

Desarrollo de un riego autónomo con energía renovable para aumentar la eficiencia en el cultivo de berenjena

Maria Fernanda Manrique Moreno

Asesor

Ing. John Barco-Jiménez, Ph. D.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Informática ECBTI

Ingeniería Electrónica

2025

Resumen

Esta investigación se centra en el diseño, desarrollo e implementación de un prototipo de sistema de riego autónomo alimentado por energía solar para el cultivo de berenjena (*Solanum melongena*). El principal objetivo es optimizar el consumo de agua mediante un control preciso y automatizado que riegue la planta solo cuando sea necesario, evitando el desperdicio.

El sistema se basa en un microcontrolador Arduino Mega que procesa datos de sensores de humedad del suelo, temperatura y luminosidad (LDR). Estos datos, obtenidos de estudios específicos sobre los rangos óptimos para la planta, permiten al sistema determinar con precisión cuándo y en qué cantidad se debe regar.

Además de la optimización del agua, el prototipo incorpora una estrategia de ahorro energético. Utiliza un sensor de proximidad ultrasónico que activa la pantalla LCD y los indicadores LED únicamente cuando un usuario se acerca, reduciendo así el consumo de energía y asegurando la autonomía total del sistema, la cual es garantizada por paneles solares y baterías recargables.

Para evaluar la efectividad del sistema, se realizará un análisis experimental que comparará el crecimiento, germinación y productividad de un cultivo con riego manual frente a uno con el sistema automatizado. Los datos recopilados serán analizados estadísticamente para demostrar la eficacia en la reducción del consumo de agua y el impacto positivo en el desarrollo del cultivo.

Esta propuesta se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), contribuyendo a la solución de problemáticas como la escasez hídrica y el desperdicio de agua en Colombia, fomentando así la seguridad alimentaria (ODS Hambre Cero) y la adopción de

tecnologías sostenibles en la agricultura. Se espera que el prototipo pueda ser adaptable a otros tipos de cultivos y ser implementado tanto a nivel doméstico como industrial.

Palabras clave: Arduino; Automatización, Autónomo, Riego, Sensores, Sostenibilidad.

Abstract

This research focuses on the design, development, and implementation of a prototype of a solar-powered autonomous irrigation system for the cultivation of eggplant (*Solanum melongena*). The main objective is to optimize water consumption through precise and automated control that waters the plant only when necessary, avoiding waste.

The system is based on an Arduino Mega microcontroller that processes data from soil moisture, temperature, and luminosity (LDR) sensors. This data, obtained from specific studies on the optimal ranges for the plant, allows the system to determine precisely when and in what quantity to irrigate.

In addition to water optimization, the prototype incorporates an energy-saving strategy. It uses an ultrasonic proximity sensor that activates the LCD screen and LED indicators only when a user approaches, thus reducing energy consumption and ensuring the total autonomy of the system, which is guaranteed by solar panels and rechargeable batteries.

To evaluate the effectiveness of the system, an experimental analysis will be conducted that will compare the growth, germination, and productivity of a crop with manual irrigation against one with the automated system. The data collected will be statistically analyzed to demonstrate the effectiveness in reducing water consumption and the positive impact on crop development.

This proposal is aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs), contributing to the solution of problems such as water scarcity and water waste in Colombia, thus promoting food security (SDG Zero Hunger) and the adoption of sustainable technologies in agriculture. It is expected that the prototype can be adaptable to other types of crops and be implemented both domestically and industrially.

Keywords: Arduino, Automation, Autonomous, Irrigation, Sensors, Sustainability.

Contenido

Objetivos	13
Objetivo General	13
Objetivos Específicos	13
Revisión de la literatura.....	14
Introducción.....	14
Planteamiento del Problema.....	15
Justificación.....	17
Antecedentes	18
Antecedentes de la problemática	18
Antecedentes de aplicación	19
Contexto Regional.....	20
Contexto Nacional.....	20
Contexto Mundial.....	20
Marco de investigación.....	21
Marco teórico	21
Marco Histórico.....	23
Marco Conceptual	25
Materiales y métodos	28
Diseño metodológico.....	28
Tipo de investigación	28
Población y muestra	29
Fases del proyecto	29

Fase 1: diseño y planificación	29
Fase 2: desarrollo e integración del prototipo	30
Fase 3: implementación en campo	31
Fase 4: monitoreo y recolección de datos	31
Fase 5: Análisis de Resultados y Conclusiones.....	32
Desarrollo del sistema	33
Diseño y planificación.....	33
Selección de Componentes del Sistema de Control y Monitoreo	33
Análisis del consumo y dimensiones del sistema de potencia	35
Diseño del esquema electrónico Integrado.....	39
Desarrollo e integración del prototipo.....	40
Ensamble del hardware	40
Programación de microcontrolador	42
Prueba y calibración	45
Implementación en campo.....	45
Monitoreo y recolección de datos	46
Análisis de resultados	48
Metodología de Cuantificación del Consumo de Agua	48
Análisis Comparativo	49
Discusión de resultados.....	50
Conclusiones	53
Recomendaciones	54
Trabajo futuro.....	55

Referencias56

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Componentes de Hardware Del Sistema De Control Y Monitoreo</i>	34
Tabla 2 <i>Análisis de Potencia Y Consumo Energético Diario</i>	36
Tabla 3 <i>Componentes del Subsistema De Potencia Autónomo a 5V</i>	38
Tabla 4 <i>Plantilla de Registro de Datos Agronómicos y Consumo de Agua</i>	48
Tabla 5 <i>Resumen de Volúmenes Totales Hasta La Fecha</i>	49
Tabla 6 <i>Resumen indicadores Agronómicos Finales (Valores Promedio Por Planta)</i>	50

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 <i>Energía Consumida Por Cada Componente</i>	35
Ecuación 2 <i>Energía Requerida</i>	37
Ecuación 3 <i>Capacidad de Batería</i>	37
Ecuación 4 <i>Capacidad Banco de Baterias</i>	37
Ecuación 5 <i>Días que Puede Operar sin Recibir Energía Solar</i>	37
Ecuación 6 <i>Energía Generada</i>	38

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama de Bloques Del Sistema De Riego Autónomo</i>	39
Figura 2 <i>Componentes Principales Del Prototipo</i>	40
Figura 3 <i>Montaje Preliminar de Componentes En Protoboard</i>	41
Figura 4 <i>Ensamblaje Final del Prototipo en el Gabinete de Protección</i>	42
Figura 5 <i>Diagrama de flujo de la Lógica de Programación del Microcontrolador</i>	43
Figura 6 <i>Puesta en Marcha del Prototipo en la Parcela Experimental</i>	46
Figura 7 <i>Resultado Final Platas Con el Sistema</i>	52
Figura 8 <i>Resultado Final Plantas sin el Sistema</i>	52

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Diagrama Esquemático Detallado del Prototipo</i>	62
Apéndice B <i>Simulación del Circuito en Proteus</i>	63
Apéndice C <i>Código fuente del Microcontrolador</i>	64
Apéndice D <i>Material audio visual Complementario</i>	79
Apéndice E <i>Tabla de registros</i>	80

Objetivos

Objetivo General

Estudiar la eficiencia hídrica de un sistema de riego autónomo alimentado por energía solar, basado en sensores de humedad del suelo, temperatura, luminosidad y proximidad ultrasónica, para su aplicación en cultivos de berenjena en un entorno agrícola sustentable.

Objetivos Específicos

Diseñar el esquema y estructura del sistema de riego autónomo, integrando sensores de humedad del suelo, temperatura y luminosidad para su aplicación en cultivos de berenjena.

Implementar el sistema de riego autónomo, calibrando los sensores y garantizando su operación con energía solar en un entorno agrícola.

Evaluar el desempeño del sistema mediante la comparación del consumo de agua y la eficiencia del riego respecto a técnicas tradicionales en un cultivo piloto de berenjena.

Analizar los datos recolectados para determinar las condiciones óptimas de riego y confirmar la factibilidad del sistema como una solución escalable y sustentable.

Revisión de la literatura

Introducción

La seguridad alimentaria y la sostenibilidad de la agricultura se encuentran ante un reto mundial nunca visto, agravado por las consecuencias del cambio climático y la demanda creciente de recursos naturales. En Colombia, este problema se refleja en una significativa falta de agua, que pone en peligro no solo la producción alimentaria, sino también la estabilidad energética de la nación, debido a su elevada dependencia de las fuentes de energía hidroeléctrica. El sector agrícola, que es el mayor consumidor de agua, se halla en el núcleo de esta crisis, donde el uso de técnicas de riego convencionales e ineficaces intensifica el derroche del recurso. De acuerdo con datos del Ministerio de Ambiente de Colombia (2022), la necesidad de agua para la agricultura sigue en un camino ascendente, lo que resalta la necesidad de implementar prácticas más sustentables.

En este contexto, la ingeniería electrónica se presenta como una disciplina esencial para la creación de soluciones novedosas que fomenten la agricultura de precisión. Este estudio de grado se enfoca en el diseño, puesta en marcha y valoración de un sistema de riego autónomo y autosustentable, dirigido a maximizar la utilización del agua en la producción de berenjena (*Solanum melongena*). El prototipo implementa un microcontrolador Arduino Mega para administrar una red de sensores de humedad en el suelo, de acuerdo con las demandas particulares de la planta. Asegurar su sostenibilidad y la proximidad. Además, la incorporación de un módulo de reloj y una memoria SD posibilita un registro minucioso de información en tiempo real, lo que simplifica la supervisión y el estudio posterior del cultivo. El propósito principal es confirmar la eficacia en el uso del agua y la factibilidad de esta tecnología como una alternativa escalable para los pequeños y medianos agricultores de la nación.

Planteamiento del Problema

La reciente situación de escasez hídrica en Colombia, intensificada por la deforestación, la contaminación y la mala gestión del recurso, representa una amenaza significativa para la seguridad alimentaria y la producción agrícola (Organización Mundial de la Meteorología, 2021). La reducción de los niveles de los embalses y la alta frecuencia de incendios forestales evidencian una crisis que afecta tanto a los ecosistemas como a las actividades productivas (Archila, 2024). Además, esta situación genera una vulnerabilidad energética, ya que aproximadamente el 70% de la electricidad en Colombia depende de las hidroeléctricas (Archila, 2024).

El sector agrícola, principal consumidor de agua, utiliza técnicas de riego ineficientes que causan un desperdicio considerable. Según el Ministerio de Ambiente de Colombia (2022), la demanda de agua en este sector continúa en aumento, lo que impacta negativamente su disponibilidad para otros usos esenciales, como el consumo humano. Esta problemática se agrava por la inseguridad alimentaria, ya que el 28% de los hogares colombianos reporta dificultades para acceder a los alimentos (FAO, 2022). Esto subraya la urgencia de desarrollar soluciones prácticas que permitan un uso eficiente del agua en la producción agrícola, contribuyendo así a la sostenibilidad del sector y alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Para abordar estos desafíos, se propone el diseño y la implementación de un prototipo de sistema de riego autónomo alimentado por energía solar para el cultivo de berenjena (*Solanum melongena*). El sistema utiliza un microcontrolador Arduino Mega en conjunto con sensores de humedad del suelo, temperatura, luminosidad, y nivel de tanque. Para optimizar el consumo de energía, se ha incluido un sensor de proximidad ultrasónico que activa la pantalla LCD y los LEDs de la interfaz solo cuando es necesario, lo que prolonga la autonomía del sistema y

garantiza su operación continua.

La elección de la berenjena como cultivo de estudio se justifica por su relevancia agrícola y su sensibilidad a las condiciones hídricas. Estudios previos han demostrado que esta hortaliza requiere un balance de agua preciso para garantizar su productividad, ya que tanto el exceso como la falta de riego afectan su desarrollo (Martínez Reina et al., 2021). Además, su alto potencial nutricional y económico contribuye a la seguridad alimentaria y el desarrollo rural (Guamán-Rivera & Flores-Mancheno, 2023).

Si bien otros estudios han demostrado la viabilidad de sistemas de riego automatizados, como el desarrollado por Ramírez y Vergara (2020) para el cultivo de berenjenas, muchos de estos proyectos carecen de fuentes de energía renovable o tienen limitaciones de adaptabilidad a distintos cultivos y entornos agrícolas. Nuestro proyecto se diferencia al proponer una solución autosustentable y adaptable, que combina tecnología de automatización con energía renovable a través de paneles solares y baterías.

En esencia, este proyecto es conveniente porque busca incrementar la eficiencia del uso del agua en la agricultura a través de un sistema de bajo costo, autosuficiente y replicable. La implementación de esta tecnología permitirá reducir el desperdicio de agua, aumentar la productividad del cultivo de berenjena y fomentar la adopción de prácticas agrícolas sostenibles. Se espera que el prototipo pueda ser replicado en otros cultivos y contextos agrícolas, contribuyendo al desarrollo rural y a la mitigación de los efectos del cambio climático.

Justificación

Este proyecto tecnológico busca mitigar los efectos de la escasez hídrica, la inseguridad alimentaria y la dependencia energética en Colombia. Proponemos una solución útil, especialmente para los pequeños y medianos productores agrícolas que son vulnerables a las condiciones climáticas.

El cambio climático en Colombia ha provocado un impacto negativo en la producción agrícola en diversas regiones, lo que agudiza la inseguridad alimentaria (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023). La ineficiencia de los sistemas de riego tradicionales, que desperdician agua y no responden a las necesidades reales de los cultivos, agrava esta problemática. Ante este escenario, un sistema de riego autónomo basado en sensores emerge como una solución innovadora y necesaria para optimizar el uso del agua y mejorar la productividad agrícola.

El proyecto es relevante porque promueve prácticas agrícolas sostenibles al reducir el desperdicio de agua y fomenta el uso de energías renovables. Nuestro sistema automatizado ajusta el suministro de agua según parámetros como la humedad del suelo y la temperatura, lo que garantiza un uso más racional del recurso hídrico, disminuye el impacto ambiental y contribuye a la sostenibilidad de la producción agrícola. Además, la integración de un sensor de proximidad ultrasónico para activar la pantalla LCD y los LEDs solo cuando es necesario, representa un avance significativo en la optimización del consumo de energía, maximizando la autonomía y la eficiencia general del sistema.

Los principales beneficiarios de esta solución serán los agricultores, quienes podrán reducir sus costos operativos gracias al uso de energía solar. De forma indirecta, el proyecto

generará un impacto social al incentivar a la población rural a adoptar tecnologías sustentables y accesibles.

Finalmente, esta iniciativa representa un avance significativo en la búsqueda de soluciones tecnológicas que permitan enfrentar los desafíos del cambio climático, la gestión del agua y la sostenibilidad agrícola en el país.

Antecedentes

La optimización del recurso hídrico en la agricultura se ha convertido en una prioridad global, impulsando una transición desde métodos tradicionales hacia sistemas de riego tecnificado. Esta evolución está marcada por la Cuarta Revolución Industrial (Agricultura 4.0), donde la convergencia de la electrónica, el Internet de las Cosas (IoT) y los microcontroladores de bajo costo están redefiniendo la gestión agrícola a nivel mundial.

Antecedentes de la problemática

La agricultura moderna enfrenta una encrucijada definida por la creciente demanda de alimentos y la menguante disponibilidad de recursos naturales, en particular el agua. Esta tensión se agudiza en países como Colombia, donde la seguridad hídrica se ha convertido en un asunto de interés nacional. La situación actual de escasez representa una amenaza significativa para la producción agrícola y, por extensión, para la seguridad alimentaria del país. Factores como la deforestación, la variabilidad climática y una gestión de recursos mejorable han intensificado la presión sobre las fuentes hídricas (Organización Mundial de la Meteorología, 2021).

Esta crisis no solo afecta la disponibilidad de agua para el consumo y la agricultura, sino que también expone una vulnerabilidad energética, dado que aproximadamente el 70% de la electricidad en Colombia se genera en hidroeléctricas (Archila, 2024). En este escenario, el sector agrícola emerge como un actor crítico, siendo uno de los principales consumidores de

agua. La persistencia en el uso de técnicas de riego tradicionales y de baja eficiencia, como el riego por inundación, conduce a un desperdicio considerable del recurso. Según el Ministerio de Ambiente de Colombia (2022), la demanda de agua en este sector sigue una tendencia al alza, lo que agrava el problema. Como consecuencia directa, la inseguridad alimentaria se ha agudizado, con un 28% de los hogares colombianos reportando dificultades para acceder a alimentos (FAO, 2022). Este conjunto de factores ratifica la necesidad urgente de desarrollar e implementar soluciones tecnológicas que permitan un uso más racional y eficiente del agua en la agricultura.

Antecedentes de aplicación

La respuesta tecnológica a la problemática hídrica en la agricultura se ha centrado en el desarrollo de sistemas de riego inteligentes basados en microcontroladores. La investigación académica reciente en Colombia refleja un creciente interés en este campo, sentando las bases para la presente propuesta. Un trabajo relevante es el desarrollado por Márquez Díaz et al. (2024), quienes diseñaron un sistema de riego automatizado para cultivos de pequeña superficie utilizando un microcontrolador compatible con el entorno de Arduino. Su prototipo procesa en tiempo real los datos de sensores de humedad para activar un sistema de riego por goteo, validando el uso de hardware de bajo costo para crear soluciones de agricultura de precisión. Asimismo, en el contexto de la propia Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), podemos referenciar que Duarte (2024) desarrolló un prototipo para el cultivo de fresas utilizando telemetría. Estos trabajos demuestran que la línea de investigación es activa y pertinente, y que el enfoque de este proyecto añadiendo capas de optimización energética y registro de datos es el siguiente paso lógico en esta evolución.

Contexto Regional

En regiones con condiciones climáticas específicas como las de Saldaña, Tolima, caracterizadas por ser un valle cálido y seco perteneciente a la cuenca del Alto Magdalena, la selección del método de riego es crucial. Para cultivos de hortalizas como la berenjena, la adopción de riego por goteo es la más recomendada por su alta eficiencia en la entrega de agua directamente a la zona radicular. Sin embargo, la implementación de esta técnica a menudo se realiza de forma manual o con temporizadores simples. El verdadero salto cualitativo en la región se está dando al combinar este método con la inteligencia electrónica, permitiendo una automatización que responda a las condiciones reales del suelo y del ambiente, y no solo a un horario preestablecido.

Contexto Nacional

A nivel nacional, Colombia presenta una brecha significativa entre su potencial agrícola y la implementación de riego tecnificado. Según el Plan Nacional de Riego 2020-2039, la cobertura actual con infraestructura adecuada es apenas del 6% del área con potencial para ello (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020). Este dato evidencia un predominio de métodos de baja eficiencia y subraya la oportunidad que existe para introducir tecnologías de automatización. La tendencia en el ámbito académico es clara: la creación de sistemas de riego inteligentes, autónomos y sostenibles basados en microcontroladores, que puedan ser adoptados por pequeños y medianos productores para cerrar esta brecha tecnológica.

Contexto Mundial

Globalmente, la evolución de los sistemas de riego está marcada por la Cuarta Revolución Industrial (Agricultura 4.0). La tendencia se orienta hacia el desarrollo de "Sistemas de Riego Inteligente" (Smart Irrigation Systems) que superan la simple automatización,

utilizando datos en tiempo real para tomar decisiones. La base de esta revolución son los microcontroladores como Arduino, que han democratizado el acceso a la agricultura de precisión. Investigaciones como la de (Silveira et al., 2021) demuestran el diseño de sistemas de bajo costo basados en IoT y LoRaWAN para aplicaciones en granjas inteligentes, permitiendo el control remoto de actuadores, un principio fundamental para el riego automatizado.

Adicionalmente, la eficiencia energética es un pilar fundamental; el uso de energía solar para alimentar estos sistemas es una práctica estandarizada, como lo exploran (R. Aruna et al., 2023), asegurando la viabilidad de estas tecnologías en zonas rurales.

Marco de Investigación

Marco Teórico

Los sistemas de riego autónomos representan una relación tecnológica entre la automatización (IBM, 2021), la agricultura de precisión y el uso de energías renovables, orientada a mejorar el manejo hídrico en cultivos. Su diseño se fundamenta en principios de control automático (Gujarro-Rodríguez et al., 2018), donde sensores inteligentes (humedad, temperatura, luminosidad) recopilan datos ambientales en tiempo real, procesados por microcontroladores como Arduino para activar actuadores (motor, leds, alarmas) según parámetros predefinidos. Esta automatización se complementa con la integración de energía solar, basada en paneles fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento en baterías, que garantizan autonomía energética y reducen la dependencia de fuentes convencionales (Alberto, 2013). Estos sistemas, respaldados por el concepto de IoT agrícola, no solo mejoran la eficiencia en el uso del agua, sino que también minimizan la intervención humana, alineándose con los objetivos de la agricultura de precisión para gestionar la variabilidad espacial y temporal de los cultivos.

En el caso específico del cultivo de berenjena (*Solanum melongena*), la implementación de estos sistemas resulta relevante debido a su sensibilidad hídrica en etapas críticas como la floración y el desarrollo de frutos. La demanda de agua varía según la fase fenológica que se encuentre la planta, además, de las variaciones en la humedad del suelo (por debajo del 50-60% de la capacidad de campo) pueden comprometer procesos como la fotosíntesis, afectando el rendimiento (Martínez Reina et al., 2021). En este contexto, los sistemas autónomos ofrecen una respuesta adaptativa: mediante algoritmos de control, permitiendo ajustar el riego según las necesidades detectadas por sensores, evitando tanto el estrés hídrico como el exceso de agua. Este enfoque se apoya en modelos de balance hídrico y sistemas de apoyo a la decisión (Decisión Support Systems), los cuales priorizan la precisión y la adaptación frente a los métodos tradicionales de riego uniforme (Bhakta et al., 2019).

La viabilidad técnica de estos sistemas ha sido demostrada en investigaciones recientes. Estudios como el de Peñalver Carvajal (2023) y Albornoz (2022), en Colombia destacan su capacidad para reducir el consumo hídrico hasta en un 30%, además de mejorar la eficiencia energética mediante el uso de energía solar. No obstante, persisten desafíos, como los costos iniciales de implementación y la escalabilidad para pequeños productores. La autonomía energética, lograda mediante conversión fotovoltaica y gestión inteligente de baterías, la cual, es clave para superar limitaciones geográficas, mientras que la eficiencia energética se optimiza seleccionando componentes de bajo consumo y evitando pérdidas en la operación. Estas características no solo aseguran sostenibilidad ambiental, sino que también contribuyen a la viabilidad económica a mediano y largo plazo, al reducir gastos operativos y aumentar la productividad (Novaldo et al., 2022).

Finalmente, estos sistemas se enmarcan en los principios de la sostenibilidad agrícola, promovidos por organizaciones como la FAO. Al conservar recursos hídricos y aumentar la resistencia climática de los cultivos, los sistemas de riego autónomos representan una solución integral ante desafíos globales como la inseguridad alimentaria y la escasez de agua. Su integración con la agricultura de precisión, mediante modelos de gestión específica, permite adaptar las prácticas agrícolas a las necesidades reales del cultivo, maximizando rendimientos sin comprometer el ecosistema. Así, la automatización, apoyada en energía renovable y datos en tiempo real, resulta como un modelo teórico y práctico para una agricultura más eficiente, sostenible y adaptativa

Marco Histórico

Histórico de Los Sistemas de Riego

El riego ha evolucionado desde técnicas rudimentarias hasta sistemas inteligentes, marcando descubrimientos tecnológicos en cada era; se piensa que las primeras formas de riego implicaban a los agricultores transportando agua en baldes desde pozos o ríos para verterla sobre sus cultivos (National Geographic, s.f.); este método primitivo fue mejorado significativamente alrededor del 6000 a.C. Grandes civilizaciones antiguas como Egipto, Mesopotamia y China desarrollaron sistemas de canales para gestionar las aguas de los ríos como el Nilo, el Éufrates, el Tigris y el Huang He (río Amarillo), ya fuera para aprovechar sus inundaciones periódicas o para contener sus crecidas impredecibles (TC Control group, 2025)

El imperio Romano aportó un avance significativo, alrededor del año 300 a.C. hasta aproximadamente 226 d.C. se construyeron los acueductos; los cuales se conformaban por una serie de tuberías, túneles, canales y puentes, los cuales canalizaban el agua para suministrar las ciudades, algunos incluso, llegaron a ser de más de 80km de distancia (National Geographic,

s.f.). Por otra parte, en el continente americano cerca del siglo XV el impero Inca implementaba sistemas de riego por gravedad que incluía norias, terrazas y molinos de agua, lo que demostraba que tenían una avanzada comprensión de la topografía y la gestión hídrica en zonas montañosas (Muñoz, 2024).

El verdadero avance en los sistemas de riego tuvo lugar en el siglo XX con la creación del riego por goteo moderno por Simcha Blass (Drip Irrigation and Beyond, 2017) y la popularidad que tomaron los sistemas de aspersión. No obstante, estos sistemas iniciales aún requerían intervención manual. La transformación final se dio a finales del siglo XX con la llegada de la agricultura de precisión, que integró sensores de humedad en el suelo y controladores automáticos, permitiendo ahorrar hasta un 30% de agua gracias a algoritmos inteligentes (Khaled Obaideen et al., 2022).

Energía solar en el riego.

El uso de la energía solar para el riego agrícola tiene sus inicios en el siglo XIX, con el descubrimiento del efecto fotoeléctrico por Alexandre-Edmond Becquerel en 1839 (American Physics Society, 2009) y el desarrollo de las primeras células fotovoltaicas de silicio por los ingenieros de Bell Labs en 1954 (Lopez, 2023). Con todo esto, no fue hasta 1981 que el físico alemán Adolf Goetzberger junto a Armin Zastrow fundaron el primer centro dedicado a la investigación aplicada de energía solar y desarrollaron el concepto de agrovoltaica, que se refiere a combinar la producción agrícola con la generación de energía solar (Magoun, 2015).

Por otra parte, hasta el 2004 esta tecnología se popularizó en Japón con el ingeniero Akira Nagashima el cual implementó esta tecnología bajo el título de “solar sharing” para luego en el 2012 ser adoptada como respaldo institucional y financiero por el gobierno de ese mismo país, lo que impulsó la integración de sistemas agrovoltaicos (Notte et al., 2020).

En la última década, según (Campen & Best, 2000, pp. 3–9) en su estudio con la FAO resaltan el potencial de la energía solar para mejorar la productividad y el bienestar en zonas rurales, sin contar con que, la implementación de estas puede reducir el consumo energético en la agricultura hasta un 50% (Qin et al., 2024)

Historia de la Berenjena en Colombia

La berenjena (*Solanum melongena* L.), propia de Asia, específicamente de regiones tropicales como India y China, llegó a América durante la época colonial con ayuda de los españoles, quienes incluyeron diversas hortalizas como parte del proceso de adaptación agrícola en el “Nuevo Mundo” (AGROSAVIA, s.f.). Sin embargo, su arraigo en Colombia se fortaleció considerablemente con la llegada de migrantes árabes y sirio-libaneses a finales del siglo XIX (Cadena, 2019), donde, la berenjena era un ingrediente central en sus platos típicos, y esas costumbres culinarias las introdujeron aquí. Esta influencia fue significativa en ciudades del Caribe colombiano como Barranquilla, Montería, Sincelejo y Lorica (Barraza, 2021).

En municipios del Valle del Sinú medio como Cereté y Montería, el cultivo se consolidó como una actividad económica clave entre los campesinos locales, y con el tiempo, la berenjena se incluyó no solo a la dieta sino también a la identidad agrícola de la región. Hoy en día, departamentos como Córdoba, Atlántico, Bolívar y Sucre representan las principales zonas productoras de berenjena en el país.

Marco Conceptual

En el marco de este proyecto, se entiende por sistema de riego autónomo a una solución tecnológica automatizada que controla el abastecimiento de agua a las plantas sin necesitar una intervención humana periódica. Este sistema se fundamenta en el seguimiento constante de factores ambientales y de la tierra, tales como la humedad, la temperatura y la luminosidad solar

(evaluada por medio de fotorresistencia), a través de sensores específicos. La información recolectada es gestionada por un microcontrolador, principalmente un Arduino Uno, que pone en marcha actuadores para regular el flujo de agua de acuerdo con las necesidades identificadas. Para asegurar su operación en áreas aisladas o sin conexión a la red eléctrica, estos sistemas comúnmente se rigen por energía solar, lo que les otorga independencia energética y sostenibilidad (Martínez, (Guijarro-Rodríguez et al., 2018).

La energía solar se refiere a la radiación electromagnética que el sol emite y que los paneles solares pueden absorber para transformarla en energía eléctrica (Cheng et al., 2022). En el sistema de riego autónomo, esta energía alimenta tanto los elementos electrónicos como las bombas de agua, garantizando el funcionamiento ininterrumpido incluso a la escasez de luz solar directa a través de baterías recargables que conservan la energía transformada. Esta implementación de energías renovables no solo disminuye los gastos de operación, sino que también favorece la preservación ambiental del sistema.

Para el cultivo de la berenjena, las variables esenciales que se deben registrar y regular durante el riego incluyen la humedad del suelo, que señala la cantidad de agua disponible para la planta, las cuales varían en sus distintas etapas, es decir, en la etapa de germinación la berenjena necesita entre 50 y 75 % de humedad en suelo, mientras que cuando ya está en la etapa de plántula la humedad cambia los rangos de 70 a 80 % , ya en contraste en la fase de floración o cuaja la humedad de suelo requerida es de 50 a 60 % y para finalizar en el momento de la fructificación la humedad del suelo debe estar entre 70 y 80 % (NSW Department of Primary Industries and Regional Development, 2020; Li et al., 2025).

La temperatura ambiental también es fundamental, ya que afecta la absorción de nutrientes. Además, la radiación solar, captada por la fotorresistencia. Se evalúan indicadores

como el consumo total de agua (medido en litros), la eficiencia del riego (calculada como la relación entre el agua aplicada y la producción de frutos, expresada en kg/m^3) y la producción de berenjena en términos de cantidad (kg por planta) y calidad del fruto (tamaño, firmeza, etc.), que reflejan el éxito del sistema de riego implementado (Torres et al., 2015).

Temas como la automatización, el control en tiempo real y la agricultura de precisión son esenciales para el diseño del sistema. La automatización significa que el riego opere sin la constante atención humana, mediante sensores y actuadores regulados por microcontroladores. El monitoreo en tiempo real posibilita que el sistema supervise y modifique de inmediato los parámetros de riego de acuerdo con las condiciones del entorno y del terreno. La agricultura de precisión emplea tecnologías de información para evaluar y reaccionar ante la variabilidad en los cultivos, maximizando la utilización de recursos y potenciando la eficiencia en su conjunto del sistema (BBVA, 2025).

En resumen, el diseño, puesta en marcha y análisis de un sistema de riego autónomo para cultivos de berenjena, basado en sensores de humedad del suelo, temperatura y fotorresistencia, alimentado por energía solar, se basa en la incorporación de tecnologías que faciliten un riego eficaz, sustentable y ajustado a las condiciones particulares del cultivo y del ambiente. Este método tiene como objetivo disminuir el uso de agua, potenciar la eficiencia del riego y favorecer.

Materiales y Métodos

Este apartado detalla de forma exhaustiva el método de estudio, el diseño experimental y los procesos que se implementarán para el desarrollo del proyecto. Se muestran los recursos, los instrumentos y las etapas de implementación requeridas para alcanzar las metas establecidas.

Diseño Metodológico

El proyecto se enmarca en un diseño metodológico de carácter cuantitativo, debido a que se enfoca en la recolección y análisis de datos numéricos para evaluar la eficiencia del sistema de riego propuesto. Se empleará un enfoque longitudinal, dado que el monitoreo de las variables y la recolección de datos se realizarán de manera continua a lo largo de un ciclo de cultivo determinado.

Tipo de Investigación

La investigación es de tipo aplicada con un enfoque experimental. Aplicada: Porque busca resolver un problema práctico y específico del contexto agrícola: el uso ineficiente del agua y la energía en el riego de cultivos. El conocimiento generado a través de este proyecto está orientado a la creación de un prototipo funcional y a la validación de su viabilidad como una solución tecnológica sostenible.

Experimental: A causa de que, se manipulará deliberadamente una variable independiente (el método de riego) para observar y medir su efecto sobre un conjunto de variables dependientes (consumo de agua, desarrollo del cultivo). Para ello, se establecerá un diseño comparativo entre un grupo de control y un grupo experimental, permitiendo así evaluar el impacto del sistema de riego automatizado.

Población y Muestra

Población: La población de estudio corresponde a los cultivos de berenjena (*Solanum melongena*) desarrollados bajo las condiciones agroclimáticas del municipio de Saldaña, en el departamento del Tolima.

Muestra: La muestra será de tipo no probabilístico por conveniencia y estará constituida por un total de 20 plantas de berenjena de una variedad comercialmente disponible en la región. Estas plantas se dividirán en dos grupos iguales de 10 unidades cada uno, conformando las parcelas de estudio:

- Grupo A (Control): Compuesto por 10 plantas de berenjena. A este grupo se le aplicará un sistema de riego tradicional, basado en la observación visual y la aplicación manual de agua en intervalos regulares, simulando las prácticas comunes de los agricultores de la zona.
- Grupo B (Experimental): Compuesto por 10 plantas de berenjena. Este grupo será irrigado exclusivamente por el prototipo de sistema de riego autónomo desarrollado en este proyecto.

Fases del Proyecto

El desarrollo del proyecto se ha estructurado en cinco fases secuenciales, diseñadas para garantizar un avance lógico y ordenado desde la conceptualización hasta la validación de los resultados.

Fase 1: Diseño Y Planificación

En esta fase inicial se definirán los fundamentos teóricos y técnicos del proyecto. Se realizarán las siguientes actividades:

- Selección de Componentes de Hardware: Se seleccionarán todos los componentes electrónicos necesarios, incluyendo: el microcontrolador Arduino Mega, dos sensores de humedad de suelo (tipo capacitivo o resistivo, ej. YL-69), sensor de temperatura y humedad ambiental (DHT11), fotorresistencia (LDR), sensor de nivel de agua (Tipo flotador), sensor ultrasónico (HC-SR04), módulo de reloj en tiempo real (RTC DS3231), módulo lector de tarjetas MicroSD, una motobomba para el riego, y el sistema de alimentación (panel solar, controlador de carga y batería).

- Diseño del Esquema Electrónico: Se diseñará el circuito completo que interconectará todos los componentes. Se utilizará software de diseño para generar un diagrama claro del montaje.

- Diseño del Sistema de Potencia: Se calcularán los requerimientos energéticos del sistema para dimensionar adecuadamente el panel solar, el controlador de carga y la capacidad de la batería, asegurando la autonomía del prototipo

Fase 2: desarrollo e integración del prototipo

Esta fase se centra en la construcción física y lógica del sistema.

- Ensamblaje del Hardware: Se realizará el montaje físico de todos los componentes electrónicos en una placa de prototipado o PCB, siguiendo el esquema diseñado en la fase anterior.

- Programación del Microcontrolador: Se desarrollará el código fuente en el IDE de Arduino. La lógica del programa incluirá:

Lectura y procesamiento de datos de todos los sensores (promediando las lecturas de los dos sensores de humedad).

Implementación de la lógica de riego basada en umbrales de humedad predefinidos.

Gestión de los dos modos de operación (ahorro y energía full) a partir de las mediciones del sensor ultrasónico.

Comunicación con el módulo RTC para obtener la fecha y hora.

Escritura de los datos recolectados (humedad, temperatura, estado del riego, etc.) con su respectiva marca de tiempo en un archivo de tipo .csv dentro de la tarjeta MicroSD.

Pruebas y Calibración: Se realizarán pruebas controladas del prototipo para verificar el correcto funcionamiento de cada componente, calibrar los sensores de humedad, temperatura, LDR, Ultrasónico y validar la lógica de programación antes de su instalación en campo.

Fase 3: implementación en campo

Una vez validado el prototipo, se procederá a su instalación en el entorno real.

- Preparación del Entorno Experimental: Se adecuarán las dos parcelas (control y experimental), asegurando que las condiciones iniciales de suelo y siembra sean lo más homogéneas posible.
- Instalación y Puesta en Marcha: Se instalará el sistema de riego autónomo en la parcela experimental, incluyendo los sensores en el suelo, la unidad de control y el sistema de alimentación solar.

Fase 4: Monitoreo y Recolección de Datos

En el transcurso del periodo de cultivo, se recogerán datos de forma ordenada de ambas parcelas.

- Variables del Sistema (Parcela Experimental): Se extraerán periódicamente los datos almacenados en la tarjeta MicroSD, correspondientes a la humedad del suelo, temperatura, luminosidad y eventos de riego.

- **Variables Agronómicas (Ambas Parcelas):** Se realizarán mediciones manuales semanales de indicadores de crecimiento como: altura de la planta (cm), grosor del tallo (mm), y número de hojas, flores y frutos.
- **Variable de Control (Ambas Parcelas):** Se medirá y registrará el volumen total de agua (en litros) aplicado a cada parcela durante todo el experimento.

Fase 5: Análisis de Resultados y Conclusiones

En la fase final, se procesarán y analizarán los datos recolectados para evaluar el desempeño del sistema.

Procesamiento de Datos: Se organizarán los datos extraídos de la MicroSD y los registros manuales en hojas de cálculo para su análisis.

Análisis Estadístico Comparativo: Se aplicarán pruebas estadísticas (ej. prueba t de Student) para comparar las medias de las variables agronómicas y el consumo de agua entre el grupo de control y el experimental.

Evaluación de la Eficiencia: Se calculará el porcentaje de ahorro de agua y se evaluará la autonomía energética del sistema.

Elaboración del Documento Final: Se redactarán las conclusiones del proyecto, discutiendo los hallazgos, las limitaciones y las posibles mejoras o trabajos futuros.

Desarrollo del sistema

El proceso de diseño y funcionamiento del prototipo de sistema autónomo de riego se explica en este capítulo. Se trata desde la elección de los componentes y el diseño electrónico preliminar hasta el ensamblaje del hardware, la codificación del microcontrolador y su aplicación final en el terreno. Cada etapa se describe de forma sucesiva para registrar el desarrollo del proyecto, siguiendo la metodología presentada en el capítulo previo.

Diseño y planificación

La organización técnica del sistema fue la primera etapa del desarrollo, un proceso esencial para garantizar que el prototipo fuera viable, eficiente y coherente. Esta fase se fraccionó en la elección de los elementos de control, el diseño del sistema de potencia y la incorporación de estos dos en un diagrama electrónico global.

Selección de Componentes del Sistema de Control y Monitoreo

La elección de cada uno de los componentes se llevó a cabo según indicadores como el costo, la compatibilidad con el entorno de Arduino, la eficiencia energética, la precisión y la funcionalidad. Se muestra a continuación una tabla que resume los componentes de control más relevantes.

Tabla 1*Componentes de hardware del sistema de Control y Monitoreo*

Componente	Modelo Especifico	Función principal
Microcontrolador	Arduino Mega2560	Unidad central del procesamiento
Sensor de humedad	Sensor Higrómetro	Medición de la humedad de suelo
Sensor Ambiental	DHT11	Medición de temperatura y humedad ambiente
Sensor de Luz	Fotorresistencia LDR	Medición de la luminosidad ambiental
Sensor de proximidad	Ultrasónico HC-SR04	Detección de usuario para modos de energía
Sensor de Nivel	Sensor de Flotador	Detección de nivel bajo/alto en el tanque
Actuador de Riego	Moto bomba 5V	Suministro de agua al cultivo
Módulo de Actuación	Modulo Relé	Interfaz de potencia para controlar la motobomba
Módulo de tiempo	RTC DS3231	Sincronización de fecha y hora para registros
Módulo Memoria	Lector de tarjetas MicroSD	Almacenamiento de datos
Interfaz visual	Pantalla LCD16x2 con I2C	Visualización de datos en tiempo real
Indicadores de estado	3x Led RGB	Señalización visual (humedad, temperatura, nivel)
Alarma sonora	Buzzer Activo 5V	Alerta sonora para nivel bajo de tanque

Nota. Se detallan los componentes electrónicos seleccionados para el procesamiento de datos del sistema y la interacción con el usuario; autoría propia.

La elección del Arduino Mega 2560 se basa en que tiene más pines de entrada/salida y memoria. Debido a su mayor durabilidad, se eligieron sensores de humedad capacitivos. El módulo RTC DS3231 fue escogido por su gran exactitud, la cual es fundamental para mantener la integridad temporal de los datos que se guardan en el módulo MicroSD. Por último, el sensor ultrasónico HC-SR04 es el componente principal para la estrategia de ahorro de energía.

Análisis del Consumo y Dimensiones del Sistema De Potencia

Se llevó a cabo una investigación detallada del consumo de cada elemento con el fin de asegurar la autonomía energética.

Para garantizar la autonomía energética del prototipo, se realizó un dimensionamiento formal del sistema de potencia. Este procedimiento se basa en un análisis detallado del consumo energético de cada componente para luego, mediante fórmulas de ingeniería, determinar las especificaciones mínimas del sistema de generación (panel solar) y almacenamiento (baterías).

Paso 1: Calculo de Consumo Energético Diario Aproximado ($E_{consumida}$)

El primer paso consiste en determinar la energía total que los componentes del sistema consumen en un ciclo de 24 horas. Para validar la robustez del diseño, se analizará un escenario de alta demanda: se asume un tiempo de riego prolongado de 2 horas diarias, lo que podría ocurrir en condiciones de sequía extrema. La energía consumida por cada componente (E_{comp}) se calcula con la Ecuación 1:

Ecuación 1 *Energía consumida por cada componente*

$$E_{comp} = P_{comp} * t_{activo} \quad (1)$$

Donde P_{comp} es la potencia del componente en Vatios (W); t_{activo} es el tiempo de operación en horas (h). La energía total consumida por el sistema ($E_{consumida}$) es la sumatoria de la energía de todos los componentes, como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2*Análisis de Potencia Y Consumo Energético Diario*

		Consumo	Potencia	Horas activo	Energía
Componente		(mA) 5V	(mW) 5V		mW/Día)
Operación base de 24 h	Arduino Mega	75	375	24	9000
	2X Sensor Humedad	10	50	24	1200
	Sensor DHT11	1	5	24	120
	Sensor HC-SR04	5	25	24	600
	Sensor de Nivel	1	5	24	120
	Modulo RTC DS 3231	0.2	1	21	24
	Modulo MicroSD	10	50	24	1200
Interfaz (1)	LCD 16x2	30	150	1	150
	3X LED RGB	15	75	1	75
Actuadores ((3h)	Motobomba 5V	350	1750	2	3500
	Modulo relé	70	350	2	700
	Buzzer	25	125	0.083	~10.4
ENERGIA TOTAL CONSUMIDA					~ 16699mWh

Nota. El consumo es una estimación calculada a partir de los valores nominales de las hojas de datos de los componentes y un perfil de uso proyectado; autoría propia.

En este caso la energía total que los componentes demandan del sistema a 5V es:

$$E_{Consumida} = 16,699 \text{ mWh/Dia} \sim \text{Aprox. } 16.7\text{Wh/dia}$$

Paso 2: Calculo de la Capacidad del Banco de Baterías Y Autonomía

Considerando las pérdidas del módulo de carga/descarga con una eficiencia del 85%, la energía real que se debe extraer del banco de baterías se calcula con la Ecuación 2:

Ecuación 2 *Energía requerida*

$$E_{Requerida} = \frac{16.7 \text{ Wh/Dia}}{0.85} \quad (2)$$

Por lo tanto, ~19.65 Wh/Dia es el valor real de consumo diario que el banco de baterías debe suministrar en este escenario.

Paso 3: Cálculo de la Capacidad del Banco de Baterías y Autonomía

La capacidad total de almacenamiento del sistema (C_{banco}) se determina a partir de la capacidad individual de cada una de las cuatro baterías de Ion-Litio. La energía de una batería (C_{bat}) se calcula multiplicando su voltaje nominal por su capacidad en Amperios-hora.

Ecuación 3 *Capacidad de batería*

$$C_{Batería} = Volt_{Batería} * Cap_{Batería} \quad (3)$$

Entonces, la capacidad de la batería con la que se trabajara es de 22.1Wh. Dado que el banco consta de cuatro baterías conectadas en paralelo, la capacidad total es la suma de las capacidades individuales, como se muestra en la Ecuación 4:

Ecuación 4 *Capacidad banco de baterías*

$$C_{Banco} = C_{Batería} * Num_{Baterías} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que se trabajara con 4 baterías la capacidad del banco es de 88.8Wh; con la capacidad total del banco ya establecida, se calcula la autonomía del sistema ($A_{\text{días}}$), es decir, los días que puede operar sin recibir energía solar, utilizando la Ecuación 5:

Ecuación 5 *Días que puede operar sin recibir energía solar*

$$C_{Banco} = C_{Batería} * Num_{Baterías} \quad (5)$$

Realizando el caculo, da un valor aproximado de 4.51, lo que nos dice que en el escenario planteado teóricamente el diseño proporciona una autonomía de aproximadamente 4.5 días, lo que demuestra una excelente robustez.

Paso 4: Validación del Panel solar con HSP

Finalmente, se verifica que la energía generada por el panel solar ($E_{generada}$) sea suficiente, considerando un escenario optimista con 5 Horas Solares Pico (HSP). La energía generada se calcula con la Ecuación 6:

Ecuación 6 *Energía generada*

$$E_{generada} = P_{panel} * HSP \quad (6)$$

Al comparar la energía generada 50 Wh/Día en un día soleado (con 5HSP) con la energía requerida en un día de consumo (19.65 Wh/día), se confirma que el panel solar tiene la capacidad de cubrir más del doble del consumo diario.

Selección de Componentes del Sistema de Potencia Autónomo

El análisis de anterior confirma que los componentes seleccionados son adecuados incluso para condiciones de operación extrema.

Tabla 3

Componentes del Subsistema de Potencia Autónomo a 5V

Componente	Especificación técnica	Función Principal
Panel solar	6V a 10W	Generación de energía fotovoltaica
Regulador de Voltaje	Modulo LM2596 (Buck Convertir)	Reducción de 6V A 5V estables para la gestión de carga
Modulo de carga y descarga	Modulo Power Bank IP5328P	Gestión de carga, protección y salida de 5V
4 x Baterías	Ion -Litio (3.7V, 6000mA)	Almacenamiento de energía

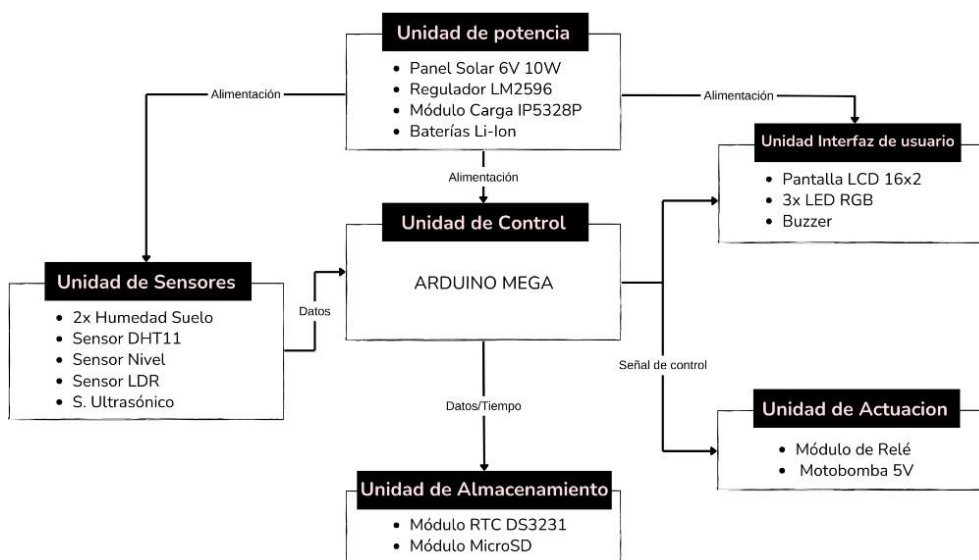
Nota. Se especifican los componentes seleccionados para el sistema de generación y almacenamiento de energía. La elección se fundamenta en los resultados del análisis de consumo (ver Tabla 2), garantizando la capacidad para suplir la demanda energética y asegurar la autonomía del prototipo.

Diseño del Esquema Electrónico Integrado

Con todos los componentes de los subsistemas de control y potencia definidos y validados, se procedió a diseñar el esquema general del sistema. Este diseño conceptualiza la interacción entre las diferentes unidades funcionales del prototipo. El diagrama de bloques presentado en la Figura 1 ilustra el flujo de información y energía a través del sistema: la Unidad de Sensores recopila datos del entorno; la Unidad de Control los procesa y toma decisiones; la Unidad de Almacenamiento registra la información; la Unidad de Actuación ejecuta las órdenes de riego; y la Unidad de Potencia alimenta de forma autónoma a todos los demás módulos.

Figura 1

Diagrama de bloques del sistema de riego autónomo



Nota. Representación de la arquitectura funcional y el flujo de energía y datos del prototipo.

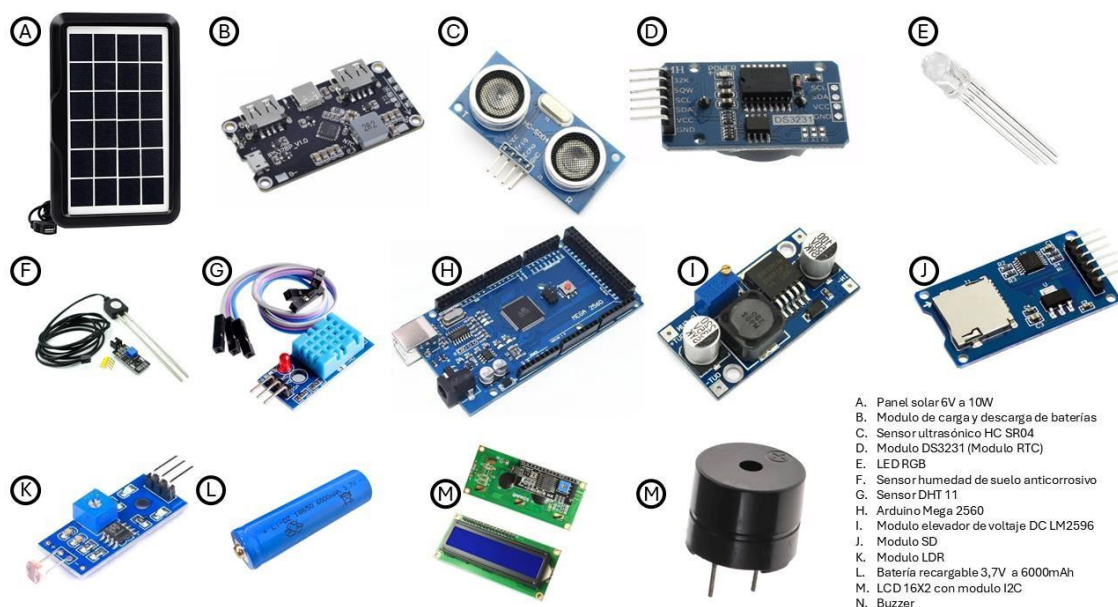
El esquema electrónico detallado, desarrollado en el software Proteus, que muestra cada conexión pin a pin del microcontrolador y los módulos, se puede consultar en el **Apéndice A**.

Desarrollo e Integración del Prototipo

Una vez concluida la fase de diseño y planificación, se procedió con la construcción física y lógica del sistema. Esta fase materializa el diseño teórico en un prototipo funcional. En la Figura 2 se presentan los componentes electrónicos clave que conforman el sistema de control y potencia del prototipo.

Figura 2

Componentes principales del prototipo



Ensamble del Hardware

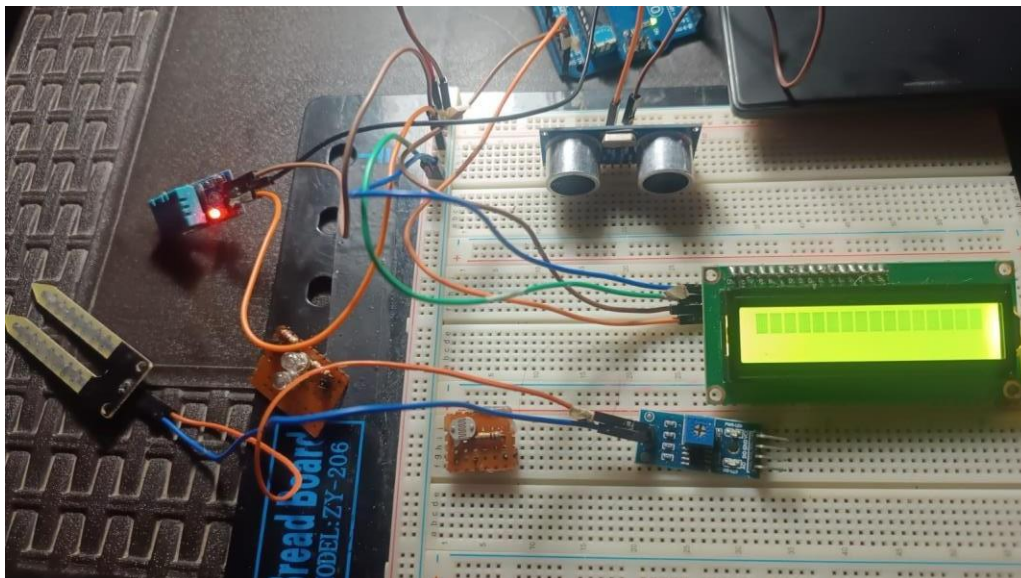
El montaje de los componentes electrónicos se realizó siguiendo el esquema diseñado en la fase de planificación. Para asegurar la correcta funcionalidad y facilitar la depuración, el proceso se dividió en dos etapas:

1. Montaje Preliminar en Protoboard: Inicialmente, se utilizó una placa de prototipado (protoboard) para realizar un montaje temporal. Esta etapa permitió verificar las conexiones eléctricas, probar cada componente de forma individual (sensores,

módulos, actuadores) y validar su interacción con el microcontrolador Arduino Mega sin necesidad de soldaduras permanentes.

Figura 3

Montaje Preliminar de Componentes en protoboard.



2. Ensamblaje Definitivo: Una vez validado el circuito, se procedió al ensamblaje final.

Para garantizar la robustez y fiabilidad de las conexiones a largo plazo, los componentes se soldaron en una placa de circuito impreso perforada (perfboard). La unidad de control completa (Arduino Mega, módulo RTC, módulo SD, módulo de relé y conexiones) se instaló dentro de un gabinete plástico con cierre hermético. Si bien no se utilizó una caja con una certificación de grado de protección industrial (IP), esta solución se seleccionó como una alternativa de bajo costo para resguardar la electrónica de las condiciones ambientales adversas del campo, como la humedad, el polvo y las salpicaduras de agua

Figura 4

Ensamblaje Final Del Prototipo En El Gabinete De Protección



Programación de Microcontrolador

El software en que el sistema fue creado es (IDE) de Arduino, empleando C++ como lenguaje de programación. El código se organizó de manera modular, utilizando bibliotecas especializadas para el manejo de cada periférico. Entre estas, sobresalen las siguientes:

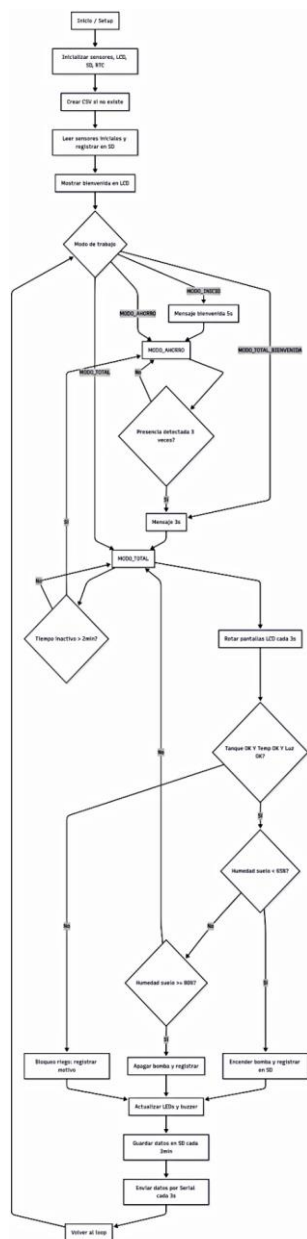
LiquidCrystal_I2C.h para la pantalla, RTCLib.h para el reloj en tiempo real, DHT.h para el sensor ambiental, SdFat.h para almacenamiento de datos y NewPing.h para el sensor ultrasónico.

El programa fue ideado con un modelo no bloqueante que emplea la función `millis()` para manejar múltiples tareas temporizadas de manera simultánea sin frenar el flujo primordial del programa. La habilidad de respuesta del sistema depende en gran medida de esta arquitectura.

La Figura 5 ilustra el funcionamiento mediante un diagrama de flujo.

Figura 5

Diagrama de flujo de la Lógica de Programación del Microcontrolador



Nota: para poder visualizar con mejor resolución el diagrama ingrese al **apéndice 4**

La lógica principal del programa, ejecutada en el bucle principal (loop ()), sigue el siguiente flujo de operación:

1. Gestión de Modos de Energía: En cada ciclo, el programa evalúa una máquina de estados que gestiona los modos de operación. Basándose en las lecturas del sensor ultrasónico y temporizadores internos, el sistema transita entre un "Modo Ahorro" (con la pantalla apagada) y un "Modo Full" (con la pantalla activa para visualización de datos).

2. Ciclo Rápido de Control (Heartbeat): Cada 500 milisegundos, el sistema ejecuta las tareas críticas: lee los datos de todos los sensores, promedia las lecturas de humedad del suelo, ejecuta la lógica de control de riego y actualiza el estado de los indicadores LED.

3. Lógica de Riego: La función `controlarRiego ()` implementa una serie de condiciones de seguridad (guard clauses). El riego se bloquea si el nivel del tanque es bajo, si la temperatura ambiental está fuera del rango óptimo, o si la intensidad lumínica es excesivamente alta por un tiempo prolongado. Solo si todas estas condiciones son seguras, el sistema procede a activar o desactivar la motobomba basándose en los umbrales de humedad del suelo.

4. Ciclo Lento de Registro de Datos: Cada 5 minutos, el sistema invoca la función `registrarDatosSD ()`, la cual obtiene la fecha y hora del módulo RTC y guarda una línea de datos completa en un archivo `.csv` en la tarjeta MicroSD.

5. Comunicación Serial: De forma paralela, cada 3 segundos se envían datos de estado al monitor serial para facilitar la depuración y el monitoreo en tiempo real durante las pruebas.

El código fuente completo y comentado se puede consultar en el Apéndice B.

Prueba y Calibración

Antes de la instalación final en campo, se realizó una fase de pruebas y calibración en un entorno controlado para asegurar la precisión y fiabilidad del prototipo.

- **Calibración de Sensores de Humedad:** Los sensores capacitivos se calibraron estableciendo dos puntos de referencia: el valor leído con el sensor completamente al aire (VALOR_SECO) y el valor leído con el sensor completamente sumergido en agua (VALOR_MOJADO). Estos dos valores se utilizaron en el código para mapear las lecturas analógicas a una escala porcentual intuitiva.
- **Verificación de Sensores Ambientales:** La precisión del sensor DHT11 se verificó comparando sus lecturas de temperatura y humedad con las de un termohigrómetro comercial de referencia. Se ajustó un desfase (CORRECCION_TEMP) en el código para alinear las mediciones.
- **Pruebas Funcionales:** Se realizaron pruebas exhaustivas de todo el sistema. Se simuló una condición de suelo seco para verificar la correcta activación de la motobomba. Se simuló un nivel de tanque bajo para confirmar que el riego se bloqueaba y se activaba la alarma sonora. Se probó repetidamente el sensor ultrasónico para asegurar la transición fluida entre los modos de energía. Finalmente, se dejó el sistema funcionando por 24 horas para verificar la correcta escritura de datos en la tarjeta SD y la estabilidad general del prototipo.

Implementación en Campo

Una vez validado el prototipo en el taller, se procederá a su instalación en el entorno real de cultivo. Esta fase es fundamental para evaluar el sistema en condiciones operativas.

1. Preparación del Entorno Experimental: Se adecuarán los dos espacios de estudio (control y experimental), asegurando que las condiciones iniciales de suelo, exposición solar y siembra de las 20 plantas de berenjena sean lo más homogéneas posible para garantizar una comparación justa.

2. Instalación y Puesta en Marcha: Se instalará el sistema de riego autónomo en la parcela experimental. Esto incluye la colocación estratégica de los dos sensores de humedad en la zona radicular, la instalación de la unidad de control y el posicionamiento del sistema de alimentación solar para maximizar la captación de energía.

Figura 6

Puesta en marcha del prototipo en la parcela experimental



Monitoreo y Recolección Dde Datos

Para evaluar de manera objetiva el desempeño del prototipo, se llevará a cabo un proceso de monitoreo y recolección de datos riguroso durante un ciclo de cultivo completo. Este proceso se aplicará a ambas parcelas (tradicional y experimental) para permitir un análisis comparativo robusto. Se registrarán tres categorías de variables: agronómicas, de control y operativas.

1. Variables Agronómicas (Ambas Parcelas): Estos indicadores de crecimiento se medirán manualmente con una frecuencia semanal para evaluar la salud y productividad de las plantas.

- Altura de la planta (cm): Medida desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento.
- Grosor del tallo (mm): Medido con un metro a una altura fija de 5 cm sobre el nivel del suelo.
- Conteo de hojas, flores y frutos: Registro del número total para evaluar el desarrollo fenológico.
- Observaciones cualitativas: Se anotará el estado general de la planta, como el color de las hojas o la presencia de plagas.

2. Variable de Control (Ambas Parcelas):

- Volumen de agua aplicado (L): Para la parcela tradicional, se medirá el volumen de agua aplicado manualmente en cada riego. Para la parcela experimental, este dato se calculará a partir del caudal de la motobomba y el tiempo total de activación registrado en la MicroSD, permitiendo una cuantificación precisa del ahorro.

3. Variables Operativas (Parcela Experimental): Estos datos serán registrados automáticamente por el sistema en un archivo .csv en la tarjeta MicroSD, con una frecuencia de cada 5 minutos.

- Humedad del suelo (%).
- Temperatura y humedad ambiental (°C y %).
- Luminosidad (%).

- Estado del riego (Activado/Desactivado).
- Nivel del tanque (OK/Bajo).
- Marca de tiempo (Fecha y Hora).

Para organizar la recolección de datos manuales, se utilizarán las siguientes plantillas de registro:

Tabla 4

Plantilla de Registro de Datos Agronómicos y Consumo de Agua.

Fecha	altura	Grosor	N°	N° flores	Agua	Observaciones
		tallo (mm)	Hojas		(L)	

Nota. La tabla presenta el formato para la recolección manual de datos agronómicos. Las mediciones se realizarán semanalmente en la misma franja horaria para asegurar la consistencia. La altura se medirá desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento, y el grosor del tallo se medirá a 5 cm de la base.

Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan los resultados cuantitativos obtenidos tras la implementación y operación continua del prototipo durante un ciclo de cultivo de tres semanas. El análisis se centra en comparar el desempeño de la parcela experimental (riego autónomo) frente a la parcela de control (riego manual tradicional).

Metodología de Cuantificación del Consumo de Agua

Para garantizar la validez de los datos presentados en la Tabla 5, la evidencia del consumo de agua se obtuvo de la siguiente manera:

Parcela tradicional (Manual): El volumen de agua se midió directamente antes de cada aplicación utilizando un recipiente graduado, registrando cada litro aplicado.

Parcela Experimental (Autónomo): El consumo total se midió también de forma manual y directa para asegurar la precisión. Se utilizó un tanque de almacenamiento con una escala graduada de 0 a 11 litros. Antes de cada recarga del tanque, se registraba la marca del nivel de agua restante. El consumo total es la suma de los volúmenes de agua añadidos en cada recarga a lo largo del experimento.

Análisis Comparativo

A continuación, se presentan los resultados comparativos entre la parcela tradicional (riego manual) y la parcela experimental (riego autónomo). Los registros detallados de día a día se pueden consultar en el **Apéndice E**.

1. Germinación

Se observó una diferencia notable en la fase de germinación. En la parcela experimental, las semillas germinaron de forma casi uniforme entre el día 5 y 6 tras la siembra. En contraste, en la parcela tradicional, la germinación fue más irregular, ocurriendo entre el día 6 y el día 9.

2. Eficiencia Hídrica: Consumo de Agua

El consumo total de agua, medido manualmente para ambas parcelas, arrojó un resultado fundamental para el análisis.

Tabla 5

Resumen de Volúmenes Totales Hasta la Fecha

Parcela	Método de riego	Consumo total de agua total
Tradicional	Manual	252
Experimental	Autónomo	267

Nota. Se presenta el consumo de agua acumulado para cada parcela al finalizar el periodo de observación experimental. El consumo de la parcela experimental se calculó a partir de los tiempos de activación de la motobomba registrados por el sistema.

3. Desarrollo Agronómico

El impacto de cada método de riego en el desarrollo de las plantas fue significativamente diferente. La Tabla 6 resume los promedios de los indicadores de crecimiento al final del ciclo.

Tabla 6

Resumen indicadores Agronómicos finales (valores promedio por planta)

Indicador	Parcela Tradicional	Parcela Experimental
Altura (cm)	3 - 8	12 - 25
Grosor final (mm)	3 - 5	8 - 13
Hojas	3 - 5	+ 10

Nota. La tabla compara los valores promedio por planta de los principales indicadores de crecimiento al final del ciclo de estudio. Los datos evidencian el impacto de cada método de riego en el desarrollo fenológico del cultivo.

Discusión de resultados

El análisis de los datos revela un hallazgo fundamental: el objetivo de un sistema de riego de precisión no es necesariamente minimizar el consumo de agua, sino optimizarlo para maximizar la salud y productividad del cultivo.

Como se observa en la Tabla 5, el sistema autónomo consumió 267 litros, un 6% más que el riego manual. Lejos de ser un resultado negativo, este dato demuestra la alta sensibilidad del prototipo. El riego manual, basado en intervalos fijos, probablemente mantenía a las plantas en un estado de estrés hídrico leve pero constante, lo que se reflejó en una germinación más tardía y un desarrollo general más lento.

Es fundamental matizar los resultados presentados en la Tabla 6 para contextualizar adecuadamente su alcance y la variabilidad observada en el campo, considerando que en cada punto de siembra de ambas parcelas se depositaron entre 5 y 10 semillas.

En la parcela de control, el desarrollo, aunque más lento, fue notablemente más uniforme. Las plantas que lograron germinar y sobrevivir alcanzaron tamaños y un número de hojas muy similares entre sí, manteniéndose en los rangos más bajos de la tabla. Esto sugiere que el riego manual, aunque limitante, impuso una condición de crecimiento homogénea para todo el grupo.

En contraste, la parcela experimental mostró un desarrollo mucho más heterogéneo. De los 10 puntos de siembra, uno no germinó y tres tuvieron una germinación muy baja. Sin embargo, en los puntos donde las semillas prosperaron, el sistema autónomo actuó como un potenciador, permitiendo que las plantas alcanzaran su máximo potencial de desarrollo sin las limitaciones del estrés hídrico. Por ello, los rangos de la tabla (ej. altura de 12-25 cm) reflejan esta variabilidad: desde plantas de tamaño modesto hasta individuos excepcionalmente vigorosos que no se observaron en el grupo de control.

A pesar de esta variabilidad, la diferencia cualitativa es innegable. Las plantas del grupo experimental, incluso las de menor tamaño (8-10 cm), mostraron un vigor superior a las del grupo de control. Las mejores plantas del grupo experimental superaron ampliamente a las mejores del grupo tradicional. Esto confirma que el sistema no desperdició agua, sino que la invirtió de manera inteligente para potenciar el máximo desarrollo posible de cada planta viable, evitando el estrés hídrico que limitó al grupo de control. Se demuestra que la verdadera eficiencia en este contexto no significa "usar menos", sino "usar mejor", transformando cada litro de agua en un mayor potencial de crecimiento.

Figura 7

Resultado final plantas con el sistema

**Figura 8**

Resultado final plantas sin el sistema



Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos y el desarrollo del proyecto, se establecen las siguientes conclusiones:

Se diseñó y construyó con éxito un prototipo de riego autónomo funcional, robusto y energéticamente autosuficiente, cumpliendo con el primer objetivo. La arquitectura basada en Arduino Mega y un subsistema de potencia solar correctamente dimensionado demostró ser viable para la operación continua en campo.

El sistema se implementó satisfactoriamente en un entorno de cultivo real, validando su capacidad para operar de forma ininterrumpida sin intervención humana para la gestión del riego, lo que satisface el segundo objetivo.

El sistema de riego autónomo demostró optimizar el desarrollo agronómico del cultivo de berenjena. A pesar de un consumo de agua marginalmente superior (6%), las plantas del grupo experimental mostraron un crecimiento significativamente mayor en altura, grosor y número de hojas en comparación con el riego manual, cumpliendo con el objetivo de evaluación.

La eficiencia hídrica en este contexto se define por la productividad del cultivo y no por la minimización del consumo. Se concluye que la capacidad del sistema para suministrar el volumen de agua preciso en el momento oportuno es un factor más determinante para el rendimiento agrícola que la simple reducción del agua aplicada.

El prototipo se valida como una solución factible y sostenible, demostrando el potencial de la electrónica de bajo costo para crear herramientas de agricultura de precisión que pueden mejorar la productividad de pequeños y medianos agricultores, cumpliendo así con el objetivo final del proyecto.

Recomendaciones

A partir de la experiencia adquirida durante la implementación, se proponen las siguientes recomendaciones para mejorar futuras versiones del prototipo:

Mejorar el Gabinete de Protección: Utilizar un gabinete con certificación IP65 o superior para garantizar una protección completa de la electrónica contra la humedad y el polvo a largo plazo.

Implementar Sensores de Mayor Calidad: Considerar el uso de sensores de humedad de suelo de tipo capacitivo en lugar de resistivos para aumentar la durabilidad y reducir la corrosión.

Optimizar el Código para Bajo Consumo: Investigar e implementar modos de bajo consumo (deep sleep) en el microcontrolador para reducir aún más el consumo energético en los periodos de inactividad y extender la autonomía.

Trabajo Futuro

Para la escalabilidad y evolución del proyecto, se proponen las siguientes líneas de investigación:

Integración de Conectividad IoT: Incorporar un módulo de comunicación (ESP8266 para WiFi o un módulo LoRaWAN) para permitir el monitoreo y control remoto del sistema a través de una plataforma web o una aplicación móvil.

Transición a Electrónica Industrial (PLC): Para aplicaciones a gran escala, migrar la lógica de control a un Controlador Lógico Programable (PLC) y utilizar sensores y actuadores de grado industrial para aumentar la robustez y fiabilidad.

Desarrollo de Algoritmos Predictivos (IA): Utilizar los datos históricos almacenados en la tarjeta SD para entrenar un modelo de aprendizaje automático (Machine Learning) que pueda predecir las necesidades de riego futuras, pasando de un sistema reactivo a uno predictivo.

Análisis de Viabilidad Económica: Realizar un estudio detallado del retorno de la inversión (ROI) para la implementación de una versión comercial del sistema, considerando los costos de hardware, el ahorro en mano de obra y el aumento proyectado en la productividad.

Referencias

- AGROSAVIA. (s.f.). AGROSAVIA - Corporación colombiana de investigación agropecuaria.
<https://www.agrosavia.co/>
- Albornoz, N., J. D. (2022). Dispositivo autónomo de riego para un cultivo de arveja que mejora el crecimiento y desarrollo de la planta. Repositorio Institucional UNAD. <https://research-ebasco-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/c/qcagk4/search/details/ykjks3iar?db=edsbas>
- American Physics Society. (2009, abril). First practical silicon solar cell. APS News.
<https://www.aps.org/apsnews/200904/physicshistory.cfm>
- Archila, G. (2024, 8 de octubre). Colombia frente a una posible crisis energética: desafíos y soluciones. Noticias UNAD. <https://noticias.unad.edu.co/index.php/2025/7131-colombia-frente-a-una-posible-crisis-energetica-desafios-y-soluciones>
- Barraza, F. V. (2021). Saberes y matices: Campesinos asociados al cultivo de berenjena en el Caribe colombiano. *Atarraya Cultural*, 4(1), 50–63.
<https://umapp002.unimagdalena.edu.co/index.php/atarrayacultural/article/view/4801>
- BBVA. (2025, 21 de enero). Agricultura de precisión gracias a algoritmos de ‘machine learning’. BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-agricultura-de-precision-la-gestion-digital-del-campo/>
- Bhakta, I., Phadikar, S., & Majumder, K. (2019). State-of-the-art technologies in precision agriculture: A systematic review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(11), 4878-4888.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.9693>

- Cadena, J. (2019). Características de la comercialización de los frutos de berenjena en las principales ciudades de consumo en Colombia. *Temas Agrarios*, 24(2), 1-12.
<https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/2357/3147>
- Campen, V., & Best, G. (2000). Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
<http://bio-nica.info/Biblioteca/VanCampen2000EnergiaSolarFotovoltaica.pdf>
- Cheng, P., Wang, D., & Schaaf, P. (2022). A review on photothermal conversion of solar energy with nanomaterials and nanostructures: From fundamentals to applications. *Advanced Sustainable Systems*, 6(9), 2200115. <https://doi.org/10.1002/adsu.202200115>
- David, G. C. C. (2023). Sistema de riego automatizado para mejorar la productividad en cultivos de tomates en casa [Tesis de pregrado, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional Unicordoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/20.500.12422/5021>
- Drip Irrigation and Beyond. (2017). The history of the drip irrigation system.
https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:liyHk8NG09IJ:scholar.google.com/+simcha+bliss+drip+irrigation+system&hl=es&as_sdt=0,5
- Duarte, B. L. (2024). Desarrollo de un prototipo de sistema de riego automatizado para un cultivo de fresa [Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/62654>
- Guamán-Rivera, S. A., & Flores-Mancheno, C. I. (2023). Seguridad alimentaria y producción agrícola sostenible en Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 2(1), 1-20.
<https://doi.org/10.69484/rcz/v2/n1/35>

- Guijarro-Rodríguez, A., Lorenzo, J., Preciado-Maila, D., Nagib, B., & Manzur, Z. (2018). Sistema de riego automatizado con arduino. *Revista Espacios*, 39(37), 27.
<https://www.revistaespacios.com/a18v39n37/a18v39n37p27.pdf>
- IBM. (2021). ¿Qué es la automatización? <https://www.ibm.com/mx-es/topics/automation> La Notte, L., Giordano, L., Calabrò, E., Bedini, R., Colla, G., Puglisi, G., & Reale, A. (2020). Hybrid and organic photovoltaics for greenhouse applications. *Applied Energy*, 278, 115582.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115582>
- Li, J., Zhang, H., Zhou, C., Teng, A., Lei, L., Ba, Y., Yu, J., & Li, F. (2025). Integrated effects of water and nitrogen coupling on eggplant productivity, fruit quality, and resource use efficiency in a cold and arid environment. *Plants*, 14(2), 210. <https://doi.org/10.3390/plants14020210>
- Lopez, R. (2023). Caracterización de dispositivos capacitivos para aplicación en celdas solares no convencionales [Tesis de maestría]. Repositorio Institucional INAOE.
<http://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/2496>
- Magoun, A. B. (2015). There, and back again: How Adolf Goetzberger got to solar energy [Scanning our past]. *Proceedings of the IEEE*, 103(3), 476–481. <https://doi.org/10.1109/jproc.2015.2399072>
- Márquez, E., Moreno, A. P., Andrea, M., & Sánchez, A. (2024). Sistema de riego automatizado para un cultivo de pequeña superficie. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 36(2), 32–45. <https://doi.org/10.37815/rte.v36n2.1227>
- Martínez Reina, A. M., Tordecilla Zumaqué, L., Grandett Martínez, L. M., & Rodríguez Pinto, M. del V. (2021). Eficiencia técnica del cultivo de berenjena (*Solanum melongena* L.) en

zonas productoras del Caribe colombiano. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(3), 66–76.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). Plan Nacional de Riego 2020 – 2039. <https://upra.gov.co/en/node/918>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022, 14 de marzo). Conozca cómo podría disminuir la demanda de agua en el sector agrícola. <https://www.minambiente.gov.co/conozca-como-podria-disminuir-la-demanda-de-agua-en-el-sector-agricola/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). ¿Cómo afectaría el cambio climático a Colombia en los próximos años? <https://www.minambiente.gov.co/como-afectaria-el-cambio-climatico-a-colombia-en-los-proximos-anos/>

Muñoz, R. (2024). Evolución de las técnicas de riego agrícola en Ecuador desde la civilización Inca hasta la actualidad [Tesis de grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/15912>

National Geographic. (s.f.). Irrigation. <https://education.nationalgeographic.org/resource/irrigation/>

National Geographic. (s.f.). Roman aqueducts. <https://education.nationalgeographic.org/resource/roman-aqueducts/>

Novaldo, E. V., Dewi, T., & Rusdianasari. (2022). Solar energy as an alternative energy source in hydroponic agriculture: A pilot study. En 2022 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT) (pp. 202–205). <https://doi.org/10.1109/ieit56384.2022.9967806>

NSW Department of Primary Industries and Regional Development. (2020). Growing eggplants.

https://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0004/126292/eggplant-growing.pdf

Obaideen, K., Yousef, B. A. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., & Ramadan, M.

(2022). An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124.

<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). En 2022, el 28 % de los hogares colombianos tuvo dificultades para alimentarse. *FAO en Colombia*.

<https://www.fao.org/colombia/noticias/detail-events/fr/c/1649695/>

Organización Meteorológica Mundial. (2021, 4 de octubre). Se advierte que urge tomar conciencia de la inminente crisis del agua. <https://wmo.int/es/news/media-centre/se-advierte-que-urge-tomar-conciencia-de-la-inminente-crisis-del-agua>

Peñalver Carvajal, M. J. (2023). Sistema autónomo de riego [Trabajo de fin de grado, Universidad de Almería]. Repositorio Institucional UAL.

Qin, J., Duan, W., Zou, S., Chen, Y., Huang, W., & Rosa, L. (2024). Global energy use and carbon emissions from irrigated agriculture. *Nature Communications*, 15(1).

<https://doi.org/10.1038/s41467-024-47383-5>

Rahman, M. A., Islam, M. S., Rahman, M. M., & Faiza, T. (2023). Design and implementation of an IoT and solar powered smart irrigation system. En *Lecture Notes in Electrical Engineering* (Vol. 932, pp. 605–616). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8825-7_52

Ramírez Díaz, E. J., & Vergara Sierra, J. D. (2020). Sistema de riego automatizado basado en IoT utilizando variables ambientales para cultivos de berenjena en la finca La

Esperanza del municipio de Chinú-Córdoba [Tesis de pregrado, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional Unicordoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/20.500.12422/3358>

Silveira, J. D., da S. Veloso, A. F., dos Reis Júnior, J. V., Soares, A. C., & Rabêlo, R. A. (2021). A new low-cost LoRaWAN power switch for smart farm applications. En 2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (pp. 3330-3335). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/SMC52423.2021.9659059>

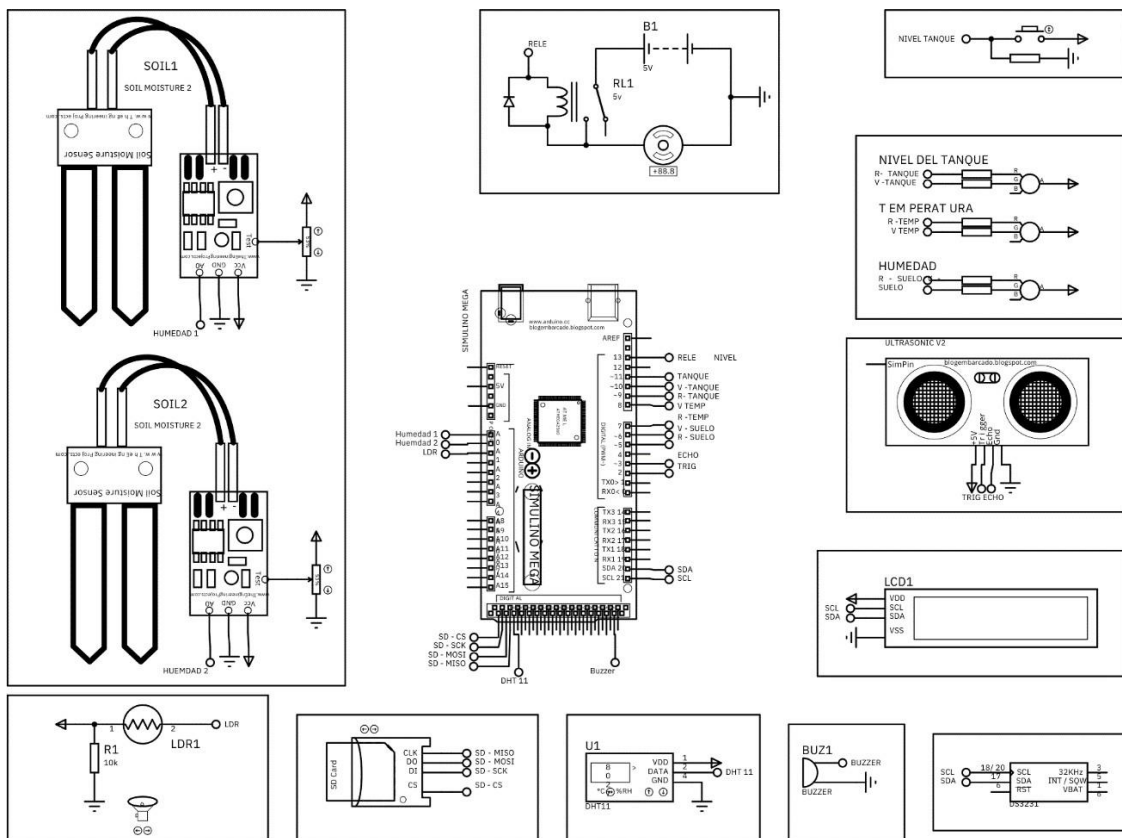
TC Control group. (2025). The history of irrigation. TC Control Group, Inc.
<https://tccontrols.com/blog/the-history-of-irrigation?>

Torres, M., Valle, C. N. del, & Bonilla, J. P. (2015). Modelo tecnológico del cultivo de berenjena para la región caribe. AGROSAVIA. <https://doi.org/978-958-740-181-3>

Apéndices

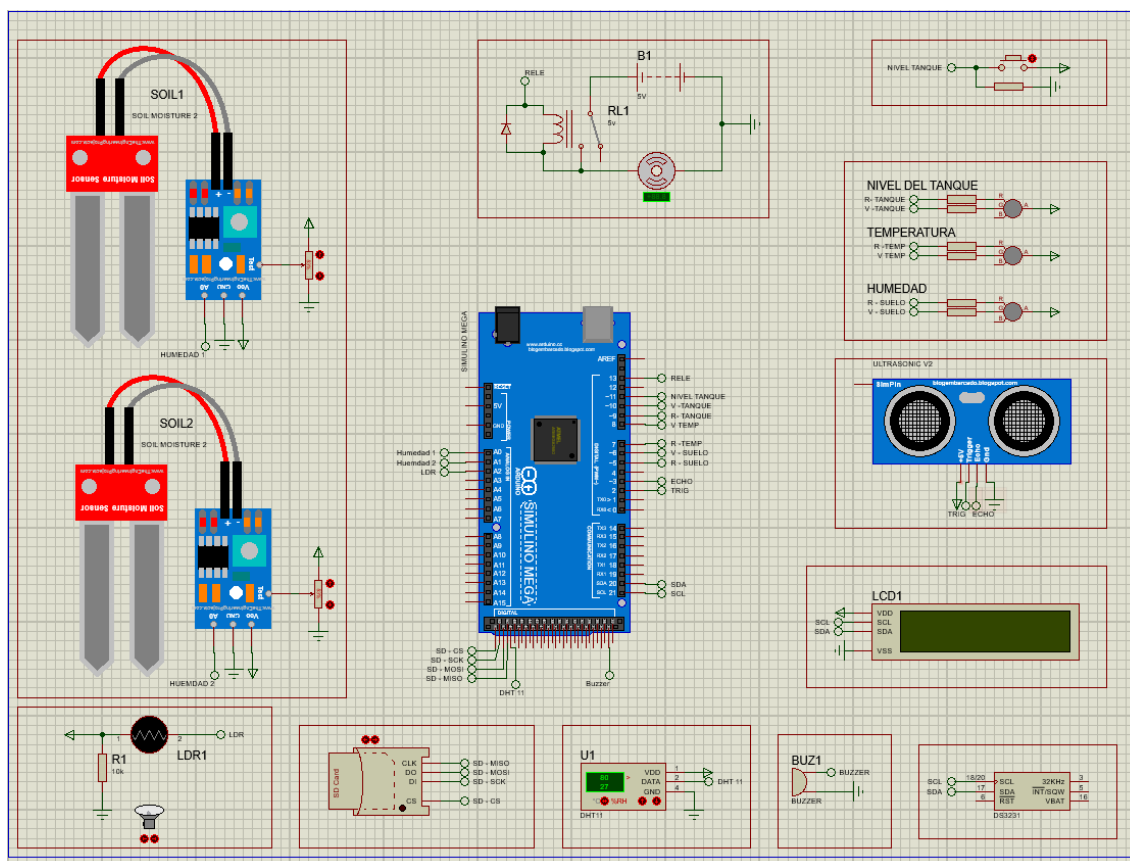
Apéndice A

Diagrama esquemático detallado del prototipo



Apéndice B

Simulación del circuito en proteus



Apéndice C

Código fuente del Microcontrolador

```
#include <Wire.h>

#include "RTCLib.h"

#include <SPI.h>

#include <SdFat.h>

#include <DHT.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#include <NewPing.h>

//

=====

=====

// --- CONFIGURACIÓN DE PINES, UMBRALES Y PARÁMETROS GLOBALES ---

//

=====

=====

#define DHTPIN 49

#define DHTTYPE DHT11

const int SD_CS_PIN = 53, PIN_SUELO1 = A0, PIN_SUELO2 = A1, PIN_LDR = A2;

const int PIN_TRIG = 2, PIN_ECHO = 3, PIN_FLOTADOR = 11, PIN_BUZZER = 23,

PIN_RELE_BOMBA = 13;
```



```
const int PIN_LED_SUELO_R = 5, PIN_LED_SUELO_V = 6, PIN_LED_TEMP_R = 7,
PIN_LED_TEMP_V = 8, PIN_LED_TANQUE_R = 9, PIN_LED_TANQUE_V = 10;

const int DISTANCIA_ACTIVACION = 20;

const unsigned long TIEMPO_MODO_TOTAL = 120000;

const unsigned long BIENVENIDA_STARTUP_DURACION = 5000;

const unsigned long BIENVENIDA_MODO_FULL_DURACION = 3000;

const unsigned long INTERVALO_PANTALLA_LCD = 3000;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

NewPing sonar(PIN_TRIG, PIN_ECHO, 200);

const float UMBRAL_RIEGO_ON = 65.0, UMBRAL_RIEGO_OFF = 80.0;

const float TEMP_MIN = 20.0, TEMP_MAX = 33.0;

const int UMBRAL_LUZ_PROHIBIDO = 90;

// --- AJUSTE DE CALIBRACIÓN DE TEMPERATURA FINAL ---

const float CORRECCION_TEMP = -5.0; // Ajustado a -5 grados

// CALIBRACIÓN DE SENSORES ANALÓGICOS

const int VALOR_SUELO1_SECO = 995, VALOR_SUELO1_MOJADO = 0,
VALOR_SUELO2_SECO = 1023, VALOR_SUELO2_MOJADO = 0;

const int VALOR_LUZ_OSCURIDAD = 1023, VALOR_LUZ_BRILLANTE = 0;
```

```

//
=====

=====

// --- VARIABLES GLOBALES DE ESTADO Y DATOS ---

//
=====

=====

RTC_DS3231 rtc; DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); SdFat sd; SdFile myFile;

String timestamp; float t_amb, h_amb, promedio_suelo, h_suelo1_p, h_suelo2_p; int luz;
unsigned int distancia; int nivel_tanque, nivel_tanque_anterior;

String estado_riego_str = "INICIALIZANDO", modo_trabajo_str = "INICIO";

enum ModoTrabajo { MODO_INICIO, MODO_AHORRO,
MODO_TOTAL_BIENVENIDA, MODO_TOTAL };

ModoTrabajo modoActual = MODO_INICIO;

int contador_deteccion = 0, contador_luz_alta = 0, pantallaActual = 1;

unsigned long timestamp_modos_inicio, previousMillisLCD=0,
previousMillisRegistro=0, previousMillisSerial=0, previousMillisBlinker=0,
previousMillisHeartbeat=0;

const long intervaloRegistro = 300000;

const long intervaloSerial = 3000;

const long intervaloBlinker = 3000;

const long intervaloHeartbeat = 500;

bool estadoBlinker = false;

```

```
//  
  
=====
```

```
=====
```

```
// --- PROTOTIPOS DE FUNCIONES ---  
  
//  
  
=====
```

```
=====
```

```
void gestionarModoDeTrabajo(); void leerSensores(); void controlarRiego(); void  
actualizarIndicadores();  
  
void actualizarPantallaLCD(); void registrarEstadoCompleto(String motivo);  
  
void imprimirMonitorSerial(); void controlarLedRG(int pinR, int pinG, String color);  
  
//  
  
=====
```

```
=====
```

```
// --- SETUP ---  
  
//  
  
=====
```

```
=====
```

```
void setup() {  
  
    Serial.begin(9600); delay(1000);  
  
    Serial.println("--- Sistema Autonomo v13.3 (Calibracion Final) ---");  
  
}
```

```
pinMode(PIN_RELE_BOMBA, OUTPUT); digitalWrite(PIN_RELE_BOMBA,
HIGH);

pinMode(PIN_BUZZER, OUTPUT);

pinMode(PIN_LED_SUELO_R, OUTPUT); pinMode(PIN_LED_SUELO_V,
OUTPUT);

pinMode(PIN_LED_TEMP_R, OUTPUT); pinMode(PIN_LED_TEMP_V, OUTPUT);

pinMode(PIN_LED_TANQUE_R, OUTPUT); pinMode(PIN_LED_TANQUE_V,
OUTPUT);

pinMode(PIN_FLOTADOR, INPUT_PULLUP);

lcd.init(); lcd.backlight();

timestamp_modulo_inicio = millis();

if (!rtc.begin()) { Serial.println("ALERTA: RTC no encontrado."); } else { if
(rtc.lostPower()) { rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); } }

dht.begin();

delay(500);

if (!sd.begin(SD_CS_PIN)) { sd.initErrorHalt(&Serial); return; }

Serial.println("Modulos OK. Iniciando...");

if (!sd.exists("LOG.CSV")) {

myFile.open("LOG.CSV", O_WRONLY | O_CREAT);
```

```

    if (myFile) {
        myFile.println("Fecha y Hora;Motivo;Temp Amb;Hum Amb;Hum Suelo 1;Hum
Suelo 2;Hum Suelo Prom;Luz;Distancia;Nivel Tanque;Estado Riego;Modo Trabajo");
        myFile.close();
    }
}

leerSensores();

registrarEstadoCompleto("Sistema Iniciado");

nivel_tanque_anterior = nivel_tanque;
}

//
=====

=====

// --- LOOP ---

//
=====

=====

void loop() {

    unsigned long currentMillis = millis();

    gestionarModoDeTrabajo();

    actualizarPantallaLCD();

```

```
if (currentMillis - previousMillisHeartbeat >= intervaloHeartbeat) {  
    previousMillisHeartbeat = currentMillis;  
    leerSensores();  
    controlarRiego();  
    actualizarIndicadores();  
}
```

```
if (currentMillis - previousMillisRegistro >= intervaloRegistro) {  
    previousMillisRegistro = currentMillis;  
    registrarEstadoCompleto("Registro Periodico");  
}
```

```
if (currentMillis - previousMillisSerial >= intervaloSerial) {  
    previousMillisSerial = currentMillis;  
    imprimirMonitorSerial();  
}  
delay(50);  
}
```

```
//
```

```
=====
```

```
=====
```

```

// --- IMPLEMENTACIÓN DE FUNCIONES ---

//

=====

=====

void gestionarModoDeTrabajo() {

    switch (modoActual) {

        case MODO_INICIO:

            lcd.setCursor(0,0); lcd.print(" Sistema de Riego"); lcd.setCursor(0,1); lcd.print("
Version 13.3 ");

            if (millis() - timestamp_modos_inicio > BIENVENIDA_STARTUP_DURACION) {

                modoActual = MODO_AHORRO; lcd.noBacklight(); lcd.clear();

                registrarEstadoCompleto("Entrando a Modo Ahorro");

                }

                break;

            case MODO_AHORRO:

                distancia = sonar.ping_cm();

                if (distancia > 0 && distancia < DISTANCIA_ACTIVACION) {

                    contador_deteccion++; } else { contador_deteccion = 0; }

                    if (contador_deteccion >= 3) {

                        modoActual = MODO_TOTAL_BIENVENIDA; timestamp_modos_inicio =

                        millis();

                        lcd.backlight(); lcd.clear(); registrarEstadoCompleto("Entrando a Modo Full");

```

```

        contador_deteccion = 0;
    }
    break;

case MODO_TOTAL_BIENVENIDA:

    lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Iniciando modo"); lcd.setCursor(0,1); lcd.print("trabajo
full...");

    if (millis() - timestamp_modos_inicio >
BIENVENIDA_MODO_FULL_DURACION) {

        modoActual = MODO_TOTAL; pantallaActual = 1;

        timestamp_modos_inicio = millis();

        previousMillisLCD = millis() - INTERVALO_PANTALLA_LCD + 1;

    }

    break;

case MODO_TOTAL:

    distancia = sonar.ping_cm();

    if (millis() - timestamp_modos_inicio > TIEMPO_MODO_TOTAL) {

        modoActual = MODO_AHORRO; lcd.noBacklight(); lcd.clear();

registrarEstadoCompleto("Retornando a Modo Ahorro");

    }

    break;

}

if(modoActual == MODO_AHORRO || modoActual == MODO_INICIO)
modo_trabajo_str = "AHORRO"; else modo_trabajo_str = "FULL";

```



```
}

void leerSensores() {

    DateTime now = rtc.now(); char buffer_timestamp[25];

    sprintf(buffer_timestamp, "%04d/%02d/%02d %02d:%02d:%02d", now.year(),
now.month(), now.day(), now.hour(), now.minute(), now.second());

    timestamp = String(buffer_timestamp);

    h_amb = dht.readHumidity();

    t_amb = dht.readTemperature() + CORRECCION_TEMP;

    h_suelo1_p = constrain(map(analogRead(PIN_SUELO1), VALOR_SUELO1_SECO,
VALOR_SUELO1_MOJADO, 0, 100), 0, 100);

    h_suelo2_p = constrain(map(analogRead(PIN_SUELO2), VALOR_SUELO2_SECO,
VALOR_SUELO2_MOJADO, 0, 100), 0, 100);

    promedio_suelo = (h_suelo1_p + h_suelo2_p) / 2.0;

    luz = constrain(map(analogRead(PIN_LDR), VALOR_LUZ_OSCURIDAD,
VALOR_LUZ_BRILLANTE, 0, 100), 0, 100);

    nivel_tanque_anterior = nivel_tanque;

    nivel_tanque = digitalRead(PIN_FLOTADOR);

    if(nivel_tanque != nivel_tanque_anterior){
```

```

        registrarEstadoCompleto(nivel_tanque == LOW ? "Alarma Tanque: ON" : "Alarma
Tanque: OFF");
    }
}

```

```

void registrarEstadoCompleto(String motivo) {
    myFile.open("LOG.CSV", O_WRONLY | O_APPEND);
    if (myFile) {
        myFile.print(timestamp); myFile.print(";");
        myFile.print(motivo); myFile.print(";");
        myFile.print(isnan(t_amb) ? "" : String(t_amb)); myFile.print(";");
        myFile.print(isnan(h_amb) ? "" : String(h_amb)); myFile.print(";");
        myFile.print(h_suelo1_p); myFile.print(";");
        myFile.print(h_suelo2_p); myFile.print(";");
        myFile.print(promedio_suelo); myFile.print(";");
        myFile.print(luz); myFile.print(";");
        myFile.print(distancia); myFile.print(";");
        myFile.print(nivel_tanque == HIGH ? "OK" : "BAJO"); myFile.print(";");
        myFile.print(estado_riego_str); myFile.print(";");
        myFile.println(modos_trabajo_str);
        myFile.close();
    }
}

```

```

void controlarRiego() {

    if (modoActual == MODO_INICIO) { estado_riego_str = "INACTIVO"; return; }

    if (nivel_tanque == LOW) { digitalWrite(PIN_RELE_BOMBA, HIGH);
estado_riego_str = "BLOQ(Tanque)"; contador_luz_alta = 0; return; }

    if (!isnan(t_amb) && (t_amb > TEMP_MAX || t_amb < TEMP_MIN)) {
digitalWrite(PIN_RELE_BOMBA, HIGH); estado_riego_str = "BLOQ(Temp)";
contador_luz_alta = 0; return; }

    if (luz > UMBRAL_LUZ_PROHIBIDO) { contador_luz_alta++; } else {
contador_luz_alta = 0; }

    if (contador_luz_alta >= 3) { digitalWrite(PIN_RELE_BOMBA, HIGH);
estado_riego_str = "BLOQ(Luz)"; return; }

    if (promedio_suelo < UMBRAL_RIEGO_ON) { digitalWrite(PIN_RELE_BOMBA,
LOW); estado_riego_str = "ACTIVO"; }

    else if (promedio_suelo >= UMBRAL_RIEGO_OFF) {
digitalWrite(PIN_RELE_BOMBA, HIGH); estado_riego_str = "INACTIVO"; }

}

```

```

void actualizarIndicadores() {

    unsigned long currentMillis = millis();

    if (nivel_tanque == LOW) {

        if (currentMillis - previousMillisBlinker >= intervaloBlinker) {

            previousMillisBlinker = currentMillis;

```

```

    estadoBlinker = !estadoBlinker;

}

digitalWrite(PIN_BUZZER, estadoBlinker);

} else {

    digitalWrite(PIN_BUZZER, LOW); estadoBlinker = false;

}

if (modoActual == MODO_TOTAL) {

    controlarLedRG(PIN_LED_SUELO_R, PIN_LED_SUELO_V, (promedio_suelo <
65.0 || promedio_suelo > 85.0) ? "ROJO" : "VERDE");

    controlarLedRG(PIN_LED_TEMP_R, PIN_LED_TEMP_V, (isnan(t_amb) || t_amb >
TEMP_MAX || t_amb < TEMP_MIN) ? "ROJO" : "VERDE");

    if (nivel_tanque == LOW) { controlarLedRG(PIN_LED_TANQUE_R,
PIN_LED_TANQUE_V, estadoBlinker ? "ROJO" : "APAGADO"); }

    else { controlarLedRG(PIN_LED_TANQUE_R, PIN_LED_TANQUE_V, "VERDE");

}

} else {

    controlarLedRG(PIN_LED_SUELO_R, PIN_LED_SUELO_V, "APAGADO");

    controlarLedRG(PIN_LED_TEMP_R, PIN_LED_TEMP_V, "APAGADO");

    controlarLedRG(PIN_LED_TANQUE_R, PIN_LED_TANQUE_V, "APAGADO");

}

}

void actualizarPantallaLCD() {

```

```

if (modoActual != MODO_TOTAL) return;

unsigned long currentMillis = millis();

if (currentMillis - previousMillisLCD >= INTERVALO_PANTALLA_LCD) {

    previousMillisLCD = currentMillis;

    pantallaActual = (pantallaActual % 3) + 1;

    lcd.clear();

}

switch (pantallaActual) {

    case 1:

        lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("T:" + (isnan(t_amb) ? "Err" : String(t_amb)) + "C");
lcd.setCursor(8, 0); lcd.print(" H:" + (isnan(h_amb) ? "Err" : String(h_amb)) + "%");

        lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Luz: " + String(luz) + "%");

        break;

    case 2:

        lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("H. Suelo:"); lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(" " +
String(promedio_suelo) + "%");

        break;

    case 3:

        lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Tanque: " + String(nivel_tanque == HIGH ? "OK" :
"BAJO!"));

        lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Riego: " + estado_riego_str);

        break;

}

```

```
}
```

```
void imprimirMonitorSerial() {  
    Serial.print("\n" + timestamp);  
    Serial.print(" | T:" + (isnan(t_amb) ? "Err" : String(t_amb)) + "C");  
    Serial.print(" | H:" + (isnan(h_amb) ? "Err" : String(h_amb)) + "%");  
    Serial.print(" | Suelo:" + String(promedio_suelo) + "%");  
    Serial.print(" | Luz:" + String(luz) + "%");  
    Serial.print(" | Dist:" + String(distancia) + "cm");  
    Serial.print(" | Tanque:" + String(nivel_tanque == HIGH ? "OK" : "BAJO"));  
    Serial.print(" | Riego:" + estado_riego_str);  
    Serial.print(" | Modo:" + modo_trabajo_str);  
}
```

```
void controlarLedRG(int pinR, int pinG, String color) {  
    if (color == "ROJO") { digitalWrite(pinR, LOW); digitalWrite(pinG, HIGH); }  
    else if (color == "VERDE") { digitalWrite(pinR, HIGH); digitalWrite(pinG, LOW); }  
    else { digitalWrite(pinR, HIGH); digitalWrite(pinG, HIGH); }  
}
```

Apéndice D

Material audio visual Complementario

Como complemento a la descripción del funcionamiento del prototipo, se ha preparado un video explicativo que demuestra la operación del sistema en tiempo real el día de su puesta en marcha. Este material audiovisual permite observar la interacción de los sensores, la activación de la motobomba y el comportamiento general de la interfaz de usuario.

El video puede ser consultado a través del siguiente link:

<https://drive.google.com/drive/folders/1Jm0cxuFPstZC8QKiAQzO6reDgdjFyV8M?usp=sharing>

Apéndice E

Tabla de registros

Fecha y Hora	Motivo	Temp Amb	Hum Amb	Hum Suelo 1	Hum Suelo 2	Hum Suelo Pn Luz	Distancia	Nivel Tanque	Estado Riego	Modo Trabajo
10/08/2025 17:33	Sistema Inicia 35.60	49.00	0.00	2.00	1.00	7	57	BAJO	INICIALIZAND	INICIO
10/08/2025 17:33	Entrando a Mc 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	2	58	BAJO	INACTIVO	AHORRO
10/08/2025 17:33	Alarma Tanqu 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	8	58	OK	INACTIVO	AHORRO
10/08/2025 17:33	Alarma Tanqu 35.60	48.00	0.00	2.00	1.00	14	57	OK	INICIALIZAND	INICIO
10/08/2025 17:33	Sistema Inicia 35.60	48.00	0.00	2.00	1.00	14	57	OK	INICIALIZAND	INICIO
10/08/2025 17:33	Entrando a Mc 35.60	49.00	0.00	0.00	0.00	93	57	OK	INACTIVO	AHORRO
10/08/2025 17:34	Entrando a Mc 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	1	11	OK	BLOQ(Temp)	AHORRO
10/08/2025 17:34	Alarma Tanqu 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	3	58	BAJO	BLOQ(Temp)	FULL
10/08/2025 17:34	Alarma Tanqu 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	2	51	OK	BLOQ(Tanque)	FULL
10/08/2025 17:36	Retornando a 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	14	57	OK	BLOQ(Temp)	FULL
10/08/2025 17:36	Retornando a Mc 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	12	6	OK	BLOQ(Temp)	AHORRO
10/08/2025 17:38	Retornando a 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	12	39	OK	BLOQ(Temp)	FULL
10/08/2025 17:39	Alarma Tanqu 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	18	51	BAJO	BLOQ(Temp)	AHORRO
10/08/2025 17:39	Entrando a Mc 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	18	13	BAJO	BLOQ(Tanque)	AHORRO
10/08/2025 17:39	Alarma Tanqu 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	11	51	OK	BLOQ(Tanque)	FULL
10/08/2025 17:41	Retornando a 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	7	51	OK	BLOQ(Temp)	FULL
10/08/2025 17:42	Alarma Tanqu 35.60	49.00	0.00	0.00	0.00	5	51	BAJO	BLOQ(Temp)	AHORRO
10/08/2025 17:42	Entrando a Mc 35.60	49.00	0.00	0.00	0.00	5	10	BAJO	BLOQ(Tanque)	AHORRO
10/08/2025 17:42	Alarma Tanqu 35.60	49.00	0.00	0.00	0.00	4	51	OK	BLOQ(Tanque)	FULL
10/08/2025 17:42	Alarma Tanqu 35.60	49.00	0.00	0.00	0.00	6	51	BAJO	BLOQ(Temp)	FULL
10/08/2025 17:42	Alarma Tanqu 35.60	49.00	0.00	0.00	0.00	6	51	OK	BLOQ(Tanque)	FULL
10/08/2025 17:44	Retornando a 35.60	49.00	0.00	0.00	0.00	9	51	OK	BLOQ(Temp)	FULL
10/08/2025 17:45	Registro Perio 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	7	51	OK	BLOQ(Temp)	AHORRO
10/08/2025 17:45	Alarma Tanqu 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	6	51	BAJO	BLOQ(Temp)	AHORRO
10/08/2025 17:45	Alarma Tanqu 35.60	48.00	0.00	0.00	0.00	6	52	OK	BLOQ(Tanque)	AHORRO
10/08/2025 17:46	Alarma Tanqu 35.60	49.00	0.00	0.00	0.00	6	51	BAJO	BLOQ(Temp)	AHORRO

Para consultar la tabla de registros completos puedo ingresar a través del siguiente link:

https://drive.google.com/drive/folders/1Jm0cxuFPstZC8QKiAQzO6reDgdjFyV8M?usp=drive_li nk