió modelar en 2D y 3D cada componente con precisión, ya que ofrece soluciones accesibles, escalables e innovadoras, integrando IA y almacenamiento en la nube para un diseño más eficiente [18]. y fabricada combinando acero galvanizado (para el mástil principal) y piezas impresas en 3D con filamento PLA (para soportes de sensores y componentes del pluviómetro). El diseño fue validado mediante análisis estático para simular esfuerzos provocados por vientos de hasta 25 km/h, con deformaciones dentro del límite elástico del material. La Figura 4 muestra el diseño de la estructura.

5. Plataforma web y visualización de datos

Se desarrolló una interfaz dinámica mediante PHP, HTML, CSS y JavaScript, utilizando la librería Chart.js para visualizar en tiempo real las variables registradas. El sistema web permite acceder a datos

https://doi.org/10.36677/rici.v3i2.26210 Julio 2025 ISSN: 2992-7447 págs. 78-94

Tabla 1: Componentes del sistema de monitoreo.

Categoría	**Elemento**	**Características principales**
Sensores	DS18B20	Temperatura digital, $\pm 0{,}5\,^{\circ}\mathrm{C}$, 10°C a 85°C
	DHT11	Temp. y humedad, $\pm 2\,^{\circ}\mathrm{C}$ / $\pm 5\,\%$ HR, 050°C, 2080 % HR
	Sensor Hall + pluviómetro	Balancín impreso 3D, señal digital por basculamiento
Controlador	Arduino Mega 2560	ATmega2560, múltiples pines analógicos/digitales
Comunicación	Ethernet Shield (W5100)	Conexión LAN, protocolo HTTP/JSON
Alimentación	Panel solar monocristalino 6W	12VDC, 500mA, batería de respaldo
Diseño electrónico	EasyEDA	Diseño y simulación de circuito impreso PCB
Diseño estructural	Acero galvanizado + piezas en PLA	Modelado CAD, piezas menores impresas en 3D
Visualización web	PHP, HTML, CSS, Chart.js	Interfaz dinámica con gráficas en tiempo real

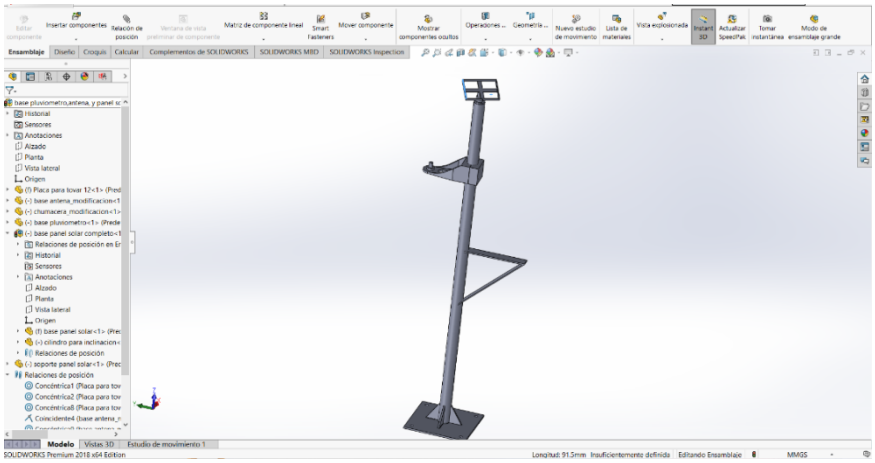


Figura 4: *Diseño de la estructura del sistema. Imagen propia.*

históricos, generar gráficas por variable y consultar alertas personalizadas desde dispositivos móviles o equipos de escritorio. La base de datos se estructuró en MySQL y fue optimizada para registrar datos cada 5 minutos.

6. Alimentación y autonomía energética

El sistema fue alimentado mediante un panel solar monocristalino de 6 W (12 V, 500 mA), conectado a una batería recargable. La autonomía energética fue verificada con mediciones continuas durante 24 horas mediante un multímetro de pinza y un medidor de consumo tipo Kill-A-Watt, determinando un consumo diario promedio de 0.07 kWh.

7. Validación experimental

El prototipo fue instalado en un campo de cultivo de caña en Tamazula de Gordiano, Jalisco, donde se realizaron pruebas durante 30 días continuos. Las variables registradas se compararon con instrumentos de referencia y con una estación meteorológica oficial de CONAGUA, ubicada en Ciudad Guzmán, Jalisco. Se evaluaron la precisión de sensores, el desempeño energético y la integridad de la estructura.

Resultados

La evaluación del prototipo de estación de monitoreo ambiental se realizó con base en cuatro ejes principales: (1) Validación estructural, (2) desempeño energético del sistema autónomo con panel solar, (3) Funcionamiento del sistema en campo (temperatura, humedad y pluviómetro), y (4) desempeño funcional en condiciones reales de campo. A continuación, se detallan los hallazgos obtenidos en cada fase, respaldados por simulaciones computacionales, pruebas de laboratorio y mediciones en campo.

Validación estructural

En la validación estructural, se consideró un acero galvanizado con propiedades mecánicas equivalentes al acero AISI 1018, cuyo límite elástico es de aproximadamente 370 MPa. El análisis estático realizado en SolidWorks mostró un esfuerzo máximo de 13.8 MPa, lo cual representa apenas el 3.73 % del límite elástico del material. Este margen de seguridad confirma que la estructura puede soportar adecuadamente las condiciones de carga previstas, sin riesgo de deformación permanente ni falla estructural. Se consideraron combinaciones de carga propias del mástil, el panel solar y los componentes electrónicos montados en la parte superior. La Figura 5 presenta las propiedades del material utilizado.

En la Figura 6 se aprecia el análisis estático de la pieza usando acero aleado, similar al material real. Se fijaron cuatro puntos en los orificios de la placa y se aplicó una fuerza lateral de viento de 0,4 N, calculada a partir de una velocidad de 10 km/h y una superficie de 0,063 m^2 con un coeficiente aerodinámico de 1 y una densidad del aire de 1.29 kg/m^3. Las flechas azules indican la dirección de la fuerza y los verdes, los puntos de sujeción.

La Figura 7 muestra, en vista lateral, la deformación provocada por la fuerza aplicada, junto con las tensiones máxima y mínima. Estos se mantienen por debajo del límite elástico del material, por lo que, aunque haya deformación, no existe riesgo de fractura en la estructura.

Consumo Energético y Autonomía del sistema

La autonomía energética del sistema fue evaluada considerando el consumo eléctrico de cada com-

https://doi.org/10.36677/rici.v3i2.26210 Julio 2025 ISSN: 2992-7447 págs. 78-94

Propiedades de material

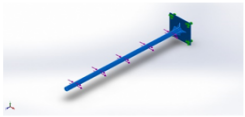
Referencia de modelo	Propiedades		Componentes
	Nombre:	Acero aleado	Sólido 1(Redondeo1)(Placa para tovar 12)
	Tipo de modelo:	Isotrópico elástico lineal	
	Criterio de error predeterminado:	Tensión de von Mises máx.	
	Límite elástico:	6.20422e+08 N/m^2	
	Límite de tracción:	7.23826e+08 N/m^2	
	Módulo elástico:	2.1e+11 N/m^2	
	Coeficiente de Poisson:	0.28	
	Densidad:	7700 kg/m^3	
	Módulo cortante:	7.9e+10 N/m^2	
	Coeficiente de dilatación térmica:	1.3e-05 /Kelvin	
Datos de curva:N/A			

Figura 5: *Propiedades del material utilizado para la estructura. Imagen propia.*

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	9.862e-01 N/m^2 Nodo: 2279	1.615e+05 N/m^2 Nodo: 8104

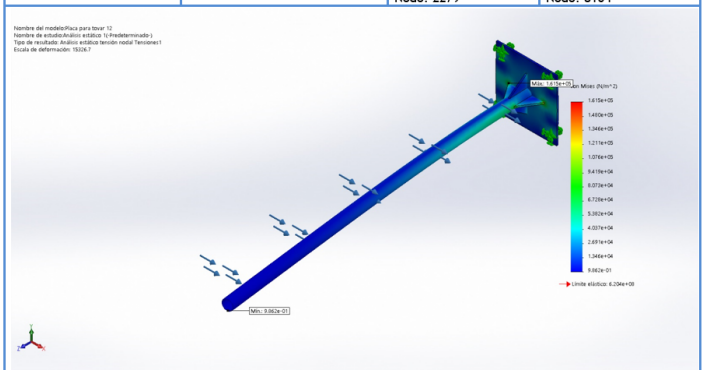


Figura 6: *Resultado del análisis estático de la estructura. Imagen propia.*

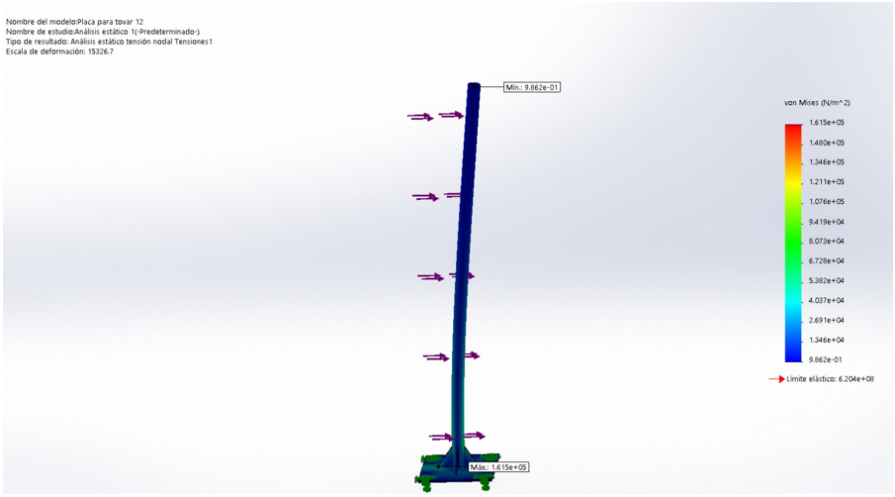


Figura 7: *Vista lateral de deformación debida a la fuerza aplicada. Imagen propia.*

ponente. El microcontrolador Arduino Mega 2560 presenta un consumo promedio de 90 mA, el módulo Ethernet W5100 aproximadamente 150 mA durante transmisión, y los sensores DS18B20, DHT11 y el sensor de efecto Hall aportan un consumo conjunto inferior a 10 mA. En conjunto, el sistema demanda una corriente promedio de 250 mA a 5 V, lo que equivale a un consumo diario de aproximadamente 0.07 kWh, coincidente con las mediciones empíricas. La batería recargable conectada al panel solar tiene una capacidad de 7 Ah a 12 V, proporcionando una energía útil de 84 Wh, suficiente para mantener el sistema operando de manera continua por más de 3 días sin recarga solar. Este análisis confirma que la configuración energética es adecuada para entornos rurales con irradiación variable. La Figura 8 muestra las mediciones registradas con el KILL A WATT y la Figura 9 las mediciones con el amperímetro.



Figura 8: *Consumo de energía en un periodo de 24 horas. Imagen propia.*



Figura 9: *Consumo de corriente del dispositivo. Imagen propia.*

Funcionamiento del sistema en campo

El prototipo se instaló en una parcela de caña en Tamazula de Gordiano, Jalisco, y operó durante 30 días consecutivos. Se logró la adquisición y transmisión de datos cada 5 minutos sin interrupciones. Las

https://doi.org/10.36677/rici.v3i2.26210 Julio 2025 ISSN: 2992-7447 págs. 78-94

variables medidas se compararon con una estación meteorológica de referencia (CONAGUA, Ciudad Guzmán), cuyos datos se recolectaron en paralelo durante el periodo de prueba. En la Figura 10 se añadieron las mediciones correspondientes de corriente y consumo energético obtenidas en la estación desarrollada, junto con los valores equivalentes de la estación comercial para el mismo intervalo de tiempo. Esta comparación permite visualizar las diferencias en el comportamiento de ambas estaciones y validar la precisión del sistema propuesto. Los datos muestran una concordancia aceptable, confirmando la viabilidad del prototipo como alternativa de bajo costo con desempeño técnico confiable.

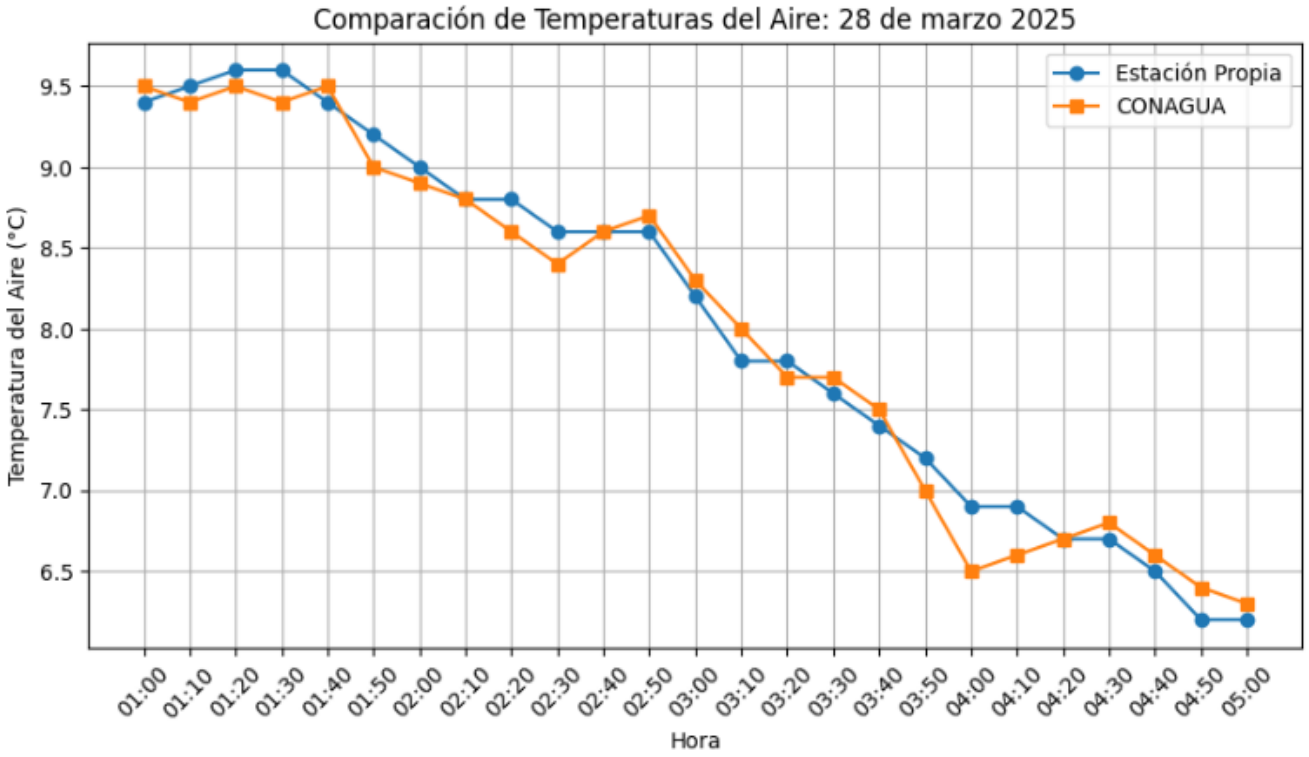


Figura 10: *Comparación de medición de temperaturas entre estación propia y CONAGUA. Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA [19].*

Además, se cuantificó el error promedio en las mediciones del prototipo frente a la estación oficial de CONAGUA (Ciudad Guzmán), como se presenta en la Tabla 3. Los resultados se mantienen dentro de rangos aceptables para aplicaciones agrícolas.

Tabla 3: Comparación de mediciones con estación de referencia.

Variable	**Error promedio**	**Rango aceptable**
Temperatura	±0.3 °C	±1.0 °C
Humedad relativa	±4 % HR	±6.0 % HR
Precipitación	±1.0 mm	±1.2 mm

Visualización web y plataforma

La interfaz web mostró correctamente los datos en tiempo real desde cualquier dispositivo conectado a internet local. Se accedió mediante dirección IP fija, con actualización automática de gráficas. El sistema permite seleccionar rangos de fechas, exportar datos y generar alertas por valores límite.

La Figura 11 muestra la estación instalada y su configuración final. En ella se instalaron: la antena (color azul), la base para el panel solar (color blanco) y el pluviómetro (color café).



Figura 11: *Instalación de la estación de monitoreo. Imagen propia.*

En la Figura 12 se presenta la gráfica generada en la página web que fue desarrollada, en la cual se visualiza la información de precipitación, temperatura y humedad relativa recopilada durante un día completo.

Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que la estación de monitoreo desarrollada representa una alternativa viable, precisa y de bajo costo frente a sistemas comerciales existentes. La validación estructural y energética, así como la comparación de sensores con equipos de referencia, confirman que el sistema cumple con los rangos técnicos aceptables para aplicaciones agrícolas.

Comparación con sistemas comerciales

Al comparar el prototipo con estaciones meteorológicas comerciales como la MK-III RTN-LR, Agro-Met y MSO ICT International, se identifican diferencias significativas en costo, escalabilidad y flexibilidad. Mientras que los equipos comerciales superan los $20,000 MXN y dependen de plataformas propietarias, el sistema desarrollado tiene un costo aproximado de $4,500 MXN y permite modificaciones

https://doi.org/10.36677/rici.v3i2.26210 Julio 2025 ISSN: 2992-7447 págs. 78-94

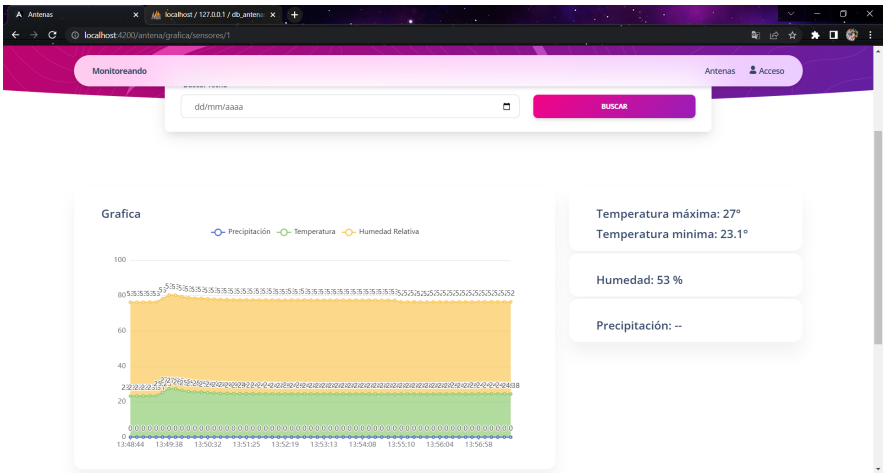


Figura 12: *Gráfica de las mediciones mostradas en la página Web. Imagen propia.*

tanto de hardware como de software. Además, utiliza sensores de gama media con desempeño aceptable, y permite la visualización web independiente sin requerir suscripciones o soporte externo. Aunque los sistemas comerciales ofrecen mayor precisión y variables adicionales como presión atmosférica o velocidad del viento, el prototipo desarrollado cubre las variables más relevantes para el sector cañero con un enfoque de bajo costo y alta adaptabilidad.

Ventajas operativas del prototipo

El sistema demostró ser robusto en campo, operando durante 30 días sin interrupciones. La autonomía energética, asegurada por un panel solar de 6 W, elimina la dependencia de fuentes externas. La visualización remota mediante plataforma web accesible desde cualquier navegador permite decisiones rápidas y basadas en evidencia. Además, la estructura modular facilita la sustitución de componentes y la integración de nuevos sensores, lo cual es difícilmente posible en sistemas comerciales cerrados.

Alcance técnico y replicabilidad

El uso de microcontroladores abiertos y sensores accesibles permite replicar el sistema en diferentes contextos agrícolas. La compatibilidad con tecnologías de análisis como inteligencia artificial o big data ofrece oportunidades para la expansión funcional del sistema, particularmente en predicción de variables climáticas y análisis multivariado.

Limitaciones observadas

- La precisión de los sensores, aunque aceptable, no alcanza niveles industriales.
- La conectividad Ethernet puede limitar su uso en zonas sin infraestructura LAN (aunque podría sustituirse por módulos LoRa/ESP32 en futuras versiones).
- La estructura, si bien resistente, podría optimizarse para velocidades de viento superiores a 25 km/h si se instalan en zonas expuestas.

Conclusiones

El desarrollo de la estación de monitoreo ambiental demostró ser una solución eficiente, económica y tecnológicamente viable para la recolección automatizada de datos climáticos en el sector cañero. Este proyecto sustituye procesos manuales propensos a errores, costosos y poco sostenibles, mediante una alternativa accesible y de bajo consumo energético. Los principales hallazgos y aportaciones se resumen en los siguientes puntos:

- Automatización efectiva del proceso de monitoreo climático, logrando una reducción del tiempo invertido en más del 80 % al eliminar la necesidad de recorridos físicos, gracias al acceso remoto a los datos desde una plataforma web amigable.
- Minimización del error humano, ya que la medición y el registro de variables como temperatura, humedad y presencia de fenómenos magnéticos fueron completamente automatizados, lo que garantiza una mayor confiabilidad de los datos obtenidos.
- Optimización de recursos humanos y logísticos, permitiendo que el personal técnico se enfoque en tareas de análisis y toma de decisiones, en lugar de actividades repetitivas de campo.
- Importante ahorro económico, al desarrollar un sistema propio con un costo aproximado 75 % inferior al de las estaciones meteorológicas comerciales con capacidades similares, lo cual democratiza el acceso a esta tecnología en pequeñas y medianas unidades de producción agrícola.
- Precisión validada experimentalmente, con márgenes de error dentro de los parámetros aceptables para aplicaciones agrícolas (± 0.3°C para temperatura, ± 4 % para humedad relativa y ± 2.5 % para precipitación), lo cual respalda su confiabilidad para decisiones agronómicas.
- Autonomía energética garantizada, mediante un panel solar de 6 W que alimenta el sistema completo con un consumo promedio de tan solo 0.07 kWh diarios, lo que lo hace apto para regiones sin acceso a la red eléctrica.
- Diseño modular y escalable, que permite su adaptación a diversas condiciones agrícolas, su expansión con sensores adicionales (p. ej., para CO, velocidad del viento, pH del suelo) y su integración con otros sistemas de monitoreo.
- Plataforma abierta y flexible, que no solo facilita su replicación y mejora continua, sino que permite la implementación futura de algoritmos de análisis de datos y modelos predictivos basados en inteligencia artificial, incrementando su valor estratégico en la agricultura de precisión.

La estación desarrollada representa un paso significativo hacia la digitalización del sector agrícola, especialmente en zonas donde los recursos económicos y tecnológicos son limitados. Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones orientadas al análisis predictivo, la toma de decisiones automatizada y la gestión integral del clima agrícola en tiempo real.

https://doi.org/10.36677/rici.v3i2.26210 Julio 2025 ISSN: 2992-7447 págs. 78-94

Agradecimientos

Agradezco al Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Tamazula por brindar el respaldo institucional necesario para el desarrollo de este proyecto. De manera especial, expreso mi reconocimiento a la directora, Mtra. Brenda Yerania Ortega Flores, por su apoyo y disposición para fomentar la investigación y la mejora continua en nuestra institución.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

Jorge Alberto Cárdenas Magaña: Investigación, Conceptualización, Metodología, Software, Redacción - Revisión y Edición.

Referencias

[1] G. Medina Vega. *Desarrollo de un sistema de monitoreo meteorológico de bajo costo basado en tecnología IoT*. Tesis de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, San Juan del Río, Qro., México, 2022. [En línea]. Disponible en: https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/9793/1/IGLIN-272308.pdf

[2] M. S. Amin, S. T. H. Rizvi, U. Iftikhar, S. Malik y Z. B. Faheem. IoT Based Monitoring and Control in Smart Farming. En *2021 MAJICC*, Karachi, Pakistán, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/MAJICC53071.2021.9526247

[3] P. Rajak, A. Ganguly, S. Adhikary y S. Bhattacharya. Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges. *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 14, art. 100776, dic. 2023. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100776

[4] K. J. Naidu et al. Sistema de monitoreo de agricultura de precisión. *Biotech Research Asia*, vol. 21, no. 4, 2024. [En línea]. Disponible en: http://dx.doi.org/10.13005/bbra/3324

[5] J. P. Tovar Soto et al. Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpsakos*, no. 22, pp. 86–105, jul.–dic., 2019. doi: https://doi.org/10.21501/21454086.3253

[6] Y. Song, J. Bi y X. Wang. Design and implementation of intelligent monitoring system for agricultural environment in IoT. *Internet of Things*, vol. 25, abril 2024, art. 101029. doi: https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101029

[7] N. Jaliyagoda et al. Internet of things (IoT) for smart agriculture: Assembling and assessment of a low-cost IoT system for polytunnels. *PLoS One*, vol. 18, no. 5, e0278440, mayo 2023. Erratum: vol. 18, no. 12, e0296110, dic. 2023. doi: 10.1371/journal.pone.0278440

[8] S. R. S. Goud, S. V. R. Goud y B. S. Kumar. Role of IoT Technology in Agriculture: A Systematic Literature Review. *Electronics*, vol. 9, no. 2, art. 319, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.mdpi.com/2079-9292/9/2/319. doi: https://doi.org/10.3390/electronics9020319

[9] G.-E. Chanchí-Golondrino, M.-A. Ospina-Alarcón y M. Saba. Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana. *Revista científica*, vol. 44, no. 2, pp. 257–271, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.redalyc.org/journal/5043/504371984008/html/. doi: https://doi.org/10.14483/23448350.18470

[10] K. G. Suman y D. Kumar. Role of IoT in Smart Precision Agriculture. En *Handbook of Metrology and Applications*, 1ł ed., Springer, 2023, pp. 1217–1238. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2074-7_66

[11] E. J. Moreno Perdomo. Sistema Inteligente de automatización, monitoreo y control de invernaderos mediante uso de IoT y el microcontrolador ESP-32 con aplicación de aprendizaje automático. En *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2023*, 2023. [En línea]. Disponible en: https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/2818. doi: https://doi.org/10.26507/paper.2818

[12] J. L. Díaz Martínez et al. Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual y su aplicación mediante un prototipo. *Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información (RISTI)*, vol. 53, pp. 106–121, mar. 2024. [En línea]. Disponible en: https://scielo.pt/pdf/rist/n53/1646-9895-rist-53-106.pdf. doi: https://doi.org/10.17013/risti.53.106-121

[13] C. J. Mejía Aguirre. Desarrollo de dispositivo IoT para monitoreo agrícola de bajo costo. Tesis de Maestría en Sistemas Embebidos, INFOTEC, Aguascalientes, 2020. [En línea]. Disponible en: https://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1027/408/1/INFOTEC_MSE_CJMA_14092020.pdf

[14] M. Dhanaraju, P. Chenniappan, K. Ramalingam, S. Pazhanivelan y S. Kaliaperumal. Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture. *Agriculture*, vol. 12, no. 10, p. 1745, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.mdpi.com/2077-0472/12/10/1745. doi: https://doi.org/10.3390/agriculture12101745

[15] H. García Aldape, E. Chávez López, C. A. Reyes del Ángel y O. D. Oyarvide Martínez. Monitoreo de cultivos con Internet de las Cosas por medio de una red de sensores. *Tectzapic*, vol. 8, no. 2, pp. 9–20, dic. 2022. [En línea]. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9591132.pdf. doi: https://doi.org/10.51896/tectzapic/NFOG6958

[16] A. Lad, S. Nandre, K. Raichurkar, S. Zarkhande y P. Charles. A literature survey on smart agriculture monitoring and control system using IoT. *International Journal of Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.ijraset.com/research-paper/smart-agriculture-monitoring-and-control-system-using-iot. doi: https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40512

https://doi.org/10.36677/rici.v3i2.26210 Julio 2025 ISSN: 2992-7447 págs. 78-94

[17] A. Secure. Soluciones para una estación meteorológica agrícola eficiente. *AlaI Secure*, 2023. [En línea]. Disponible en: https://alaisecure.pe/blog/soluciones-para-una-estacion-meteorologica-agricola-eficiente/. [Accedido: 12-mar-2025]

[18] SOLIDWORKS. Una solución probada para el diseño y desarrollo de productos en 3D. *SolidWorks*. [En línea]. Disponible en: https://www.solidworks.com/es/lp/proven-solution-3d-design-and-product-development. [Consulta: 13-mar-2025]

[19] Servicio Meteorológico Nacional. Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's). Comisión Nacional del Agua, 2025. [En línea]. Disponible en: https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s