

OPTIMIZACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO MEDIANTE SISTEMA AUTOMATIZADO DE RIEGO EN PASTOS DE LA HACIENDA SAN PABLO, GUANO

STUDY FOR THE OPTIMIZATION OF THE WATER RESOURCE WITH AN AUTOMATED IRRIGATION SYSTEM IN THE PASTURES OF THE SAN PABLO FARM IN THE GUANO CANTON

Cristian García Pumagualle ^{1*}

¹ Instituto de Investigaciones, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4341-408X>. Correo: alexis.garcia@epoch.edu.ec

Paula Abdo Peralta ²

² Magíster en Sistema de Información Geográfica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Recursos Naturales (FRN), Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9383-9168>. Correo: paula.abdo@epoch.edu.ec

Juan Guaranga Allauca ³

³ The grove school of engineering, City College of New York. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0189-216X>. Correo: jguaran000@citymail.cuny.edu

* Autor para correspondencia: cristian_alxgar@hotmail.com

Resumen

Este estudio presenta una solución sostenible para optimizar el uso del agua en la producción ganadera. Los resultados presentados muestran la eficiencia en el uso del agua y la mejora en el rendimiento de los pastos mediante la implementación de un sistema de riego automatizado en una hacienda ganadera en Ecuador. Se encontró que la implementación del sistema permitió una reducción del 18,80% en el consumo promedio diario de agua, lo que representa una significativa optimización del recurso hídrico. Además, se observó una mejora en la uniformidad de riego y en la capacidad de carga forrajera de los pastos. El sistema de riego automatizado permitió la recolección de datos de humedad en tiempo real y la visualización de estos de manera remota a través de una aplicación web. Además, los costos de implementación del sistema resultaron ser un 2,16% más económicos respecto al promedio de los sistemas comerciales convencionales, lo que demuestra su rentabilidad. En conclusión, este estudio demuestra que la implementación de un sistema de

riego automatizado puede mejorar significativamente la eficiencia en el uso del agua y la capacidad de carga forrajera de los pastos en una hacienda ganadera. Además, se destaca que este tipo de sistemas son rentables y pueden ser una solución sostenible para optimizar el uso del recurso hídrico en la producción ganadera.

Palabras clave: riego automático; optimización del recurso hídrico; sensores inalámbricos; reducción de consumo de agua; incremento de producción; rentabilidad

Abstract

This study presents a sustainable solution aimed at optimizing water use in livestock production. The results presented show the efficiency in water use and the improvement in pasture performance through the implementation of an automated irrigation system in a livestock farm in Ecuador. The implementation of the system led to a notable 18.80% reduction in daily average water consumption, which represents a significant optimization of the water resource. In addition, an improvement in irrigation uniformity and forage carrying capacity of the pastures was observed. The automated irrigation system facilitated the real-time collection of moisture data and its remote visualization through a web application. Furthermore, the implementation costs of the system proved to be 2.16% more economical compared to the average of conventional commercial systems, demonstrating its profitability. In conclusion, this study demonstrates that the adoption of an automated irrigation system can significantly improve water use efficiency and the carrying capacity of pastures in a livestock farm. Furthermore, it is highlighted that these types of systems are profitable and can be a sustainable solution to optimize water use in livestock production.

Keywords: automatic irrigation; optimization of water resources; wireless sensors; reduction of water consumption; increase in production; profitability

Fecha de recibido: 05/07/2023

Fecha de aceptado: 27/09/2023

Fecha de publicado: 17/10/2023

Introducción

Las políticas públicas implementadas en Ecuador han permitido el progreso de la industria ganadera, aumentando la producción y exportación, convirtiéndose en una fuente de empleo que ha fortalecido el desarrollo económico del sector. Sin embargo, el crecimiento acelerado ha generado problemas, ya que los ganaderos no cuentan con sistemas tecnificados para el mantenimiento y producción del hato lechero. El aumento de la productividad y la calidad de la leche está relacionado con la nutrición del ganado y el manejo adecuado del pasto, que exige cuidados específicos, como el riego. En la actualidad, el riego de las pasturas se realiza de forma manual en la mayoría de los ganaderos en la región Interandina, lo que conlleva un gran esfuerzo humano y pérdida de tiempo (Campaña et al., 2016; Paredes r & Perdomo, 2012).

El cuidado del pasto requiere atención especial en cuanto a su riego, ya que se necesita una cantidad precisa y adecuada de agua para que se desarrolle de manera óptima y garantice su calidad. Este riego se realiza de manera artificial mediante la aplicación de agua al suelo para proporcionar la humedad necesaria. Es importante que este proceso sea controlado y realizado con precisión para evitar problemas de crecimiento y calidad del pasto. La cantidad de agua utilizada debe ser medida y regulada adecuadamente para evitar el exceso o la escasez de humedad en el suelo, lo que puede afectar negativamente al pasto. Por lo tanto, se deben tomar precauciones especiales para garantizar el crecimiento saludable y sostenible del pasto. (División et al., 2020)

La hacienda San Pablo ha decidido implementar un sistema de riego automatizado para optimizar sus recursos y aumentar la eficiencia del consumo de agua en la producción de pasto, lo que reducirá las pérdidas de producción, facilitará el control y la optimización del recurso hídrico y mejorará la calidad del pasto. El sistema cuenta con una plataforma que presenta los datos en tiempo real de las condiciones del suelo a través de una red de sensores y un servidor web que le permite al propietario controlar el estado de los aspersores y pastos de manera remota desde su ordenador o dispositivo móvil.

El desarrollo involucra un estudio de eficiencia del sistema de riego que permita medir el gasto hídrico mediante técnicas como la huella hídrica, para posterior aplicar un diseño hidráulico y la correcta implementación de una red de sensores que permita el monitoreo y riego automático de las plantaciones de pasto según la etapa fenológica del área. Además, se realizará la evaluación de la eficiencia del sistema implementado y la optimización del recurso hídrico. (Martínez Naranjo, 2018)

En todo el mundo, la agricultura y la ganadería han sido una de las principales preocupaciones y objetos de estudio en el campo de los sistemas de riego. A lo largo del tiempo, estos han evolucionado en busca de una mayor eficiencia, sobre todo debido a la escasez de recursos hídricos en ciertas partes del planeta. A pesar de que el 75% del planeta está constituido por agua, solo un 2,5% es agua dulce, indispensable para la vida y el desarrollo del sector agroindustrial. (Cortes et al., 2017)

Las actividades agrícolas han sido un pilar fundamental en la economía nacional de Ecuador. Según datos de la encuesta de superficie y producción agropecuaria, cerca de 5,3 millones de hectáreas han sido destinadas a la producción agropecuaria, de las cuales el 45,1% ha sido dedicado al cultivo de pastos para ganado. La mayor concentración de producción ganadera se agrupa en la región Sierra (ESPAC, 2018).

Varios investigadores agrónomos y productores afirman que el sistema de riego de las pasturas es clave en el sistema productivo, especialmente en zonas secas. El riego agrícola es una práctica ancestral que se ha ido adaptando a la tecnología no solo para mitigar la falta de lluvia, sino también para incrementar la productividad del sistema. La propuesta consiste en utilizar tanto la tecnología hidráulica como la tecnología Open Source para crear un sistema de bajo costo y flexible que ayude en el desarrollo agrícola del ganadero. El sistema permitiría un mantenimiento más sencillo de las pasturas y un uso más eficiente de los recursos, lo que a su vez ayudaría a aumentar la rentabilidad del ganadero. (Allen et al., 2006; Canales & Martínez, 2010; Castro et al., 2017; López et al., 2020; Bejarano, 2017; Linares, 2012; Lugo et al., 2018; Bourdin Medici et al., 2015).

Materiales y métodos

Ubicación Geográfica y características del experimento

- La hacienda se localiza en la provincia de Chimborazo, en el cantón Guano, y se extiende sobre una superficie total de 15,49 hectáreas.
- El terreno está dividido en 12 parcelas, denominadas módulos, que se destinan a la producción de pasto para el hato lechero.
- El sistema de riego se basa en la fuerza de la gravedad y cuenta con un reservorio de agua con capacidad para 192 m³.
- Para el estudio de uniformidad de riego se analizó un solo módulo representativo.
- Para el estudio de eficiencia se analizó el consumo de agua de todos los módulos.

Materiales y equipos utilizados

Microcontrolador: El control del sistema se fundamenta en una tarjeta ESP8266, la cual posee un microcontrolador y transmisor que se encargará de captar y procesar la información de los sensores y la acción de los actuadores. El ESP8266 ha sido diseñado para consumir poca energía y cuenta con tres modos de operación: activo, suspensión y apagado, lo que le permite mantener un bajo consumo de aproximadamente 60µA en modo reposo. En cuanto a su módulo Wi-Fi, este incluye una comunicación integrada 802.11 b/g/n, los modos Wi-Fi Direct (P2P) y soft-Ap, y varios protocolos TCP/IP, lo que ayuda a mejorar la eficiencia del procesador al liberarlo de ciertas tareas. (Llamas, 2017).

Microprocesador: Se requiere registrar y monitorear datos en el sistema, por lo que se han considerado las SBC o minicomputadoras capaces de procesar y almacenar información. La Amlogic S905W X96E es una placa de tamaño reducido que integra todas las prestaciones de un ordenador convencional gracias a su procesador Amlogic S905W, que ejecuta el sistema operativo Android 7.1.2. Esta placa es versátil, accesible y se utiliza en proyectos de investigación y dispositivos multimedia. La Amlogic S905W necesita alimentación externa y es compatible con varios periféricos gracias a su conectividad USB, HDMI y Wi-Fi. Para el desarrollo del sistema se utiliza la SBC configurada como un servidor en una red inalámbrica, y el sistema operativo Android 7.1.2 viene instalado por defecto. (S905X / Products / Amlogic, 2022)

Plataforma IoT: En el proyecto se utilizó Node-RED para facilitar la comunicación con servicios en línea y reducir los tiempos de respuesta de hardware al mínimo. Node-RED es una herramienta de programación visual que permite crear flujos de trabajo de forma gráfica mediante nodos que representan diferentes funciones. En el proyecto, se crearon flujos de trabajo para integrar los datos recolectados por los sensores y actuar en consecuencia, como, por ejemplo, encender o apagar la bomba de agua. También se utilizó Node-RED para enviar notificaciones a los usuarios a través de aplicaciones de mensajería como Telegram, en caso de que se detecten problemas en el sistema. En general, Node-RED se utilizó para facilitar la interacción del sistema con diferentes servicios en línea y mejorar la eficiencia del sistema en general. (About : Node-RED - <https://nodered.org/about/>, 2022)

Tecnología Inalámbrica: Debido a la gran extensión de la propiedad, se decidió que la transmisión de datos debía ser inalámbrica, por lo que se optó por utilizar la tecnología Wi-Fi compatible con los elementos de

control y procesamiento. Esta tecnología resultó ser de bajo costo y su alcance se limitó a la capacidad de los dispositivos utilizados. Para el desarrollo del trabajo de titulación se utilizó un router TP-link con una antena RouterBoard Mikrotik 5SHPN, que permite una cobertura de hasta 30 km de distancia y alcanza todas las parcelas de la propiedad desde una altura de 4 metros. Este dispositivo inalámbrico de alta potencia tiene un diseño industrial robusto y sellado para alcanzar largas distancias, y utiliza un sistema operativo basado en Linux llamado RouterOS, de fácil configuración. También es compatible con una amplia gama de frecuencias. (*MikroTik Routers and Wireless - Products: Metal 5*, 2022)

Sensores: Se buscó implementar una estación meteorológica para prever las precipitaciones de agua y se evaluaron varias opciones de sensores disponibles en el mercado. Entre los sensores evaluados, se seleccionó el sensor DHT21 debido a su capacidad para medir la temperatura y humedad del ambiente y por ser totalmente compatible con la plataforma ESP8266. El DHT21 es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de precisión en un empaque resistente, que cuenta con un sensor capacitivo de humedad, un termistor y un microcontrolador que se encarga de realizar la conversión analógica a digital. Además, utiliza un protocolo de comunicación de un único hilo o cable, con una longitud máxima recomendada de 20 metros. (*Sensor de temperatura y humedad relativa DHT21 (AM2301)*, 2022)

Se seleccionó el Higrómetro Fc-28 para realizar la medición de humedad del suelo en la formación de una tubera de pasto, ya que es compatible con la plataforma NodeMCU y puede realizar una toma de datos a la altura de la raíz del pasto. El sensor utiliza una sonda para medir la variación de conductividad del suelo y su funcionamiento se basa en una relación proporcional entre humedad y voltaje, proporcionando una salida analógica en un rango de 0 a 1023. Además, este sensor es comúnmente utilizado en sistemas de riego para activar automáticamente el sistema de bombeo, lo que lo hace muy útil en este tipo de aplicaciones. (*Medir la humedad del suelo con Arduino y sensor FC-28 - <https://www.luisllamas.es/arduino-humedad-suelo-fc-28/>*, 2022)

Actuadores: El riego en las parcelas se regula de acuerdo con una variable de control digital, por lo que se necesita un actuador que cumpla con los requisitos necesarios. Para controlar el flujo de agua, se optó por la Electroválvula Aquanet 2", ya que es compatible con el tamaño de las tuberías utilizadas. Esta válvula electromecánica funciona a 24V y requiere de un regulador de voltaje adicional para su correcto funcionamiento. La electroválvula Aquanet 2" es una válvula solenoide que se abre y cierra mediante un campo magnético generado por una bobina en una base fija, y cuenta con un control manual de flujo y un actuador que opera con un consumo mínimo de corriente (*NETAFIM ECUADOR*, 2022).

Métodos y procedimientos utilizados para recolectar datos

Definición de la temperatura y humedad relativa como variables de control

Las variables de temperatura y humedad relativa son útiles para controlar el momento adecuado para regar los pastos, ya que la temperatura y la humedad relativa del ambiente influyen en la evaporación de la humedad del suelo y en la transpiración de las plantas. Cuando la temperatura y la humedad relativa son altas, la demanda de agua de las plantas aumenta y la evaporación del agua del suelo es más rápida, lo que indica que se debe regar antes de que las plantas sufran de estrés hídrico. Por otro lado, cuando la temperatura y la humedad relativa son bajas, la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas son más lentas, lo que indica que no es necesario regar en ese momento. Por lo tanto, el monitoreo de estas variables es

fundamental para asegurarse de que los pastos reciban la cantidad adecuada de agua en el momento adecuado para maximizar su crecimiento y calidad.

Tabla 1. Acciones de control del sistema con respecto a las variables temperatura y humedad relativa.

Temperatura	Humedad Relativa	Acción de Control
Menor a 20°C	Menor a 50%	No Regar
Menor a 20°C	50% - 70%	Regar
Menor a 20°C	Mayor a 70%	No Regar
20°C - 30°C	Menor a 50%	No Regar
20°C - 30°C	50% - 70%	Regar
20°C - 30°C	Mayor a 70%	No Regar
Mayor a 30°C	Menor a 50%	No Regar
Mayor a 30°C	50% - 70%	No Regar
Mayor a 30°C	Mayor a 70%	No Regar

La razón por la cual no se calibró el sensor DHT21 es que este tipo de sensor es un higrómetro digital que viene calibrado de fábrica, lo que significa que se ha comprobado su precisión antes de su venta. Además, este sensor tiene una resolución de humedad relativa de 0,1%, lo que lo hace muy preciso en su medición. Por lo tanto, no es necesario calibrar este sensor antes de su uso, ya que su precisión ha sido verificada y comprobada por el fabricante.

Definición de la humedad del suelo como variable de control

En el desarrollo del sistema se definió la humedad del suelo como una de las variables de control ya que nos dice la cantidad adecuada de agua que se debe regar. Se conocía que, por el tipo de suelo y textura de este, la humedad gravimétrica θ_g oscilaba entre 5% y 14%, donde la humedad gravimétrica es la relación entre la masa de agua y la masa de suelo seco.

Los datos obtenidos por el sensor fueron de tipo análogos y se escalaron en un rango de [0;100]%. La ecuación (1) expresa una conversión de humedad gravimétrica y humedad obtenida con los sensores.

$$\theta_{\%} = 5 \times (\theta_g) \quad (1)$$

Se estableció el valor máximo en un 70%, lo que indica que el suelo debe sentirse muy mojado, incluso por encima del punto de marchitez permanente, mientras que el valor mínimo se fijó en un 20%, que representa el límite de saturación del suelo. Además, se establecieron las acciones de control en la (Tabla 2).

Tabla 2. Acciones de control del sistema con respecto a la variable humedad del suelo.

Humedad gravimétrica (θ_g)	Humedad del suelo ($\theta_{\%}$)	Acción de Control
Menor a 8	Menor a 20	Riego inmediato
8 a 9,5	[20;30)	Riego programado
9,5 a 14	[30;70)	No necesita riego
14 o más	Mayor a 70	Suelo saturado

Procedimiento de calibración del sensor de humedad FC-28

El método de calibración del sensor fue por muestreo gravimétrico, esto consiste en tomar un determinado número de muestras para definir el perfil higrométrico del suelo, para esto se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se instaló un sensor de humedad FC-28 a la altura de la raíz para capturar datos analógicos de la conductividad eléctrica del suelo, estos datos fueron almacenados por el sistema con marcas de tiempo para su posterior análisis.
2. Se tomaron muestras en paralelo con las mismas marcas de tiempo que en el paso anterior para medir el porcentaje de humedad en un analizador de humedad por infrarrojos.
3. Los datos analógicos del sensor y del analizador de humedad fueron contrastados para determinar el patrón de una curva de calibración por medio de una prueba de uniformidad. (FIGURA1)
4. Como resultado de la prueba de uniformidad se obtuvo la ecuación de la curva de calibración para ingresar en la programación del flujo de adquisición de datos del sistema.

$$m=0.47555; y=0.47555 x+3.30222 \quad (2)$$

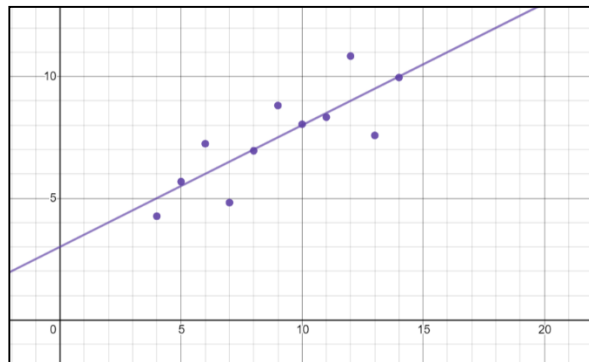


Figura 1. Gráfica de los resultados de la prueba de uniformidad.

Métodos y procedimientos para analizar los datos

Evaluación de eficiencia de la uniformidad del sistema de riego

Antes y después de instalar el sistema automatizado, se llevaron a cabo evaluaciones del sistema de riego por aspersión que incluyó un análisis de los aspersores y la verificación de posibles fugas en tuberías, conexiones y tomas de agua para asegurar la estabilidad de estas variables en ambos escenarios de prueba.

La uniformidad de riego se calculó mediante el uso de una ecuación conocida como coeficiente de uniformidad (CU) o coeficiente de distribución (CD). Este coeficiente compara la cantidad de agua aplicada en los puntos más húmedos de un área de riego con la cantidad de agua aplicada en los puntos más secos.

Para calcular el coeficiente de uniformidad se siguieron los siguientes pasos:

1. Se instaló una red de vasos pluviométricos en forma de tabla de ajedrez con una distancia de 3 metros entre cada uno y con el aspersor en el punto central.
2. Se regaron los pastos del módulo experimental durante 15 minutos y se registró la cantidad de agua que se recolectó en cada vaso.
3. Se calculó el promedio de la cantidad de agua recolectada en todos los vasos.
4. Se calculó la desviación estándar de la cantidad de agua recolectada en todos los vasos.
5. Se calculó el coeficiente de uniformidad utilizando la siguiente fórmula:

$$CU = (1 - (EUC / AU)) \times 100 \quad (2)$$

Donde EUC es la suma de las desviaciones al cuadrado de la cantidad de agua recolectada en cada vaso y AU es el promedio de la cantidad de agua recolectada en todos los vasos. El coeficiente de uniformidad se expresa en forma de porcentaje, y su valor debe ser lo más cercano posible a 100%, lo que indicaría que el riego es uniforme en toda el área cubierta por los vasos pluviométricos.

Evaluación de la eficiencia del consumo del sistema de riego

Se registró el consumo de agua para el mantenimiento del pasto en la Hacienda San Pablo durante el último trimestre antes de implementar la automatización. Dado que el reservorio de agua tiene una capacidad de 192m³, se midió el caudal de salida y se tomó el tiempo de riego para calcular el consumo diario en m³. Estos datos se compararon con las mediciones realizadas durante un mes de funcionamiento del sistema para contrastar los resultados. El mantenimiento del pasto requiere grandes cantidades de agua y el registro del consumo es esencial para evaluar la eficiencia del sistema.

Estudio de mercado

Para comparar los precios del sistema propuesto con los disponibles en el mercado, se llevó a cabo una investigación de precios en diferentes proveedores de sistemas de riego automatizados y se comparó con los costos estimados de los componentes del sistema propuesto. Se tuvieron en cuenta los costos de los sensores, actuadores, controladores y otros accesorios necesarios para el sistema. Además, se analizó la calidad y la garantía de los productos ofrecidos por cada proveedor para tomar una decisión informada. Con esta información, se pudo establecer una comparación detallada de los precios y elegir la opción más adecuada para el presupuesto disponible y las necesidades del proyecto.

Análisis del retorno de la inversión

La metodología para calcular el retorno de la inversión (ROI) implica el análisis de los costos y beneficios del proyecto a lo largo del tiempo. Para calcular el ROI, primero se debe determinar el costo total del proyecto, incluyendo el costo de la implementación del sistema, los costos de mantenimiento y los costos operativos. Luego, se deben identificar los beneficios asociados con la implementación del sistema, como la reducción de costos de agua y energía, la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, y otros beneficios tangibles e intangibles.

Una vez que se tienen los costos y beneficios identificados, se debe calcular el período de tiempo en el que se recuperará la inversión inicial. Esto se hace dividiendo el costo total del proyecto por los ahorros anuales

obtenidos a través de la implementación del sistema. El resultado es tiempo necesario para recuperar la inversión.

Resultados y discusión

Evaluación de eficiencia de la uniformidad del sistema de riego

En la (Tabla 3) se presentan los datos recolectados para evaluar la uniformidad del sistema de riego por aspersión, esta recolección se llevó a cabo sin automatización logrando un coeficiente de uniformidad de riego del 45 %.

Tabla 3. Volúmenes de agua recolectados de los vasos pluviométricos sin automatización expresados en mililitros.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
1	24	20	24	30	24	30	20	18	10	21
2	27	34	32	34	37	37	32	34	10	7
3	32	32	27	38	18	28	25	50	20	20
4	24	23	28	24	10	10	36	28	24	20
5	11	24	11	30	32	32	42	22	28	27
6	20	18	10	20	0	62	62	20	28	27
7	14	20	54	28	38	22	22	20	20	26
8	18	20	17	12	16	25	55	20	48	27
9	22	20	24	11	14	16	16	24	38	27
10	24	14	20	24	14	15	15	18	26	24
11	4	24	27	27	24	26	28	20	28	24

En la (Tabla 4) se presentan los datos recolectados para evaluar la uniformidad del sistema de riego por aspersión, esta recolección se llevó a cabo con automatización logrando un coeficiente de uniformidad de riego del 85 %.

Tabla 4. Volúmenes de agua recolectados de los vasos pluviométricos con automatización expresados en mililitros.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
1	83	77	74	78	70	70	71	82	77	77
2	81	84	85	73	75	73	76	85	75	83
3	81	82	72	85	85	85	72	81	73	77
4	78	80	76	77	72	81	73	77	77	70
5	85	71	71	84	81	75	84	79	72	73
6	77	78	76	71	0	70	81	80	74	79
7	71	83	73	80	81	72	85	80	85	80
8	80	70	76	82	76	85	80	72	72	74
9	70	84	71	79	84	85	80	81	85	72
10	78	78	77	83	76	80	79	79	77	83
11	73	72	74	70	72	77	76	76	76	83

En la (Tabla 5) se presentan los datos de los sensores de humedad relativa y temperatura registrados por el sensor DHT21 durante las mediciones realizadas para calcular los coeficientes de uniformidad de riego en las ambas pruebas.

Tabla 5. Datos de la variable Temperatura y Humedad Relativa asociados los Coeficientes de Uniformidad de Riego calculados.

Temperatura	Humedad Relativa	Coeficiente de Uniformidad de Riego	Tipo de Prueba
20-25 grados Celsius	>= 40%	85%	Con Automatización
13-15 grados Celsius	>= 60%	45%	Sin Automatización

Durante el experimento se observó una relación entre las condiciones climáticas y el coeficiente de uniformidad del riego. Se encontró que a medida que la temperatura aumentaba y la humedad relativa disminuía, la cantidad de viento presente en el ambiente era menor. Esta situación favoreció la retención de agua en el suelo, lo que permitió que el agua llegara a todas las áreas del terreno de manera más uniforme y se lograra un coeficiente de uniformidad de riego mayor. Estos resultados indican que es importante considerar no solo la temperatura y la humedad relativa, sino también la velocidad del viento al planificar y ejecutar la irrigación de los pastos.

Evaluación de la eficiencia del consumo del sistema de riego

En la (Tabla 6) se presentan los resultados de las mediciones del consumo de agua previo a la instalación del sistema automatizado en un período de tres meses.

Tabla 6. Registro del consumo de agua antes de la implementación del sistema automatizado.

Meses	Volumen	Consumo diario
Marzo	3227,9 m ³	104,1 m ³
Abril	2940 m ³	98 m ³
Mayo	3270,8 m ³	109 m ³

Después de instalar el sistema de riego automatizado, se realizó una evaluación del consumo de agua (Tabla 6) donde se encontraron resultados más bajos en cuanto al consumo de agua, los cuales se pueden apreciar en la tabla 7.

Tabla 7. Registro del consumo de agua después de la implementación del sistema automatizado.

Semana	Volumen	Consumo diario
Primera	591,7 m ³	84,5 m ³
Segunda	608,8 m ³	87 m ³
Tercera	557,4 m ³	79,6 m ³
Cuarta	600,3 m ³	85,8 m ³

La implementación del sistema de riego automatizado ha demostrado ser una solución eficiente para la optimización del recurso hídrico en la Hacienda. Antes de la implementación, se registraba un consumo promedio diario de 103.7 m³ de agua para el mantenimiento de los pastos. Sin embargo, después de la implementación, se logró reducir significativamente el consumo de agua, con un promedio diario de 84.2 m³, lo que representa una optimización del 18.8% del recurso hídrico. Estos resultados evidencian la importancia de la automatización en la gestión del riego y su potencial para mejorar la eficiencia del uso de agua en la producción agrícola.

Estudio de mercado

Actualmente, en el mercado nacional, es posible encontrar varias empresas que ofrecen servicios de venta e implementación de sistemas de riego por aspersión. Sin embargo, la oferta de sistemas automatizados para el riego es limitada y presenta precios variables según la empresa, tal como se puede apreciar en la (Tabla 8), en esta se detallan los nombres de las empresas, los productos y el precio de los sistemas para instalarse en los 12 módulos de la hacienda.

Tabla 8. Resultados del estudio de mercado de productos similares.

Empresa	Productos	Precio total
Casa del riego	Sistema de riego por aspersión, con controlador y panel arrancador, no incluye instalación	\$2250,00
Riego Ecuador	Kit de aspersión, bomba y accesorios. Adicionales aspersores por parcela, no incluye instalación	\$ 4433,93
Ecuaquimica	Kit de aspersión, no incluye instalación.	\$2439,04

Tabla 9. Análisis de costos de los sistemas disponibles en el mercado.

Costo de sistemas promedio	\$3040,99
Costo de instalación promedio	\$1833,50
Costo Total Promedio	\$4874,49

El costo de implementación del sistema de riego automatizado en la hacienda fue de 4769 dólares americanos, lo que resulta en un ahorro del 2,16% en comparación con el costo promedio de los sistemas comerciales convencionales que asciende a 4874,49 dólares americanos. Además, se destaca que en el mercado no existe un controlador y sistema que ofrezca un servicio de monitoreo y control en tiempo real embebido en un servidor web, por lo que no se ha podido contrastar el costo de un sistema similar. Estos resultados confirman que la implementación del sistema automatizado es una opción rentable y altamente aplicable en la Hacienda San Pablo.

Análisis del retorno de la inversión

Después de analizar los costos de inversión, es importante evaluar el retorno de inversión (ROI) para determinar el tiempo que se tardará en recuperar la inversión inicial. La (Tabla 10) muestra la información relevante para el análisis de ROI del sistema de riego automatizado. El costo de inversión total es de \$4769,00.

Se estima un ahorro anual de \$914,40 en el consumo de agua y \$216,00 en el consumo de energía, lo que representa un ahorro anual total de \$1130,40. Con estos datos, se estima que el tiempo de retorno de inversión (ROI) será de 4,22 años. Este resultado indica que la inversión en el sistema de riego automatizado será rentable a largo plazo.

Tabla 10. Información relevante para el análisis del ROI.

Descripción	Valor
Costo de inversión	\$4769,00
Ahorro anual de agua	\$914,40
Ahorro anual de energía	\$216,00
Ahorro anual total	\$1130,40
Tiempo de retorno de inversión (ROI)	4,22 años

Conclusiones

Después de llevar a cabo la implementación del sistema de riego automatizado en la Hacienda San Pablo, Guano, se obtuvieron resultados alentadores en cuanto a la optimización del recurso hídrico. El consumo promedio diario de agua disminuyó en un 18,80% después de la implementación del sistema, lo que se traduce en una importante reducción del impacto ambiental causado por el desperdicio de agua.

Se observó que la temperatura y la humedad relativa tienen un impacto significativo en la uniformidad del riego. Se encontró que una temperatura moderada de 20-25 grados Celsius y una humedad relativa de al menos el 60% son ideales para obtener un coeficiente de uniformidad de riego del 85%. Por otro lado, se determinó que un coeficiente de uniformidad de riego del 45% se puede lograr tolerando una temperatura un poco más alta de alrededor de 25-30 grados Celsius y una humedad relativa del 40% o más.

En cuanto a los costos de implementación del sistema, se encontró que es un producto rentable y más económico que los sistemas comerciales convencionales. Además, no se encontró en el mercado un controlador y sistema que ofrezca un servicio de monitoreo y control en tiempo real embebido en un servidor web, lo que hace que este sistema sea innovador y de gran aplicabilidad en la optimización del recurso hídrico.

En resumen, la implementación del sistema automatizado de riego en la Hacienda San Pablo, Guano, logró optimizar el uso del recurso hídrico y disminuir el impacto ambiental. Los resultados obtenidos son alentadores y muestran el potencial de este tipo de sistemas en la mejora de la eficiencia de los recursos en la agricultura. Además, el sistema desarrollado es innovador y rentable, lo que lo hace una herramienta valiosa para los productores agrícolas que buscan optimizar su uso del agua y reducir su impacto ambiental.

Referencias

About: Node-RED - <https://nodered.org/about/>. (s/f). Recuperado el 27 de marzo de 2023, de <https://nodered.org/about/>

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los

requerimientos de agua de los cultivos Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>

- Bourdin Medici, A. D., Franco Fraguas Souto, J. M., & Burgos Valiente, M. J. (2015). Respuesta física al riego suplementario y desarrollo de tecnologías de riego por melgas en pasturas artificiales. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/8789/1/3982bou.pdf>
- Campaña Cristian Marcelo Reinoso Campaña José Luis, P., Cristian Fabián Gallardo Molina, I., & Mirian Susana Pallasco Venegas, L. C. (2016). Análisis del sistema actual de riego y productividad para la implementación de un sistema automático de riego controlando los parámetros de temperatura y humedad mediante sistema HMI en la finca “San Nicolas” sector de Illuchi ubicado en el barrio Juan Pablo Segundo en el cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi en el periodo 2015-2016. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/3070>
- Canales, A. R., & Martínez, J. M. M. (2010). Automatización y telecontrol de sistemas de riego. 409. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=510055>
- Castro Popoca, M., Marín, Á., Miguel, F., Nolasco, Q., Chávez, T., & Sáenz, M. (s/f). Agricultura Técnica en México. Recuperado el 27 de marzo de 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60811120009>
- Cortes, V., Marco, C., & García, F. V. (s/f). Universidad Católica de Colombia Facultad de Ingeniería programa ingeniería electrónica y telecomunicaciones Bogotá 2020.
- De, C., De, P., Hacienda, L. A., Pablo, S., & Cantón Guano, D. (2019). Estudio para la optimización del recurso hídrico con un sistema automatizado de riego en los pastos de la Hacienda San Pablo del Cantón Guano. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13523>
- De, C., En, I., Computacionales, S., & De Titulación, P. (2019). Estudio de factibilidad para la implementación de una red de sensores ambientales inalámbricos para el riego de las áreas verdes del complejo universitario de la Universidad Estatal del Sur de Manabí. <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1542>
- De Educación, D., & De Posgrado, P. (s/f). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- División, A., División, P. P. P. R., De, R., & Cartilla, P. (s/f). División de Formación a Distancia Capacitación Campesina. Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.
- Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) 2018. (s/f).
- Enrique López Avendaño, J., Díaz Valdés, T., Watts Thorp, C., César Rodríguez, J., Emilio Castellanos Villegas, A., Partida Ruvalcaba, L., & de Jesús Velázquez Alcaraz, T. (s/f). Evapotranspiration and Crop Coefficient of Bell Pepper in Culiacan Valley, Mexico.
- Gusqui Bejarano, Y. A. (2017). Diseño de un prototipo de red WSN para el monitoreo del nivel de contaminación de CO₂ existente en el centro de la ciudad de Riobamba. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1064703>
- Linares Ojeda, R. del M. (2012). Proyecto de una explotación agrícola en el T.M. de Berja (Almería).

- Llamas, L. (2017). Conectar Arduino por WiFi con el módulo ESP8266 ESP01. <https://www.luisllamas.es/arduino-wifi-esp8266-esp01/>
- Lugo Espinosa, O., Quevedo Nolasco, A., Bauer Mengelberg, J. R., Del Valle Paniagua, D. H., Palacios Vélez, E., & Águila Marín, M. (2018). Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(5), 659–672. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V2I5.1616>
- Martínez Naranjo, H. F. (2018). Optimización del recurso hídrico en el proceso de riego de un cultivo hidropónico de fresa en la parroquia Huachi del cantón Ambato en base a sistemas embebidos open source. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9768>
- Medir la humedad del suelo con Arduino y sensor FC-28 - <https://www.luisllamas.es/arduino-humedad-suelo-fc-28/>. (s/f). Recuperado el 27 de marzo de 2023, de <https://www.luisllamas.es/arduino-humedad-suelo-fc-28/>
- MikroTik Routers and Wireless - Products: Metal 5. (s/f). Recuperado el 27 de marzo de 2023, de <https://mikrotik.com/product/RBMetal5SHPn>
- NETAFIM ECUADOR. (s/f). Recuperado el 27 de marzo de 2023, de <https://www.netafim.ec/>
- Paredes Heller, & Perdomo Héctor Orlando. (2012, agosto). Proyecto de establecimiento de un hato lechero en Villanueva, Cortez. 81–82. <https://www.unitec.edu/innovare/published/volume-1/number-1/114-proyecto-de-establecimiento-de-un-hato-lechero-en-villanueva-cortez.pdf>
- (PDF) manual de pastos - infoalpacas.com.pe/infoalpacas.com.pe/wp-content/uploads/2016/10/manual_pastos.pdf · Manual de manejo de pastos cultivados para zonas altoandinas presencia - DOKUMEN.TIPS. (s/f). Recuperado el 27 de marzo de 2023, de <https://dokumen.tips/documents/manual-de-pastos-manual-de-manejo-de-pastos-cultivados-para-zonas-altoandinas.html>
- S905X | Products | Amlogic. (s/f). Recuperado el 27 de marzo de 2023, de <https://www.amlogic.com/#Products/196/index.html>
- Sensor de temperatura y humedad relativa DHT21 (AM2301). (s/f). Recuperado el 27 de marzo de 2023, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/354-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht21-am2301.html>