

TOBO Y COMPAÑÍA SAS BIC.



TOBO



COLOMBIA
POTENCIA DE LA
VIDA



Ciencias



COMITE
REGIONAL DE
GANADEROS
DE YOPAL



CARTILLA ORIENTADORA

*SISTEMA HÍBRIDO DE EXTRACCIÓN DE AGUA
CON ENERGÍA SOLAR Y EÓLICA Y RIEGO POR
GOTEO AUTÓNOMO BASADO EN HUMEDAD DEL
SUELO, CON INTEGRACIÓN DE FERTIRRIEGO
PARA AGRICULTURA SOSTENIBLE.*

SISTEMAS RENOVABLES DE
COLOMBIA SAS BIC



Ciencias



COMITE
REGIONAL DE
GANADEROS
DE YOPAL

TABLA DE CONTENIDO

1. Resumen.	6
2. Introducción.	8
3. Objetivos.	
3.1. Objetivo general.	
3.2. Objetivos específicos.	9
4. Justificación.	10
5. Estado del arte.	
5.1. Estrategia de búsqueda.	11
5.2. Criterios de inclusión y exclusión.	12
5.3. Bases de datos y fuentes de información.	13
5.4. Análisis de la información existente.	14
6. Descripción de la problemática.	16
7. Metodología.	
7.1. Técnica metodológica implementada.	
7.2. Investigación aplicada.	
7.3. Diseño e implementación de soluciones tecnológicas.	17
7.4. Evaluación y mejora continua.	
7.5. Descripción de las técnicas implementadas.	18
8. Desarrollo del proyecto.	
8.1. Fase 1: Investigación inicial y diagnóstico.	20
8.2. Fase 2: Diseño del sistema híbrido para la extracción de agua.	23
8.2.1. Molino de viento.	24
8.2.2. Sistema solar de extracción de agua.	32
8.3. Fase 3: Desarrollo del sistema automatizado de riego.	
8.3.1. Selección del área de cultivo y ubicación del pozo profundo.	35
8.3.2. Elección del tipo de cultivo.	36
8.3.3. Selección de semilla híbrida y manejo orgánico del cultivo.	37
8.3.4. Identificación y manejo de la biodiversidad local.	38
8.4. Fase 4: Selección de la tecnología para el sistema de riego.	40
8.4.1 Implementación de sensores y módulos Inalámbricos.	42
8.4.2 Control y gestión del riego.	44
8.4.3. Implementación de un sistema de riego y fertirriego por goteo.	49
9. Análisis de resultados.	
9.1. Análisis del Desempeño Agronómico del Cultivo.	
9.1.1. Estado Fitosanitario.	51
9.1.2. Estado nutricional del cultivo.	52

TABLA DE CONTENIDO

9.1.3. Comportamiento de la humedad de suelo con el sistema de riego por goteo automatizado.	53
10. Impacto del proyecto y consideraciones finales.	56
10.1 Evolución del cultivo bajo el sistema de riego por goteo.	57
11. Conclusiones.	58
12. Referencias.	59



FIGURAS

Figura 1. Resultados de la encuesta: Uso de tecnologías de riego.	20
Figura 2. Resultados de la encuesta: Fuente principal de agua.	
Figura 3. Resultados de la encuesta: Método de extracción de agua.	21
Figura 4. Encuesta: Interés en la adopción de tecnologías.	22
Figura 5. Modelado de sistema de extracción de agua híbrido Tobo.	23
Figura 6. Cabezote de un molino de viento TOBO.	
Figura 7. Partes del cabezote.	24
Figura 8. Modelado 3D del rotor de un molino de viento TOBO.	
Figura 9. Partes del rotor	26
Figura 10. Modelado 3D de la Cola y Coleta.	27
Figura 11. Partes que componen la cola y coleta.	28
Figura 12. Modelado 3D de la torre de 6 metros.	29
Figura 13. Partes de la torre.	30
Figura 14. Modelado 3D de la bomba de agua.	
Figura 15. Partes de la bomba.	31
Figura 16. Referencia de la bomba sumergible solar.	33
Figura 17. Curva de operación.	35
Figura 18. Selección de área de cultivo y pozo profundo.	
Figura 19. Mesa técnica para elección del terreno y tipo de cultivo.	36
Figura 20. Preparación del terreno para el cultivo.	37
Figura 21. Detección de chizas de tierra.	38
Figura 22. Proceso de identificación de biodiversidad por la mujer rural.	
Figura 32. Análisis de insectos previos al cultivo.	39
Figura 19. Resultados de la encuesta: Cultivos existentes en la finca.	40
Figura 20. Análisis del diámetro de la raíz del maíz.	
Figura 21. Análisis del funcionamiento del sistema de riego por goteo.	41
Figura 22. Sensor de humedad de suelo implementado.	42
Figura 23. Módulo transmisor inalámbrico.	43
Figura 24. Módulo receptor.	44
Figura 25. Electroválvulas de control inalámbrico.	
Figura 26. Módulo de control de las electroválvulas.	46
Figura 27. Panel principal de control.	47
Figura 28. Sistema de riego por goteo con fertirriego.	49
Figura 29. Ejecución de fertirriego en el cultivo.	50
Figura 30. Día 3 después de la germinación.	52
Figura 31. Día 46 después de la germinación.	53
Figura 32. Segmentación por bloques del cultivo.	54
Figura 33. Gráfico promedio diario niveles de humedad.	55

CUADROS

Cuadro 1. Partes que componen el cabezote.	25
Cuadro 2. Descripción de partes que componen el rotor.	26
Cuadro 3. Descripción de partes que componen la cola y coleta.	28
Cuadro 4. Descripción de partes que la torre.	30
Cuadro 5. Descripción de partes que la bomba.	32
Cuadro 6. Características técnicas de la bomba solar sumergible KOLOS4-60-150-11.	33
Cuadro 7. Partes del módulo transmisor de humedad.	43
Cuadro 8. Partes del módulo receptor.	45
Cuadro 9. Partes del módulo controlador de las electroválvulas.	47
Cuadro 10. Partes del sistema principal de control.	48
Cuadro 11. Partes del sistema de riego.	50



1. RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo mejorar el proceso de extracción de agua subterránea mediante la implementación de un sistema híbrido que combina energía eólica y solar, y automatizar el riego en cultivos agrícolas mediante el uso de un Controlador Lógico Programable (PLC). El proyecto se desarrolla en la región de Yopal, Casanare, donde la agricultura de secano y la escasez de agua, agravada por el cambio climático, han limitado la producción agrícola y pecuaria.

La solución propuesta se basa en la integración de un sistema híbrido que permite aprovechar dos fuentes renovables de energía, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y la red eléctrica. El agua extraída de pozos profundos es distribuida a través de un sistema de riego por goteo automatizado, optimizado mediante sensores de humedad del suelo que aseguran la correcta dosificación de agua, evitando su desperdicio.

Además, se implementa un manejo sostenible del cultivo de maíz, utilizando semillas híbridas y técnicas mayoritariamente sostenibles para proteger la biodiversidad y minimizar el uso de agroquímicos. El sistema también incorpora un proceso de fertirrigación, que permite la aplicación precisa de fertilizantes a través del riego, mejorando la eficiencia en la absorción de nutrientes y reduciendo la lixiviación de fertilizantes hacia los acuíferos.

Los resultados esperados incluyen un ahorro significativo de agua y energía, la mejora de la productividad agrícola y la reducción de los costos operativos. Este proyecto representa una solución sostenible que puede ser replicada en otras regiones que enfrenten problemas similares, contribuyendo al manejo eficiente de los recursos hídricos y a la sostenibilidad ambiental en el sector agropecuario.

2. INTRODUCCIÓN

La región de Yopal, Casanare, enfrenta desafíos significativos relacionados con la escasez de agua y el cambio climático, lo que ha limitado la productividad agrícola y pecuaria. La mayoría de los cultivos en la región dependen de la agricultura de secano, lo que significa que solo reciben agua de lluvia. Esto los hace vulnerables a las fluctuaciones climáticas, ocasionando estrés hídrico en las plantas y limitando la capacidad de realizar más de un ciclo de cultivo al año.

Adicionalmente, la extracción de agua en la región depende en gran medida de métodos tradicionales que utilizan combustibles fósiles o energía de la red eléctrica, lo cual incrementa tanto los costos operativos como la huella de carbono. Estos sistemas resultan costosos e insostenibles desde un punto de vista ambiental, lo que genera la necesidad de buscar alternativas más eficientes y sostenibles.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema híbrido de extracción de agua que combine energía eólica y solar, reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables. Además, se busca automatizar el proceso de riego por goteo mediante el uso de un PLC (Controlador Lógico Programable), lo que optimizará el uso del agua mediante sensores de humedad del suelo, garantizando que cada cultivo reciba la cantidad de agua necesaria sin desperdicios.

Esta iniciativa no solo busca mejorar la eficiencia hídrica y energética, sino también contribuir a la sostenibilidad económica y ambiental de los productores agropecuarios, generando un impacto positivo tanto en los recursos naturales como en la productividad agrícola. El presente documento expone el desarrollo investigativo, las tecnologías implementadas y los resultados esperados de este proyecto servirán como modelo replicable en otras regiones que enfrentan problemáticas similares.



3. OBJETIVOS

3.1.OBJETIVO GENERAL:

- Mejorar la extracción de agua subterránea mediante un sistema híbrido de energía eólica y solar para optimizar la producción agropecuaria en Yopal, Casanare.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un diagnóstico del sistema actual de extracción de agua en un productor agropecuario.
- Optimizar el equipo híbrido eólico-solar para la extracción de agua y automatizar el riego por goteo usando un PLC.
- Realizar prácticas de conservación del suelo.
- Implementar procesos de monitoreo de insectos, plagas y malezas.
- Utilizar fuentes de fertilización con base orgánica.
- Mejorar las operaciones agropecuarias del productor en la vereda Tilodirán, Yopal.



4. JUSTIFICACIÓN

La región de Yopal, Casanare, enfrenta desafíos críticos debido a la escasez de agua, la cual afecta tanto a la ganadería extensiva como a la agricultura. La falta de sistemas eficientes de extracción y manejo de agua, junto con las prácticas tradicionales de riego, genera un uso ineficiente de este recurso, afectando la sostenibilidad de las actividades productivas y los ecosistemas locales.

El cambio climático y la presión sobre los recursos hídricos han intensificado la necesidad de soluciones que mejoren el aprovechamiento del agua. La sobreexplotación de los acuíferos y la dependencia de métodos convencionales de riego no solo incrementan el riesgo ambiental, sino que también limitan la productividad y aumentan los costos operativos de los productores locales.

Este proyecto justifica la necesidad de implementar un sistema híbrido de extracción de agua con energías renovables (solar y eólica), acompañado de un sistema de riego automatizado que optimice el uso del agua en el cultivo. Estas tecnologías permiten una gestión eficiente y sostenible del recurso hídrico, reduciendo el desperdicio y los costos, además de minimizar el impacto ambiental.

Adoptar estas tecnologías es crucial para asegurar la sostenibilidad económica y ambiental en Yopal. Si no se toman medidas, los efectos negativos sobre la biodiversidad, la productividad y la calidad de vida de las comunidades rurales continuarán empeorando. Este proyecto ofrece una solución viable para mejorar la gestión del agua y garantizar el desarrollo sostenible en la región.



5. ESTADO DEL ARTE

El riego automatizado ha emergido como una solución clave en la agricultura moderna para optimizar el uso del agua y enfrentar los desafíos del cambio climático y la escasez hídrica. Tecnologías avanzadas como sensores de humedad, controladores programables (PLC) y comunicación inalámbrica permiten un control preciso del riego, mejorando la eficiencia y reduciendo el desperdicio. Además, la integración de energías renovables en estos sistemas ha mostrado ser efectiva para reducir costos y aumentar la sostenibilidad. Sin embargo, aunque su adopción ha crecido, persisten barreras como los costos iniciales y la falta de capacitación técnica, que limitan su implementación en zonas rurales.

5.1. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

Para abordar con profundidad la temática del estudio sobre el riego automatizado y su vínculo con las energías renovables y la sostenibilidad, se diseñó una estrategia de búsqueda bien estructurada. Se comenzó seleccionando un conjunto de palabras clave que capturan la esencia de los temas a explorar. Las palabras clave seleccionadas fueron:

- "Riego automatizado"
- "Tecnologías de riego avanzadas"
- "Sostenibilidad en agricultura"
- "Eficiencia del uso del agua en agricultura"
- "Sensores en agricultura"
- "Automatización agrícola"
- "Sistemas de riego automatizado empleando energías renovables"

Estas palabras clave se utilizaron en combinación con operadores booleanos como "AND" y "OR" para ampliar o precisar la búsqueda. Esto permitió no solo focalizarse en estudios que tratan específicamente sobre el riego automatizado, sino también incorporar aquellos que discuten el uso de tecnologías renovables en estos sistemas. Algunas de las combinaciones empleadas incluyeron:

"Riego automatizado AND energías renovables"
"Tecnologías de riego AND sostenibilidad"
"Automatización agrícola OR sensores en agricultura"

Este enfoque proporcionó una visión amplia y detallada, permitiendo recolectar tanto investigaciones sobre prácticas tradicionales de riego como aquellas que resaltan las innovaciones más recientes en el uso de energías renovables. Este método ayudó a construir una base sólida para comprender el estado actual y explorar futuras direcciones en el desarrollo de sistemas de riego automatizado adaptados a las necesidades de una agricultura moderna y sostenible.

5.2. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Criterios de inclusión:

Para este estudio, se incluyeron documentos que cumplieran con los siguientes criterios:

- Tipo de documento: Se incluyeron trabajos de investigación que abordan el diseño, implementación y evaluación de sistemas de riego automatizados, especialmente aquellos que integran tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y las energías renovables.
- Área de estudio: Documentos que se enfocan en la automatización del riego en contextos agrícolas, con especial atención a estudios realizados en condiciones climáticas y edafológicas similares a las de los cultivos de maíz.
- Innovaciones tecnológicas: Estudios que describen la implementación de sensores inalámbricos y uso de energías renovables en sistemas de riego.
- Idiomas: Documentos escritos en inglés y español para capturar una amplia gama de investigaciones a nivel internacional y regional.

Criterios de Exclusión:

Se excluyeron documentos basados en los siguientes criterios:

- Tipo de documento: Se excluyeron editoriales, comentarios, y artículos de opinión que no aportan evidencia empírica o análisis detallado.

- Fuera de alcance: Estudios que tratan sobre riego manual o tradicional sin componentes de automatización.
- Antigüedad: Documentos publicados hace más de 15 años, a menos que sean citados como fundamentales en la evolución del riego automatizado.
- Calidad del estudio: Estudios que no proporcionan suficiente detalle sobre la metodología, la implementación técnica, y los resultados obtenidos.

Estos criterios garantizan que los documentos revisados proporcionen información relevante y actualizada sobre las tecnologías y métodos más efectivos en el campo del riego automatizado, particularmente aquellos que pueden ser aplicados en cultivos de maíz y adaptados a las condiciones específicas de las áreas de estudio mencionadas en tus documentos

5.3. BASES DE DATOS Y FUENTES DE INFORMACIÓN

Para la revisión de literatura en esta investigación sobre sistemas de riego automatizado, se utilizó una selección de fuentes que son reconocidas por su relevancia académica. Se priorizaron bases de datos y repositorios que ofrecen acceso a investigaciones de calidad, incluyendo estudios empíricos y desarrollos tecnológicos en el área de interés.

Fuentes Académicas Utilizadas:

- Google Scholar: Esta herramienta de búsqueda gratuita fue utilizada como la principal fuente de acceso a documentos académicos, tesis doctorales, y artículos de revistas. Google Scholar es útil por su capacidad de indexar una amplia gama de literatura académica de múltiples disciplinas y formatos, proporcionando acceso a textos completos a través de enlaces a las editoriales o repositorios directos.
- SciELO: Una biblioteca electrónica que incluye una colección seleccionada de revistas científicas. SciELO es especialmente útil para acceder a estudios realizados en América Latina, Portugal, España y otros países en desarrollo, lo que permite una perspectiva diversa sobre los sistemas de riego automatizado adaptados a diferentes condiciones agronómicas y climáticas.

Repositorios Universitarios:

-Tesis de Universidades: Se revisaron tesis de grado y posgrado disponibles en repositorios universitarios abiertos. Estas tesis a menudo exploran nuevas áreas de investigación y pueden incluir estudios de caso detallados y prototipos experimentales que no están disponibles en publicaciones de revistas.

Estas fuentes fueron escogidas por su accesibilidad y la relevancia de su contenido, lo que garantiza que la información recopilada sea pertinente y útil para entender tanto el estado actual como las futuras direcciones en el desarrollo de sistemas de riego automatizado. La selección estratégica de estas fuentes permite abarcar un amplio espectro de investigaciones y perspectivas sobre el tema.

5.4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

- Desarrollo de un sistema de control de riego e identificación de malezas mediante inteligencia artificial para cultivos de maíz:

Resumen: El proyecto implementa un sistema que combina control de riego por goteo e identificación de malezas usando inteligencia artificial en cultivos de maíz en Paz de Ariporo, Casanare. Utiliza redes neuronales para mejorar la eficiencia en el manejo del agua y el control de malezas.

Tecnologías: Sensores de humedad, Raspberry Pi, Arduino, electroválvulas, cámara USB, redes neuronales, OpenCV.

Conclusiones: La tecnología mejora la eficiencia en el uso del agua y contribuye a la agricultura de precisión mediante la automatización del riego y la identificación de malezas.

- Diseño de un sistema automatizado de riego por goteo para aumentar la producción de maíz en la hacienda Durand:

Resumen: Proyecto en Lambayeque, Perú, que propone un sistema de riego por goteo automatizado con PLC para mejorar la distribución del agua y la productividad del maíz.

Se utilizó software de simulación (CROPWAT) para optimizar las necesidades hídricas.

Tecnologías: PLC, sensores de humedad, software de simulación (CROPWAT, Zelio Soft).



Conclusiones: El sistema automatizado mejoró la eficiencia hídrica y aumentó la productividad del maíz.

- Sistema de riego por goteo y fertirriego automatizado con sensores de humedad y telemetría para maíz en Jicaral, Puntarenas:

Resumen: Implementación de un sistema de riego y fertirrigación automatizado en Costa Rica, utilizando sensores de humedad y controladores programables, optimizando el uso de agua y nutrientes.

Tecnologías: PLC, sensores de humedad, telemetría, válvulas solenoides.

Conclusiones: El sistema es viable económicamente y mejora la eficiencia del riego y la productividad.

- Diseño de un sistema de riego automatizado para maíz con transmisión inalámbrica de datos:

Resumen: Proyecto que utiliza sensores de humedad y módulos Xbee para transmitir datos de manera inalámbrica y activar la irrigación en función del estado del suelo. El sistema incluye una interfaz de usuario para monitoreo.

Tecnologías: Sensores de humedad, módulos Xbee, MATLAB.

Conclusiones: La tecnología Zigbee superó las expectativas y el sistema permitió la optimización del uso del agua.

- Una red de sensores inalámbricos para la automatización y control del riego localizado en cultivos de fresas:

Resumen: Diseño de una red de sensores inalámbricos ZigBee para automatizar el riego en cultivos de fresas en Pasto, Colombia. Se optimiza el riego en función de la humedad del suelo.

Tecnologías: ZigBee, sensores de humedad 10HS, XBee Pro-Series 2.

Conclusiones: El sistema mejoró la eficiencia hídrica y la calidad del cultivo.

- Programa de alimentación bovina en Yopal:

Resumen: Proyecto que incluye la siembra de 10 hectáreas de maíz y sorgo para la producción de forraje ensilado destinado a ganaderos locales en Yopal, Casanare.

Tecnologías: Tractores, cosechadoras, equipos de aspersión.

Conclusiones: Se logró un rendimiento de 18 toneladas de ensilaje por hectárea, mejorando la capacidad forrajera de la región.

6. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La región de Yopal, Casanare, enfrenta graves problemas relacionados con la escasez de agua y el uso ineficiente de este recurso, que afecta directamente a la producción agropecuaria. Gran parte de la agricultura en esta área depende de la agricultura de secano, un método que confía exclusivamente en las precipitaciones para regar los cultivos. Esta práctica, cada vez más ineficaz, ha incrementado la vulnerabilidad de los agricultores frente a los cambios climáticos y a la variabilidad de las lluvias, provocando estrés hídrico en los cultivos y limitando los rendimientos productivos.

Además, la extracción de agua subterránea y el riego dependen en gran medida de la electricidad de la red y del uso de combustibles fósiles para alimentar bombas y sistemas de riego, lo que aumenta los costos operativos y emisiones de gases contaminantes. Esta dependencia no solo representa un obstáculo económico, sino que también agrava la situación ambiental, elevando la huella de carbono en una región ya afectada por la degradación ecológica.

El cambio climático ha exacerbado estos problemas al provocar sequías más frecuentes y alterar los patrones de lluvia, lo que afecta la disponibilidad de agua y los ciclos de producción agropecuaria. Este escenario ha creado la necesidad urgente de adoptar soluciones sostenibles, como el uso de tecnologías de riego eficientes, sistemas híbridos de energía renovable (eólica y solar), y métodos automatizados que optimicen el uso del agua y reduzcan la dependencia de fuentes de energía convencionales.

Sin soluciones efectivas, la producción agropecuaria en la región de Yopal se verá cada vez más afectada, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria y el sustento económico de las comunidades locales. La modernización de los sistemas de riego y la implementación de energías renovables son fundamentales para asegurar un futuro sostenible, reducir el impacto ambiental, y mejorar la resiliencia frente a los efectos del cambio climático.



7. METODOLOGÍA

El proyecto empleó diversas técnicas para abordar los desafíos relacionados con la extracción de agua y el riego automatizado en la región de Yopal, Casanare, integrando soluciones tecnológicas sostenibles diseñadas para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos. En una región afectada por el cambio climático y la escasez de agua, fue esencial desarrollar e implementar tecnologías que no solo mejoraran la disponibilidad de agua, sino que también contribuyeran a la sostenibilidad ambiental y la productividad agropecuaria.

7.1. TÉCNICA METODOLÓGICA IMPLEMENTADA

El enfoque metodológico se basó en la aplicación de un modelo de investigación aplicada. Esta técnica busca resolver problemas concretos a través de la implementación de soluciones tecnológicas en un entorno específico. A lo largo del proyecto, se siguió un proceso iterativo de diseño, implementación y evaluación, que permitió ajustar y optimizar las tecnologías instaladas. Este enfoque permitió no solo validar la viabilidad técnica del sistema, sino también mejorar su impacto en las condiciones reales del campo.

7.2. INVESTIGACIÓN APLICADA

El proyecto comenzó con un diagnóstico de las condiciones actuales de extracción de agua y riego en la región. Se realizaron encuestas y análisis de campo para identificar los principales problemas y necesidades de los agricultores locales. Esta etapa permitió desarrollar una comprensión detallada del contexto en el que se aplicarían las tecnologías.

7.3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOLUCIONES TECNOLÓGICAS

Se diseñaron e implementaron sistemas específicos de extracción de agua y riego basados en energías renovables (eólica y solar), optimizados mediante la automatización del riego con PLC y sensores de humedad. Esta fase involucró una metodología de diseño experimental, donde cada solución fue implementada y

ajustada en función de las condiciones locales del suelo y las necesidades hídricas de los cultivos.

7.4. EVALUACIÓN Y MEJORA CONTINUA

Una parte crucial de la metodología fue el monitoreo continuo del rendimiento del sistema mediante la recolección y análisis de datos en tiempo real. Se utilizaron sensores de humedad del suelo, integrados en un sistema de comunicación inalámbrica (LoRa), para evaluar la eficiencia de riego y ajustar las operaciones según fuera necesario. Esta evaluación permitió realizar ajustes inmediatos, asegurando que el sistema funcionara de manera óptima en todo momento.

7.5. DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS IMPLEMENTADAS

- Energía eólica y solar:

Para la extracción de agua subterránea, se implementaron sistemas que combinan molinos de viento y paneles solares. Esta solución híbrida aprovecha al máximo las condiciones climáticas locales, garantizando un suministro constante de agua incluso en momentos de baja radiación solar o viento moderado, reduciendo la dependencia de fuentes de energía convencionales.

- Automatización del riego mediante PLC:

El riego por goteo fue automatizado utilizando Controladores Lógicos Programables (PLC), los cuales se programaron para regular las electroválvulas según los niveles de humedad del suelo. Los sensores de humedad distribuidos en distintas áreas del campo proporcionan datos precisos, permitiendo una irrigación localizada y ajustada a las necesidades específicas del cultivo.

- Implementación de fertirriego:

Se implementó un sistema de fertirrigación, que permite la inyección de fertilizantes directamente en el sistema de riego por goteo. Esto garantiza una distribución uniforme de los nutrientes, mejorando su absorción por el cultivo y reduciendo el desperdicio de insumos, lo que a su vez minimiza el impacto ambiental y optimiza los costos de producción.



- Monitoreo y control inalámbrico:

La comunicación entre los diferentes componentes del sistema (sensores, electroválvulas, PLC) se realiza mediante tecnologías LoRa de comunicación inalámbrica. Esto permite un monitoreo remoto del sistema, facilitando ajustes en tiempo real sin necesidad de intervención directa en el campo, lo que reduce la mano de obra y mejora la eficiencia operativa.



8. DESARROLLO DEL PROYECTO

- A continuación, el desarrollo del proyecto se divide en varias fases, cada una de las cuales aborda un aspecto clave de la implementación de las soluciones tecnológicas propuestas.

8.1. FASE 1: INVESTIGACIÓN INICIAL Y DIAGNÓSTICO

Se inició el proyecto con un diagnóstico de la situación actual en la región de Yopal, Casanare, utilizando como herramienta principal la recolección de datos mediante encuestas realizadas a los productores agropecuarios locales. Estas encuestas permitieron identificar los principales desafíos relacionados con la escasez de agua, el uso de tecnologías de riego ineficientes y la dependencia de combustibles fósiles o energía eléctrica convencional para la extracción y distribución del agua.

El análisis de los datos arrojó información clave sobre las prácticas de riego en la región. La mayoría de los productores aún dependen de métodos tradicionales, como el uso exclusivo de la lluvia o el riego manual, lo que resulta en un uso ineficiente del agua. Solo un pequeño porcentaje utiliza tecnologías modernas como el riego por goteo, destacando una oportunidad significativa para la adopción de sistemas más eficientes que optimicen el uso del recurso hídrico

Figura 1. Resultados de la encuesta: Uso de tecnologías de riego

¿Cómo describiría el estado actual de los procesos de riego en su finca?



Además, las encuestas evidenciaron que la mayoría de los productores dependen de pozos profundos como principal fuente de agua, pero muchos enfrentan desafíos asociados a la dependencia de la energía eléctrica de la red para la extracción del agua, lo que incrementa los costos y afecta la disponibilidad en caso de interrupciones del suministro.

Figura 2. Resultados de la encuesta: Fuente principal de agua



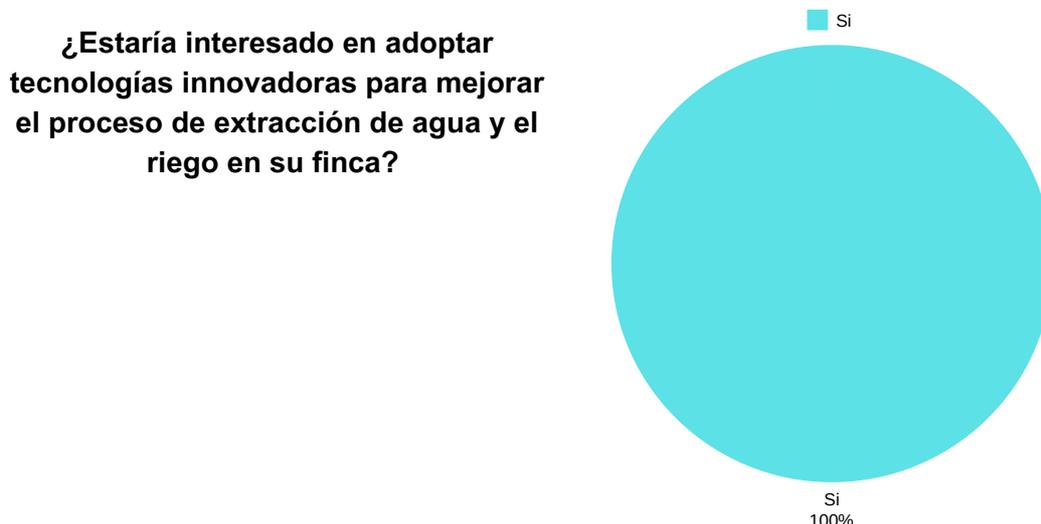
Estos factores subrayan la necesidad urgente de soluciones sostenibles, como el uso de energías renovables y tecnologías de riego automatizadas, para mejorar la eficiencia en la gestión del agua.

Figura 3. Resultados de la encuesta: Método de extracción de agua



Además, se identificó un creciente interés por parte de los productores agropecuarios de la región en adoptar tecnologías que les permitan mejorar la eficiencia en el uso del agua y reducir su dependencia de fuentes de energía no renovables. Aunque muchos productores aún utilizan prácticas tradicionales de riego, los resultados del diagnóstico revelan una disposición significativa a explorar alternativas más modernas, siempre que estas tecnologías sean accesibles en términos de costos y puedan integrarse de manera efectiva a las condiciones específicas de sus fincas.

Figura 4. Resultados de la encuesta: Interés en la adopción de tecnologías



En resumen, aunque existen barreras iniciales como los costos de implementación y la falta de capacitación técnica, los productores agropecuarios de Yopal han mostrado un alto grado de receptividad hacia la adopción de tecnologías innovadoras. Esto sugiere que, con el apoyo adecuado en términos de capacitación y financiación, la región está bien posicionada para aprovechar los beneficios de la modernización de los sistemas de riego y el uso de energías renovables. Con base en estos hallazgos, el proyecto se enfocó en diseñar e implementar tecnologías que abordaran directamente los problemas identificados, orientándose hacia un modelo de gestión hídrica sostenible, que no solo optimizara el uso del agua, sino que también redujera la dependencia de fuentes de energía no renovables.

8.2. FASE 2: DISEÑO DEL SISTEMA HÍBRIDO PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUA

En esta fase, se diseñó e implementó un sistema híbrido que combina energía eólica y solar para la extracción de agua subterránea. El sistema se compone de un molino de viento y paneles solares que trabajan en conjunto para garantizar un suministro constante de agua, incluso en situaciones de baja velocidad del viento o escasez de luz solar. Esta integración reduce la dependencia de la red eléctrica y los combustibles fósiles, haciendo el sistema más eficiente y sostenible.

Figura 5. Modelado de sistema de extracción de agua híbrido Tobo



Componentes del sistema híbrido:

8.2.1. Molino de viento

·Cabezote: El cabezote del molino de viento es la parte superior del molino que alberga los componentes mecánicos que convierten la energía del viento en energía mecánica. Es una estructura robusta y resistente a la intemperie que se encuentra sobre la torre del molino y gira para orientarse hacia el viento.

Figura 6. Cabezote de un molino de viento TOBO

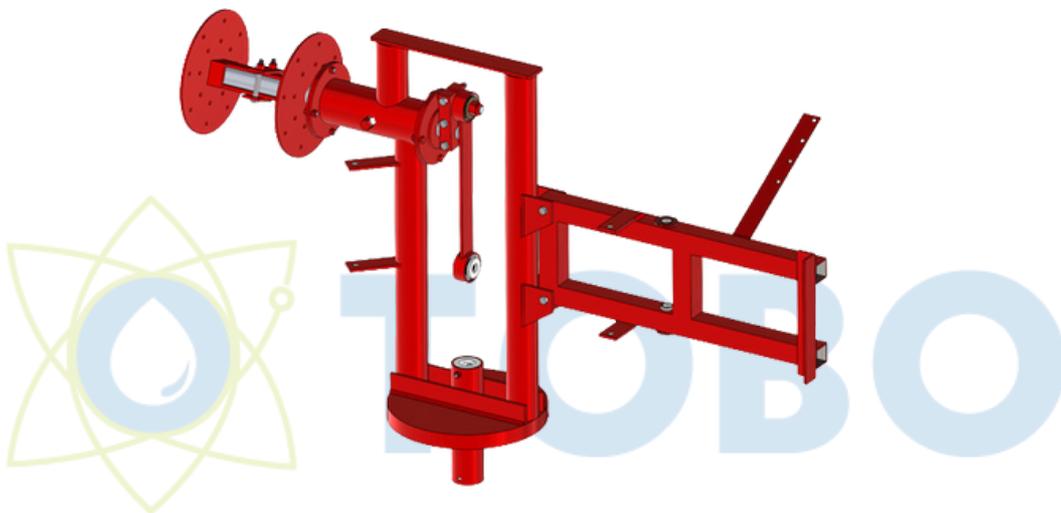
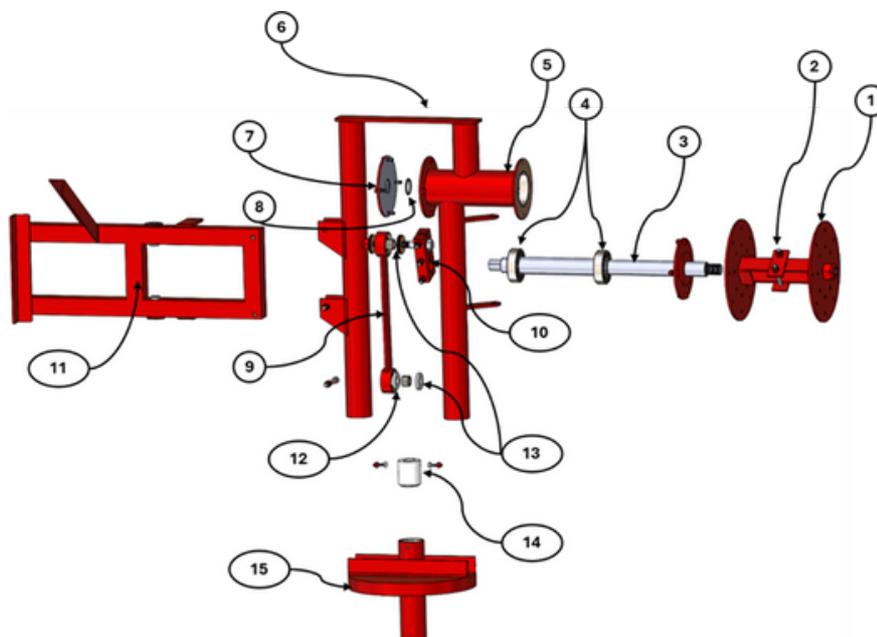


Figura 7. Partes del cabezote



Cuadro 1. Partes que componen el cabezote

Ítems	Descripción
1	Carrete
2	Abrazadera de carrete
3	Eje principal
4	Rodamientos del eje principal
5	Mandril
6	Estructura principal de ensamble
7	Tapa de mandril
8	O-ring de protección de humedad
9	Biela
10	Cigüeñal
11	Soporte de colas
12	Rodamientos de la Biela
13	Bujes de la biela
14	Buje guía de la varilla biela
15	Soporte de cabezote

- **Rotor de 32 aspas:** Este componente del sistema está diseñado para capturar eficientemente la energía del viento a través de sus aspas aerodinámicas. Al girar con el viento, el rotor genera movimiento rotativo que puede ser utilizado para diversas aplicaciones, en esta caso en específico como el bombeo de agua. Además, el diseño del rotor, incluyendo la forma y el tamaño de las aspas, está optimizado para maximizar la eficiencia en la captura de energía eólica.

Figura 8. Modelado 3D del rotor de un molino de viento TOBO

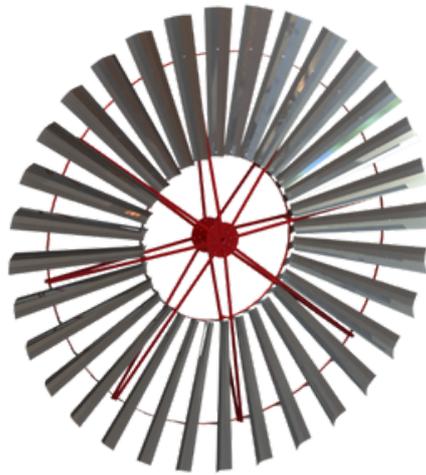


Figura 9. Partes del rotor



Cuadro 2. Descripción de partes que componen el rotor

Ítems	Descripción
1	Aspas
2	Soporte de Aspas
3	Tijeras
4	Aros de soporte

- **Cola y coleta:** Estos componentes están diseñados para mantener el rotor alineado correctamente con la dirección del viento, permitiendo así que las aspas capturen la mayor cantidad posible de energía eólica. Cuando el viento cambia de dirección, la cola gira para alinear el rotor en la dirección correcta del viento. Este movimiento de la cola asegura que las aspas estén expuestas al viento de manera óptima, maximizando así la eficiencia en la captura de energía eólica. Por otro lado, la coleta, ayuda a estabilizar el rotor y mantenerlo en posición mientras está en funcionamiento. Actúa como contrapeso, equilibrando las fuerzas ejercidas sobre la cola y garantizando su correcto funcionamiento incluso en condiciones de viento variable o ráfagas fuertes.

Figura 10. Modelado 3D de la Cola y Coleta

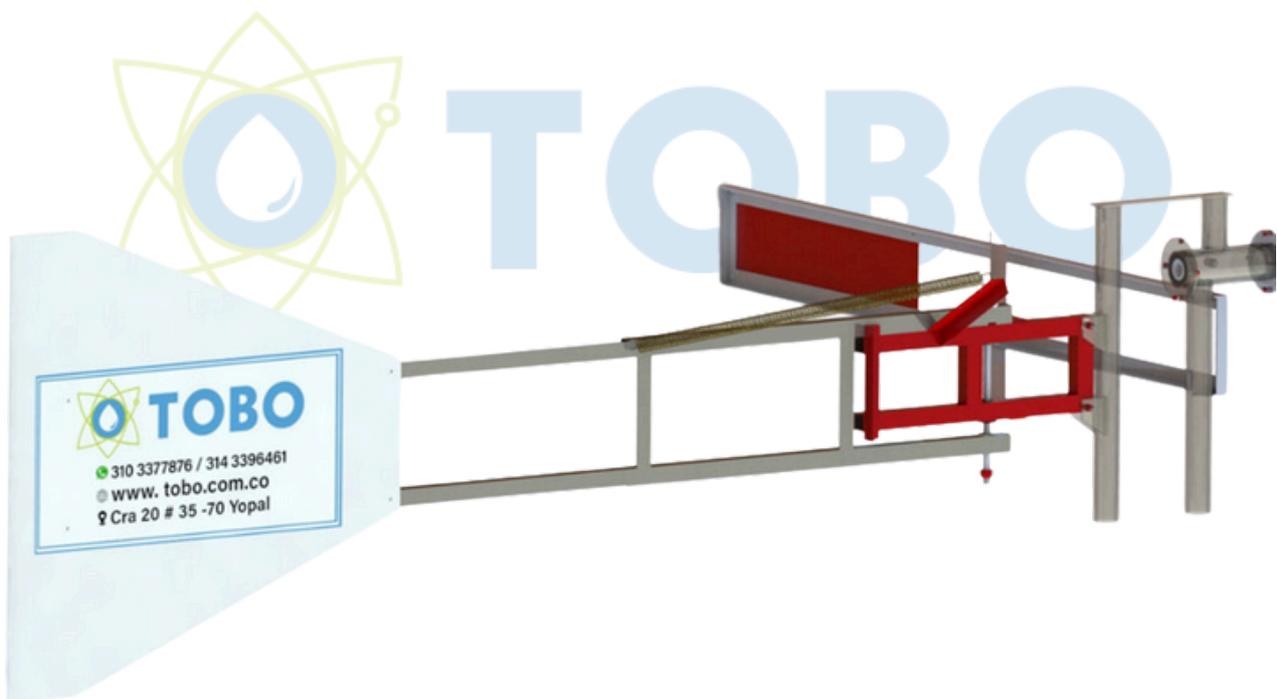
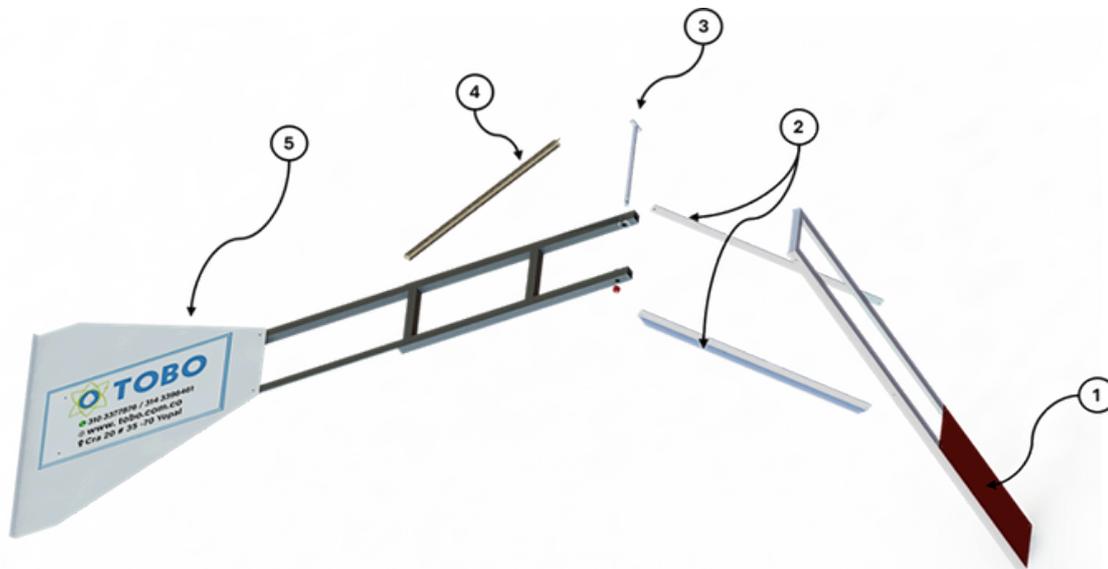


Figura 11. Partes que componen la cola y coleta



Cuadro 3. Descripción de partes que componen la cola y coleta

Ítems	Descripción
1	Coleta
2	Soporte de coleta
3	Varilla pin
4	Resorte de seguridad
5	Cola

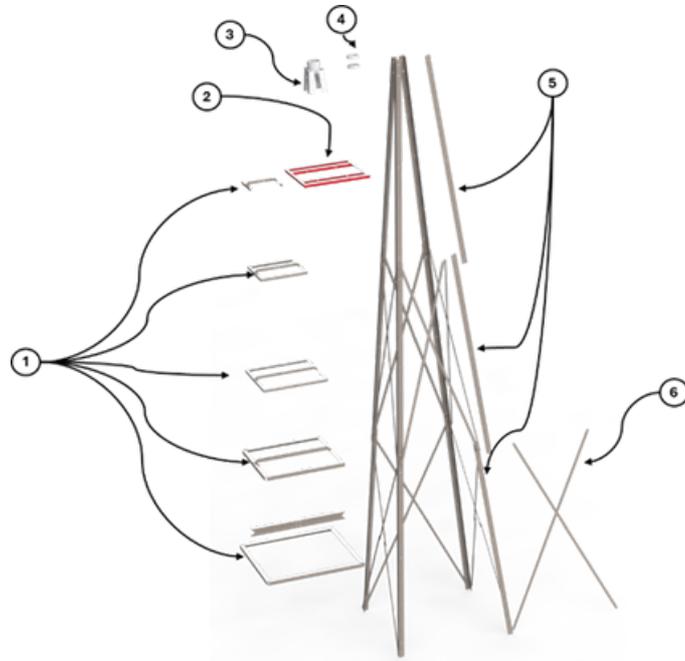


- Torre de 6 metros: La torre en el molino de viento cumple una función esencial al proporcionar la altura necesaria para elevar el rotor y las aspas a una posición óptima para capturar la energía del viento. En este caso, la torre tiene una altura específica de 6 metros, lo que le permite alcanzar una elevación adecuada para maximizar la exposición del rotor al viento circundante. El funcionamiento de la torre implica su capacidad para soportar el peso del rotor y las aspas, así como para resistir las fuerzas ejercidas por el viento. Está construida con materiales resistentes y duraderos, diseñados para soportar condiciones climáticas adversas y garantizar la estabilidad y seguridad del sistema en su conjunto.

Figura 12. Modelado 3D de la torre de 6 metros



Figura 13. Partes de la torre



Cuadro 4. Descripción de partes que la torre

Ítems	Descripción
1	Recuadros estructurales
2	Plataforma de trabajo
3	Banqueta
4	Rodamientos de banqueta
5	Parales de 2 metros
6	Tijeras de soporte



- Bomba de agua: Bombea el agua del pozo a la superficie: La bomba de agua utilizada en el sistema híbrido es accionada exclusivamente por el movimiento lineal generado por el molino de viento, eliminando la necesidad de energía eléctrica o combustible para su funcionamiento. Este movimiento lineal se convierte en la fuerza necesaria para bombear agua desde los pozos profundos, aprovechando de manera eficiente la energía eólica. Su diseño mecánico simple pero robusto permite una operación continua y confiable, ideal para entornos rurales donde se requiere un sistema autónomo y sostenible para el suministro de agua. Esta tecnología garantiza un flujo constante de agua para riego, adaptándose a las condiciones de viento disponibles.

Figura 14. Modelado 3D de la bomba de agua

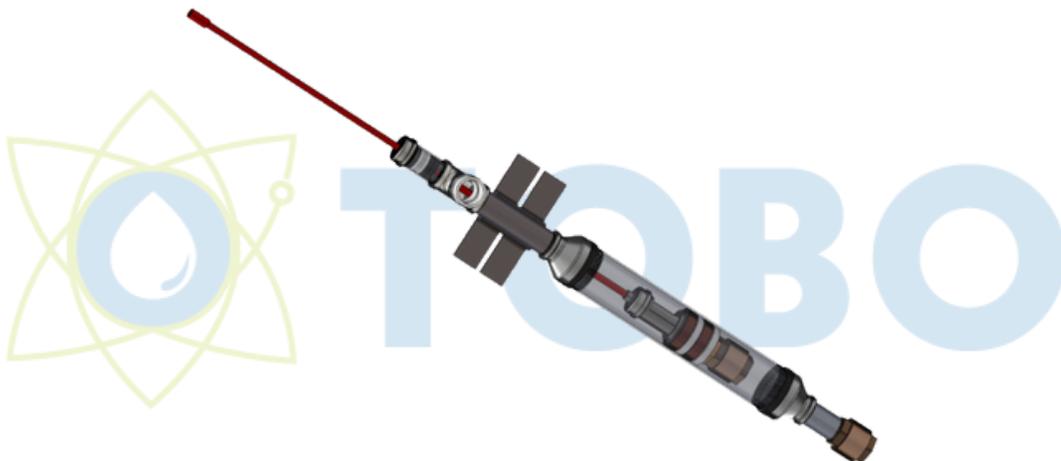
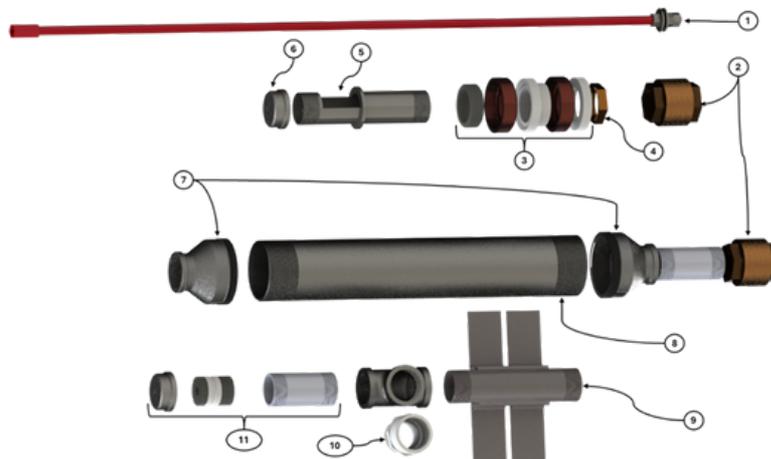


Figura 15. Partes de la bomba



Cuadro 5. Descripción de partes que la bomba

Ítems	Descripción
1	Varilla con chupa
2	Válvula Cheque
3	Sistema de chupas
4	Tuerca de conexión de bronce
5	Niple en acero inoxidable
6	Tapa de niple
7	Reducción de 3" a 1½"
8	Cilindro de 3" en acero inoxidable
9	Soporte de bomba
10	Unión en PVC para salida de agua
11	Sello múltiple

8.2.2. Sistema solar de extracción de agua

Para el sistema de extracción de agua subterránea, se ha seleccionado la bomba solar sumergible KOLOS4-60-150-11, una bomba de 1500W que opera con un voltaje de entrada de 110V DC y un rango de funcionamiento de 60 a 135V DC. Este modelo es capaz de extraer agua desde profundidades de hasta 180 metros, lo que la hace adecuada para pozos profundos, y tiene un caudal que varía según las condiciones de operación, alcanzando hasta 60 litros por minuto en su punto máximo. Diseñada para ser alimentada por paneles solares, esta bomba ofrece una operación sostenible y eficiente, ideal para áreas rurales sin acceso confiable a la red eléctrica



Figura 16. Referencia de la bomba sumergible solar KOLOS4-60-150-11



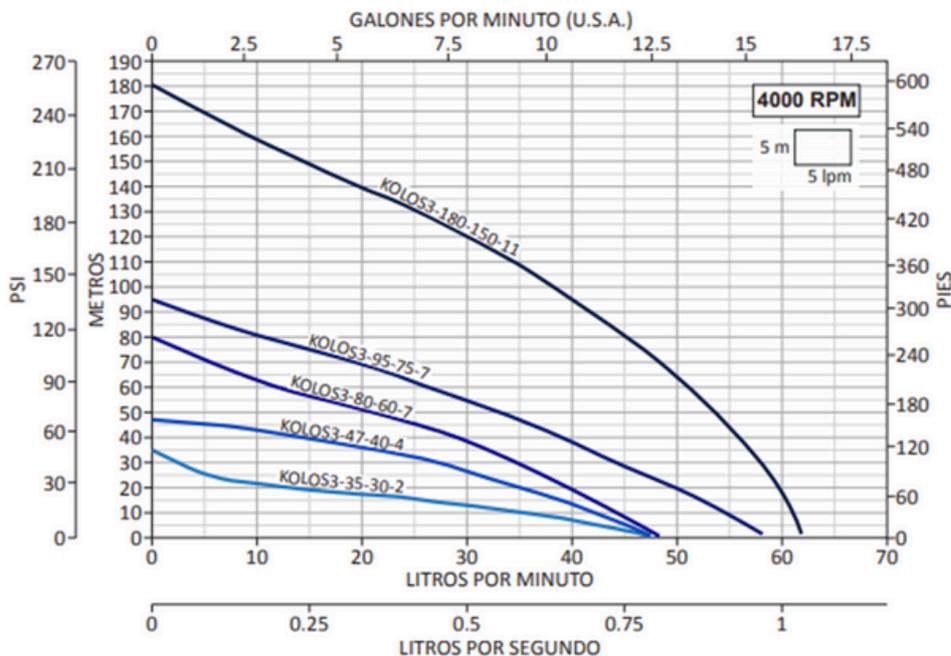
Cuadro 6. Características técnicas de la bomba solar sumergible KOLOS4-60-150-11

Características	Descripción
Tipo de producto	Motobomba solar sumergible para agua limpia
Marca	CONNERA
Incluye	Bomba, motor, controlador, 2 m de cable plano sumergible y kit de instalación.
Tipo de bomba	Bomba multietapas
Diámetro nominal	4"
Diámetro pozo	6"
Potencia solar	≥2,000 watts
Potencia de la motobomba	1,500 watts
Máximo voltaje de entrada	200 VCC
Voltaje de operación	110 VCC

**Cuadro 6. Características técnicas de la bomba solar sumergible
KOLOS4-60-150-11**

Características	Descripción
Rango de voltaje de entrada	60 – 135 VCC
Máxima corriente de operación del motor	13.9 A
Número de polos / RPM	4000
Clase de aislamiento	F
Protección IP	IP68 (Motor), y IP54 (controlador)
Material de la carcasa del motor	Acero inoxidable 304
Protecciones	Conexión inversa, trabajo en seco, pérdida de fase, bloqueo de motor, alto y bajo voltaje, sobrecorriente y alta temperatura en controlador.
Temperatura máxima del agua	35 °C
Descarga	2" Hembra
Tipo de conexión	Rosca – NPT
Material del cuerpo de la bomba	Acero inoxidable 304
Material de impulsor	Noryl
Material de la succión	Bronce
Material de la descarga	Bronce
Dimensiones	Motobomba: 625 x 96.52 mm Controlador: 260 x 205 x 95 mm
Peso	Motobomba: 8.9 kg Controlador: 2.1 kg

Figura 17. Curva de operación



8.3. FASE 3: DESARROLLO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO DE RIEGO.

Esta fase se desarrolló a partir de un enfoque organizado en subetapas, comenzando con la planificación del área de cultivo y la elección de tecnologías adecuadas para implementar un sistema automatizado de riego por goteo, eficiente y controlado por un PLC. A continuación, se describe cada subetapa del desarrollo del sistema:

8.3.1. Selección del área de cultivo y ubicación del pozo profundo.

El primer paso fue seleccionar un terreno adecuado para el cultivo, asegurando que cumpliera con las características necesarias para el desarrollo agrícola. Tras reuniones con el Comité de Ganaderos, se eligió una parcela de aproximadamente 1 hectárea en la finca El Chicoral, ubicada en Tilodirán, Casanare. Esta ubicación fue seleccionada estratégicamente, ya que en la zona suelen existir terrenos bajos propensos a inundaciones, lo que podría afectar negativamente al cultivo. Por esta razón, se priorizó un terreno que ofreciera mejores condiciones de drenaje y que fuera adecuado para la siembra del maíz, el cultivo seleccionado para este proyecto.

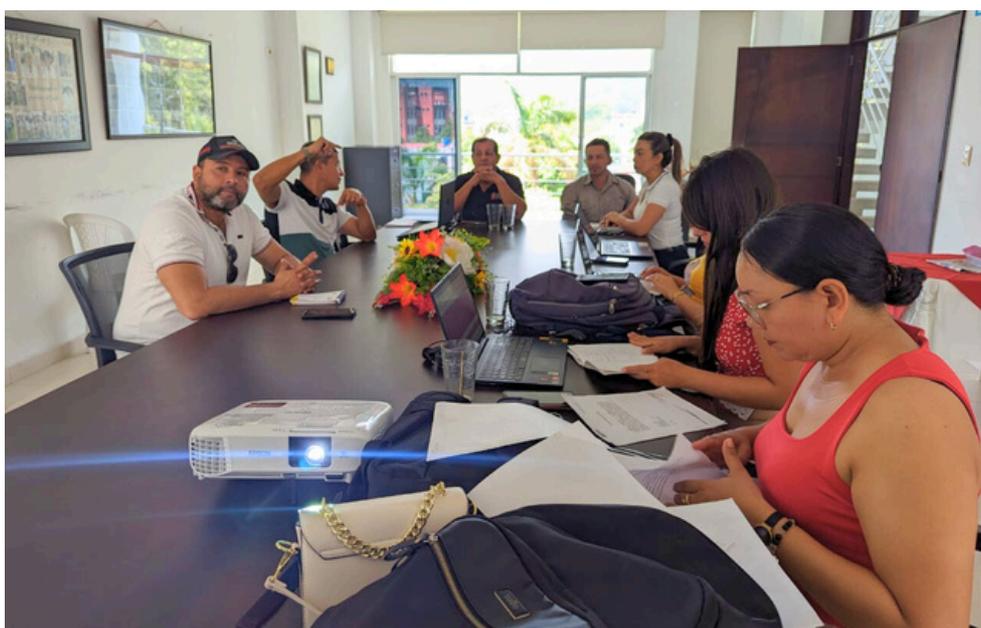
Figura 18. Selección de área de cultivo y pozo profundo



8.3.2. Elección del tipo de cultivo

La decisión sobre el tipo de cultivo se tomó en función de las opiniones del ingeniero agrónomo que participó en todas las fases del proyecto, así como de los resultados de las encuestas realizadas entre los ganaderos locales. Se eligió el maíz, debido a su importancia en la dieta bovina y su impacto positivo en la economía local. El maíz también fue uno de los cultivos más mencionados en las encuestas, lo que refleja su relevancia y popularidad en la región.

Figura 19. Mesa técnica para elección del terreno y tipo de cultivo de cultivo



8.3.3. Selección de semilla híbrida y manejo orgánico del cultivo

Para este proyecto, se seleccionó una semilla de maíz híbrido debido a sus ventajas en términos de alto rendimiento y resistencia a plagas y enfermedades comunes. Sin embargo, se evitó el uso de semillas transgénicas para no comprometer la biodiversidad del entorno. Al utilizar una semilla híbrida, se logró maximizar la productividad mientras se minimizaba el riesgo de que las alteraciones genéticas afectaran a los organismos que habitan en los ecosistemas cercanos.

Figura 20. Preparación del terreno para el cultivo



El manejo orgánico fue una prioridad para asegurar que el cultivo respetara los equilibrios ecológicos locales. Esto implicó reducir al mínimo el uso de pesticidas y fertilizantes químicos, promoviendo prácticas de cultivo que protegen el suelo y fomentan la salud del ecosistema. La implementación de fertirriego, integrada al sistema automatizado de riego, fue fundamental para la administración eficiente de los nutrientes, evitando el desperdicio y garantizando una distribución homogénea de fertilizantes.

8.3.4. Identificación y manejo de la biodiversidad local

Antes de la siembra, se llevó a cabo un estudio para identificar la biodiversidad presente en el área seleccionada. Estas labores fueron realizadas por parte de la mujer rural donde se registraron varios insectos, algunos de los cuales representaban una amenaza potencial para el cultivo, como las chizas de tierra (grub worms), que fueron identificadas como una plaga que podría afectar el crecimiento del maíz. Este proceso de identificación permitió desarrollar un plan de manejo adecuado para controlar estas plagas, evitando daños al cultivo sin recurrir a pesticidas agresivos.

Figura 21. Detección de chizas de tierra



Simultáneamente, se identificaron insectos beneficiosos para el cultivo, como la *Coccinella septempunctata* (mariquita), que actúa como depredador natural de plagas como los pulgones. Estos insectos aliados permitieron reducir la dependencia de plaguicidas químicos, favoreciendo un control biológico y promoviendo un equilibrio natural en el ecosistema. Esta estrategia de manejo biológico no solo protegió el maíz, sino que también preservó la biodiversidad local, alineándose con el enfoque sostenible del proyecto.

Figura 22. Proceso de identificación de biodiversidad por la mujer rural.



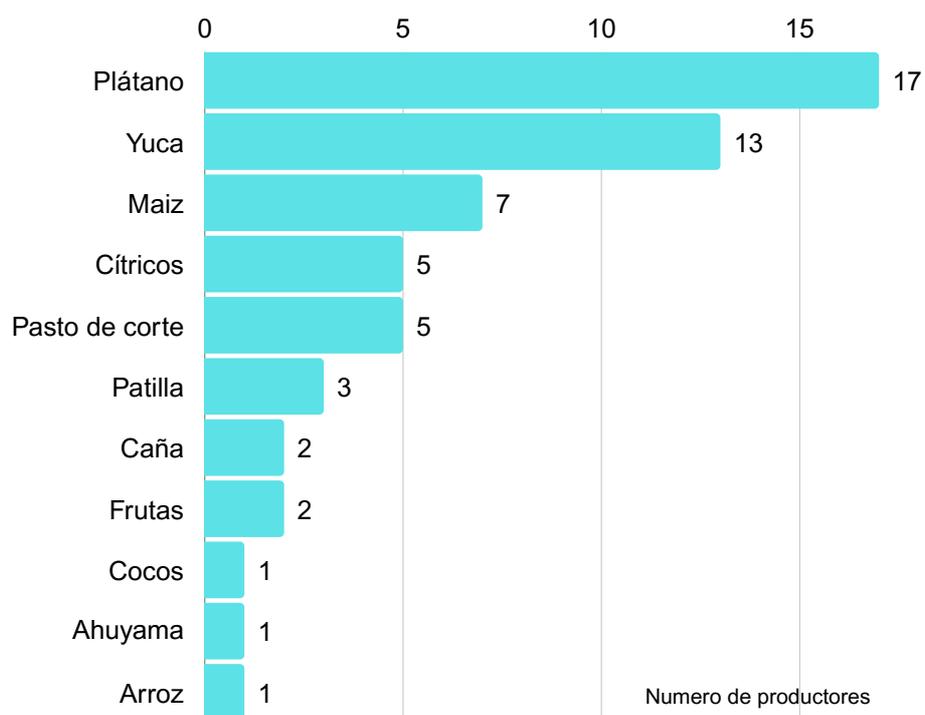
En el marco del proyecto, la mujer rural desempeñó un rol activo en tareas cruciales como la identificación de la biodiversidad local, el estudio de la pluviosidad y el análisis de la capacidad de drenaje en el área de cultivo. Estas labores, realizadas bajo la supervisión y guía de un agrónomo, fueron esenciales para establecer un diagnóstico preciso del terreno y adaptar el sistema de riego a las condiciones específicas del entorno. La participación de la mujer rural en estas actividades no solo fortaleció sus conocimientos técnicos, sino que también destacó su papel como conocedora del entorno ecológico local, contribuyendo a una gestión agrícola más sostenible y alineada con el entorno natural.

Figura 32. Análisis de insectos previos al cultivo



Figura 19. Resultados de la encuesta: Cultivos existentes en la finca

¿Qué cultivos agrícolas existen actualmente en su finca?



8.4. FASE 4: SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA EL SISTEMA DE RIEGO.

Para determinar las tecnologías adecuadas, el equipo técnico visitó un cultivo de maíz que utilizaba un sistema de riego por goteo manual, lo que brindó una visión más clara de los desafíos que enfrenta este tipo de cultivo. El primer problema encontrado fue la distancia entre el panel de control y el área de cultivo, aproximadamente 300 metros. Extender el cableado para los sensores y las electroválvulas incrementaría los costos de manera significativa.

La solución fue integrar tecnologías inalámbricas mediante el uso de módulos LoRa, que permiten una cobertura de hasta 1 kilómetro sin la necesidad de cableado adicional. Esta tecnología resolvió el problema de la distancia y redujo los costos previstos.



Figura 20. Análisis del diámetro de la raíz del maíz en su etapa de cosecha



Figura 21. Análisis del funcionamiento del sistema de riego por goteo



8.4.1 Implementación de sensores y módulos inalámbricos

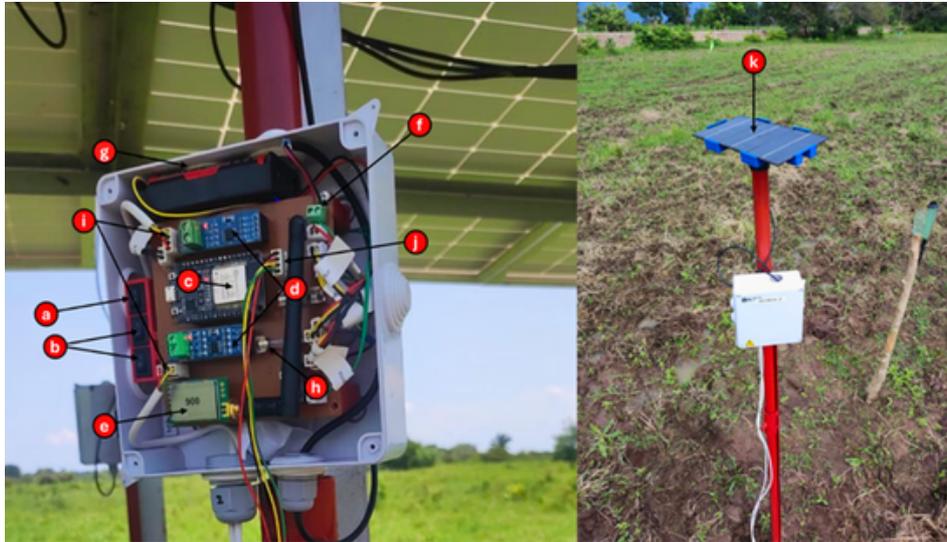
Se seleccionaron sensores de humedad del suelo con comunicación RS485, que son completamente sellados con resina, lo que les permite operar en exteriores sin sufrir daños. Estos sensores fueron conectados a un microcontrolador ESP32 mediante un convertidor RS485 a TTL, que a su vez se encargaba de enviar las lecturas de humedad a través de los módulos LoRa al receptor principal.

Figura 22. Sensor de humedad de suelo implementado



El sistema se diseñó para dividir el terreno en cuatro bloques de riego, permitiendo regar cada bloque por separado y garantizar un uso eficiente del agua almacenada en un tanque de 5000 litros. Cada bloque cuenta con dos sensores de humedad, lo que da un total de ocho sensores en todo el cultivo. Para garantizar la autosuficiencia de los módulos transmisores, se les equipó con paneles solares y baterías de litio

Figura 23. Módulo transmisor inalámbrico



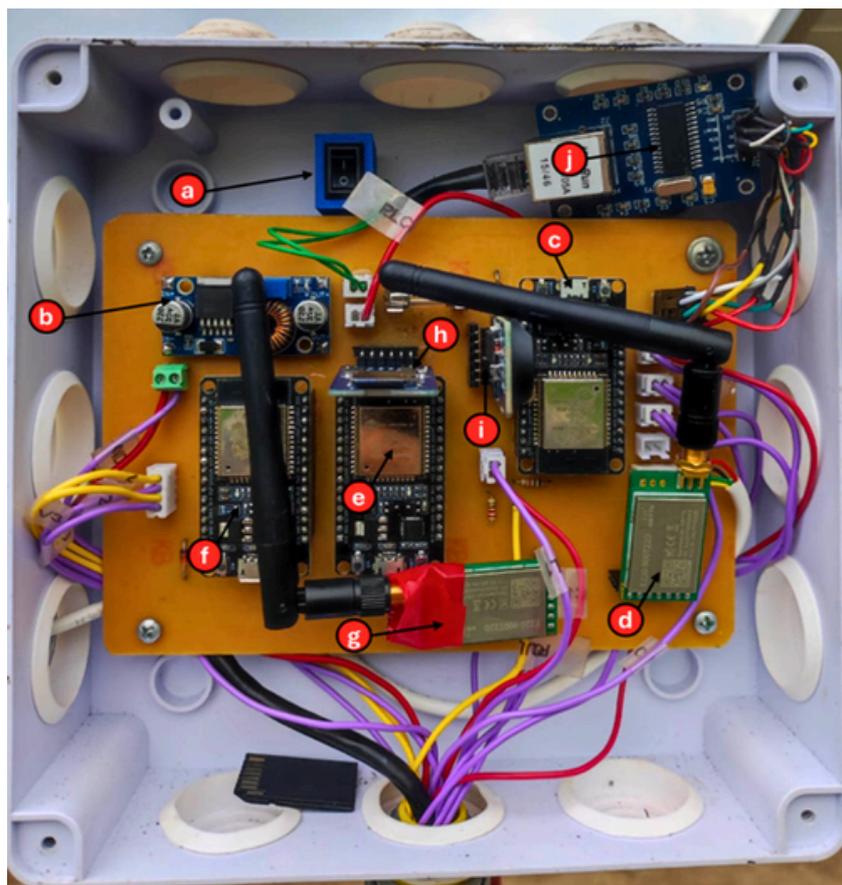
Cuadro 7. Partes del módulo transmisor de humedad

Ítems	Descripción
a	Interruptor para el panel solar
b	Interruptor del circuito general
c	Microcontrolador ESP32
d	Módulos RS485
e	Módulo LoRa
f	Entrada de paneles solares
g	Baterías LiPo 18650
h	Fusibles de protección
i	Conexión de sensores de humedad con salida RS485
j	Conexión de OLED 32x128
k	Arreglo de paneles solares

8.4.2. Control y gestión del riego

El módulo receptor, basado en ESP32, es responsable de recibir los datos de los módulos transmisores, que comunican las lecturas de los sensores de humedad distribuidos en el campo utilizando tecnología LoRa. Una vez recibidos, los datos se transmiten al PLC mediante el protocolo Modbus TCP/IP a través de un Módulo Ethernet (ENC28J60), lo que asegura una comunicación fiable y rápida con el sistema de control principal. El PLC procesa estos datos, calcula el promedio de la humedad en cada bloque de cultivo y lo compara con los umbrales mínimo y máximo establecidos en el sistema.

Figura 24. Módulo receptor



Cuadro 8. Partes del módulo receptor

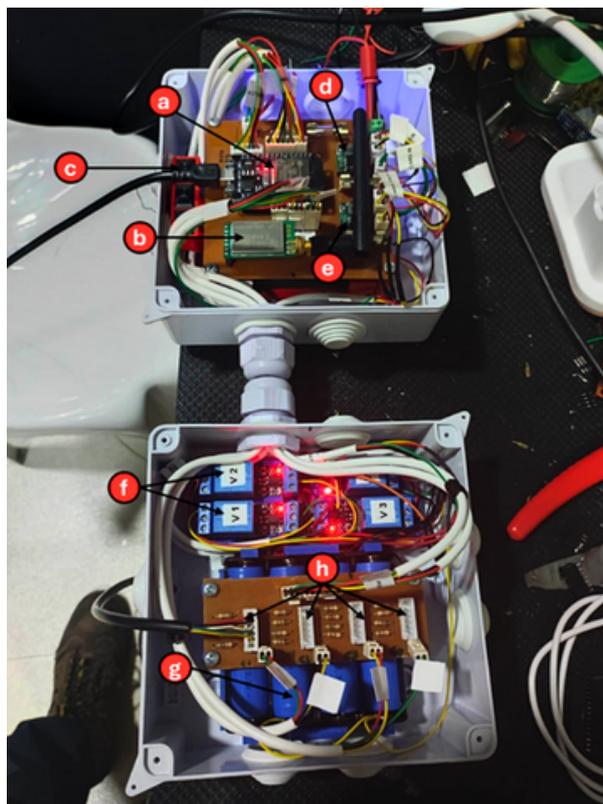
Ítems	Descripción
a	Interruptor de encendido
b	Regulador de 5V
c	Esp32 De comunicación al PLC
d	Módulo LoRa de comunicación con los nodos
e	Esp32 De Guardado de datos
f	Esp32 De control de electroválvulas
g	Módulo LoRa de comunicación con las electroválvulas
h	Módulo SD
i	Módulo RTC
j	Módulo Ethernet

Si la humedad de un bloque cae por debajo del umbral mínimo, el PLC activa la electroválvula inalámbrica correspondiente para iniciar el riego, asegurando que solo un bloque sea irrigado a la vez, lo que evita la sobrecarga del sistema de almacenamiento de agua. Las electroválvulas también están controladas de forma inalámbrica, utilizando la misma tecnología LoRa, lo que optimiza el control remoto y la operación sin la necesidad de cableado adicional.

Figura 25. Electroválvulas de control inalámbrico



Figura 26. Módulo de control de las electroválvulas

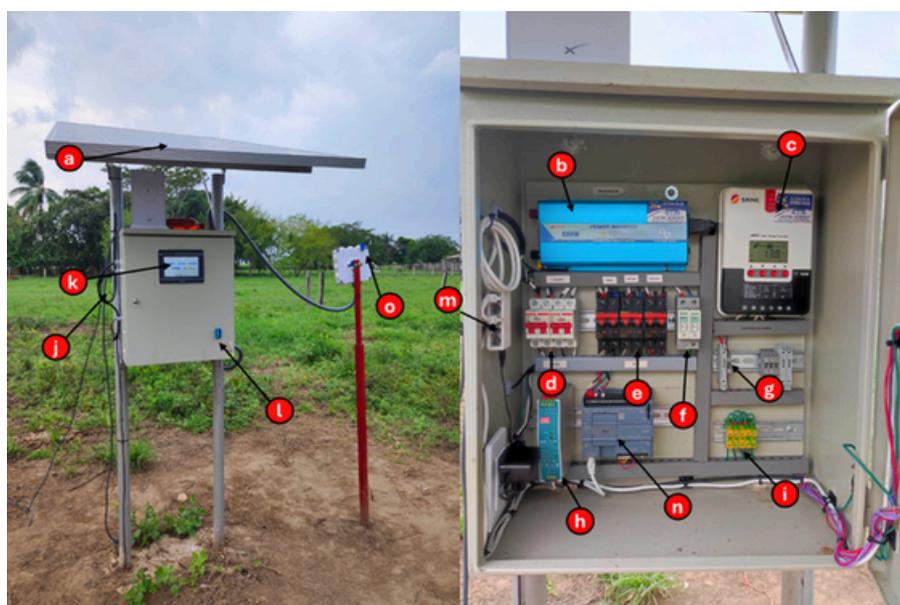


Cuadro 9. Partes del módulo controlador de las electroválvulas

Ítems	Descripción
a	ESP32
b	Modulo LoRa
c	Interruptores del circuito
d	Regulador de voltaje 6V para electroválvulas
e	Regulador de voltaje 5V para el circuito
f	Modulo RELÉ para energía de electroválvulas
g	Baterías LiPo 18650
h	Conexión de electroválvulas

El sistema cuenta con una identificación visual de los nodos activos, permitiendo al operador verificar el estado de cada uno de los módulos y asegurarse de que todos los sensores y válvulas estén funcionando correctamente. Además, el sistema tiene la capacidad de guardar todos los datos operativos y de sensores en una memoria microSD, lo que permite realizar análisis y monitoreo de largo plazo.

Figura 27. Panel principal de control.



Cuadro 10. Partes del sistema principal de control

Ítems	Descripción
a	Panel fotovoltaico de 470W
b	Inversor onda pura de 600W
c	Regulador de carga solar
d	Breaker AC de 6A
e	Breaker DC de 16A
f	Protector de sobre tensiones
g	Fusible de 500mA para módulo transmisor
h	Fuente de 24V DC para alimentación del PLC y HMI
i	Conexiones de puesta a Tierra
j	Batería de gel de 80Ah
k	HMI (Human-Machine Interfaz)
l	Switch Ethernet
m	PLC (Programmable Logic Controller)
n	Testigo de confirmación de comunicación con los nodos
o	Fotocelda

Otra característica importante es la integración de una fotocelda, que permite al sistema detener las operaciones cuando cae la noche y no hay suficiente luz solar. Esto garantiza que el tanque de almacenamiento no se vacíe durante la noche, manteniendo reservas de agua para el siguiente día. Todo el sistema es controlado a través de una HMI (Interfaz Hombre-Máquina), que permite el control manual y automático del riego, así como la visualización en tiempo real de los datos y la configuración de los parámetros del sistema

8.4.3 Implementación de un sistema de riego y fertirriego por goteo

El sistema de riego por goteo está diseñado para suministrar agua directamente a las raíces de las plantas de manera precisa y controlada. Consiste en una red de tuberías y emisores que distribuyen el agua de manera uniforme, asegurando que cada planta reciba la cantidad adecuada. Cada gotero está calibrado para liberar una cantidad exacta de agua, minimizando el desperdicio y maximizando la eficiencia.

Además, el sistema incorpora un sistema de fertirriego mediante un inyector Venturi. Este mecanismo permite la inyección controlada de fertilizantes líquidos directamente en la corriente de agua que se distribuye por el sistema de goteo. El sistema Venturi funciona creando una diferencia de presión que succiona el fertilizante y lo mezcla con el agua de riego, garantizando que los nutrientes lleguen de manera uniforme a todas las plantas, mejorando el rendimiento del cultivo.

Figura 28. Sistema de riego por goteo con fertirriego



Cuadro 11. Partes del sistema de riego

Ítems	Descripción
a	Tubería madre de 3"
b	Filtro de anillos de micropartículas
c	Manómetros
d	Sistema Venturi
e	Líneas de riego
f	Tuberías de reparto (Flautas)

Figura 29. Ejecución de fertirriego en el cultivo.



La aplicación de fertilizantes se realiza mediante un sistema de fertirriego, bajo la supervisión del ingeniero agrónomo, quien determina la dosificación adecuada de nutrientes para cada etapa del cultivo. En este proceso, además del fertilizante tradicional, se incorpora un hongo biocontrolador para el control biológico de plagas, lo que permite minimizar el uso de pesticidas y proteger el ecosistema local. Asimismo, el sistema de fertirriego permite la aplicación de nanofertilizantes de origen biológico, los cuales, gracias a su estructura a nivel nanométrico, potencian la absorción de nutrientes por las raíces, promoviendo un crecimiento más eficiente y saludable. Esta combinación de prácticas asegura una nutrición balanceada y un manejo sostenible de la sanidad vegetal en el cultivo.

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- En esta sección, se presentan los resultados obtenidos tras la implementación del sistema híbrido de extracción de agua y riego automatizado en el cultivo de maíz.

9.1. Análisis del Desempeño Agronómico del Cultivo.

A través de la recopilación y análisis de datos clave, se analiza el impacto del sistema en aspectos como el manejo de la humedad del suelo, el crecimiento del cultivo y la sostenibilidad de los recursos utilizados. Este análisis permite evaluar la efectividad del sistema y su contribución a una agricultura más eficiente y sostenible, ofreciendo además observaciones relevantes para optimizar su desempeño en futuras aplicaciones.

9.1.1 Estado Fitosanitario:

Para el control fitosanitario del cultivo de maíz, se implementó un enfoque biológico utilizando el hongo *Beauveria bassiana*, efectivo contra el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*). Este hongo parasita las larvas de la plaga al penetrar su cutícula y multiplicarse internamente, causando su muerte en pocos días. La aplicación de *Beauveria bassiana* se realizó en fases tempranas del cultivo, con el objetivo de controlar de forma preventiva la plaga y evitar el uso de insecticidas químicos, que suelen dejar residuos tóxicos y generar resistencia en los insectos.

La estrategia de control biológico no solo mantuvo el cultivo en un estado óptimo sin infestación crítica, sino que también preservó la biodiversidad del entorno y redujo costos operativos. El monitoreo constante del cultivo permitió verificar la efectividad del hongo y su impacto positivo en el ecosistema, al proteger tanto la fauna benéfica como el suelo. En general, el uso de *Beauveria bassiana* consolidó un manejo sostenible y seguro del cultivo, alineado con los principios de una agricultura ecológica y responsable.



9.1.2 Estado nutricional del cultivo

A partir del análisis de laboratorio de suelos, se desarrolló un programa de fertilización específico para el cultivo de maíz, complementado con un sistema de fertirriego y la aplicación de nanofertilizantes. Este programa cubrió las necesidades nutricionales del cultivo, asegurando un crecimiento saludable de hojas, tallos y raíces, con un desarrollo óptimo en todas las etapas. El sistema de fertirriego permitió una distribución eficiente y controlada de los nutrientes, garantizando su absorción en el momento adecuado y reduciendo pérdidas por escorrentía o evaporación.

Figura 30. Día 3 después de la germinación



Además, se emplearon nanofertilizantes, los cuales poseen una alta biodisponibilidad debido a su tamaño nanométrico, lo que facilita la penetración y absorción de los nutrientes a nivel celular. Estas propiedades contribuyeron a un aprovechamiento máximo de los nutrientes, mejorando la eficiencia del programa de fertilización y fortaleciendo la productividad y calidad del cultivo.



Figura 31. Día 46 después de la germinación



9.1.3. Comportamiento de la humedad de suelo con el sistema de riego por goteo automatizado

En esta sección se analiza el efecto del sistema de riego por goteo automatizado en el control de la humedad del suelo en el cultivo de maíz. La implementación de este sistema buscó garantizar un suministro constante y eficiente de agua, ajustándose a las necesidades específicas del cultivo en cada etapa de desarrollo. A través de sensores de humedad y un sistema de control programado, se logró una administración precisa del recurso hídrico, minimizando pérdidas y optimizando el uso de agua. Este análisis permite evaluar la efectividad del riego automatizado en la retención de humedad en el suelo, contribuyendo a un crecimiento estable y saludable del cultivo.



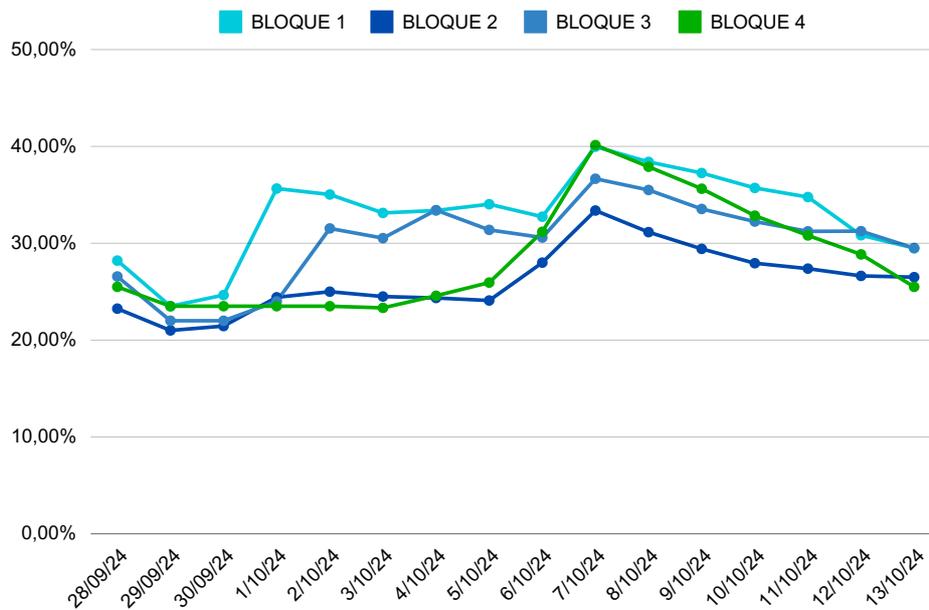
Figura 32. Segmentación por bloques del cultivo



Tal como se observa en la imagen anterior, el sistema de riego por goteo automatizado fue diseñado con una segmentación por bloques, dividiendo el terreno en cuatro áreas distintas. Esta segmentación permite un control preciso y ajustado de la humedad en cada zona del cultivo. Cada bloque está equipado con dos sensores de humedad, ubicados estratégicamente para proporcionar un promedio representativo del estado del suelo. Esta distribución de sensores y la autonomía energética de cada módulo, alimentado por paneles solares y baterías de litio, garantizan un monitoreo continuo, permitiendo que cada bloque reciba el riego necesario de acuerdo a sus necesidades específicas.



Figura 33. Gráfico promedio diario niveles de humedad



En la gráfica anterior, se muestra el promedio diario desde el 28 septiembre hasta el 12 de octubre de los niveles de humedad en el suelo para cada uno de los cuatro bloques, evidenciando el comportamiento del sistema de riego por goteo automatizado a lo largo de varios días. Como se observa, la humedad en cada bloque se mantuvo constantemente por encima del 20%, lo que refleja la eficiencia del sistema para conservar un nivel adecuado de humedad en el suelo. Esta estabilidad en los niveles de humedad asegura un ambiente propicio para el desarrollo del cultivo, minimizando el riesgo de estrés hídrico y contribuyendo a un crecimiento homogéneo en todas las áreas. La gráfica destaca cómo el sistema logró adaptarse a las necesidades del cultivo en cada bloque, manteniendo una consistencia en la humedad que favorece la salud y productividad del cultivo.



10. IMPACTO DEL PROYECTO Y CONSIDERACIONES FINALES

Para concluir, este proyecto representa un paso significativo hacia la implementación de prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles, integrando tecnología avanzada en el manejo de cultivos. La automatización de procesos como el riego y el fertirriego no solo optimiza el uso de recursos, sino que también facilita un monitoreo preciso de las condiciones del cultivo, promoviendo una producción agrícola más controlada y respetuosa con el medio ambiente. A través de este tipo de iniciativas, se fomenta el desarrollo rural, se fortalece la autonomía de las comunidades y se potencia el rol de la agricultura sostenible en el progreso de nuestra región. Este esfuerzo colectivo entre la comunidad, técnicos y especialistas agrícolas sienta las bases para un futuro en el que la tecnología y la agricultura trabajen de la mano para el beneficio de todos.



10.1 EVOLUCIÓN DEL CULTIVO BAJO EL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO

DÍA 0



DÍA 3



DÍA 18



DIA 30



DIA 46



11. CONCLUSIONES

- El sistema híbrido eólico-solar ha permitido una extracción de agua eficiente, reduciendo la dependencia de fuentes de energía convencionales y los costos operativos.
- La automatización del riego ha optimizado el uso del agua, manteniendo los niveles de humedad adecuados en todo el cultivo, evitando el estrés hídrico y el desperdicio.
- La implementación del sistema de fertirriego ha garantizado una distribución uniforme de los nutrientes, mejorando el crecimiento del maíz sin malgastar fertilizantes.
- El sistema ha mostrado un impacto positivo en la productividad agropecuaria, aumentando el rendimiento del maíz, que es clave para la alimentación bovina en la región.
- Se ha observado una reducción significativa en los costos operativos, tanto por la reducción en el consumo de energía como por el ahorro de agua y fertilizantes.
- El sistema ha sido adoptado de manera exitosa por la mujer rural, quien es responsable de su operación diaria, demostrando la facilidad de uso y accesibilidad de la tecnología.
- El uso de tecnología inalámbrica LoRa ha permitido gestionar grandes áreas de cultivo sin necesidad de extensos sistemas de cableado, lo que reduce costos y facilita el mantenimiento.
- El proyecto ha contribuido a la sostenibilidad ambiental, reduciendo la huella de carbono al depender de fuentes de energía renovable y disminuir el uso de pesticidas químicos mediante un manejo orgánico del cultivo.
- El modelo de riego automatizado y energías renovables tiene un gran potencial de ser replicado en otras regiones, ofreciendo una solución sostenible para la gestión hídrica y la productividad agrícola en áreas rurales.

12. REFERENCIAS

- Calderón Meza, L. T. (2021). Desarrollo de un sistema de control de riego e identificación de malezas mediante inteligencia artificial para cultivos de maíz en el municipio de Paz de Ariporo, Casanare [Trabajo de grado, Universidad de Pamplona]. Repositorio Institucional Universidad de Pamplona. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5517/1/Calder%c3%b3n_2021_TG.pdf
- Rodríguez Villegas, A. J. (2022). Sistema de riego por goteo y fertirriego automatizado con sensores de humedad y telemetría para maíz (Zea mays), Jicaral, Puntarenas [Trabajo de graduación, Universidad Técnica Nacional, Costa Rica]. Repositorio Institucional Universidad Técnica Nacional. <https://repositorio.utn.ac.cr/server/api/core/bitstreams/9edc0f4c-e1a6-42a3-bb2c-836567bef97d/content>
- Villalba Espitia, I. L., & Gastelbondo Flórez, S. J. (2019). Diseño de un sistema de riego automatizado para un cultivo de maíz haciendo uso de sensores de humedad, realizando transmisión inalámbrica de datos [Trabajo de grado, Universidad de San Buenaventura]. Repositorio Institucional Universidad de San Buenaventura. <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/171518.pdf>
- Chang Wong, L. I. (2020). Diseño de un sistema automatizado de riego por goteo para aumentar la producción de maíz en la Hacienda Durand [Tesis de pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio Institucional USAT. https://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/2799/1/TL_ChangWongLeonel.pdf
- Apaza Mamani, D. F., & La Torre Javier, I. J. (2020). Diseño de un sistema automatizado de riego por goteo utilizando energías renovables en el distrito de Paucarcolla, Puno [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional UNAP. http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/5970/Apaza_Mamani_Darwin_Fray_La_Torre_Javier_Irvin_Jhons.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- García Torres, M. F. (2014). Automatización de un sistema de riego mediante el uso de un controlador lógico programable (PLC) [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5304/1/UPS-GT000434.pdf>
- Castro, N. D., Chamorro, L. E., & Viteri, C. A. (2016). Una red de sensores inalámbricos para la automatización y control del riego localizado. *Tecnura*, 20(49), 127-138. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/7221/8871>



SISTEMAS RENOVABLES DE COLOMBIA SAS BIC



Ciencias



TOBO
www.tobo.com.co
Cra 50 # 25-10 Yopal
Tel: 3103339694

ISBN: 978-628-96677-0-7



9 786289 667707