

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Análisis comparativo del riego por goteo manual y
automatizado en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa*
Willd.) en Canaán, Ayacucho - 2025**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:

Bach. Luis Alberto RIVERA HUAMANCUSI

ASESOR:

Mtro. Carlos Augusto CASTAÑEDA ESQUEN

AYACUCHO - PERÚ

2026

DEDICATORIA

*A Dios, mi guía y sustento,
por ser el aliento detrás de cada
ecuación, la paz en cada duda,
y el propósito de este trabajo.*

*A mi familia, especialmente a mi madre,
Domitila Huamancusi, y a mi padre, Teodoro
Rivera, por ser mis cimientos y brindarme su
apoyo inquebrantable. A mis hermanos Víctor,
Judith, Vanesa, Katty, Miriam, Yoel y Ruth,
por su alegría y ánimo en los momentos
difíciles. Y especialmente a Analí, por su
cariño, sus palabras de aliento y por ser una
fuente constante de motivación e inspiración.*

AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, instituciones que me brindaron la oportunidad de formarme profesionalmente y fortalecer mis conocimientos y pensamiento crítico a lo largo de mi etapa universitaria.

Expreso un especial reconocimiento a mi asesor de tesis, Mtro. Carlos Augusto Castañeda Esquen, por su guía constante, dedicación y valioso acompañamiento durante el desarrollo de la presente investigación.

Del mismo modo, agradezco a los miembros del jurado de tesis, Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla e Ing. Eduardo Pacori Quispe, así como al presidente del jurado, Dr. Lurquin Marino Zambrano Ochoa, por sus observaciones, recomendaciones y aportes académicos que contribuyeron significativamente al fortalecimiento de este trabajo de investigación.

Asimismo, expreso mi gratitud al Centro Experimental Canaán, por las facilidades brindadas y el apoyo proporcionado para la ejecución de la presente investigación.

De igual manera, manifiesto mi agradecimiento a William Huacho Ichpas, por su apoyo y colaboración durante el desarrollo del presente estudio.

A cada uno de mis docentes, por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, así como por la paciencia y dedicación demostradas durante mi formación profesional.

A mis amigos y compañeros de universidad, por los momentos compartidos, el apoyo mutuo y las experiencias vividas que hicieron más significativa esta etapa académica.

Finalmente, agradezco de manera muy especial a mi familia y seres queridos, por ser el principal soporte de mi esfuerzo y perseverancia. Gracias por su amor, comprensión, confianza y apoyo incondicional en cada paso de este camino. Este logro también les pertenece, pues ha sido posible gracias a su constante motivación y acompañamiento.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	xiii
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	16
Objetivos	16
<i>Objetivo general</i>	<i>17</i>
<i>Objetivos específicos</i>	<i>17</i>
CAPÍTULO I	18
MARCO TEÓRICO	18
1.1. Antecedentes	18
1.1.1. Antecedentes internacionales	18
1.1.2. Antecedentes nacionales	18
1.1.3. Antecedentes locales	20
1.2. Bases teóricas	21
1.2.1. Cultivo de Quinoa	21
1.2.2. Internet de las Cosas (IoT)	29
1.2.3. Automatización de riego	30
1.2.4. Riego tecnificado	42
CAPÍTULO II	50
MATERIALES Y METODOLOGÍA	50
2.1. Aspectos metodológicos	50
2.2. Aspectos generales del proyecto	50
2.2.1. Ubicación	51
2.2.2. Vías de acceso	52
2.3. Población y muestra	56
2.4. Instrumentos	56
2.5. Materiales	57
2.6. Diseño de la investigación	59

2.7. Procedimientos.....	60
CAPÍTULO III.....	108
RESULTADOS Y DISCUSIONES	108
3.1. Rendimiento del grano de quinua bajo riego manual y automatizado.....	108
3.1.1. Manejo inicial de la quinua	108
3.1.2. Rendimiento del grano de quinua en el riego automático	111
3.1.3. Rendimiento del grano de quinua en el riego tradicional	112
3.1.4. Comparación de rendimiento del grano	112
3.2. Eficiencia en el uso del agua en sistemas de riego	114
3.3. Análisis financiero de VAN y TIR de los sistemas de riego en el cultivo de quinua.....	123
3.4. Discusión de resultados	142
3.4.1. Rendimiento de quinua bajo riego manual y automatizado.....	142
3.4.2. Eficiencia en el uso del agua en sistemas de riego.....	142
3.4.3. Análisis financiero de VAN y TIR de los sistemas de riego en el cultivo de quinua.....	143
CAPÍTULO IV.	146
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	146
4.1. Conclusiones.....	146
4.2. Recomendaciones.....	146
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
ANEXOS.....	151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Categorías y descripción del cultivar</i>	22
Tabla 2	<i>Parámetro y especificaciones del Microcontrolador ESP32 WROOM-32</i>	32
Tabla 3	<i>Parámetro y especificación del sensor de humedad y temperatura del suelo RS485</i>	33
Tabla 4	<i>Parámetro y especificación del sensor de temperatura y humedad relativa DHT21 (AM2301)</i>	35
Tabla 5	<i>Parámetro y especificación del sensor de flujo de agua YF-S201</i>	36
Tabla 6	<i>Parámetro y especificaciones de válvula solenoide 12VDC</i>	37
Tabla 7	<i>Parámetro y especificaciones del regulador de Voltaje XL4005</i>	38
Tabla 8	<i>Valores para caracterizar el coeficiente de uniformidad</i>	48
Tabla 9	<i>Vía de acceso de Plaza de Armas de Ayacucho a Centro Experimental Canaán UNSCH</i>	53
Tabla 10	<i>Temperatura máxima, media, mínima y balance hídrico de la campaña agrícola 2025-2026 según la Estación Meteorológica INIA - Ayacucho</i>	54
Tabla 11	<i>Diseño experimental</i>	59
Tabla 12	<i>Análisis físico de suelos</i>	63
Tabla 13	<i>Análisis químico de suelos</i>	63
Tabla 14	<i>Resultados de análisis de agua</i>	65
Tabla 15	<i>Valores de Kc por mes</i>	67
Tabla 16	<i>Valores de ETo por mes</i>	67
Tabla 17	<i>Valores calculados de Etc por etapa fenológica</i>	68
Tabla 18	<i>Datos de ambiente utilizados para modelamiento agronómico</i>	68
Tabla 19	<i>Valores utilizados respecto a riego</i>	69
Tabla 20	<i>Datos utilizados de suelos</i>	69
Tabla 21	<i>Modelamiento agronómico para etapa de germinación</i>	70
Tabla 22	<i>Modelamiento agronómico para etapa de emergencia</i>	70
Tabla 23	<i>Modelamiento agronómico para etapa de 2 hojas cotiledones</i>	70
Tabla 24	<i>Modelamiento agronómico para etapa de 2 hojas verdaderas</i>	70
Tabla 25	<i>Modelamiento agronómico para etapa de 4 hojas verdaderas</i>	71
Tabla 26	<i>Modelamiento agronómico para etapa de inicio de panojamiento</i>	71
Tabla 27	<i>Modelamiento agronómico para etapa de panojamiento</i>	71
Tabla 28	<i>Modelamiento agronómico para etapa de inicio de floración</i>	71
Tabla 29	<i>Modelamiento agronómico para etapa inicial de floración o antesis</i>	71

Tabla 30	<i>Modelamiento agronómico para etapa de floración o antesis</i>	72
Tabla 31	<i>Modelamiento agronómico para etapa de inicio de grano lechoso</i>	72
Tabla 32	<i>Modelamiento agronómico para etapa de fin de grano lechoso</i>	72
Tabla 33	<i>Modelamiento agronómico para etapa de grano pastoso</i>	72
Tabla 34	<i>Resultados de modelamiento hidráulico</i>	75
Tabla 35	<i>Perfil de carga de fuente</i>	80
Tabla 36	<i>Datos del sistema fotovoltaico</i>	81
Tabla 37	<i>Cálculo de coeficiente de uniformidad – parcela manual</i>	95
Tabla 38	<i>Cálculo de coeficiente de uniformidad – parcela automatizada</i>	97
Tabla 39	<i>Oferta de caudal Inicial real</i>	98
Tabla 40	<i>Monitoreo de fase fenológicas en el experimento para ambos sistemas</i>	108
Tabla 41	<i>Análisis morfológico del cultivo en el riego automático</i>	109
Tabla 42	<i>Análisis morfológico del cultivo en el riego tradicional</i>	110
Tabla 43	<i>Matriz Inferencial de Varianza (ANOVA) y Comparaciones de Tukey ($\alpha = 0.05$)</i>	111
Tabla 44	<i>Resultado de rendimiento por metro lineal en el riego automático con peso húmedo</i>	112
Tabla 45	<i>Resultados de muestras para el rendimiento en riego tradicional con peso húmedo</i>	112
Tabla 46	<i>Rendimiento de quinua con riego tradicional vs automatizado</i>	113
Tabla 47	<i>Análisis de rendimiento de grano del cultivo de quinua</i>	113
Tabla 48	<i>Datos meteorológicos más resaltantes de estación cercana</i>	114
Tabla 49	<i>Eficiencia en uso de agua para ambos sistemas</i>	122
Tabla 50	<i>Análisis comparativo en la eficiencia en el uso del agua en ambos sistemas</i>	122
Tabla 51	<i>Costos de mano de obra para riego tradicional</i>	123
Tabla 52	<i>Costos de mano de obra para riego automatizado</i>	124
Tabla 53	<i>Costos de mantenimiento para riego tradicional</i>	124
Tabla 54	<i>Costos de mantenimiento para riego automatizado</i>	125
Tabla 55	<i>Costos de instalación para ambos sistemas</i>	126
Tabla 56	<i>Otros costos de ambos sistemas</i>	130
Tabla 57	<i>Costos de servicio</i>	131
Tabla 58	<i>Consumo general de energía en los sistemas</i>	132
Tabla 59	<i>Cálculo de consumo de energía del controlador iot</i>	132

Tabla 60 <i>Cálculo de tarifa en un mes</i>	133
Tabla 61 <i>Consumo de electroválvula</i>	133
Tabla 62 <i>Cálculo de tarifa de la electroválvula</i>	134
Tabla 63 <i>Resumen de costo total anual para ambos sistemas</i>	134
Tabla 64 <i>costos de inversión inicial</i>	135
Tabla 65 <i>Factores de escalamiento utilizados para la estimación de costos a una hectárea</i>	135
Tabla 66 <i>Escalamiento de costos para una hectárea de cultivo de quinua mediante la aplicación de factores de escalamiento.</i>	137
Tabla 67 <i>Resumen de ingresos, costos y flujo neto anual por sistema de riego</i>	138
Tabla 68 <i>Tabla de flujo de caja económico</i>	139
Tabla 69 <i>Tabla de resultado del análisis financiero (VAN y TIR)</i>	141
Tabla 70 <i>Indicadores de Rentabilidad y Viabilidad Financiera Comparada</i>	142
Tabla 71 <i>Calibración del sensor de humedad del suelo</i>	165
Tabla 72 <i>Calibración del sensor de flujo de agua</i>	166

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Quinua Salcedo INIA</i>	22
Figura 2 <i>Fases fenológicas quinua Salcedo INIA</i>	23
Figura 3 <i>Internet de las Cosas</i>	29
Figura 4 <i>Esquema de automatización de riego por goteo</i>	30
Figura 5 <i>Microcontrolador ESP32 WROOM-32</i>	31
Figura 6 <i>Sensor de humedad y temperatura del suelo</i>	33
Figura 7 <i>Sensor de temperatura y humedad relativa DHT21 (AM2301)</i>	34
Figura 8 <i>Sensor de flujo de agua YF-S201</i>	35
Figura 9 <i>Válvula solenoide 12VDC</i>	36
Figura 10 <i>Regulador de Voltaje XL4005</i>	38
Figura 11 <i>Protocolo MQTT</i>	39
Figura 12 <i>Dashboard del Arduino IOT Review</i>	40
Figura 13 <i>Energía fotovoltaica</i>	41
Figura 14 <i>Componentes del sistema fotovoltaico</i>	42
Figura 15 <i>Riego por goteo</i>	43
Figura 16 <i>Componentes del riego por goteo</i>	43
Figura 17 <i>Perfil hídrico del suelo y manejo de riego</i>	46
Figura 18 <i>Evapotranspiración y coeficiente de cultivo</i>	49
Figura 19 <i>Ubicación satelital del área de proyecto</i>	51
Figura 20 <i>Ubicación política del área de proyecto</i>	52
Figura 21 <i>Croquis de ruta para la ubicación del proyecto</i>	53
Figura 22 <i>Temperatura máxima, mínima, media y balance hídrico de la campaña agrícola 2025-2026 según la Estación Meteorológica de INIA- Ayacucho.</i>	55
Figura 23 <i>Diagrama de flujo del procedimiento</i>	61
Figura 24 <i>Sistema hidráulico de reservorio</i>	62
Figura 25 <i>Toma de muestras de suelo en las dos parcelas experimentales</i>	62
Figura 26 <i>Toma de muestra de agua</i>	64
Figura 27 <i>Arado y rastrado mecánico</i>	66
Figura 28 <i>Esquema de diseño hidráulico</i>	73
Figura 29 <i>Esquema de modelamiento hidráulico en WATERCAD V.24</i>	74
Figura 30 <i>Plano del sistema de riego</i>	77

Figura 31	<i>Corte A-A del plano de sistema de riego</i>	78
Figura 32	<i>Detalle sistema de riego</i>	78
Figura 33	<i>Delimitación y distribución de las parcelas</i>	79
Figura 34	<i>Implementación de sistema de riego</i>	80
Figura 35	<i>Instalación de panel fotovoltaico y caja de control eléctrico</i>	82
Figura 36	<i>Diagrama de conexiones</i>	83
Figura 37	<i>Placa de diseño para proyecto IoT (Internet de las Cosas)</i>	84
Figura 38	<i>Diagrama de fuente de alimentación</i>	84
Figura 39	<i>Diagrama de microcontrolador</i>	85
Figura 40	<i>Diagrama de módulo RS485</i>	85
Figura 41	<i>Diagrama de conector</i>	86
Figura 42	<i>Diagrama de salida</i>	86
Figura 43	<i>Topología de automatización</i>	87
Figura 44	<i>Lectura, procesamiento y escritura de programación</i>	87
Figura 45	<i>Diagrama de flujo del Sketch (código)</i>	88
Figura 46	<i>Códigos para la nube</i>	89
Figura 47	<i>Pruebas iniciales del Interfaz de monitoreo IoT Arduino Cloud</i>	90
Figura 48	<i>Calibración del sensor de humedad</i>	91
Figura 49	<i>Calibración del sensor de flujo</i>	92
Figura 50	<i>Verificación eléctrica del sistema de riego</i>	93
Figura 51	<i>Sistema de riego manual y automático instalado</i>	94
Figura 52	<i>Esquema del coeficiente de uniformidad – parcela manual</i>	96
Figura 53	<i>Esquema del coeficiente de uniformidad – parcela automatizada</i>	98
Figura 54	<i>Toma de datos para cálculo de coeficiente de uniformidad</i>	99
Figura 55	<i>Monitoreo fitosanitario del cultivo</i>	101
Figura 56	<i>Medición de del diámetro de panoja en el cultivo de quinua</i>	102
Figura 57	<i>Muestras de grano de quinua etiquetadas para la evaluación de rendimiento</i>	103
Figura 58	<i>Determinación del peso y registro de datos del grano en laboratorio</i>	104
Figura 59	<i>Proceso de secado de las muestras de grano de quinua en estufa de laboratorio</i>	104
Figura 60	<i>Análisis morfológico del cultivo por tratamiento de riego</i>	111
Figura 61	<i>Comparación del rendimiento de grano de quinua entre ambos sistemas</i>	113
Figura 62	<i>Datos de sensores de ambiente - Temperatura y humedad</i>	118

Figura 63 <i>Datos de sensores de suelo - Temperatura y humedad</i>	119
Figura 64 <i>Datos de flujómetro en panel de control - Sistema automatizado.....</i>	119
Figura 65 <i>Última toma de datos en sensores y flujómetro para sistema automatizado</i>	120
Figura 66 <i>Datos de flujómetro en panel de control - Sistema tradicional.....</i>	121
Figura 67 <i>Última toma de datos en sensores y flujómetro para sistema tradicional ..</i>	121
Figura 68 <i>Comparación de eficiencia del uso de agua entre ambos sistemas</i>	122

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexos A	Panel fotografico.....	152
Anexos B	Plano de ubicación y localización.....	162
Anexos C	Calibración de sensores de humedad y flujo de agua.....	164
Anexos D	Estado fenológico del cultivo y actividad realizadas.....	167
Anexos E	Resultado de análisis de laboratorio.....	174
Anexos F	Ficha técnica del sensor de humedad	179
Anexos G	Monitoreo del riego manual y automatizado	186
Anexos H	Recibo de luz.....	198
Anexos I	Informe de entrega de datos climatológicos	200
Anexos J	Sketch (código) del sistema	203
Anexos K	Resultados principales de modelamiento agronómico	212

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

Sigla	Definición
ESP32	: Microcontrolador ESP32 WROOM-32
IoT	: Internet de las Cosas
INIA	: Instituto Nacional de Innovación Agraria
VAN	: Valor Actual Neto
TIR	: Tasa Interna de Retorno
ETo	: Evapotranspiración de referencia
RS485	: Protocolo de comunicación serial diferencial
CU	: Coeficiente de Uniformidad
MQTT	: Protocolo de transporte de telemetría de cola de mensajes
DHT	: Sensor digital de humedad y temperatura
AWG	: Calibre de cable americano
DC	: Corriente Continua / Directa
HDPE	: Polietileno de Alta Densidad
OLED	: Diodo orgánico de emisión de luz
FAO	: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Wi-Fi	: Fidelidad inalámbrica (Red inalámbrica)
PVC	: Policloruro de Vinilo
EEPROM	: Memoria de solo lectura programable y borrrable eléctricamente
PEN	: Sol peruano (Moneda oficial del Perú)
DDS	: Días Después de la Siembra
BLE	: Bluetooth de Baja Energía
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
UTM	: Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator
WGS	: Sistema Geodésico Mundial

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar comparativamente la eficiencia del riego por goteo manual y automatizado mediante energía fotovoltaica en el cultivo de quinua en el Centro Experimental Canaán, Ayacucho. La metodología consistió en un diseño experimental de enfoque cuantitativo, evaluando el rendimiento de grano de la variedad Salcedo INIA, la eficiencia en el uso del agua y la rentabilidad financiera de ambos sistemas de riego. Los resultados mostraron que el sistema automatizado alcanzó un rendimiento de 5,670.83 kg/ha, superior a los 5,412.50 kg/ha obtenidos con el sistema manual, representando un incremento del 4.77 %. Asimismo, la eficiencia en el uso del agua fue de 1.21 kg/m³ en el sistema automatizado y de 0.88 kg/m³ en el manual, evidenciando una mejora del 37.5 %, con volúmenes de agua aplicados de 4,677.5 m³/ha y 6,174.4 m³/ha, respectivamente. En el análisis financiero, aunque el sistema automatizado requirió una mayor inversión inicial de S/ 49,223 frente a S/ 45,216 del sistema manual, presentó mejores indicadores financieros, alcanzando un Valor Actual Neto (VAN) de S/ 198,123 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 131 %, mientras que el sistema manual obtuvo un VAN de S/ 132,580 y una TIR de 101 %. En conclusión, el riego automatizado mediante energía fotovoltaica mejoró el rendimiento del grano de cultivo y la eficiencia hídrica, constituyéndose como la alternativa más rentable y sostenible a mediano y largo plazo para la producción de quinua.

Palabras clave: riego por goteo, automatización, energía fotovoltaica, eficiencia hídrica, rendimiento de grano, análisis financiero.

ABSTRACT

The objective of this study was to comparatively analyze the efficiency of manual and automated drip irrigation using photovoltaic energy in quinoa cultivation at the Canaán Experimental Center, Ayacucho. The methodology consisted of an experimental design with a quantitative approach, evaluating the grain yield of the Salcedo INIA variety, water use efficiency, and the financial profitability of both irrigation systems. The results showed that the automated system achieved a yield of 5,670.83 kg/ha, which was superior to the 5,412.50 kg/ha obtained with the manual system, representing an increase of 4.77%. Furthermore, water use efficiency was 1.21 kg/m³ in the automated system and 0.88 kg/m³ in the manual system, demonstrating a 37.5% improvement, with applied water volumes of 4,677.5 m³/ha and 6,174.4 m³/ha, respectively. In the financial analysis, although the automated system required a higher initial investment of S/ 49,223 compared to S/ 45,216 for the manual system, it presented better financial indicators, reaching a Net Present Value (NPV) of S/ 198,123 and an Internal Rate of Return (IRR) of 131%, while the manual system obtained an NPV of S/ 132,580 and an IRR of 101%. In conclusion, automated irrigation using photovoltaic energy improved crop grain yield and water efficiency, proving to be the most profitable and sustainable alternative in the medium and long term for quinoa production.

Keywords: drip irrigation, irrigation automation, photovoltaic energy, water use efficiency, grain yield, financial analysis.

INTRODUCCIÓN

La agricultura consume alrededor del 85% del agua dulce disponible a nivel mundial, y se prevé que este porcentaje continúe siendo predominante debido al incremento de la población y a la mayor demanda de alimentos. Por ello, resulta necesario implementar nuevas estrategias que permitan aprovechar este recurso hídrico de forma más responsable (Sushanth y Sujatha, 2018).

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo de gran importancia en el ámbito agrícola debido a su alto valor nutricional y su capacidad de adaptación a diferentes condiciones agroecológicas (Ccoyllar et al., 2021). Sin embargo, su rendimiento puede verse afectado por la escasez y la ineficiencia en el uso del agua, especialmente en zonas áridas o semiáridas como la región de Ayacucho (Tineo et al., 2021).

Los sistemas de riego tradicionales dependen de un operador para suministrar agua a los cultivos; sin embargo, presentan la desventaja de que no permiten determinar con precisión cuándo la planta realmente necesita riego y, además, demandan un alto consumo de mano de obra para su funcionamiento (Rajendrakumar et al., 2018).

En cambio, los sistemas de riego automatizados aplican estrategias clave para optimizar el uso del agua y disminuir la necesidad de trabajo manual. Por ello, según (Heble et al., 2018), es fundamental que la implementación de estas tecnologías sea de bajo costo, de modo que resulten accesibles para los agricultores.

En este contexto, el centro experimental de Canaán, en Ayacucho, se presenta como un escenario adecuado para hacer una comparativa al implementar el riego por goteo automatizado y riego manual.

La implementación de tecnologías que combinen el uso de energía solar y la automatización del riego por goteo tiene el potencial de reducir el consumo de agua y aumentar la eficiencia energética, aspectos críticos en regiones donde estos recursos son limitados (Valverde et al., 2022).

En este sentido, la automatización del riego por goteo mediante energía fotovoltaica representa una alternativa sostenible y eficiente frente a los métodos tradicionales de riego, al optimizar el uso del agua y reducir la dependencia de fuentes energéticas convencionales. Por ello, la presente investigación tiene como finalidad analizar comparativamente el riego por goteo con control manual y automatizado mediante energía fotovoltaica en el cultivo de quinua, evaluando el rendimiento del

cultivo, la eficiencia hídrica y el análisis financiero en el Centro Experimental Canaán, Ayacucho. Asimismo, busca promover el uso de energías renovables y tecnologías innovadoras en el sector agrícola, contribuyendo al fortalecimiento de la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas de producción en Ayacucho y en otras regiones con características similares.

Objetivos

Objetivo general

Analizar comparativamente el riego por goteo con control manual y automatizado mediante energía fotovoltaica en el cultivo de quinua, evaluando el rendimiento, la eficiencia hídrica y el análisis financiero en el Centro Experimental Canaán, Ayacucho.

Objetivos específicos

- Comparar el rendimiento de grano de la quinua bajo riego por goteo manual y automatizado.
- Determinar la eficiencia en el uso del agua en ambos sistemas de riego.
- Realizar un análisis financiero de VAN y TIR de los sistemas de riego en el cultivo de quinua.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Antecedentes internacionales

Bustamente y Chugá (2022) , en su proyecto titulado “Diseño e implementación de un sistema de riego inteligente y monitoreo de variables edafológicas y meteorológicas activado por IOT”, tuvo como objetivo desarrollar un prototipo capaz de determinar el estrés hídrico y establecer los tiempos de irrigación de forma eficiente. La metodología consistió en la integración de sensores de humedad y temperatura que recopilaban datos para alimentar un sistema en lazo cerrado, gestionados por un módulo central que transmitió la información mediante protocolos inalámbricos hacia una aplicación en la nube, desarrollada en ThingSpeak, donde el usuario pudo visualizar en tiempo real las variables, almacenar los registros, descargar datos para análisis y, además, activar o desactivar manualmente el riego; el sistema incluyó también un tanque de almacenamiento de agua equipado con dos sensores de nivel para monitoreo constante. Los resultados mostraron que el cultivo bajo riego inteligente obtuvo un desempeño superior frente al riego tradicional, validado con el uso de variables estadísticas y alcanzando un incremento aproximado del 54 % en productividad y eficiencia en el aprovechamiento de los recursos. En conclusión, la implementación del sistema IoT optimizó la gestión del agua en agricultura urbana, contribuyendo a un uso más sostenible del recurso hídrico y a un mejor rendimiento de los cultivos.

1.1.2. Antecedentes nacionales

Acero (2021), en su investigación titulado: “Implementación de un sistema de Internet de las Cosas para optimizar la gestión del agua en la agricultura de la región Tacna” tuvo como objetivo diseñar un sistema autónomo capaz de mejorar la eficiencia del riego y la gestión del recurso hídrico mediante la aplicación de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) integradas con un sistema de control. La metodología consistió en el desarrollo de un sistema inteligente, denominado Damla, aplicado a un terreno de cultivo tecnificado de 3,535 m² con riego por goteo, conectado a un reservorio de 600,000 litros de agua, en el cual se comparó el desempeño del riego tradicional manual frente al riego controlado y monitoreado por IoT; el sistema permitió la activación automática del riego en diferentes escalas de tiempo, así como la recopilación y análisis de datos en tiempo real para la toma de decisiones. Los resultados evidenciaron que el uso del sistema IoT optimizó el consumo del recurso hídrico en un 21.25 % en

comparación con el riego manual, además de generar un ahorro indirecto de energía al disminuir el tiempo de uso de las bombas de agua. En conclusión, la implementación de un sistema de agricultura inteligente basado en IoT no solo mejora significativamente la eficiencia en el uso del agua, sino que también aporta beneficios adicionales en ahorro de energía, optimización del proceso de riego y mayor sostenibilidad en la producción agrícola.

Porras (2015) en su tesis titulada: “Evaluación del sistema de riego por goteo y exudación en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en el INIA - La Molina”, con el objetivo de evaluar el impacto de dos sistemas de riego localizado (gotero y exudación) sobre el crecimiento y rendimiento de la quinua variedad INIA 431-Altiplano, considerando variables agronómicas, hídricas y financieras. El diseño incluyó parcelas divididas en cuatro bloques (B1, B2, B3, B4), evaluándose volumen de agua aplicado, eficiencia de aplicación, desarrollo vegetativo, cobertura del dosel, índice de área foliar, índice de cosecha, rendimiento, grados día acumulados y análisis beneficio/costo. Los resultados mostraron que el volumen total de agua aplicado fue de 1,571.6 m³/ha en exudación y 1,708.5 m³/ha en gotero, con eficiencias de 78% y 81%, respectivamente; la cobertura del dosel a los 80 DDS alcanzó 88.5% en exudación frente a 69.8% en gotero; el índice de área foliar máximo se registró a los 73 DDS con valores de 2.9 y 2.5, respectivamente; el índice de cosecha fue de 0.5 en exudación y 0.3 en gotero; el rendimiento fue superior en exudación con 3,519.3 kg/ha frente a 1,587.9 kg/ha en gotero; la eficiencia en el uso del agua fue de 2.2 kg/m³ en exudación y 0.9 kg/m³ en gotero; el cultivo demandó en promedio 1178.8 grados día acumulados; y el análisis económico evidenció un beneficio/costo de 2.9 y rentabilidad de 190% en exudación, frente a un 2.4 y 186% en gotero. En conclusión, el sistema de riego por exudación resultó más eficiente y rentable que el de gotero, mostrando ventajas en el uso del agua, el crecimiento del cultivo y la productividad.

Zeña (2022), en su tesis: “Análisis tecno-económico comparativo entre una minicentral fotovoltaica y eólica para abastecimiento de un sistema de riego tecnificado” tiene por objetivo comparar técnica y económicamente el uso de energía solar y eólica para el abastecimiento de un sistema de riego tecnificado en el caserío Collique Bajo, distrito de Zaña. Se realizaron mediciones de caudal, demanda energética, y se utilizaron datos meteorológicos para determinar la radiación solar y velocidad del viento críticas. Se seleccionaron y diseñaron los sistemas fotovoltaico y eólico con base en días de autonomía. El análisis mostró que el sistema fotovoltaico tiene un valor actual neto (VAN) positivo y una tasa interna de retorno (TIR) superior al 10%, lo que lo hace

viable económicamente. El sistema fotovoltaico es más rentable que el sistema eólico para satisfacer las necesidades energéticas del riego tecnificado en la zona.

Campos (2018), en su tesis: "Proyecto de riego por goteo utilizando energía solar para cultivo de flores para exportación en el Fundo Huertas, distrito de Sayán, provincia de Huaura, departamento de Lima", los objetivos fueron implementar un sistema de riego tecnificado por goteo utilizando energía solar fotovoltaica para mejorar el rendimiento de cultivos de flores. Se diseñó un sistema de bombeo fotovoltaico considerando la radiación solar disponible y las necesidades hídricas del cultivo. Se compararon los costos y la eficiencia entre el sistema actual de motobomba y el nuevo sistema solar. El sistema fotovoltaico optimizó el riego, reduciendo el consumo de combustible y mejorando la eficiencia energética, con un aumento en el rendimiento de las flores. El uso de energía solar para el riego es una solución eficiente y rentable, especialmente para áreas con alta radiación solar.

1.1.3. Antecedentes locales

Huanca (2024), en su tesis titulado: "Implementación de un sistema inalámbrico utilizando el Internet de las cosas para el monitoreo del cultivo de papas en el Fundo Huaylacucho en el Departamento de Ayacucho", tiene como objetivo desarrollar un sistema tecnológico que optimice el uso del agua y mejore la productividad agrícola mediante la integración de sensores de humedad del suelo, temperatura y humedad ambiental, apoyados en un microcontrolador ESP32 que recopila y transmite la información a través de Wi-Fi hacia la plataforma ThingSpeak, con visualización complementaria en Google Sheets y notificaciones en tiempo real mediante un bot de Telegram; la metodología consiste en la instalación y configuración de los sensores, el almacenamiento de datos en la nube y su consulta desde dispositivos móviles o computadoras, lo que permitirá programar los riegos de manera más eficiente; los resultados esperados se centran en la reducción del consumo de agua, la optimización de la frecuencia y cantidad de riego, así como el incremento del rendimiento del cultivo de papa; en conclusión, la implementación de este sistema de monitoreo basado en el Internet de las Cosas representa una alternativa sostenible e innovadora para enfrentar los desafíos de la agricultura regional, beneficiando tanto a los agricultores como al medio ambiente.

Quispe (2024) en su investigación titulado: "Densidad de plantas en el rendimiento de tres variedades de *Chenopodium quinoa* Willd. Canaán 2750 msnm - Ayacucho, 2021" tuvo como objetivo evaluar la influencia de diferentes densidades de siembra y variedades sobre el rendimiento de grano de quinua. La metodología consistió

en un experimento desarrollado en el Centro Experimental de Canaán de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, ubicado a 2750 msnm, donde se emplearon tres variedades (Salcedo INIA, Arete y Señor del Huerto) y tres densidades de plantas (125,000; 187,000 y 250,000 plantas.ha⁻¹), bajo un Diseño de Bloques Completos al Azar con arreglo factorial 3V x 3D, conformado por nueve tratamientos y tres repeticiones, en unidades experimentales de 12.80 m². Los resultados mostraron que la densidad de 125,000 plantas.ha⁻¹ alcanzó el mayor rendimiento con 4,028.96 kg.ha⁻¹, superando a las densidades de 187,000 y 250,000 plantas.ha⁻¹, que tuvieron rendimientos similares; además, dicha densidad generó mejores características morfológicas con un diámetro de tallo de 1.53 cm, un diámetro de panoja de 16.44 cm, una longitud de panoja de 48.40 cm y una altura de planta de 165.59 cm. En cuanto a las variedades, no se hallaron diferencias significativas en el rendimiento de grano, aunque la variedad Arete registró un diámetro de panoja de 16.36 cm y la variedad Señor del Huerto presentó la mayor longitud de panoja (45.69 cm) y altura de planta (159.85 cm). En conclusión, la densidad de 125,000 plantas/ ha⁻¹ resultó la más adecuada para maximizar tanto el rendimiento como el desarrollo agronómico de la quinua en las condiciones de Ayacucho, mientras que las variedades no mostraron diferencias en rendimiento, pero sí en características morfológicas específicas.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Cultivo de Quinua

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA, 2013), indica que la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo andino capaz de crecer en condiciones difíciles como sequías y heladas. Se considera un alimento muy completo porque aporta proteínas (12 a 21,3%), vitaminas, minerales, aminoácidos y ácidos grasos esenciales como la omega 3, 6 y 9. Su consumo se orienta tanto al autosostenimiento de familias en situación vulnerable como al mercado de productos funcionales, donde la demanda nacional e internacional crece de manera constante, aunque la oferta todavía no logra cubrirla totalmente. Para enfrentar este reto, el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) desarrolla tecnologías y alternativas que buscan mejorar la producción y productividad de la quinua, teniendo en cuenta los desafíos del cambio climático (INIA, 2013).

1.2.1.1. Variedad de quinua (Salcedo INIA)

La figura 1 muestra una planta de quinua de la variedad Salcedo INIA, caracterizada por presentar una panoja densa y verde, capturada en su entorno de cultivo. Esta variedad fue utilizada en el desarrollo de la presente investigación.

Figura 1

Quinua Salcedo INIA



Nota. Obtenido de INIA (2013)

Esta tabla 1 describe una variedad de quinua Salcedo INIA, color de grano blanca, dulce y precoz, altamente adaptable desde la costa hasta el altiplano y con un rendimiento potencial de hasta 4,5 t/ha.

Tabla 1

Categorías y descripción del cultivar

Categoría	Descripción del cultivar
Tipo de crecimiento	Herbáceo
Porte de la planta	Erecto
Altura promedio	1,64 m
Color de axilas	No pigmentado
Estrías en tallo	Ausentes
Color del tallo	Verde claro
Forma de la panoja	Glomerulada
Longitud de panoja	Hasta 70 cm
Densidad de panoja	Intermedia
Color del grano	Blanco
Tamaño del grano	Grande

Categoría	Descripción del cultivar
Sabor del grano	Dulce (no requiere lavado riguroso)
Período vegetativo	150 días (precoz)
Rendimiento comercial	2,5-3 t/ha
Rendimiento potencial	4,0-4,5 t/ha
Resistencia al mildiú	Tolerante
Resistencia a heladas	Hasta -2 °C
Adaptación	Altiplano, valles interandinos y costa
Altitud óptima	1 284 – 3 950 msnm

Nota. Obtenido de INIA (2013)

1.2.1.2. Fenología del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*)

Mateu (2023), menciona que la fenología es la ciencia que estudia los cambios visibles que presentan las plantas como resultado de su interacción con factores ambientales como la temperatura, la luz, la humedad y el suelo, a lo largo de sus etapas vegetativas y reproductivas. A través de la observación directa, permite identificar las diferentes fases del desarrollo vegetal y los cambios fenotípicos asociados a la variación climática. En el caso de la quinua, se ha establecido que su ciclo de crecimiento se divide en trece fases fenológicas claramente diferenciables, definidas a partir de estudios en bancos de germoplasma y observaciones en campos de cultivo de distintas variedades.

En la figura 2 se muestran las etapas fenológicas que la quinua.

Figura 2

Fases fenológicas quinua Salcedo INIA

FASE VEGETATIVA						FASE REPRODUCTIVA	
							
Germinación	Emergencia de plántula	Dos hojas verdaderas	Cuatro hojas verdaderas	Seis hojas verdaderas	Ramificación	Inicio de panoja y floración	Madurez fisiológica
Días hasta la emergencia de plántulas a la superficie del suelo					: 7 días		
Días hasta el inicio de panoja					: 57 días		
Días hasta la floración					: 95 días		
Días hasta la madurez fisiológica					: 150 días		

Nota. Obtenido de INIA (2013)

Emergencia

Mateu (2023), explica que corresponde al momento en que los cotiledones, aún unidos, emergen del suelo y la plántula se hace visible a nivel del terreno. En esta etapa la planta es altamente vulnerable al ataque de aves debido a la exposición de la semilla sobre el talluelo. Esta fase ocurre aproximadamente entre los 5 y 6 días después de la siembra, bajo condiciones adecuadas de humedad.

Hojas cotiledonales

Mateu (2023), menciona que, en esta fase, los cotiledones se separan y se observan dos hojas alargadas, angostas y completamente extendidas. Las plántulas se distinguen claramente en hileras dentro del surco, y en algunas variedades se aprecia variación en la coloración, especialmente en aquellas con pigmentaciones rojas o púrpuras.

Dos hojas verdaderas

Mateu (2023), explica que además de las hojas cotiledonales, aparecen dos hojas verdaderas de mayor tamaño, con bordes denticulados y nervaduras bien definidas, que emergen desde el botón foliar. Esta fase ocurre entre los 15 y 20 días después de la siembra y se caracteriza por un rápido desarrollo del sistema radicular, siendo susceptible al ataque de gusanos cortadores como *Copitarsia*, *Feltia* y *Tichium*.

Cuatro hojas verdaderas

Mateu (2023), menciona que las cuatro hojas verdaderas se observan dos pares de hojas verdaderas completamente desarrolladas, mientras que las hojas cotiledonales aún permanecen verdes. Esta fase ocurre entre los 25 y 30 días después de la siembra y se caracteriza por un crecimiento vigoroso, hojas más firmes y ásperas, y un tallo fortalecido, sin requerir riego suplementario. Bajo condiciones de estrés térmico y escasas lluvias, aumenta el ataque de insectos masticadores como *Epitrix*, *Diabrotica*, pulguilla saltarina y loros.

Seis hojas verdaderas

Mateu (2023), menciona que se presentan tres pares de hojas verdaderas completamente desarrolladas, mientras que las hojas cotiledonales se tornan amarillas y flácidas. Se observa mayor densidad foliar y una mejor protección del ápice de la planta. Esta fase ocurre entre los 35 y 45 días después de la siembra y es sensible a condiciones de bajas temperaturas, sequía y estrés ambiental, especialmente durante el anochecer, afectando principalmente a las hojas más antiguas.

Ramificación

Mateu (2023), explica que se observan cinco hojas verdaderas completamente desarrolladas y la extensión de hojas axilares hasta la tercera fila del tallo, mientras los cotiledones se marchitan. Aparecen señales morfológicas asociadas al inicio de la inflorescencia. Esta fase ocurre entre los 45 y 50 días después de la siembra y se caracteriza por un crecimiento acelerado, especialmente en la quinua de valles, así como por una mayor resistencia al frío y menor dependencia de la luz.

Inicio de panojamiento

Mateu (2023), menciona que la inflorescencia comienza a emerger desde el ápice de la planta, rodeada por pequeñas hojas con alta presencia de cristales de oxalato de calcio, que cubren gran parte de la panoja. Esta fase ocurre entre los 55 y 60 días después de la siembra y se caracteriza por el amarillamiento del primer par de hojas verdaderas, junto con una marcada elongación y engrosamiento del tallo. Durante este periodo se presenta el ataque de la primera generación de *Euriscacca quinucae* y “kconakona”.

Panojamiento

Mateu (2023), menciona que la inflorescencia se eleva claramente por encima de las hojas superiores, distinguiéndose los glómérulos en la base de la panoja y los botones florales bien definidos, especialmente los apicales correspondientes a las flores pistiladas. Esta fase ocurre entre los 65 y 70 días después de la siembra y, a partir de este momento, las hojas apicales pueden consumirse como verdura.

Inicio de floración

Mateu (2023), menciona que, en esta fase, las flores hermafroditas apicales de la inflorescencia se abren, dejando visibles los estambres y los sacos antrales. Ocurre entre los 75 y 80 días después de la siembra y se caracteriza por una alta sensibilidad a la sequía y a las heladas, además del amarillamiento y la caída de las hojas inferiores, especialmente aquellas con menor eficiencia fotosintética.

Floración

Mateu (2023), explica que en esta fase se presenta cuando aproximadamente el 50 % de las flores de la inflorescencia principal se encuentran abiertas, lo cual ocurre entre los 90 y 100 días después de la siembra.

Es una etapa altamente sensible a las heladas, tolerando temperaturas solo hasta -2°C . Durante este periodo, las flores permanecen cerradas en horas de la

mañana y al atardecer por su carácter heliófilo, se intensifica la caída de hojas inferiores con baja actividad fotosintética y se observa abundante polen de coloración amarilla en los estambres.

Grano lechoso

Mateu (2023), explica que, en esta etapa, los frutos al ser presionados liberan un líquido de consistencia lechosa. Esta fase ocurre entre los 100 y 130 días después de la siembra y el déficit hídrico en este periodo resulta altamente perjudicial para la producción del cultivo.

Grano pastoso

Mateu (2023), explica que, en esta fase, los frutos presentan una consistencia pastosa de color blanco al ser presionados. Ocurre entre los 130 y 160 días después de la siembra y se caracteriza por daños importantes causados por la segunda generación de *Euriscacca quinuae* y “kcona-kcona”, además de una alta sensibilidad al déficit de humedad, lo que afecta significativamente la producción.

Madurez fisiológica

Mateu (2023), menciona que esta fase corresponde al momento en que la planta alcanza su madurez completa, identificándose cuando los granos ofrecen resistencia a la presión de la uña. Ocurre entre los 160 y 180 días después de la siembra, con un contenido de humedad del grano entre 14 y 16 %. El periodo comprendido entre la floración y esta etapa constituye la fase de llenado del grano.

1.2.1.3. Manejo del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*)

Preparación de terreno

Gómez y Aguilar (2016) mencionan que la preparación del suelo debe realizarse de manera adecuada, logrando un terreno bien mullido mediante el uso de yunta o maquinaria agrícola. Debido al pequeño tamaño de la semilla, es fundamental una preparación fina del suelo, la cual se obtiene mediante el uso de arado de disco y rastra antes de la siembra, garantizando condiciones óptimas para la germinación. Asimismo, el terreno debe estar bien nivelado para evitar encharcamientos que puedan provocar asfixia y muerte de las plantas.

Además de facilitar la siembra, la preparación del suelo permite reducir la población de malezas y plagas, al exponer los estados inmaduros de insectos en la superficie.

Rotación del cultivo

Mujica et al. (2001) reportan que en el cultivo de la quinua es fundamental aplicar la rotación de cultivos, debido a la delicadeza de su desarrollo inicial. Se recomienda sembrarla después de cultivos tuberosos como papa u olluco, para aprovechar los nutrientes residuales y un suelo previamente acondicionado, con menor presencia de plagas y enfermedades. Asimismo, debe evitarse la siembra posterior a cultivos de la misma familia botánica. Una rotación recomendada es: papa, quinua, leguminosas, trigo o cebada y luego papa.

Siembra

Mujica et al. (2001) afirman que la siembra de la quinua debe realizarse en condiciones ambientales favorables, con temperaturas entre 15 y 20 °C y adecuada humedad del suelo para asegurar una buena germinación; en la región andina, altiplano y costa, la época óptima es del 15 de septiembre al 15 de noviembre, ajustándose según clima, disponibilidad de agua y tipo de genotipo. La dosis de semilla recomendada es de 8 a 15 kg/ha, variando según el tamaño de la semilla, el sistema de siembra y el agroecosistema. Un manejo adecuado de la densidad es clave, ya que densidades altas producen plantas débiles y bajos rendimientos, mientras que densidades moderadas favorecen plantas vigorosas; el distanciamiento ideal es de 0.08 a 0.10 m entre plantas (15 a 20 plantas por metro lineal), asociado a mayor producción de grano.

Fertilización

Mujica et al. (2001) mencionan que la quinua es un cultivo con alta demanda nutricional, especialmente de nitrógeno y calcio, y con requerimientos moderados de fósforo y potasio. La dosis de fertilización depende del contenido de nutrientes del suelo, por lo que es indispensable realizar un análisis previo y considerar el cultivo antecesor dentro del sistema de rotación. De forma general, se recomienda una fertilización con la fórmula 80-60-40 de N-P₂O₅-K₂O, aplicando el 50 % del nitrógeno junto con la totalidad del fósforo y potasio en la siembra, y el 50 % restante del nitrógeno durante el aporque, al inicio del panojamiento.

Aporque

Mujica et al. (2001) mencionan que el aporque se realiza al inicio del panojamiento, cuando la planta alcanza entre 35 y 40 cm de altura, y se complementa con la aplicación del 50 % restante del nitrógeno. Esta labor puede hacerse de forma

manual, con yunta o maquinaria, y tiene como objetivo principal evitar el acame y fortalecer la estabilidad de las plantas.

Riego

Gómez y Aguilar (2016), mencionan que la quinua necesita entre 300 y 1000 mm de agua al año, con requerimientos que varían según la variedad y su origen. Algunas demandan mayor humedad, mientras que otras se adaptan a condiciones secas, mostrando alta tolerancia al déficit hídrico. Por ello, el riego debe ser ligero y espaciado cada 10 a 15 días, intensificándose durante la floración y el llenado de grano para asegurar una buena producción. Requiere precipitación pluvial de 500 a 700mm.

Raleo

Gómez y Aguilar (2016) mencionan que se lleva a cabo para reducir la competencia por agua, luz y nutrientes, permitiendo un desarrollo adecuado del cultivo. Consiste en eliminar las plantas más débiles y pequeñas, dejando una densidad aproximada de 20 plantas por metro lineal.

Control de malezas

Mujica et al. (2001) menciona que el manejo de malezas depende del sistema de rotación y de los controles realizados en el cultivo anterior. Generalmente se efectúan uno o dos deshierbos cuando las plantas alcanzan unos 10 cm de altura o alrededor de los 45 días después de la siembra, para evitar la competencia por luz, agua y nutrientes. Una práctica eficiente es realizar un riego previo entre 20 y 25 días antes de la siembra, con el fin de inducir la germinación de semillas de malezas y luego eliminarlas mediante aradura, rastra y surcado. Además, se puede complementar el control con herbicidas como Linuron, aplicados de forma dirigida para el control de malezas de hoja ancha y angosta.

Control fitosanitario

Mujica et al. (2001), mencionan que el mildiu es la enfermedad más importante y generalizada del cultivo de la quinua en países como Bolivia, Colombia y Perú, ya que se adapta fácilmente a las condiciones ambientales donde se cultiva este grano, especialmente a bajas temperaturas y humedad ambiental. Además del mildiu, existen otras enfermedades de menor impacto como la podredumbre marrón del tallo, la mancha ojival y la mancha bacteriana. Para su control, se dispone de variedades resistentes y fungicidas eficaces. Asimismo, la quinua es afectada por diversos insectos plaga a lo largo de todo su ciclo vegetativo, desde la emergencia hasta la madurez, e

incluso durante el almacenamiento, lo que representa un riesgo constante para la producción.

Cosecha

Gómez y Aguilar (2016) afirman que la cosecha es una labor clave, ya que de ella depende la calidad del producto y la reducción de pérdidas en la producción. Se realiza cuando la planta alcanza la madurez fisiológica, identificada por el amarillamiento del cultivo, y puede ejecutarse de forma manual, semimecanizada o mecanizada.

1.2.2. Internet de las Cosas (IoT)

Mora (2015), menciona que el Internet de las Cosas (IoT) se refiere a la posibilidad de que los objetos y herramientas que usamos a diario estén conectados a Internet para comunicarse entre sí y con nosotros. Esto es posible gracias a diferentes tecnologías como Bluetooth, Wi-Fi o la identificación por radiofrecuencia (RFID), además de los servicios que ofrecen los teléfonos inteligentes. También intervienen sensores, que captan información del entorno, y actuadores, que permiten ejecutar acciones o controlar dispositivos. En conjunto, estos componentes hacen posible que los objetos de uso diario no solo estén enlazados a la red, sino que además interactúen de forma inteligente, contribuyendo a simplificar tareas y mejorar nuestra calidad de vida.

En la imagen 3 se muestra un bosquejo de Internet de las cosas, donde se aprecia que todas las "cosas" están conectados a una red.

Figura 3

Internet de las Cosas



Nota. Obtenido de Mora (2015)

1.2.2.1. Internet de las cosas (IoT) en la agricultura

Días et al. (2024), explican que el sector agrícola es uno de los grandes favorecidos por el crecimiento del Internet de las Cosas (IoT), pues brinda la posibilidad de recopilar y gestionar gran cantidad de información sobre las condiciones de los cultivos. Esto se logra mediante el uso de sensores y sistemas de bajo costo que almacenan los datos en la nube, posibilitando su consulta y análisis en tiempo real. Gracias a ello, es viable implementar sistemas de monitoreo agrícola sin necesidad de recurrir a herramientas tecnológicas o computacionales complejas, lo que convierte al IoT en un aliado clave para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sector agrícola.

1.2.3. Automatización de riego

Loaiza et al. (2015), mencionan que la automatización de los sistemas de riego permite optimizar la distribución del agua en los cultivos mediante el uso de tecnología avanzada.

Con sensores y sistemas computarizados, se puede gestionar el caudal de agua de manera más precisa, reduciendo significativamente las pérdidas por fugas y evaporación. Estos sistemas resultan especialmente útiles en zonas áridas donde los recursos hídricos son escasos.

Además, la automatización no solo mejora el uso eficiente del agua, sino que también aumenta la producción agrícola al reducir la necesidad de intervención manual, logrando un riego más controlado y puntual, como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Esquema de automatización de riego por goteo



Nota. (Agro 4.0, 2023)

1.2.3.1. Componentes del sistema de automatización

a) Hardware Principal

- *Microcontrolador ESP32 WROOM-32:*

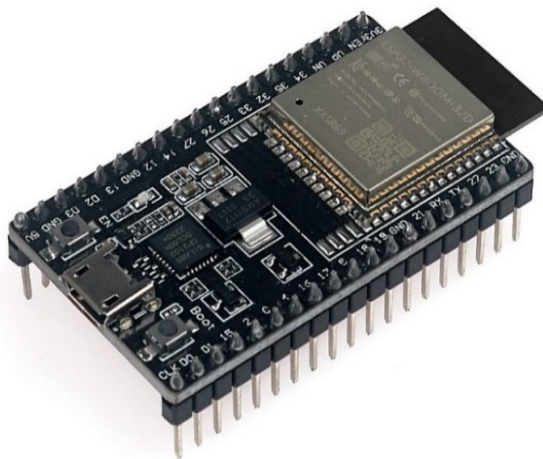
Maier et al. (2017), explican que el ESP32 es un microcontrolador revolucionario, económico y versátil que se ha convertido en el corazón de innumerables proyectos de IoT, domótica, robótica y automatización industrial gracias a su doble núcleo de hasta 240 MHz, conectividad Wi-Fi/Bluetooth y bajo consumo energético. Compatible con lenguajes como C/C++ (para control preciso del hardware) y MicroPython (para desarrollo rápido), su facilidad de programación ya sea mediante Arduino, ESP-IDF o entornos Python- lo hace accesible tanto para principiantes como expertos.

Maier et al. (2017) , explican que desde wearables inteligentes hasta sistemas industriales complejos, pasando por dispositivos médicos y soluciones de smart home, el ESP32 democratiza la tecnología permitiendo crear soluciones conectadas y eficientes con una simple placa del tamaño de un dedo.

En la figura 5 se visualiza el ESP32 que corresponde a una tarjeta de desarrollo (Development Kit).

Figura 5

Microcontrolador ESP32 WROOM-32



Nota. Obtenido de Naylamp Mechatronics (2024)

La tabla 2 resume las especificaciones del microcontrolador ESP32 WROOM-32, destacando su procesador de doble núcleo (240 MHz), conectividad Wi-Fi/Bluetooth, diversos puertos de comunicación (UART, SPI, I2C) y funciones de seguridad por hardware.

Tabla 2*Parámetro y especificaciones del Microcontrolador ESP32 WROOM-32*

Parámetro	Especificación
Microprocesador	Tensilica Xtensa LX6 de doble núcleo (hasta 240 MHz)
Voltaje de alimentación	5V DC
Voltaje de entradas/salidas	3.3V DC
Desempeño	hasta 600 DMIPS
Frecuencia del reloj	hasta 240MHz
Conectividad	Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth 4.2 (clásico y BLE)
Memoria	ROM: 448KByte SRAM: 520KByte SRAM in RTC: 16KByte QSPI Flash/SRAM: 4MBytes
Consumo energético	Modos de ahorro: <i>deep sleep</i> , <i>light sleep</i> y optimización de bajo consumo
Entradas/Salidas	Amplio número de pines GPIO programables
Interfaces	UART, SPI, I ² C, I ² S, CAN, PWM, ADC y DAC integrados
Seguridad	Cifrado por hardware: AES, SHA, RSA, ECC, generador de números aleatorios (RNG)
Aplicaciones	IoT, domótica, sensores inalámbricos, wearables, sistemas embebidos

Nota. Obtenido de Arduino (2025)**- Sensores:****Sensor de humedad y temperatura del suelo RS485**

Estuiez (2025), menciona que este innovador sensor está específicamente desarrollado para realizar mediciones precisas de humedad de suelo y temperatura. Su estructura reforzada y prestaciones tecnológicas lo convierten en el instrumento perfecto para implementaciones agropecuarias, trabajos científicos especializados y sistemas de control ecológico.

Características principales:

- Diseño pequeño y fácil de instalar.
- Mediciones exactas con respuesta rápida y compatibilidad entre unidades.
- Sellado hermético (IP68) para resistir humedad, corrosión y entierro prolongado.

- Funciona en diversos tipos de suelo sin alterar su desempeño.
- Exactitud en las mediciones y transmisión de datos eficiente para un monitoreo continuo.

Ventajas clave:

- Ideal para uso en exteriores y condiciones adversas.
- Se adapta a múltiples aplicaciones agrícolas y ambientales.
- Diseñado para operar sin interferencias por largos períodos.

En la figura 6 se muestra el sensor de humedad de suelo, este modelo de sensor está desarrollado para utilizar a nivel industrial, entrega datos confiables, se utilizó la versión que posee comunicación por RS485 que es un protocolo de comunicación industrial.

Figura 6

Sensor de humedad y temperatura del suelo



Nota. Obtenido de AliExpress (2025)

Esta tabla 3 describe las especificaciones de un sensor industrial de suelo de alta precisión y respuesta rápida, compatible con salidas RS485, voltaje y corriente.

Tabla 3

Parámetro y especificación del sensor de humedad y temperatura del suelo RS485

Parámetro	Especificación
Unidad de medida	Contenido volumétrico de agua del suelo (% m ³ /m ³); Temperatura (°C)
Rango de humedad	0–100 % (posible personalización: 30 %, 50 % u otro rango)
Rango de temperatura	- 40 a 80 °C (otros rangos arbitrarios personalizables)

Parámetro	Especificación
Precisión de medición	Humedad: ± 2 % (0–50 % m ³ /m ³); Temperatura: $\pm 0,2$ °C
Rango de trabajo	-30 a 70 °C
Señal de salida	A: Voltaje (0–2 V, 0–5 V, 0–10 V) B: 4–20 mA (bucle de corriente) C: RS485 (Modbus-RTU estándar, dirección predeterminada 01)
Voltaje de alimentación	4,5–30 V DC
Tiempo de estabilización	< 1 segundo
Tiempo de respuesta	< 1 segundo

Nota. Obtenido de AliExpress (2025)

Sensor de temperatura y humedad relativa DHT21 (AM2301)

Lozano (2020) menciona que este sensor digital mide temperatura y humedad relativa con buena precisión, integrando un sensor capacitivo de humedad, un termistor y un microcontrolador que convierte las lecturas en datos digitales. Debido a su diseño resistente y mayor durabilidad frente a modelos como el DHT11 y DHT22, resultó adecuado para la presente aplicación. La figura 7 muestra el sensor de temperatura y humedad utilizado.

Figura 7

Sensor de temperatura y humedad relativa DHT21 (AM2301)



Nota. Obtenido de Novatronic (2022)

La tabla 4 detalla las especificaciones del sensor DHT21 (AM2301), un dispositivo digital de alta precisión y diseño robusto que mide temperatura y humedad en rangos amplios, siendo ideal para aplicaciones de exterior.

Tabla 4

Parámetro y especificación del sensor de temperatura y humedad relativa DHT21 (AM2301)

Parámetro	Especificación
Voltaje de operación	3.5 – 5.5 V DC
Consumo de corriente	1 – 1.5 mA
Tiempo de sensado	2 s
Protocolo digital	Single bus (1 cable)
Rango de temperatura	-40 a 80 °C
Resolución de temperatura	0.1 °C
Precisión de temperatura	±0.5 °C
Rango de humedad relativa	0 – 100 % RH
Resolución de humedad	0.1 % RH
Precisión de humedad	±3 %
Modelo	AM2301
Dimensiones	60 × 28 × 12 mm
Carcasa	Plástico negro
Longitud del cable	50 cm

Nota. Obtenido de Novatronic (2022)

Sensor de flujo de agua YF-S201

Castaño (2023) explica que el sensor de flujo o caudalímetro es un dispositivo utilizado para medir la cantidad de líquido que circula por una tubería en un tiempo determinado, expresando el caudal en unidades como L/min, L/h o m³/h. Este sensor se instala directamente en la tubería y también es conocido como flujómetro o medidor de flujo. La figura 8 muestra el sensor de flujo utilizado.

Figura 8

Sensor de flujo de agua YF-S201



Nota. Obtenido de Electromania (2024)

La tabla 5 resume las especificaciones del sensor de flujo YF-S201, destacando su rango de medición de 1 a 30 L/min, su salida de pulsos digitales.

Tabla 5
Parámetro y especificación del sensor de flujo de agua YF-S201

Parámetro	Especificaciones
Alimentación eléctrica	Funciona con un voltaje entre 5 y 18 VDC
Corriente de consumo	Aproximadamente 15 mA
Tipo de señal de salida	Nivel digital TTL de 5 V
Caudal de trabajo	Desde 1 hasta 30 litros por minuto
Rango de temperatura	Operativo entre -25 °C y 80 °C
Relación caudal–pulsos	$F(\text{Hz}) = 7.5 \times Q - 3 (\pm 10\%)$, siendo Q el caudal en L/min
Conexión mecánica	Rosca DN15, estándar BSP, tipo macho
Humedad ambiental permitida	35 % a 80 % de humedad relativa
Tamaño físico	60 mm × 33 mm × 33 mm
Peso aproximado	50 g

Nota. Obtenido de Electromania (2024)

- **Actuadores:**

Válvula solenoide 12VDC

Acosta y John (2020) mencionan que las válvulas solenoides son electroválvulas de acción abierto/cerrado compuestas por un solenoide y un cuerpo. El solenoide funciona como electroimán: al energizarse mueve el diafragma y permite el paso del fluido; al desenergizarse, un resorte lo devuelve a su posición, cerrando la válvula (tipo normalmente cerrada, NC) como se muestra en la figura 9.

Figura 9

Válvula solenoide 12VDC



Nota. Obtenido de Electromania (2024)

La tabla 6 resume las especificaciones de una válvula solenoide de 12V, destacando que es de tipo normalmente cerrada y de diafragma, ideal para sistemas por gravedad ya que no requiere presión mínima para funcionar.

Tabla 6

Parámetro y especificaciones de válvula solenoide 12VDC

Parámetro	Especificaciones
Voltaje de operación	12 V DC
Consumo de corriente	0.6 A
Consumo de potencia	8 W
Rango de temperatura	5 °C – 100 °C
Presión mínima de trabajo	0.0 MPa (0 bar / 0 mca)
Presión máxima de trabajo	0.01 MPa (0.1 bar / 1.02 mca)
Tiempo de apertura	≤ 0.15 s
Tiempo de cierre	≤ 0.3 s
Conexión a tubería	Rosca externa de 3/4" NPS macho
Estado en reposo	Normalmente cerrado (NC)
Tipo de válvula	De diafragma
Compatibilidad de fluidos	Agua y líquidos de baja viscosidad
Uso recomendado	Sistemas por gravedad, ya que no requiere presión mínima de funcionamiento
Material del cuerpo	Plástico ABS
Dimensiones	72 × 60 × 34 mm
Peso	103 g

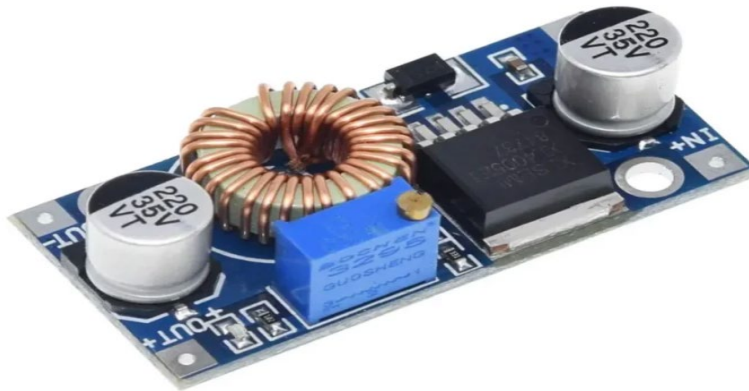
Nota. Obtenido de Electromania (2024)

Regulador de Voltaje XL4005

Lazo y Coronel (2022) explican que es un regulador tipo *step-down* que entrega un voltaje estable más bajo que el de entrada, soportando hasta 5 A de corriente. Su rango de entrada es de 5 a 32 V y permite ajustar la salida entre 0.8 y 30 V mediante un potenciómetro multivuelta. Se utiliza para obtener tensiones menores a partir de una fuente mayor, por ejemplo 5 V o 3.3 V desde una batería de 12 V. Para un funcionamiento correcto, la entrada debe superar al menos en 1.5 V a la salida. Puede trabajar con cargas de hasta 5 A, aunque por encima de 2.5 A se recomienda usar un disipador de calor. En la figura 10 se muestra regulador de voltaje en la figura 10.

Figura 10

Regulador de Voltaje XL4005



Nota. Obtenido de Novatronic (2022)

La tabla 7 resume las especificaciones del regulador Buck XL4005, un convertidor de alta eficiencia (98%) que entrega hasta 5 A y cuenta con protecciones integradas contra cortocircuito y temperatura.

Tabla 7

Parámetro y especificaciones del regulador de Voltaje XL4005

Parámetro	Especificación
Modelo	Convertidor DC-DC Buck XL4005
Rango de voltaje de entrada	5.0 – 32 V DC
Rango de voltaje de salida	0.8 – 30 V DC
Condición de ajuste de salida	El voltaje de entrada debe superar al de salida en al menos 1.5 V
Corriente de salida	Máx. 5 A (recomendado 4.5 A, disipador necesario a partir de 2.5 A)
Potencia de salida	50 – 70 W
Eficiencia máxima	Hasta 96 %
Regulación de carga	≤ 0.8 %
Regulación de voltaje	≤ 0.8 %
Frecuencia de operación	300 kHz
Ondulación en salida (ripple)	50 mV máx. (medido a 20 MHz)
Protección por temperatura	Sí, desconecta la salida al sobrecalentarse
Protección contra cortocircuito	Sí, hasta 8 A
Limitación de corriente	Sí

Parámetro	Especificación
Protección contra polaridad inversa	No
Dimensiones	43 × 21 × 13 mm

Nota. Obtenido de Novatronic (2022)

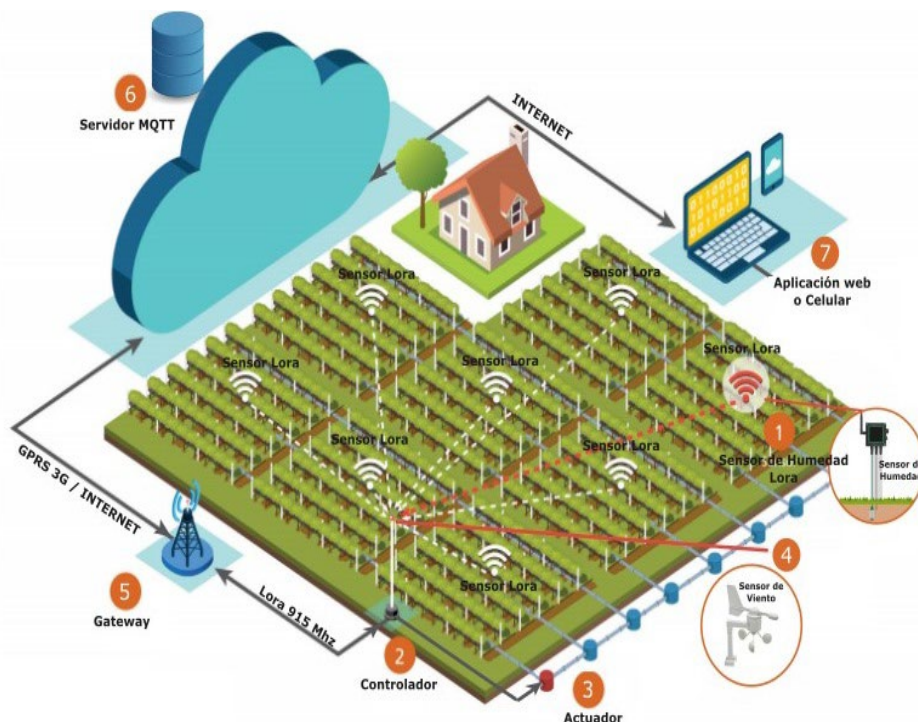
b) Software y Comunicaciones

Protocolo MQTT

Férnandez y Ordoñez (2021) , mencionan que el MQTT es un protocolo de mensajería basado en el modelo publicación/suscripción con arquitectura cliente-servidor. Se caracteriza por ser liviano, abierto y fácil de implementar, lo que lo hace especialmente útil en entornos con recursos limitados, como en aplicaciones de comunicación máquina a máquina (M2M) o en el Internet de las Cosas (IoT), donde se necesita un consumo mínimo de ancho de banda y un código reducido. En la figura 11 se muestra el protocolo general para MQTT.

Figura 11

Protocolo MQTT



Nota. Obtenido de MINKAFAB (2017)

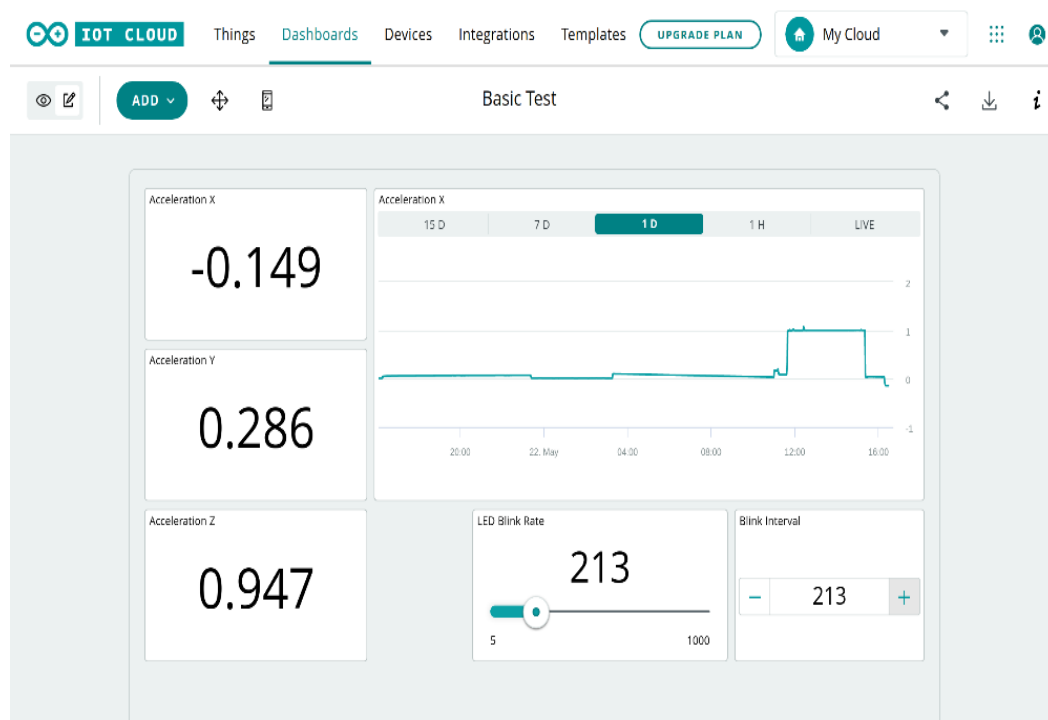
Dashboard (Interfaz de Usuario):

Berón et al. (2017), mencionan que es una interfaz gráfica que muestra de manera clara y resumida datos y métricas importantes. Su propósito es ayudar a las personas a monitorear, analizar y gestionar el desempeño de un sistema, empresa o

proceso. La idea viene del tablero de los automóviles, donde se concentran indicadores clave para el conductor. En el ámbito digital cumple la misma función: transformar información compleja en elementos visuales fáciles de interpretar, como gráficos, tablas o indicadores, para que se puedan tomar decisiones rápidas y acertadas. En la figura 12 se muestra un dashboard en la plataforma Arduino Cloud.

Figura 12

Dashboard del Arduino IOT Review



Nota. Obtenido de Electronic-lab (2023)

f) Energía fotovoltaica

Méndez y Cuervo (2013), mencionan que la energía solar fotovoltaica es la energía proveniente del Sol que se transforma directamente en electricidad, sin necesidad de ninguna conversión intermedia.

Méndez y Cuervo (2013), explican que la correcta inclinación y orientación de esta superficie es crucial para maximizar la eficiencia en la conversión de la energía solar en energía eléctrica. Como fuente de energía renovable, la energía solar fotovoltaica es inagotable, limpia y puede ser utilizada directamente en el lugar donde se produce, permitiendo una gestión autónoma del recurso energético. En el futuro, la sostenibilidad energética dependerá en gran medida de la adopción de este tipo de energías renovables, como se muestra en la figura 13.

Figura 13

Energía fotovoltaica



Nota. Obtenido de Salgado (2020)

Sistema fotovoltaico

Méndez y Cuervo (2013), definen como el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar la energía solar disponible y transformarla en utilizable como energía eléctrica, como se muestra en la figura 14. Estos sistemas independientemente de su utilización y del tamaño de potencia, se pueden clasificar según el esquema siguiente:

Aislados: están diseñados para suministrar electricidad en lugares sin acceso a la red eléctrica o con difícil acceso. Se tienen: con baterías o sin baterías.

Conectados a red: los sistemas conectados a red no tienen sistemas de acumulación, ya que la energía producida durante las horas de insolación es canalizada a la red eléctrica.

Híbridos: En ciertas situaciones, el sistema fotovoltaico aislado puede ser complementado con otro para asegurar una mayor seguridad en la provisión de electricidad.

Componentes del sistema fotovoltaico

Módulos fotovoltaicos: captan la energía solar y la transforman en energía eléctrica.

Regulador de carga: protege a los acumuladores de un exceso de carga, y de la descarga por exceso de uso.

Sistema de acumulación: almacena la energía sobrante para que pueda ser reutilizada cuando se demande energía.

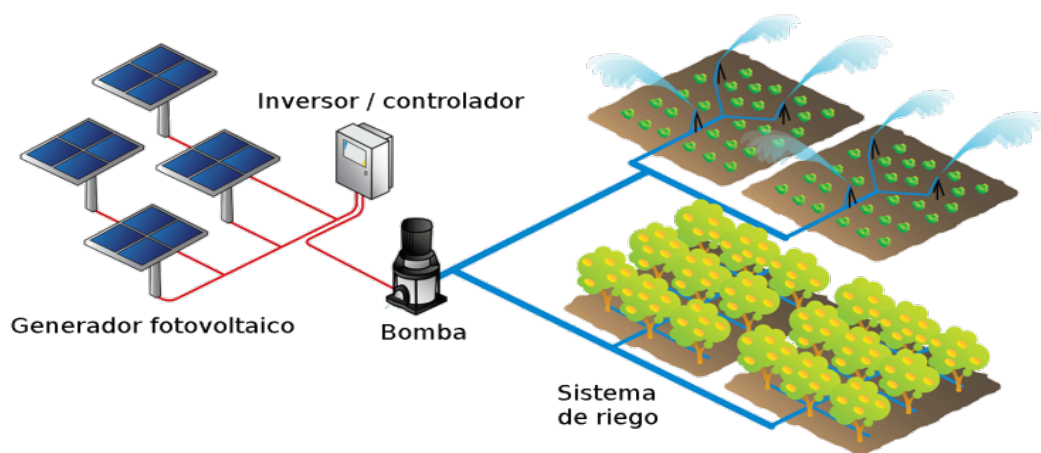
Inversor: transforma la corriente continua producida por los módulos, en corriente alterna para la alimentación de las cargas que así lo necesiten.

Elementos de protección del circuito: protegen la descarga y derivación de elementos en caso de fallo o situaciones de sobrecarga.

Se muestra en la figura 14 los componentes básicos de un sistema fotovoltaico.

Figura 14

Componentes del sistema fotovoltaico



Nota. Obtenido de Lorentz (2017)

1.2.4. Riego tecnificado

Morales et al. (2021), definen que el riego tecnificado es un sistema de irrigación que utiliza tecnologías avanzadas para distribuir el agua de manera eficiente y controlada a las plantas, optimizando el uso de recursos como agua y energía en comparación con métodos tradicionales. Entre sus tipos más comunes se incluyen el riego por goteo, que aplica agua directamente a las raíces; el riego por aspersión, que simula la lluvia natural; el riego subterráneo, que distribuye agua bajo tierra para reducir la evaporación.

1.2.4.1. Riego por Goteo

Blair (2017), menciona que el riego por goteo es una técnica nueva para la aplicación del agua de riego, que está difundándose de manera acelerada en todo el mundo y que está experimentando un rápido proceso de perfeccionamiento. Así mismo el autor señala que el método implica transportar agua al campo a través de pequeñas tuberías de plástico de pequeño calibre, situadas a lo largo de las hileras de plantas,

con el objetivo de suministrar agua de manera gradual pero constante al sistema radicular, a través de dispositivos apropiados llamados goteros o emisores, tal como se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Riego por goteo



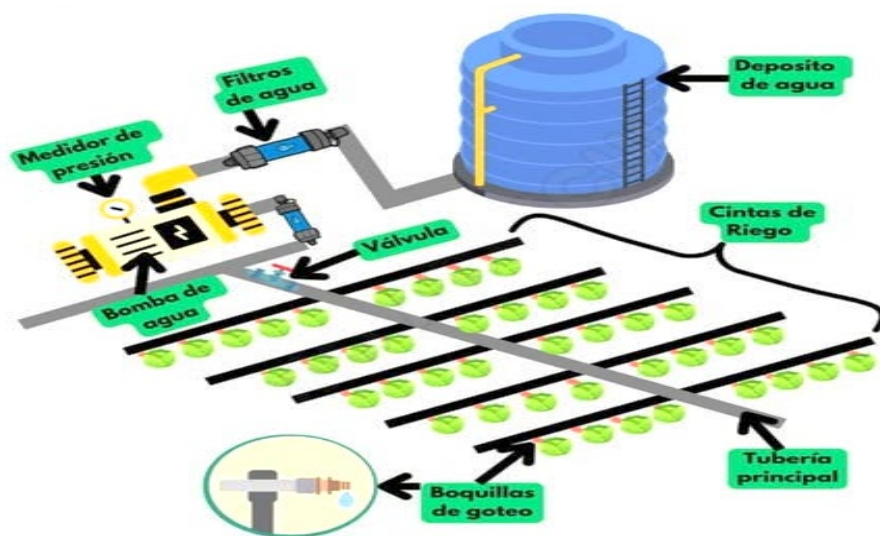
Nota. Obtenido de Huaylla (2019)

1.2.4.2. Diseño del riego por goteo

Blair (2017) menciona que implica diseñar y construir un sistema capaz de suministrar agua de forma precisa y homogénea directamente a las raíces de las plantas, reduciendo al máximo las pérdidas por evaporación, escurrimientos superficiales y filtraciones profundas. La figura 16 muestra el esquema y flujo de un sistema de riego por goteo, desde el depósito y bomba hasta las cintas de riego.

Figura 16

Componentes del riego por goteo



Nota. Obtenido de SENASA (2024)

a) Componentes del riego por goteo

- ***Cabezal de riego***

Blair (2017) afirma que este componente incluye el sistema de bombeo, junto con los mecanismos de fertirrigación y filtrado secundario. Su propósito es gestionar el control del flujo de agua y su distribución dentro del sistema de riego.

- ***Sistema de impulsión***

Blair (2017) menciona que se emplea cuando el agua no llega con la presión suficiente a la zona de riego. Para generar la presión necesaria, se utilizan bombas centrífugas, que pueden estar impulsadas por motores eléctricos o de combustión, como motores a gasolina o diésel.

- ***Sistema de filtrado***

Blair (2017) sostiene que es crucial para prevenir que los emisores se obstruyan. Se utilizan diversos tipos de filtros, tales como filtros de arena, de malla o de anillas, para asegurar que el agua se mantenga limpia y sin residuos que puedan taponar el sistema.

- ***Red de conducción y distribución***

Blair (2017), menciona que esta red está formada por tuberías que transportan el agua desde el cabezal hasta las zonas de riego. Generalmente, se usan tuberías de polietileno o PVC que distribuyen el agua hacia las cintas de goteo o emisores, encargados de suministrar el agua directamente a las raíces de las plantas.

- ***Emisores o goteros***

Blair (2017), explica que estos dispositivos aplican el agua de manera lenta y controlada. Existen varios tipos de emisores, como los de trayectoria larga, los de orificio y los vortex, diseñados para proporcionar el caudal adecuado y evitar las obstrucciones.

- ***Purgadores***

Blair (2017), indica que los purgadores se utilizan para limpiar las tuberías y mantenerlas en buen estado, permitiendo la eliminación de residuos o impurezas acumuladas. Los purgadores suelen colocarse en los extremos de las tuberías para facilitar este proceso. La imagen ilustra un sistema de riego por goteo que utiliza varios componentes, como un cabezal de riego con filtros para asegurar la limpieza del agua, una bomba conectada a un depósito que regula

la cantidad de agua distribuida, y una red de tuberías que suministra agua directamente a las plantas a través de emisores de goteo.

- **Tiempo de riego**

Díaz et al. (2023), mencionan que es el periodo en que la instalación debe permanecer en operación para suministrar el volumen de agua previamente calculado. ambos conceptos se vinculan, ya que cuando los riegos se realizan con mayor frecuencia o con intervalos más cortos, la cantidad de agua aplicada en cada turno disminuye y, en consecuencia, también se reduce la duración del riego.

- **Frecuencia de Riego**

Díaz et al. (2023), mencionan que la frecuencia de riego se refiere a la cantidad de veces que se aplica agua al cultivo dentro de un periodo específico (día, semana, mes, entre otros). en cambio, el intervalo de riego corresponde al tiempo que transcurre entre una aplicación y la siguiente.

- **Umbral de riego**

Según Allen et al. (1998), mencionan que el umbral de riego se determina a partir del agua fácilmente aprovechable (RAW), definida como la fracción del agua total disponible que el cultivo puede consumir sin presentar estrés hídrico. Cuando el agotamiento del agua en el suelo alcanza el valor RAW, debe aplicarse el riego. Según la metodología FAO 56, el umbral de riego representa la cantidad de agua que el cultivo puede consumir antes de sufrir estrés hídrico y se expresa mediante:

$$RAW = p \times TAW$$

Donde: RAW es el agua fácilmente aprovechable, p =fracción de agotamiento permisible TAW es el agua total disponible expresada $(\theta_{FC} - \theta_{WP})$.

Si se trabaja con humedad del suelo, la expresión del umbral hídrico es:

$$\theta_{UR} = \theta_{FC} - p (\theta_{FC} - \theta_{WP})$$

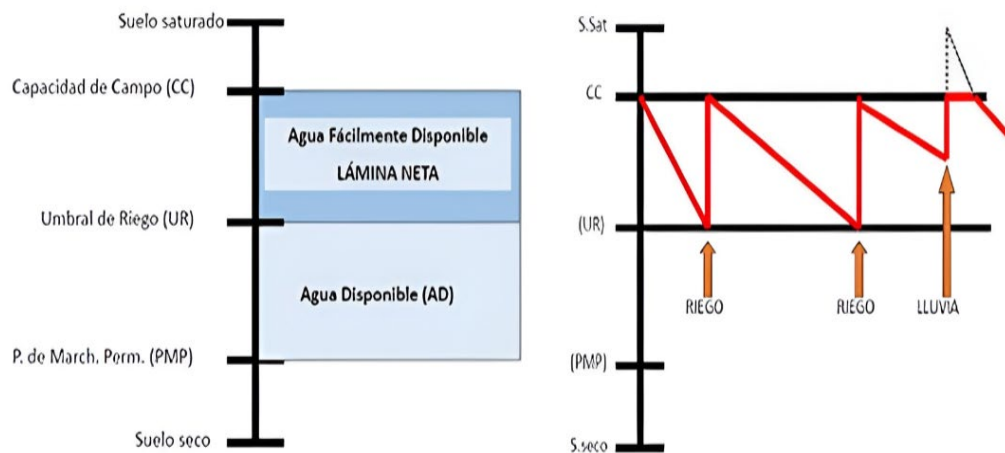
θ_{UR} es humedad al umbral de riego, θ_{FC} es la humedad a capacidad de campo, θ_{WP} es la humedad al punto de marchitez permanente y p es la fracción de agotamiento permisible.

Esta expresión determina el contenido de humedad del suelo en el que debe iniciarse el riego.

En la figura 17 se muestra el perfil hidríco del suelo y manejo de riego .

Figura 17

Perfil hídrico del suelo y manejo de riego



Nota. Agua en el Suelo, 2015, p.22

Ventajas del riego por goteo

Las ventajas son las mismas enunciadas en el riego por aspersión, además de las siguientes:

- Se consiguen eficiencias de 90 – 95% ya que la evaporación disminuye considerablemente bajo estos sistemas.
- Se reduce el crecimiento de malezas sobre todo entre las hileras de las plantas ya que esta zona no recibe humedad.
- Trabajan a menor presión, comparado con el riego por aspersión.
- Se pueden aplicar simultáneamente con el riego los fertilizantes solubles (fertiirrigación) y algunos insecticidas.
- Se pueden utilizar aguas salinas dependiendo de la tolerancia del cultivo.
- No le afectan los vientos fuertes salvo el sistema de microaspersión.

Desventajas del riego por goteo

- Requiere una inversión inicial elevada; sin embargo, esta se compensa con la reducción de costos asociados a la nivelación del terreno, la disminución de la mano de obra necesaria para el riego y la aplicación de fertilizantes, así como por el incremento significativo en la producción del cultivo.
- Es necesario disponer de una fuente de abastecimiento de agua en forma regular.
- Requiere de energía para operar el equipo.

- No se puede emplear en todos los cultivos (alfalfa, trigo, etc.) o cultivos cuya
- rentabilidad es baja.
- No se pueden hacer lavados de suelos, ni riegos climáticos.
- El sistema de riego por goteo (goteros compensados y no compensados, insertados o integrales, cintas de riego, otros) se emplea generalmente para frutales, hortalizas, flores.

1.2.4.3. Modelamiento agronómico

Jones et al. (2017), mencionan que el modelamiento agronómico es una herramienta científica que permite simular el crecimiento y desarrollo de los cultivos en función de variables ambientales, fisiológicas y de manejo agrícola. Los modelos agronómicos integran información sobre clima, suelo, prácticas de riego y fertilización para predecir el rendimiento y la respuesta del cultivo ante diferentes escenarios de manejo.

1.2.4.4. Modelamiento hidráulico

Bedoya y Ángeles (2017) señalan que el modelamiento hidráulico es un procedimiento analítico que permite evaluar el comportamiento del flujo de agua en sistemas de riego, considerando parámetros como caudal, presión, pérdidas de carga y distribución del agua, con el fin de asegurar una aplicación uniforme y eficiente del recurso hídrico.

1.2.4.5. Coeficientes de uniformidad

Keller y Karmeli (1974), menciona que el coeficiente de uniformidad (CU) es un indicador clave utilizado para medir la uniformidad en la distribución del agua en sistemas de riego, como los de riego localizado (goteo) o aspersión.

a) Coeficiente de uniformidad de caudales

$$CU = \frac{q_{25}}{q_m} \times 100$$

CU = Es el coeficiente de uniformidad del riego evaluado en el campo, expresado en porcentaje (%).

q_{25%} = Promedio del 25% de los menores valores de agua recolectada

q_{m%} = Promedio de todos los valores de agua recolectada en el sistema.

La tabla 8 clasifica la eficiencia del riego según su coeficiente de uniformidad, categorizando los valores desde excelentes (90-100%) hasta inaceptables (menor al 70%)

Tabla 8

Valores para caracterizar el coeficiente de uniformidad

Valor del coeficiente de uniformidad	Calificación
90 – 100%	Excelente
80 – 90%	Buena
70 – 80%	Aceptable
Menor de 70%	Inaceptable

Nota. Obtenido de Merriam et al. (1978)

La falta de uniformidad en el riego por goteo puede deberse principalmente a:

- Diferencias de presión en las tuberías afectan el caudal de los emisores, generando distribución desigual del agua.
- Sedimentos, minerales o materia orgánica pueden bloquear los emisores, reduciendo el flujo de agua.
- Tuberías largas, bombas insuficientes o errores en el diseño provocan desequilibrios en la distribución del agua.

1.2.4.6. Demanda hídrica del cultivo

García et al. (2017) mencionan que la demanda hídrica del cultivo corresponde a la cantidad de agua necesaria para su adecuado desarrollo bajo condiciones óptimas de humedad, sanidad y fertilidad. Esta puede determinarse experimentalmente o mediante la relación entre la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el coeficiente de cultivo (K_c).

a) Componentes relacionados con la demanda hídrica

La evapotranspiración del cultivo (ET_c)

García et al. (2017) , mencionan que la ETC representa el agua total que pierde un cultivo, combinando la evaporación directa desde el suelo y el agua que las plantas liberan mediante la transpiración. Este concepto es fundamental para el manejo eficiente del riego, ya que nos indica cuánta agua requieren realmente los cultivos para desarrollarse sanamente.

Evapotranspiración de referencia (ET_o)

García et al. (2017), explican que la ET_o es la tasa a la cual se evapora el agua de una superficie de referencia, que generalmente es un césped en crecimiento activo. En el caso de la quinua, la ET_o se utiliza para calcular la evapotranspiración del cultivo

y se estima utilizando métodos como el de Penman-Monteith, que incluye diversas variables del clima como radiación solar, temperatura, humedad, y velocidad del viento.

Coeficiente de cultivo (K_c)

García et al. (2017), señalan que el K_c es un factor que relaciona la evapotranspiración de un cultivo específico con la evapotranspiración de referencia (ETo). Es un coeficiente que varía según la etapa de desarrollo del cultivo, y para la quinua varía en función de las diferentes etapas de crecimiento, como la etapa inicial, desarrollo, mediados de temporada y etapa final. Estos valores de K_c permiten ajustar la ETo para reflejar la demanda hídrica real del cultivo.

García et al. (2017), mencionan que el K_c del cultivo está en función de la evapotranspiración de referencia (ETo) y la evapotranspiración del cultivo (ETc) expresado mediante la siguiente relación:

$$ETc = ETo \times Kc$$

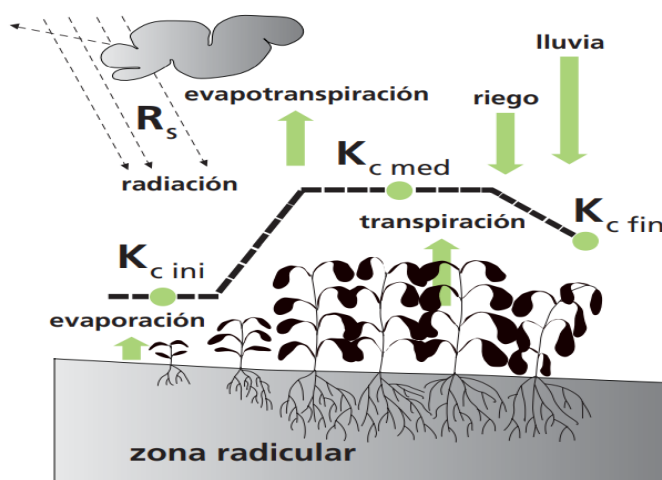
Donde:

- ETc es la evapotranspiración del cultivo de quinua.
- ETo es la evapotranspiración de referencia.
- Kc es el coeficiente de cultivo

ETc es la evapotranspiración del cultivo, determinado en forma diaria durante el periodo vegetativo del cultivo a través de la lectura del lisímetro de nivel freático constante. Se muestra en la figura 18 el proceso de evapotranspiración y coeficiente de cultivo.

Figura 18

Evapotranspiración y coeficiente de cultivo



Nota. Obtenido de FAO (2006)

CAPÍTULO II

MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. Aspectos metodológicos

Según Hernández et al. (2014), los aspectos metodológicos de la presente investigación se describen de la siguiente manera:

La investigación presentó un enfoque cuantitativo, debido a que se emplearon métodos y técnicas orientados a la medición numérica de variables clave, tales como el rendimiento de grano, la eficiencia en el uso del agua y los costos de operación.

El estudio fue de tipo aplicado, ya que utilizó conocimientos científicos y técnicos relacionados con el riego agrícola para dar solución a un problema práctico: la comparación de la eficiencia del riego por goteo manual frente al riego por goteo automatizado mediante energía fotovoltaica.

El nivel de investigación fue descriptivo y comparativo. Se describieron las características de ambos sistemas de riego y se compararon en función de las variables de estudio, permitiendo identificar diferencias en el rendimiento del grano de la quinua, la eficiencia en el uso del agua y la rentabilidad.

El diseño de investigación fue experimental comparativo, dado que se manipuló la variable independiente (tipo de riego: manual y automatizado) para evaluar su efecto sobre las variables dependientes (rendimiento de grano, eficiencia en el uso del agua y rentabilidad). Para ello, se establecieron dos tratamientos experimentales bajo condiciones agronómicas similares, procurando mantener la homogeneidad de las parcelas y el manejo del cultivo, con el fin de garantizar la validez de la comparación entre ambos sistemas de riego.

Las variables morfológicas fueron analizadas mediante ANOVA de un factor y prueba post-hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$). Las variables de rendimiento de grano, eficiencia

de uso del agua y viabilidad financiera fueron evaluadas mediante análisis comparativo, calculando variaciones absolutas y porcentuales entre ambos sistemas

2.2. Aspectos generales del proyecto

2.2.1. Ubicación

a) Ubicación Geográfica

La ubicación geográfica del área de estudio corresponde al sistema de coordenadas UTM, datum WGS 84, Zona 18L tal y como se muestra en la figura 19.

- **Este (E)** : 586351.745 m
- **Norte (N)** : 8544179.148 m
- **Altitud** : 2745 m.s.n.m

Figura 19

Ubicación satelital del área de proyecto



Nota. Adaptado de Google Earth

b) Ubicación política

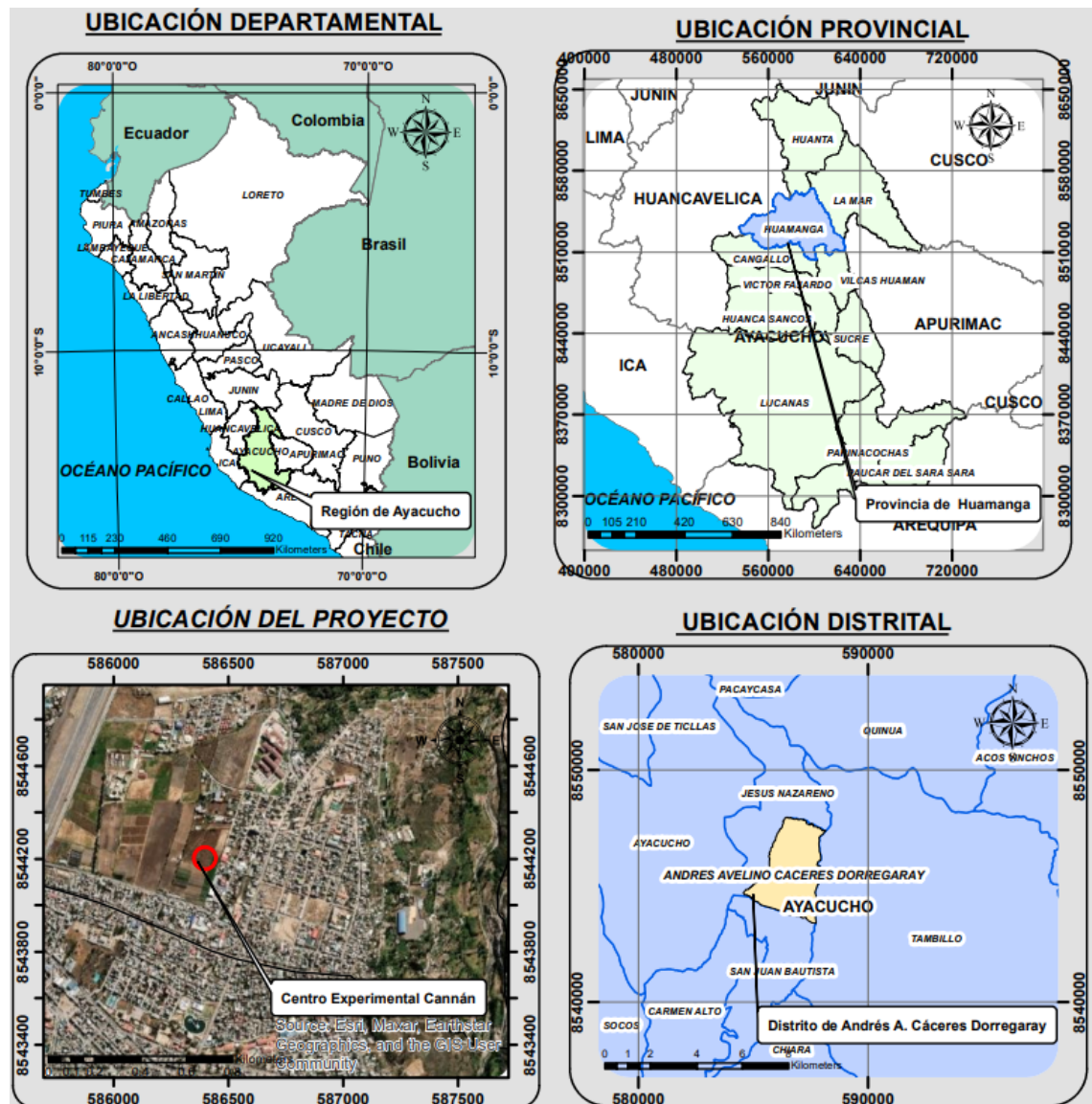
La ubicación política del área de estudio corresponde:

- **Departamento** : Ayacucho
- **Provincia** : Huamanga
- **Distrito** : Andrés Avelino Cáceres
- **Lugar** : Centro Experimental Canaán

En la figura 20 muestra la ubicación del proyecto mediante una jerarquía que va desde la Región Ayacucho y la Provincia de Huamanga hasta el Distrito de Andrés Avelino Cáceres. Esta figura combina cartografía política con una vista satelital para señalar con precisión el área de estudio.

Figura 20

Ubicación política del área de proyecto



2.2.2. Vías de acceso

EL acceso hacia el proyecto de investigación, se tomó como punto de partida desde la Plaza de Armas de Ayacucho hacia el Centro Experimental Canán que se encuentra en el distrito de Andrés Avelino Cáceres, el tipo de camino es pavimentada, con un recorrido de 3.1 km y un tiempo de 14 minutos aproximados como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9

Vía de acceso de Plaza de Armas de Ayacucho a Centro Experimental Canaán
UNSCH

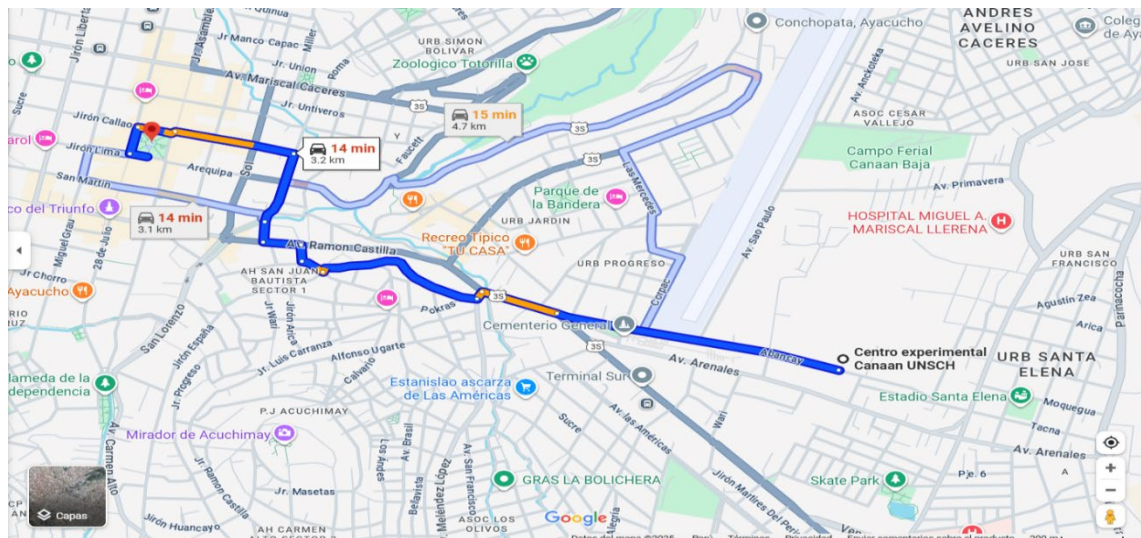
Origen	Destino	Distancia	Tiempo	Tipo de camino
Plaza de Armas de Ayacucho	Centro Experimental Canaán	3.1 km	14 min	Pavimentada

Nota. La tabla muestra el origen y destino, la distancia, tiempo y vía del proyecto, Fuente: Google Earth Pro

Se muestra el croquis de la ubicación del proyecto en la figura 21.

Figura 21

Croquis de ruta para la ubicación del proyecto



Nota. Adaptado de Google Maps

3.2.3 Condiciones climáticas

Los datos climáticos provienen de la Estación Meteorológica INIA-OPEMAN del Gobierno Regional de Ayacucho, ubicada a 2 756 msnm (13° 10' 00.06" S, 74° 12' 22.92" O), en el distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray, provincia de Huamanga, Ayacucho. Con estos datos se calcularon la evapotranspiración potencial y el balance hídrico, cuyos resultados se presentan en la tabla 10 y la figura 22.

Durante el período de cultivo (agosto 2025 - enero 2026), la temperatura media fue de 17.30 °C, con una máxima de 29.83 °C y una mínima de 4.85 °C. La precipitación total anual registrada fue de 565.00 mm, con valores mensuales de 8.5, 17.4, 31.3, 42.8, 85.3 y 95.6 mm respectivamente, siendo diciembre y enero los meses de mayor precipitación.

Tabla 10

Temperatura máxima, media, mínima y balance hídrico de la campaña agrícola 2025-2026 según la Estación Meteorológica INIA - Ayacucho.

DISTRITO: Andrés Avelino C. Dorregaray

ALTITUD: 2735 msnm

PROVINCIA: Huamanga

LATITUD: 13° 10' 00.06"

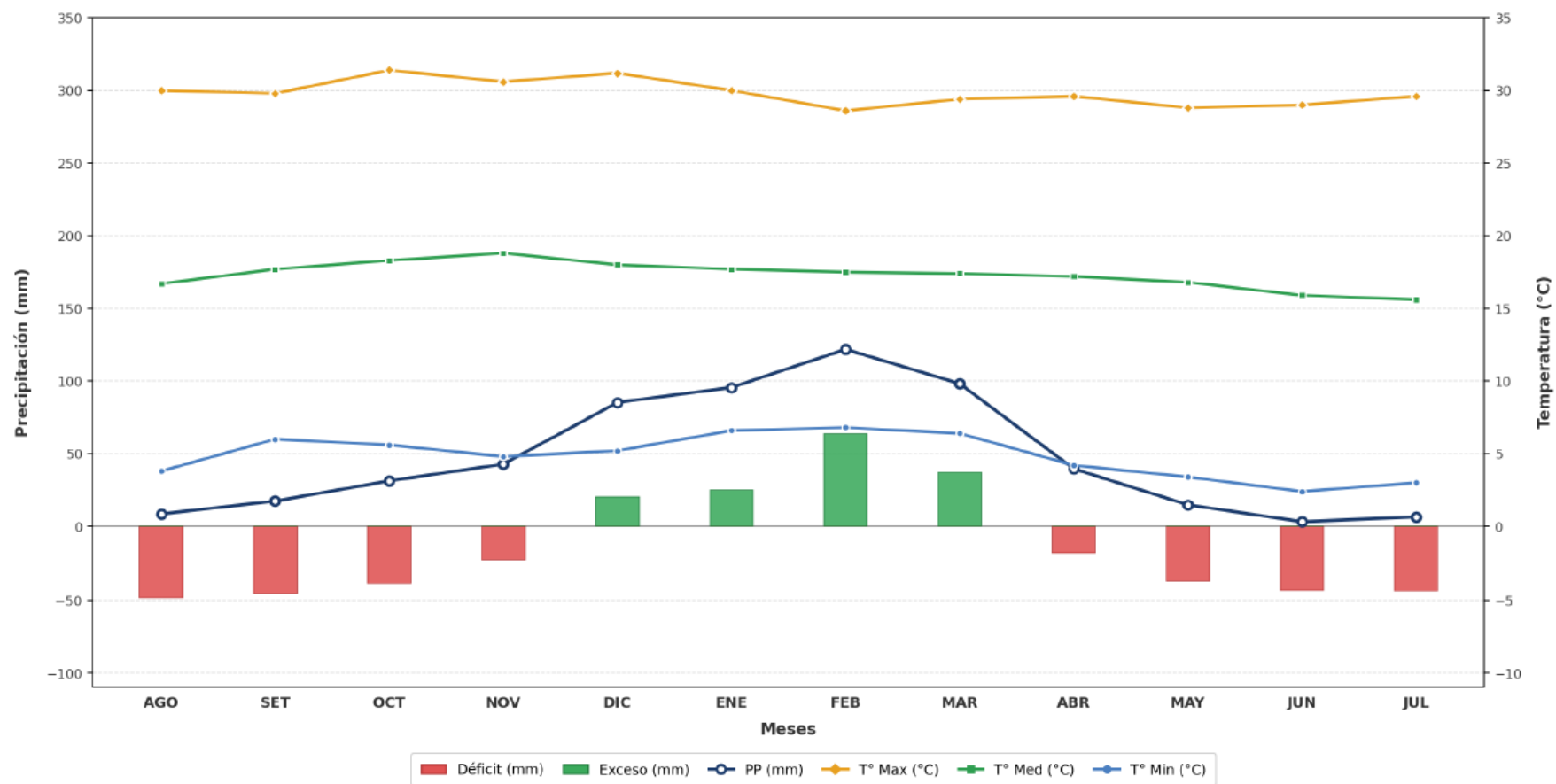
DEPARTAMENTO: Ayacucho

LONGITUD: 74° 12' 22.92"

Año	2025						2026						Total	Prom
Meses	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul		
Numero de días	31	30	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31		
T° máxima (°C)	30	29.8	31.4	30.6	31.2	30	28.6	29.4	29.6	28.8	29	29.6		29.83
T° mínima (°C)	3.8	6	5.6	4.8	5.2	6.6	6.8	6.4	4.2	3.4	2.4	3		4.85
T° media (°C)	16.7	17.7	18.3	18.8	18	17.7	17.5	17.4	17.2	16.8	15.9	15.6		17.30
Factor	4.96	4.8	4.96	4.8	4.96	4.96	4.48	4.96	4.8	4.96	4.8	4.96		
ETo (mm/mes)	103.23	114	126.48	117.9	118.42	128.03	105.84	110.67	103.8	93.93	84	90.52	1296.82	108.07
Precipitación (mm)	8.5	17.4	31.3	42.8	85.3	95.6	121.8	98.2	39.6	14.8	3.2	6.5	565.00	
factor de corrección	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55		
ETo ajustada (mm)	56.78	62.70	69.56	64.85	65.13	70.42	58.21	60.87	57.09	51.66	46.20	49.79		
H del suelo (mm)	-48.28	-45.30	-38.26	-22.05	20.17	25.18	63.59	37.33	-17.49	-36.86	-43.00	-43.29		
Exceso (mm)					20.17	25.18	63.59	37.33						
Déficit (mm)	-48.3	-45.3	-38.3	-22.0					-17.5	-36.9	-43.0	-43.3		

Figura 22

Temperatura máxima, mínima, media y balance hídrico de la campaña agrícola 2025-2026 según la Estación Meteorológica de INIA-Ayacacucho.



2.3. Población y muestra

La población de estudio estuvo conformada por las parcelas de cultivo de quinua ubicadas en el Centro Experimental Canaán que se encuentra en el distrito de Andrés Avelino Cáceres de la provincia de Huamanga y departamento de Ayacucho donde se desarrolló la investigación. Este conjunto abarca las áreas agrícolas representativas de la zona, caracterizadas por condiciones edafoclimáticas específicas y por el uso de prácticas de riego a pequeña escala. Dicha población permitió disponer de un marco de referencia real y contextualizado, adecuado para evaluar el desempeño de los sistemas de riego automatizado y manual en condiciones propias del lugar.

La muestra estuvo constituida por dos parcelas experimentales seleccionadas dentro de la población de estudio, cada una destinada a la implementación de un sistema de riego diferente: una bajo el sistema automatizado con energía fotovoltaica y otra bajo el sistema manual. La selección se realizó de manera intencional, asegurando la homogeneidad en cuanto a área, características del suelo, manejo agronómico y condiciones de exposición, con el fin de garantizar la validez de las comparaciones entre tratamientos. Estas unidades de análisis representaron de manera adecuada la realidad agrícola local y proporcionaron datos suficientes para cumplir con los objetivos de la investigación.

2.4. Instrumentos

- GPS portátil
- Cámara fotográfica
- Cinta métrica
- Balanza analítica
- Instrumental para toma de muestras de suelo (cubeta/azadón) y bolsas herméticas para muestras.
- Botellas limpias para muestreo de agua (y rotulación).
- Caudalímetros tipo sensor YF-S201 (registro de caudal instantáneo y volumen acumulado).
- Sensor de humedad de suelo - RS485
- Sensor DHT22 (temperatura y humedad ambiente).
- Multímetro
- Medidor de humedad de suelo PMS-714 (Serie de Humedad para Plantas y Suelos) para prueba de calibración.
- Cuaderno de campo

- Computador / dispositivo con acceso a Arduino IoT Cloud (dashboard y descarga CSV).
- Equipo para pruebas volumétricas de calibración de caudalímetros (vasos graduados, cronómetro y caudalímetro industrial).
- Equipo de laboratorio para análisis físico-químico de agua y suelos

2.5. Materiales

Materiales electrónicos y de control

- Microcontrolador ESP32-WROOM-32
- Módulo de comunicación RS485 (MAX485)
- Sensores de flujo YF-S201
- Sensor de humedad de suelo - RS485
- Sensor de temperatura y humedad DHT22
- Relé de control de 5V/10A
- Electroválvula de 12V DC
- Transistor 2N3904
- Diodo 1N4007
- Resistencias (220 Ω , 510 Ω , 1k Ω , 10k Ω)
- Capacitor electrolítico de 10 μ F
- Placa PCB (para montaje final)
- Conectores tipo 2P-P5.08
- Headers macho/hembra

Materiales de energía y alimentación

- Panel solar de 100 W
- Controlador de carga solar de 10 A
- Batería de 12V – 7 Ah
- Regulador de tensión LM2596 (step-down)
- Cables eléctricos (12 AWG, 14 AWG GPTE, 18 AWG GPTE)
- Conectores MC4 para panel solar
- Caja de protección para batería y controlador
- Fusibles de protección (10 A, 20 A)
- Porta-fusibles

Materiales hidráulicos y de riego

- Tubos PVC de ½" y 1"
- Mangueras de polietileno de ½" y 1"

- Goteros autocompensados
- Cinta de riego por goteo
- Conectores de manguera (T, L, codos, uniones rectas)
- Válvulas manuales de paso
- Filtros de malla para agua
- Adaptadores para electroválvula
- Tanque de almacenamiento de agua (1100 L)
- Abrazaderas industriales

Materiales agrícolas

- Semillas de quinua de variedad Salcedo INIA
- Fertilizantes de aplicación básica
- Insumos fitosanitarios (biofertilizantes, bioinsecticidas)
- Herramientas agrícolas manuales (azadón, pico, rastrillo)
- Regla graduada y cinta métrica
- Estacas de madera para delimitación de parcelas
- Cuerda para marcación de surcos
- Bolsas de muestreo de grano
- Marcadores permanentes

Materiales de instalación y medición

- Alicates universales
- Pinzas de corte
- Destornilladores planos y de cruz
- Taladro inalámbrico con brocas
- Multímetro digital
- Cinta aislante
- Cinta de teflón
- Cinta métrica
- Nivel de burbuja
- Guantes de seguridad
- Lentes de protección

Herramientas y software

- Arduino IDE
- Librerías para ESP32, DHT22, RS485 y YF-S201
- Plataforma Arduino IoT Cloud

- Microsoft Excel (procesamiento de datos)

2.6. Diseño de la investigación

La investigación presentó un diseño experimental, estructurado considerando las condiciones reales del área de estudio y los recursos disponibles. Se estableció un esquema comparativo entre dos modalidades de riego: automatizado y manual. Debido a limitaciones logísticas y de espacio, no se dispuso de réplicas experimentales, por lo que se trabajó con una sola parcela por tratamiento. Ambas parcelas presentaron características homogéneas en cuanto a pendiente (1.25 %), textura del suelo (franco arcillo arenoso), exposición solar y manejo agronómico, de modo que la principal diferencia entre ellas fue el método de riego aplicado.

La tabla 11 se muestra la estructura del experimento de campo, el cual consiste en una comparación entre dos tratamientos de riego sin réplicas (parcelas únicas).

Tabla 11

Diseño experimental

Ítem	Descripción
Tipo de diseño	Experimento de campo con dos tratamientos sin réplicas (comparación entre parcelas únicas)
Tratamientos	T1: Riego por goteo manual; T2: Riego por goteo automatizado (fotovoltaico)
Número de réplicas	0 (una parcela por tratamiento)
Unidades experimentales	Una parcela completa por tratamiento
Superficie de parcela útil	de 48 m ² por tratamiento
Criterio de control	Selección intencional para homogeneidad de pendiente y textura; exclusión de bordes 0,5 m
Unidades de muestreo internas	Superficial: 4 surcos de 1 m lineal por parcela para peso de grano general. Biológica: 10 plantas individuales por parcela para variables morfológicas y peso de grano individual.
Variables medidas	Rendimiento de grano (kg/ha), eficiencia de uso de agua, análisis financiero, etc.
Frecuencia de muestreo	Variables vegetativas: etapa de maduración; sensores: muestreo continuo; rendimiento: al corte/postcosecha.

En este diseño, cada parcela se constituyó como unidad experimental completa, delimitando un área útil que excluyó los bordes para evitar distorsiones en las mediciones. Dentro de cada parcela se seleccionaron plantas testigo de forma sistemática con el fin de registrar variables vegetativas y productivas, las cuales fueron monitoreadas en distintas etapas fenológicas. Los tratamientos aplicados fueron dos: riego por goteo manual y riego por goteo automatizado con sistema fotovoltaico, ambos bajo las mismas condiciones de siembra, fertilización y control fitosanitario. El análisis se orientó a comparar tendencias y promedios entre tratamientos, interpretando los resultados con base en las diferencias observadas y reconociendo las limitaciones de no contar con replicación estadística.

2.7. Procedimientos

El diagrama de flujo de procedimientos del proyecto representa de forma secuencial y ordenada las etapas principales ejecutadas, dividiéndose en tres fases clave:

En la primera fase, se inicia con la automatización del sistema de riego por goteo, que abarca desde el diagnóstico inicial y selección de componentes hasta el modelamiento agronómico, hidráulico y técnico. Posteriormente, se detalla la instalación de los sistemas (automático y tradicional), la programación del microcontrolador y la configuración de la plataforma IoT, finalizando con la operación y monitoreo en campo de la tecnología fotovoltaica.

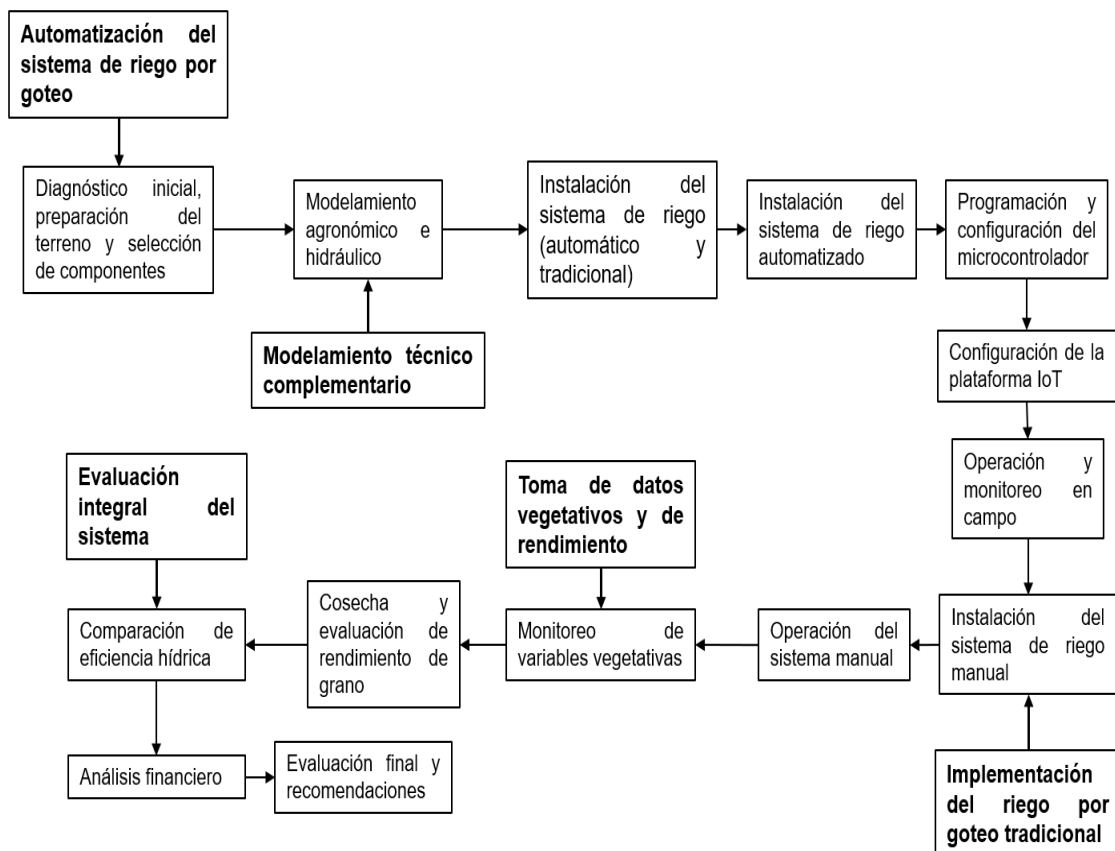
En la segunda fase, se describe la implementación del riego por goteo tradicional y la operación del sistema manual. A partir de aquí, el flujo se centra en la toma de datos vegetativos y de rendimiento, el monitoreo de variables en campo y la ejecución de la cosecha, procesos fundamentales para recolectar la evidencia experimental del cultivo.

Finalmente, el diagrama culmina con la evaluación integral del sistema. En esta etapa se realiza la comparación de eficiencia hídrica, el análisis financiero y la evaluación final con recomendaciones. Esta estructura permite integrar los resultados técnicos y económicos para emitir conclusiones sólidas sobre la viabilidad y trazabilidad de todo el estudio, desde la instalación hasta la interpretación de resultados.

La 23 muestra el diagrama de flujo de procedimientos del proyecto, el cual representa de forma secuencial las etapas principales ejecutadas en la investigación. El proceso se divide en tres bloques fundamentales.

Figura 23

Diagrama de flujo del procedimiento



Proceso 1: Automatización del sistema de riego por goteo

Paso 1: Diagnóstico inicial, preparación del terreno y selección de componentes

Diagnóstico inicial

Se realizó un diagnóstico del área en el Centro Experimental Canaán, del distrito Andrés Avelino Cáceres Dorregaray de la región Ayacucho, para caracterizar las condiciones edafoclimáticas y la calidad del agua antes de implementar los tratamientos de riego por goteo manual y automatizado. El estudio incluyó la inspección de la topografía, distribución de parcelas, georreferenciación, registro fotográfico, levantamiento preliminar de planos de riego e identificación del sistema de conducción de agua. Asimismo, se seleccionaron parcelas adyacentes y homogéneas para reducir variaciones de pendiente y sombra que pudieran afectar los resultados experimentales. En la figura 24 se ilustra la inspección del cabezal de riego y el registro de datos del sistema de bombeo encargado de abastecer el área experimental; emplea una bomba de 2 HP de potencia junto a un manómetro con un rango operativo de 1 bar a 1.5 bar, garantizando así un control preciso de la presión durante el proceso de riego.

Figura 24

Sistema hidráulico de reservorio



Se muestra en la figura 25 las tomas de muestras de suelo para el análisis físico y químico de suelo que serán llevados al laboratorio para su análisis respectivo.

Figura 25

Toma de muestras de suelo en las dos parcelas experimentales



Las muestras de análisis químico de suelos se obtuvieron de la capa arable (muestreo de la zona radicular, por lo general 0–30 cm) mediante submuestreos compuestos dispuestos en patrón zig-zag dentro de cada parcela y la muestra de análisis físico de suelos se realizó en una pequeña calicata de 1x1x0.60m de profundidad, luego se procedió a realizar el respectivo rotulado y las muestras se almacenaron en bolsas herméticas y se remitieron al laboratorio dentro de las condiciones de conservación apropiadas.

Según la tabla 12, el suelo de las parcelas es de clase arcillosa, con una densidad aparente de 1.16 g.cc^{-1} , lo que indica una estructura física favorable para el desarrollo radicular. Su capacidad de retención de agua es eficiente, ofreciendo un rango de humedad aprovechable entre el 30.65% (capacidad de campo) y el 16.06% (punto de marchitez), condiciones óptimas para el manejo del riego

Tabla 12

Análisis físico de suelos

Nº Laboratorio	AS 112033
Nº Campo	Parcela 01 y 02
Capacidad de campo (%)	30.65
Punto de marchites (%)	16.06
Densidad aparente (g.cc^{-1})	1.16
Arena (%)	32
Limo (%)	21
Arcilla (%)	47
Clase Textural	Arcilloso

El análisis químico de la tabla 13 revela un suelo ligeramente alcalino (pH 7.43) y no salino (0.45 dS m^{-1}), con una alta capacidad de intercambio catiónico ($28.89 \text{ Cmol (+).kg}^{-1}$) y saturación de bases del 100%. Aunque presenta niveles altos de calcio, magnesio y potasio, las relaciones catiónicas indican desequilibrios nutricionales (como Ca/K de 13.17), lo que sugiere ajustar la fertilización para corregir las deficiencias relativas de calcio y potasio y así optimizar el rendimiento de grano del cultivo.

Tabla 13

Análisis químico de suelos

Parámetro	Resultado	Unidad	Clasificación
pH (1:1)	7.43	Unidad pH	Ligeramente alcalino
Conductividad (1:1)	0.45	dS m^{-1}	No salino
Carbonatos	0.55	%	Muy bajo
Materia orgánica	2.68	%	Medio
Fósforo disponible	12.94	ppm	Medio
Potasio disponible	267	ppm	Muy Alto
Nitrógeno total	0.14	%	Medio
C.I.C.	28.89	Cmol (+).kg^{-1}	Alto
Ca^{2+}	21.54	Cmol (+).kg^{-1}	Alto
Mg^{2+}	5.24	Cmol (+).kg^{-1}	Alto
K^{+}	1.91	Cmol (+).kg^{-1}	Alto
Na^{+}	0.45	Cmol (+).kg^{-1}	Bajo
$\text{Al}^{3+} + \text{H}^{+}$	0	Cmol (+).kg^{-1}	Muy bajo
Saturación de bases	100	%	Alto

Relaciones catiónicas		
Ca / K	13.17	Deficiencia de Calcio
Ca / Mg	4.11	Deficiencia de Calcio
Mg / K	3.2	Deficiencia de Potasio
(Ca + Mg + K)/Al	—	—

La figura 26 se aprecia la toma de muestras de agua provenientes del reservorio de forma piramidal, el cual posee una capacidad de 50 m³ del Centro Experimental Canaán y se encuentra recubierto con geomembrana para garantizar la estanqueidad y calidad del recurso hídrico utilizado en el proyecto.

Figura 26

Toma de muestra de agua



. Para el análisis físico-químico, las muestras de agua se recolectaron directamente en el punto estratégico de la toma y del reservorio. Utilizamos una botella limpia, debidamente rotuladas con la fecha y el lugar de procedencia, para luego trasladarlas al laboratorio. Durante el proceso en campo, registramos datos clave como coordenadas GPS, la hora y fecha y lugar.

El análisis de agua en la tabla 14 clasificó la muestra como C1-S1*, indicando una salinidad y contenido de sodio bajos, lo que la hace apta para el riego en casi cualquier condición de suelo. Debido a su naturaleza "muy blanda", es un recurso ideal para sistemas de riego presurizado, ya que no presenta riesgo de obturación en los emisores. Solo se recomienda precaución en suelos de permeabilidad muy reducida o con cultivos altamente sensibles al sodio.

Tabla 14*Resultados de análisis de agua*

Nº Laboratorio	A01467
Nº Campo	Reservorio del C.E. Canaán
pH	6.89
C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	157
CATIONES (meq/l)	
Calcio	0.73
Magnesio	0.33
Potasio	0.09
Sodio	0.45
Suma de Cationes (meq/l)	1.6
ANIONES (meq/l)	
Nitratos	0
Carbonatos	0
Bicarbonatos	1.13
Cloruros	0.44
Sulfatos	0
Suma de Aniones (meq/l)	1.57
Na (%)	28.31
Boro (ppm)	0.03
RAS	0.62
Sales Solubles Totales (ppm)	100.48
Dureza (G.H.F.)	5.3
CLASIFICACIÓN	C1-S1*

Preparación del terreno

La preparación del área experimental, con una extensión de 118.5 m², se llevó a cabo mediante labores mecanizadas utilizando un tractor agrícola. Inicialmente, el 19 de julio de 2025, se realizó una labor de arado de discos, alcanzando una profundidad aproximada de 25 cm para remover la capa arable. Posteriormente, el 15 de agosto, se efectuó el paso de rastra con la finalidad de nivelar el terreno, obteniéndose un suelo suelto y con condiciones estructurales apropiadas para la siembra.

Se muestra en la figura 27 las labores iniciales realizadas en el terreno como es el arado y rastrado mecánico.

Figura 27

Arado y rastrado mecánico



Se preparó el terreno mediante una limpieza general del área de cultivo, retirando restos vegetales, piedras y materiales inertes, seguida de un arado y rastreado mecanizado para mejorar la aireación e infiltración. Finalmente, se realizó una nivelación topográfica precisa para asegurar una distribución uniforme del agua y evitar encharcamientos.

Selección de componentes

La selección y disposición de los componentes del sistema de riego se realizó considerando criterios de eficiencia hidráulica, operativa y autonomía energética. Se delimitaron las parcelas experimentales optimizando la distribución del agua entre los sectores automatizado y manual, trazando las líneas de conducción para reducir pérdidas de carga y asegurar la uniformidad del riego. Asimismo, se seleccionó un sistema fotovoltaico compuesto por paneles solares, controlador de carga, batería y un sistema de control integrado por dispositivos electrónicos y de medición.

Proceso 2: Modelamiento técnico complementario

Paso 2: Modelamiento agronómico e hidráulico

Modelamiento agronómico:

El modelamiento agronómico permitió planificar y gestionar el riego de acuerdo con las necesidades hídricas de la quinua durante sus diferentes etapas fenológicas, evitando déficits o excesos de agua que afecten el rendimiento de grano de la quinua. Para ello, se recopiló información climática local y se estimó la evapotranspiración de

referencia (ET_o) mediante el método Penman-Monteith. Posteriormente, se definieron los coeficientes de cultivo (K_c) para cada fase fenológica, permitiendo calcular la evapotranspiración del cultivo (ET_c), la cual determinó la lámina de agua requerida reponerse en el suelo mediante el riego.

La tabla 15 muestra los valores de K_c (coeficiente de cultivo) para el cultivo de quinua a lo largo de sus diferentes etapas fenológicas

Tabla 15

Valores de K_c por mes

CULTIVOS DE BASE	ÁREA	Kc												
		há	Germinación	Emergencia	2 hojas cotiledones	2 hojas verdaderas	4 hojas verdaderas	Inicio de panojamiento	Panojamiento	Inicio de floración	Floración o antesis	Floración o antesis	Inicio de grano lechoso	Fin de grano lechoso
Quinua	0.0048	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.9	1.01	1.0	1.1	1	0.7
Kc ponderado	0.0048	0.4	0.8	1.3	1.8	2.4	3.0	3.7	4.6	5.6	6.7	7.9	8.9	9.6

Nota. Obtenido de Choquecahua et al 1991

La tabla 16 muestra la evapotranspiración de referencia (ET_o) mensual, que cuantifica la demanda de agua que el clima exige al entorno en cada mes del año. Los respectivos cálculos se muestran en el anexo K.

Tabla 16

Valores de ET_o por mes

ET _o	MESES											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Días/mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
mm/día	4.1	3.8	3.6	3.5	3.03	2.8	2.9	3.3	3.8	4.1	3.9	3.8
mm/mes	128	106	111	104	93.9	84	91	103	114	126	118	118

Nota. CROPWAT VERSION 8.0

Luego se procedió a calcular la evapotranspiración (ET_c):

$$ET_c = ET_o \times K_c$$

Esta es la tabla 17, que presenta los valores calculados de ET_c (Evapotranspiración del Cultivo) para la quinua desglosados por etapa fenológica

Tabla 17*Valores calculados de Etc por etapa fenológica*

Etc por etapa fenológica	
Germinación	1.734
Emergencia	3.381
2 hojas cotiledones	2.420
2 hojas verdaderas	2.520
4 hojas verdaderas	2.924
Inicio de panojamiento	3.176
Panojamiento	3.984
Inicio de floración	4.911
Floración o antesis	5.512
Floración o antesis	5.751
Inicio de grano lechoso	6.070
Fin de grano lechoso	4.874
Grano pastoso	3.802

Luego se procedió a calcular la demanda hídrica de diseño:

Demanda hídrica de diseño (mm/día) = ETc (mes) / Eficiencia (%)

Esta tabla 18 se muestra el resumen de los parámetros fundamentales para el modelamiento agronómico del proyecto: define las condiciones físicas y operativas para el riego de tus 48 m³ (0.0048 ha) de quinua.

Tabla 18*Datos de ambiente utilizados para modelamiento agronómico*

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	2.04	mm/día
Eficiencia esperada	0.85	%
Textura	Arcilloso	-

En paralelo, con las características físico-hídricas del suelo obtenidas del laboratorio como capacidad de campo (CC) de 30.65 %, punto de marchitez permanente (PMP) de 16.06 %, agua disponible total (TAW) y profundidad efectiva de raíces de 0.30 m y se determinó el almacenamiento útil de agua y los límites críticos de humedad, información esencial para establecer la frecuencia de riego es decir, el intervalo de días

que el cultivo puede tolerar sin riego antes de alcanzar un déficit que comprometa su desarrollo. El modelamiento agronómico se muestra en el anexo K.

Esta tabla 19 define los parámetros técnicos de tu sistema de riego por goteo. Son los valores que determinan cómo se distribuirá físicamente el agua en las parcelas de quinua.

Tabla 19

Valores utilizados respecto a riego

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

En la tabla 20 se muestra los datos utilizados de suelos, que es fundamental para determinar cuánta agua puede retener el suelo y cuánto debe almacenarse en la zona radicular para que la quinua no sufra estrés hídrico.

Tabla 20

Datos utilizados de suelos

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65	%HG
PMP	16.06	%HG
Densidad	1.16	g/cm ³
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	42.0	%

A partir de estos parámetros, el modelamiento agronómico permitió simular diferentes escenarios de riego, considerando tanto la eficiencia del sistema presurizado como las pérdidas inevitables en el proceso. Con ello se definieron tres variables fundamentales para cada fase de desarrollo de la quinua:

Frecuencia de riego (días): intervalo calculado entre riegos sucesivos.

Lámina de riego (mm/riego): profundidad de agua que debe aplicarse en cada evento.

Tiempo de riego (horas): duración necesaria de cada turno para reponer la lámina establecida, en función del caudal del sistema.

Se realizó dicho modelamiento para cada etapa fenológica específica de la quinua:

En la tabla 21 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de germinación, especificando que se debe aplicar una lámina de 25.20 mm cada 5 días

Tabla 21

Modelamiento agronómico para etapa de germinación

Frecuencia de riego	5.00	días
Lámina de riego recogida	25.20	mm/riego
Tiempo de riego	2.02	horas
Tiempo de riego	120.97	minutos

En la tabla 22 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de emergencia, indicando que se debe aplicar una lámina de 24.47 mm cada 6 días.

Tabla 22

Modelamiento agronómico para etapa de emergencia

Frecuencia de riego	6.00	días
Lámina de riego recogida	24.47	mm/riego
Tiempo de riego	2.97	horas
Tiempo de riego	117.96	minutos

En la tabla 23 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de 2 hojas cotiledones, indicando que se debe aplicar una lámina de 25.13 mm cada 7 días.

Tabla 23

Modelamiento agronómico para etapa de 2 hojas cotiledones

Frecuencia de riego	7.00	días
Lámina de riego recogida	25.13	mm/riego
Tiempo de riego	2.01	horas
Tiempo de riego	120.60	minutos

En la tabla 24 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de 2 hojas verdaderas, indicando que se debe aplicar una lámina de 23.55 mm cada 8 días.

Tabla 24

Modelamiento agronómico para etapa de 2 hojas verdaderas

Frecuencia de riego	8.00	días
Lámina de riego recogida	23.55	mm/riego
Tiempo de riego	1.88	horas
Tiempo de riego	113.03	minutos

En la tabla 25 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de 4 hojas verdaderas, indicando que se debe aplicar una lámina de 24.29 mm cada 8 días.

Tabla 25*Modelamiento agronómico para etapa de 4 hojas verdaderas*

Frecuencia de riego	8.00	Días
Lámina de riego recogida	24.29	mm/riego
Tiempo de riego	1.94	horas
Tiempo de riego	116.58	minutos

En la tabla 26 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de inicio de panojamiento, indicando que se debe aplicar una lámina de 23.09 mm cada 7 días.

Tabla 26*Modelamiento agronómico para etapa de inicio de panojamiento*

Frecuencia de riego	7.00	Días
Lámina de riego recogida	23.09	mm/riego
Tiempo de riego	1.85	horas
Tiempo de riego	110.82	minutos

En la tabla 27 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de panojamiento, estableciendo que se debe aplicar una lámina de 24.82 mm cada 6 días.

Tabla 27*Modelamiento agronómico para etapa de panojamiento*

Frecuencia de riego	6.00	días
Lámina de riego recogida	24.82	mm/riego
Tiempo de riego	1.99	horas
Tiempo de riego	119.13	minutos

En la tabla 28 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de inicio de floración, indicando que se debe aplicar una lámina de 25.48 mm cada 5 días.

Tabla 28*Modelamiento agronómico para etapa de inicio de floración*

Frecuencia de riego	5.00	días
Lámina de riego recogida	25.48	mm/riego
Tiempo de riego	2.04	horas
Tiempo de riego	122.31	minutos

En la tabla 29 presentada, el plan de riego operativo para la etapa inicial de floración o antesis es: se debe aplicar una lámina de 22.90 mm cada 4 días

Tabla 29*Modelamiento agronómico para etapa inicial de floración o antesis*

Frecuencia de riego	4.00	días
----------------------------	------	------

Lámina de riego recogida	22.90	mm/riego
Tiempo de riego	1.81	horas
Tiempo de riego	109.91	minutos

En la tabla 30 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de floración, indicando que se debe aplicar una lámina de 23.88 mm cada 4 días

Tabla 30

Modelamiento agronómico para etapa de floración o antesis

Frecuencia de riego	4.00	días
Lámina de riego recogida	23.88	mm/riego
Tiempo de riego	1.91	horas
Tiempo de riego	120.97	minutos

En la tabla 31 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de inicio de grano lechoso, indicando que se debe aplicar una lámina de 25.20 mm cada 4.00 días

Tabla 31

Modelamiento agronómico para etapa de inicio de grano lechoso

Frecuencia de riego	4.00	días
Lámina de riego recogida	25.20	mm/riego
Tiempo de riego	2.02	horas
Tiempo de riego	120.97	minutos

En la tabla 32 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de fin de grano lechoso, indicando que se debe aplicar una lámina de 25.31 mm cada 5.00 días

Tabla 32

Modelamiento agronómico para etapa de fin de grano lechoso

Frecuencia de riego	5.00	días
Lámina de riego recogida	25.31	mm/riego
Tiempo de riego	2.02	horas
Tiempo de riego	121.47	minutos

En la tabla 33 se muestra el plan de riego operativo para la etapa de grano pastoso, indicando que se debe aplicar una lámina de 23.67 mm cada 6.00 días

Tabla 33

Modelamiento agronómico para etapa de grano pastoso

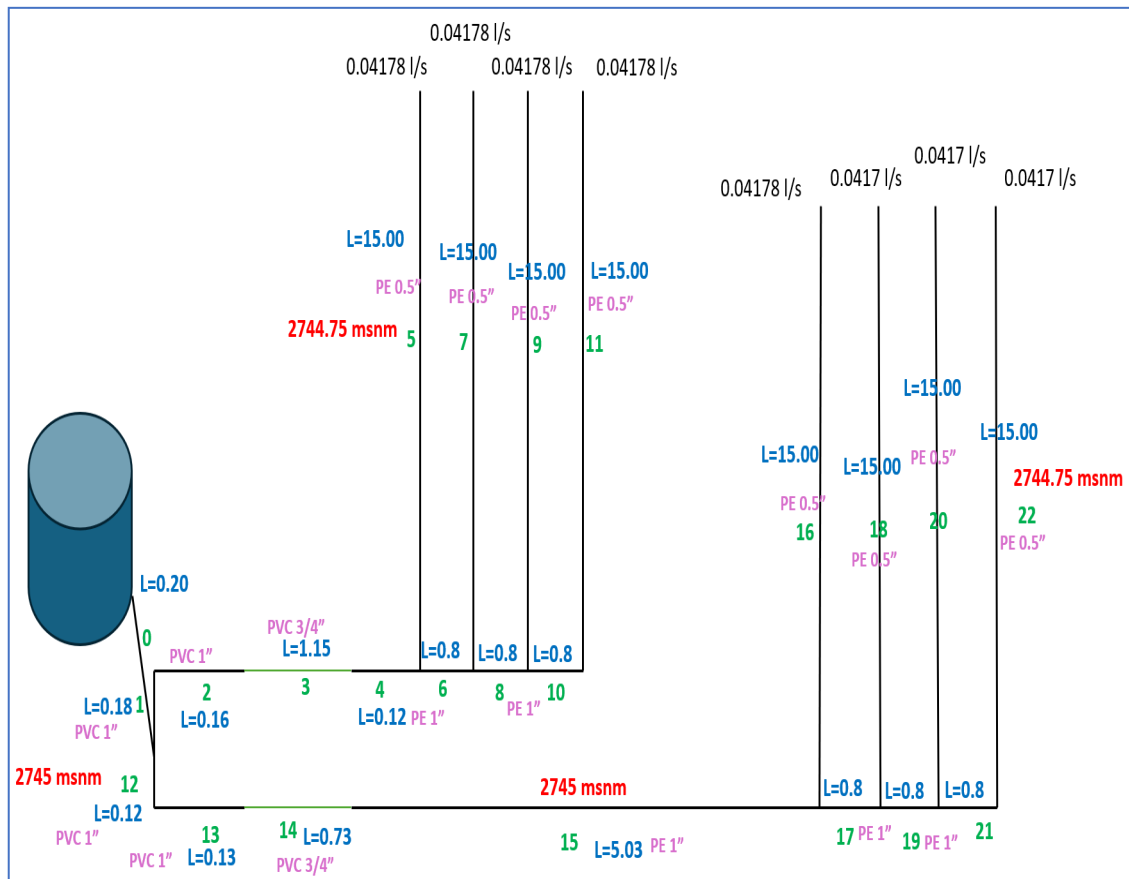
Frecuencia de riego	6.00	Días
Lámina de riego recogida	23.67	mm/riego
Tiempo de riego	1.89	Horas
Tiempo de riego	113.60	Minutos

Modelamiento Hidráulico:

Seguido del modelamiento agronómico, se realizó el modelamiento hidráulico, se realizó en primera instancia un esquema en donde se identificó las longitudes, materiales, diámetro y demanda de caudal en cada extremo como se muestra en la figura 28.

Figura 28

Esquema de diseño hidráulico

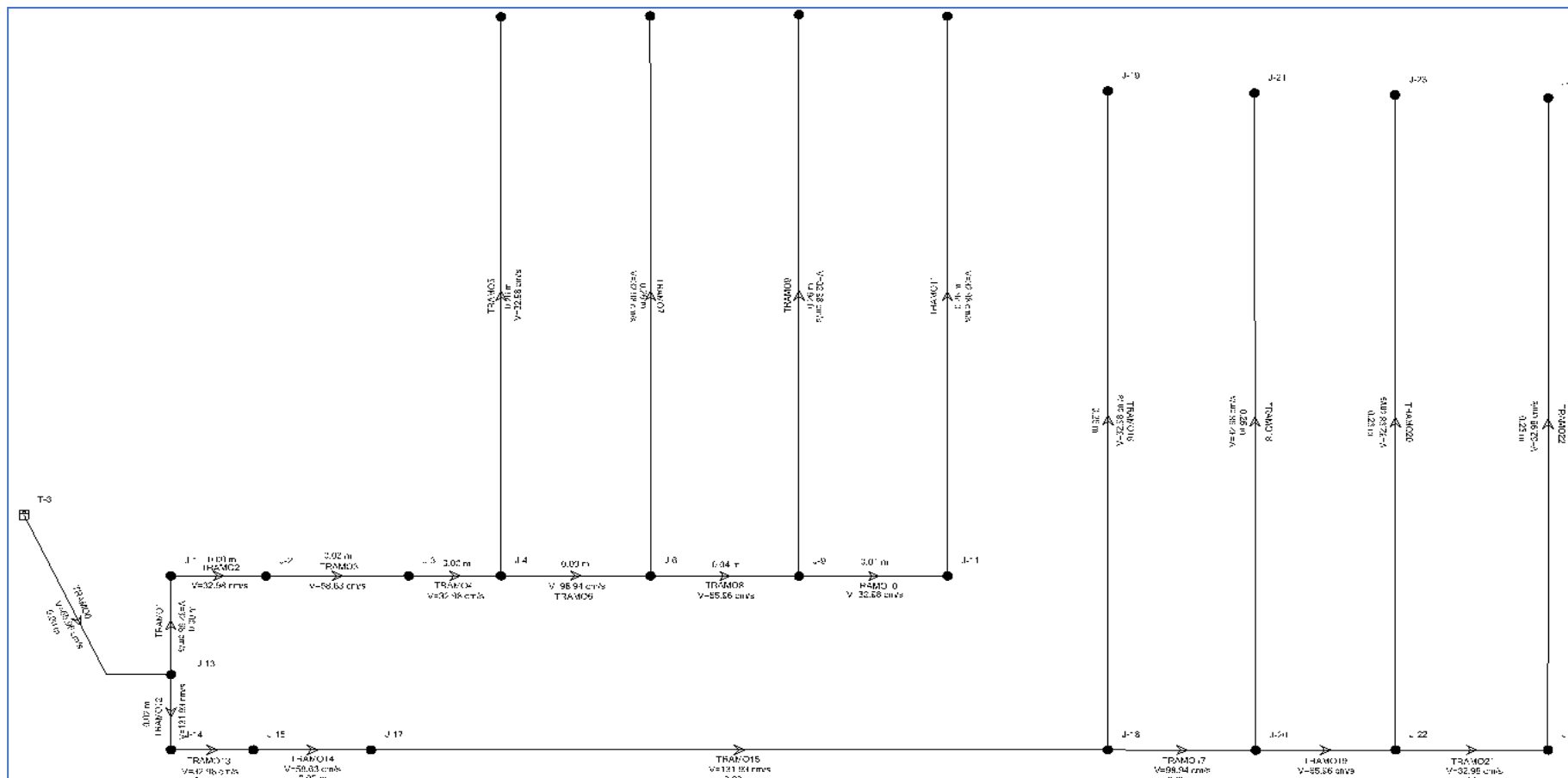


- **Rojo:** altura respecto a nivel del mar (indica elevaciones de cada tramo)
- **Verde:** número de identificación de tramo según orden de recorrido hidráulico.
- **Rosa:** Material y diámetro de la tubería.
- **Azul:** longitud de tramo
- **Negro:** demanda de caudal en cada extremo

Seguido de la esquematización se llevó esta al software WaterCad, en donde se introdujo todos los datos a detalle incluyendo la esquematización y los tramos indicados como se muestra en la figura 29.

Figura 29

Esquema de modelamiento hidráulico en WATERCAD V.24



Nota: El modelamiento hidráulico se realizó en el software de WATERCAD 2024 V. 24.00.00.26.

En a tabla 34 se muestran los resultados del modelamiento y fueron los siguientes:

Tabla 34*Resultados de modelamiento hidráulico*

TRAMO	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (in)	DIÁMETRO (m)	C	CAUDAL (l/s)	CAUDAL (m ³ /s)	Hf (m)	VELOCIDAD (m/s)
0	0.20	1.00	0.0254	150	0.33424	0.00033424	0.00426	0.000017160
1	0.18	1.00	0.0254	150	0.16712	0.00016712	0.00106	0.000008580
2	0.16	1.00	0.0254	150	0.16712	0.00016712	0.00095	0.000008580
3	1.15	0.75	0.0191	150	0.16712	0.00016712	0.02759	0.000004826
4	0.12	1.00	0.0254	140	0.16712	0.00016712	0.00081	0.000008580
5	15.00	0.50	0.0127	130	0.04178	0.00004178	0.25926	0.000000536
6	0.80	0.50	0.0127	140	0.12534	0.00012534	0.09221	0.000001609
7	15.00	0.50	0.0127	130	0.04178	0.00004178	0.25926	0.000000536
8	0.80	0.50	0.0127	140	0.08356	0.00008356	0.04352	0.000001072
9	15.00	0.50	0.0127	130	0.04178	0.00004178	0.25926	0.000000536
10	0.80	0.50	0.0127	140	0.04178	0.00004178	0.01205	0.000000536
11	15.00	0.50	0.0127	130	0.04178	0.00004178	0.25926	0.000000536
12	0.12	0.50	0.0127	150	0.16712	0.00016712	0.02074	0.000002145
13	0.16	1.00	0.0254	150	0.16712	0.00016712	0.00095	0.000008580
14	0.73	0.75	0.0191	150	0.16712	0.00016712	0.01751	0.000004826
15	5.03	0.50	0.0127	140	0.16712	0.00016712	0.98771	0.000002145
16	15.00	0.50	0.0127	130	0.04178	0.00004178	0.25926	0.000000536
17	0.80	0.50	0.0127	140	0.12534	0.00012534	0.09221	0.000001609
18	15.00	0.50	0.0127	130	0.04178	0.00004178	0.25926	0.000000536
19	0.80	0.50	0.0127	140	0.08356	0.00008356	0.04352	0.000001072
20	15.00	0.50	0.0127	130	0.04178	0.00004178	0.25926	0.000000536
21	0.80	0.50	0.0127	140	0.04178	0.00004178	0.01205	0.000000536
22	15.00	0.50	0.0127	130	0.04178	0.00004178	0.25926	0.000000536

Nota. Las hileras están resaltadas para indicar las demandas de caudal que el sistema debe cumplir, se tuvo una demanda total de 0.00033424 m³/s

La constante C fue determinada según el material de cada tramo, la demanda inicial de caudal va disminuyendo según la disminución de cada extremo que requiere parte de dicha demanda. Para el cálculo de pérdidas se utilizó la ecuación de Hazen-Williams:

$$h_f = 10.67 \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.852} \cdot \frac{L}{D^{4.87}}$$

Donde: La h_f es la pérdida de carga (m) y L es la longitud (m) y D es el diámetro de tubería (m). El Q viene a ser el caudal ($\frac{m^3}{s}$), mientras el C viene a ser el coeficiente.

Paso 3: Instalación del sistema de riego (automático y manual)

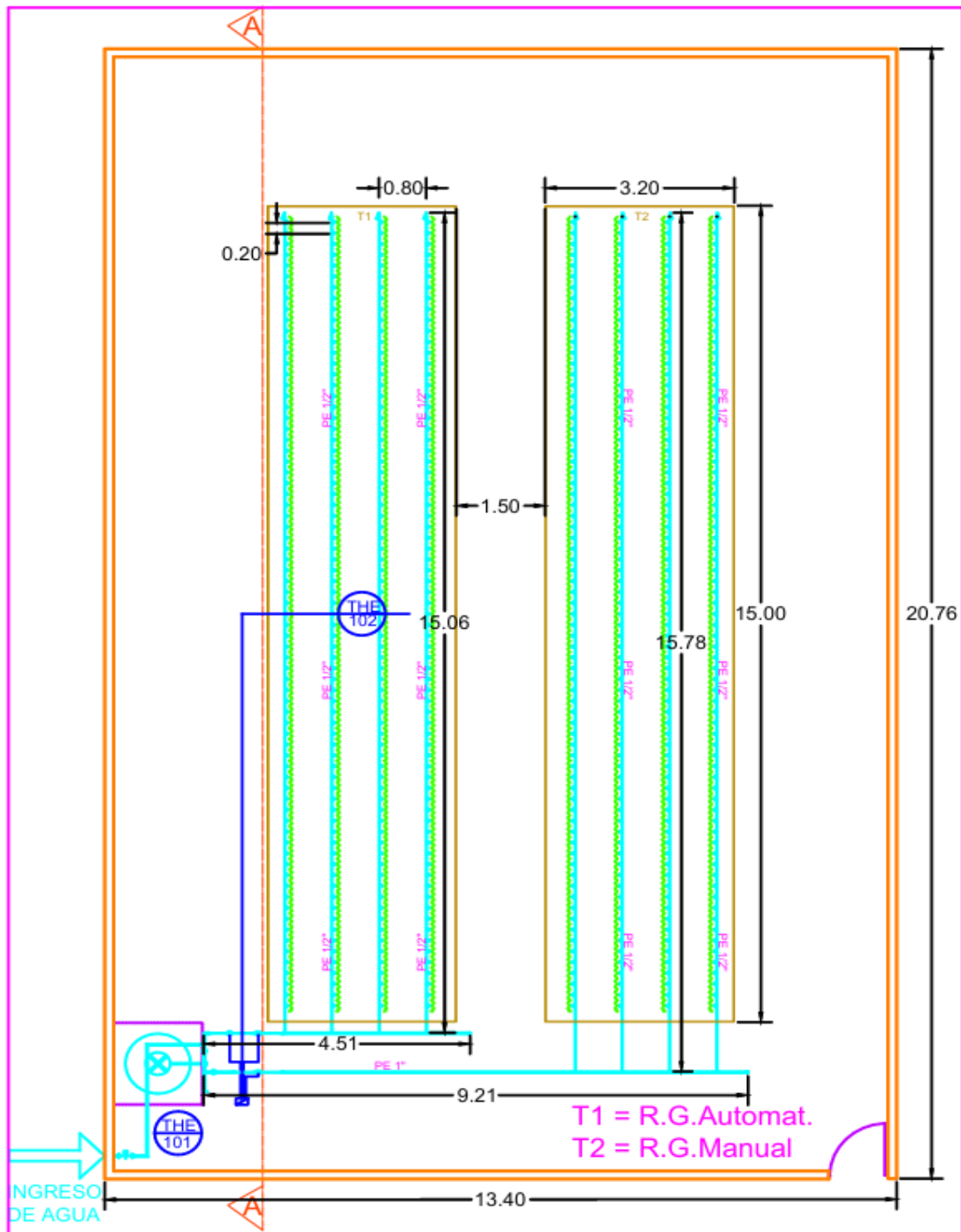
El sistema de riego diseñado está conformado por un tanque elevado ubicado a 2,5 m de altura, desde el cual parte una tubería principal de PVC de 1 pulgada equipada inicialmente con una válvula de bola para el control del flujo. A 1 m de la salida del tanque se instaló una válvula de control general y, posteriormente, una conexión en “T” que deriva una línea hacia un caño de distribución y otra hacia las parcelas de riego. La conducción principal continúa hasta una segunda conexión en “T”, ubicada a nivel del suelo, desde donde se distribuye el agua hacia dos ramales: el sistema automatizado y el sistema convencional. Ambos ramales incorporan codos de 90°, válvulas manuales y reducciones de diámetro de 1” a ¾”, permitiendo la instalación de dispositivos de control como flujómetros y una válvula automática en el sistema automatizado, como se muestra en la figura 29.

Después de los dispositivos de control, las líneas presentan una ampliación de ¾” a 1” y continúan mediante tuberías de polietileno (PE) hacia las parcelas de riego. El sistema automatizado utiliza una conducción PE de 1” y 3,2 m de longitud, mientras que el sistema convencional emplea una tubería PE de ¾” y 7,88 m. Finalmente, ambas parcelas se distribuyen mediante cuatro líneas de riego de PE de ½”; en el sistema automatizado cada línea tiene una longitud de 15,06 m, mientras que en el sistema convencional cada línea alcanza 15,78 m, todas equipadas con goteros autocompensados de 2 L/h. En el sistema automatizado, las líneas con emisores inician inmediatamente después de la ampliación, mientras que en el sistema convencional comienzan a 4,92 m de distancia. La disposición del sistema responde a la ubicación del tanque en la parte inferior izquierda del plano y a la distribución contigua de las parcelas hacia el norte. En las figuras 30 y 31 se presentan los planos del sistema hidráulico, donde también se observa la representación del sensor de humedad y

temperatura del ambiente THE-101 y del sensor de humedad y temperatura del suelo THE-102.

Figura 30

Plano del sistema de riego

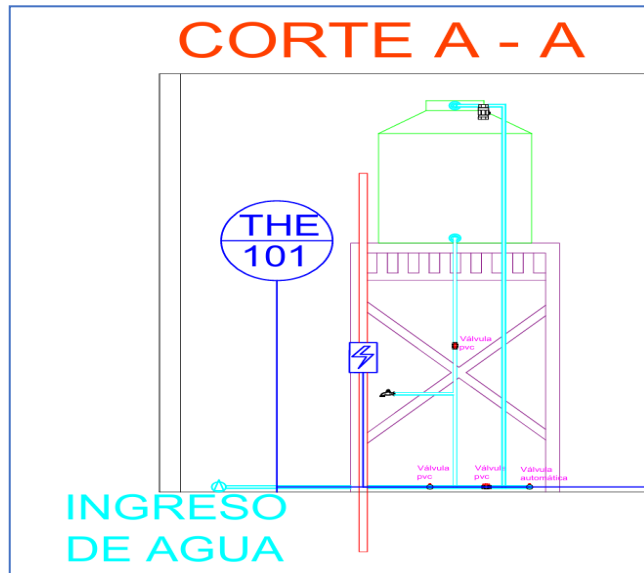


Nota. (THE-101) corresponde al sensor de humedad y temperatura del ambiente, mientras que (THE-102) corresponde al sensor de humedad y temperatura del suelo. Las letras "TH" representan temperatura y humedad, "E" indica elemento sensor y los

números 101 y 102 identifican los instrumentos dentro del sistema automatizado de riego.

Figura 31

Corte A-A del plano de sistema de riego

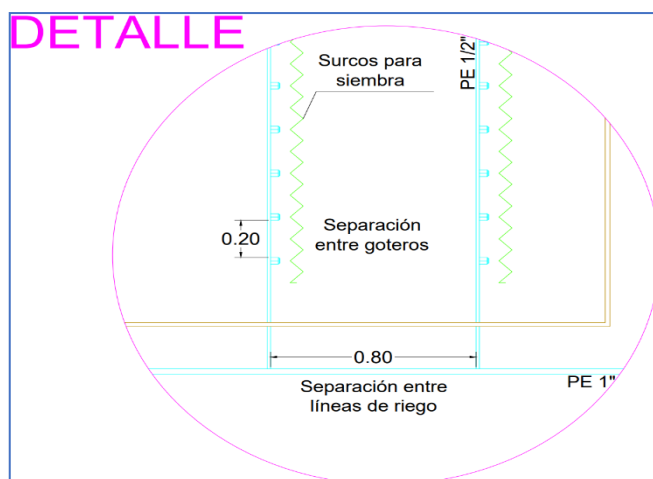


Nota. Se observa en el corte el tanque elevado de almacenamiento y distribución, así como las conexiones de válvulas de bola, caño, centro de control de sensores y sistema automatizado.

Se muestra en la figura 32 el detalle de la distribución del sistema de riego.

Figura 32

Detalle sistema de riego



Delimitación, distribución e instalación de las parcelas experimentales

La delimitación de las parcelas experimentales y la distribución de los tratamientos se realizaron dentro de un mismo espacio, considerando dos parcelas

destinadas al riego automatizado y manual, de acuerdo con el diseño experimental y el croquis establecido. Para ello se utilizaron estacas, wincha y cordel, permitiendo el trazado y surcado del terreno con un distanciamiento de 0,80 m entre líneas y una separación de 1,5 m entre parcelas, favoreciendo la aireación, el drenaje y la adecuada distribución de las plantas. Posteriormente, se marcaron las líneas principales de conducción, los puntos de toma y las zanjas para las tuberías. En el área del riego automatizado se instaló una caseta técnica que albergó el panel eléctrico, controladores, relés y dispositivos de protección. Asimismo, se implementó una estructura de soporte para el sistema fotovoltaico, incluyendo paneles solares, controlador de carga, baterías e inversor, asegurando el suministro energético autónomo del sistema.

Se muestra en la figura 33 la delimitación y distribución de las parcelas experimentales para la campaña de sembrío de quinua.

Figura 33

Delimitación y distribución de las parcelas



De forma paralela, se ejecutaron las zanjas de conexión hidráulica y eléctrica, cuidando la profundidad y pendiente requeridas para evitar daños mecánicos y permitir el correcto drenaje. Una vez completadas las labores de infraestructura, se instaló la unidad de filtrado, tuberías, goteros, reguladores de presión, válvulas y caudalímetros en ambos sistemas y el tanque elevado.

Finalmente, se realizaron pruebas de nivelación, limpieza de líneas y verificación de conexiones eléctricas y de control, asegurando que el sistema quedara listo para las etapas de calibración, pruebas hidráulicas y operación de campo, como se muestran en la figura 34.

Figura 34

Implementación de sistema de riego



Paso 4: Instalación del sistema de riego automatizado

La instalación del sistema de riego automatizado se realizó considerando tanto los requerimientos de consumo energético como el dimensionamiento de los materiales necesarios para garantizar un funcionamiento estable y continuo.

Evaluación del consumo eléctrico

En primer lugar, se evaluó el consumo eléctrico de los equipos que conforman el sistema automatizado de riego. La electroválvula presentó un consumo de 0,4 A, a este valor se sumó los sensores de flujo, humedad y temperatura del suelo y ambiente, junto con las tarjetas de control y la disipación adicional, completaron un consumo total teórico de 1,7 A, equivalente a 20,4 W. Sin embargo, durante el funcionamiento normal del sistema se registró un consumo promedio estabilizado de 0,935 A, correspondiente a 11,22 W. En la tabla 35 se muestran los consumos de carga de los equipos del sistema.

Tabla 35

Perfil de carga de fuente

Consumidor de carga	Cantidad	Consumo (A)	Consumo total (A)
Electroválvula	1	0.4	0.4
Sensor de flujo	2	0.2	0.4
Sensor de humedad y temperatura del suelo	1	0.2	0.2
Sensor de temperatura y humedad relativa del ambiente	1	0.2	0.2
Tarjeta de control	2	0.2	0.4
Disipación	1	0.1	0.1
TOTAL DE CARGA			1,7

- Consumo de potencia del sistema de control – 20.4 Watts
- Consumo de corriente en máxima demanda – 1,7 Amperios
- Consumo de corriente sin paralelismo – 0,935 Amperios
- Consumo potencia sin paralelismo – 11,22 Watts

Con base en este análisis, se procedió al dimensionamiento de los materiales que alimentaron energéticamente el sistema. Se instaló un panel solar de 100 W como fuente principal de generación, conectado a un controlador de carga de 10 A encargado de regular el ingreso energético hacia una batería de 7 Ah. A su vez, se integró un regulador de tensión de 5 A que estabilizó la energía entregada a los equipos electrónicos. Para la interconexión se emplearon conductores de distintos calibres según el requerimiento de cada componente: cable 12 AWG para la conexión del panel solar, cable 14 AWG GPTE para la distribución general y la electroválvula, y cable 18 AWG GPTE para los sensores. En la tabla 36 se muestra los datos del sistema voltaico.

Tabla 36

Datos del sistema fotovoltaico

Material	Cantidad	Dimensión	Descripción
Panel solar	1	100 Watts	
Controlador de carga	1	10 Amperios	
Batería	1	7Ah	7 horas de duración consumiendo 1A
Regulador de tensión	1	5A	
Cable de panel solar	1	12 AWG	
Cables de distribución	1	14 AWG GPTE	
Cables de sensores	1	18 AWG GPTE	
Cables para electroválvula	1	14 AWG GPTE	

Cálculo de autonomía de batería

- Autonomía de batería es 7 Ah
- Cantidad de batería en paralelo es 1
- Potencia de batería es 84 W
- Autonomía requerida del sistema es 0,935 Ah
- Potencia de consumo es 11.22 W
- Horas de autonomía ofrecida es 7,49 h

El cálculo de autonomía de la batería permitió estimar que la capacidad instalada de 7 Ah (equivalente a 84 Wh de potencia) podía sostener el consumo promedio de 0,935 Ah durante 7,49 horas, es decir, cerca de 7 horas de operación continua. Esto representó una autonomía suficiente para mantener activo el sistema hasta

aproximadamente la 1:00 a.m., considerando que el inicio de operación se producía al anochecer.

Cálculo de carga de batería

- Potencia del panel solar es 100 Watts
- Cantidad de panel solar es 1
- Corriente de carga del panel solar es 8,33 A
- Eficiencia de carga al 80% es 6,67 A
- Capacidad de la batería es 7 Ah
- Tiempo de carga al 100% es 1,05 h
- Horas Pico Sol es 5 h

Por otro lado, se evaluó la capacidad de carga de la batería mediante el panel solar de 100 W, el cual generó una corriente teórica de 8,33 A. Considerando una eficiencia de carga del 80 %, la corriente útil fue de 6,67 A, permitiendo cargar la batería de 7 Ah en aproximadamente 1,05 horas bajo condiciones óptimas de radiación solar. Asimismo, con un promedio de cinco horas pico de sol al día, se garantizó la recarga completa del sistema de almacenamiento energético.

Se muestra en la figura 35 la instalación del panel solar.

Figura 35

Instalación de panel fotovoltaico y caja de control eléctrico

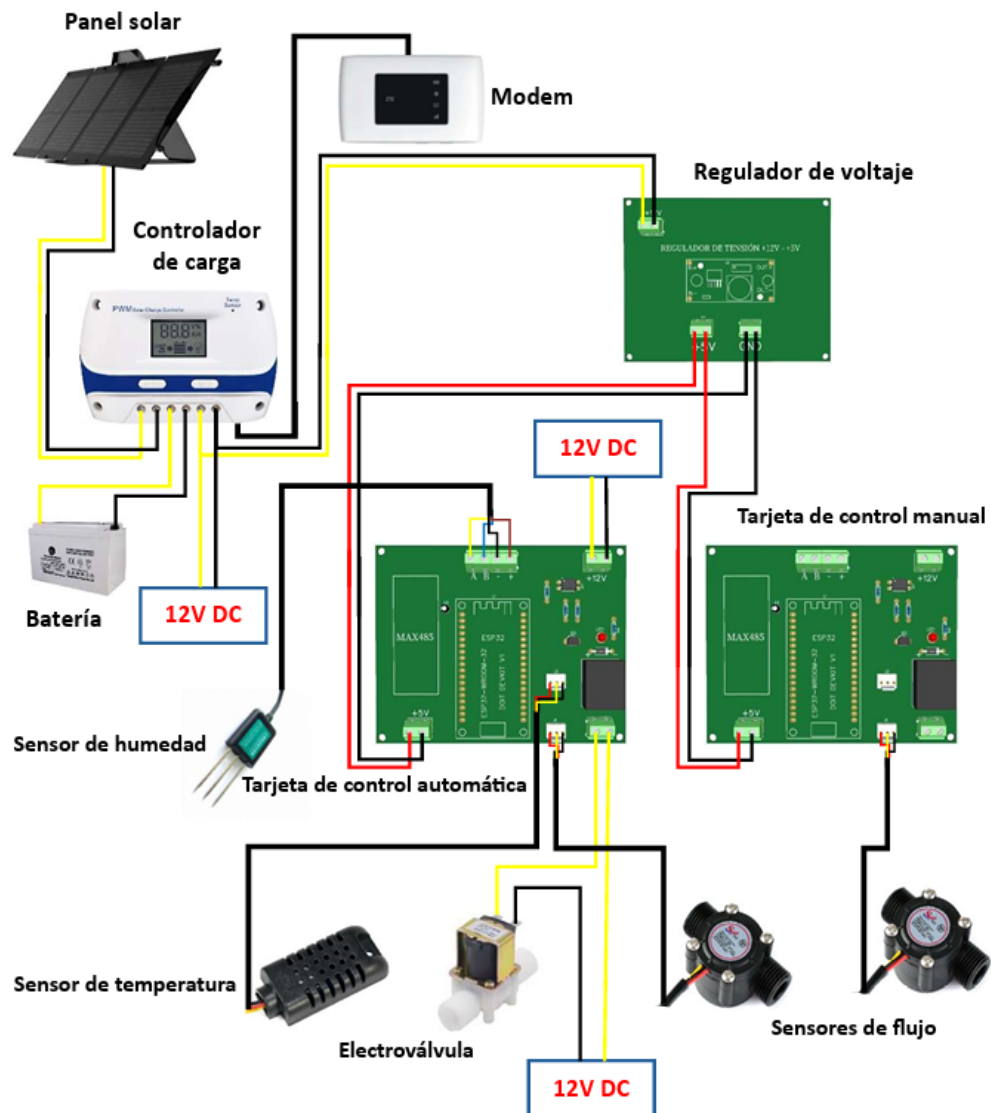


Los resultados del dimensionamiento indicaron que el sistema diseñado proporciona aproximadamente siete horas de autonomía con una sola batería. Asimismo, se recomendó la incorporación de una segunda batería en paralelo para incrementar el tiempo de funcionamiento. Se verificó además que el consumo del sistema de control fue compatible con la capacidad del panel solar instalado. En la figura

36 se presenta el bosquejo del sistema de control, donde el color amarillo representa cables de 12 V, el rojo cables de 5 V y el negro cables negativos.

Figura 36

Diagrama de conexiones

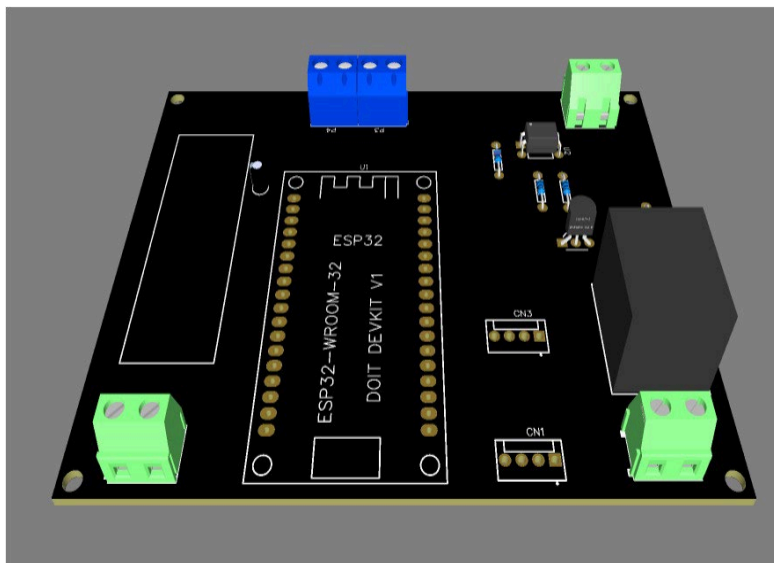


Diseño del sistema de control

En la figura 37 se muestra la placa de diseño para el proyecto (Internet de las Cosas) donde se observan sus principales componentes, tales como terminales de conexión de color verde, un conector de alimentación de color azul, resistencias, capacitores y el microcontrolador ESP32 con la inscripción “DOIT DEVKIT V1”. Asimismo, se identifican conectores etiquetados como CN1, CN3 y U1. La disposición de estos elementos corresponde a una placa diseñada para el desarrollo y control del sistema automatizado basado en el microcontrolador ESP32.

Figura 37

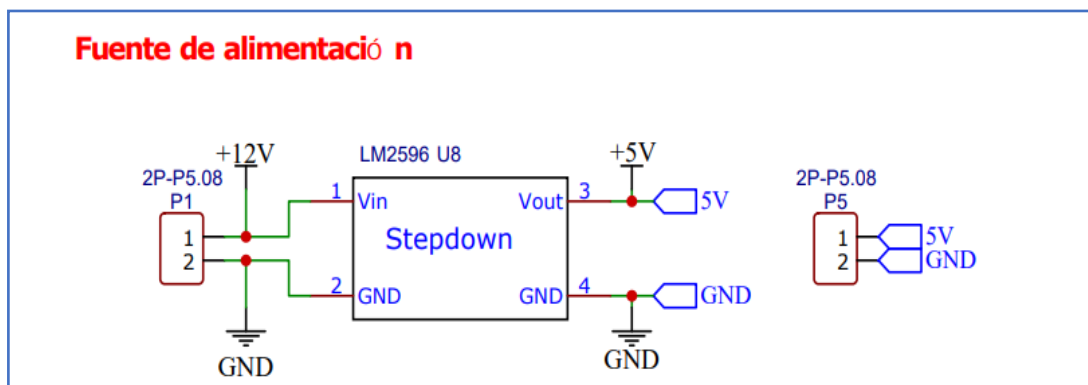
Placa de diseño para proyecto IoT (Internet de las Cosas)



El sistema de alimentación se construyó sobre una base de 12 V DC, con un regulador LM2596 tipo step-down que transforma esta tensión en 5 V estables para el microcontrolador ESP32 y los periféricos. A su vez, se añadieron resistencias de distintos valores (220 Ω , 510 Ω , 1k Ω y 10k Ω) y capacitores de 10 μ F que ayudaron a estabilizar señales y proteger la electrónica frente a variaciones. En la figura 38 se muestra el circuito electrónico de la etapa de fuente de alimentación.

Figura 38

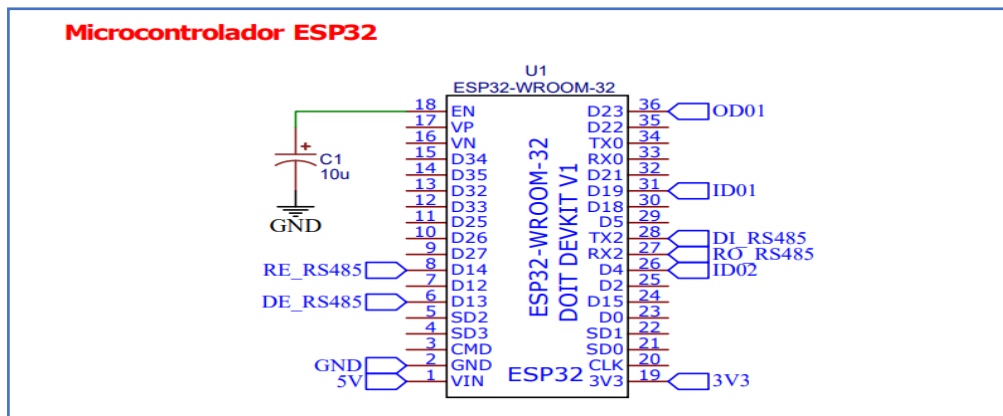
Diagrama de fuente de alimentación



Desde el punto de vista electrónico, el núcleo de control estuvo conformado por un microcontrolador ESP32-WROOM-32, encargado de la gestión integral del circuito, el procesamiento de datos y la comunicación IoT en la nube. Este dispositivo llamado microcontrolador ESP32 permitió la conexión de sensores y actuadores a través de sus múltiples pines de entrada y salida digitales, analógicos y de comunicación serie, tal y como se observa en la figura 39.

Figura 39

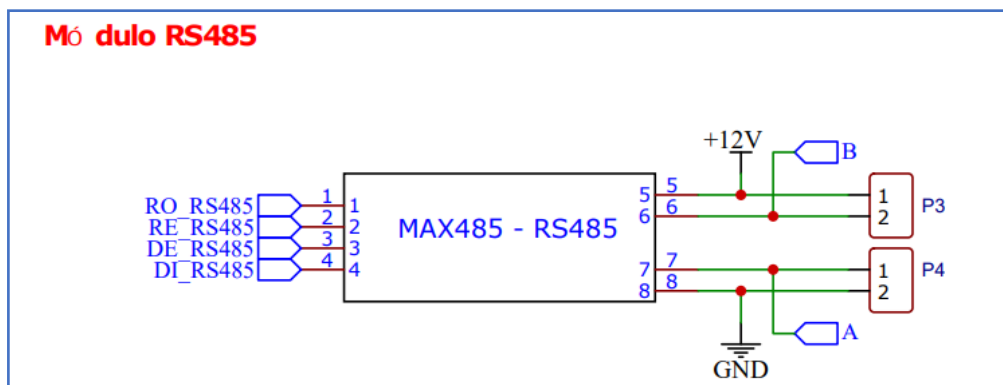
Diagrama de microcontrolador



Para la comunicación de largo alcance, se integró un módulo RS485 (MAX485), que garantizó la transmisión diferencial en ambientes agrícolas donde los sensores podían encontrarse a mayor distancia. Este módulo permitió robustecer la conexión y evitar interferencias, interconectándose directamente con el microcontrolador a través de las líneas diferenciales A y B. En la figura 40 se muestra el circuito electrónico del módulo de comunicación del protocolo RS485.

Figura 40

Diagrama de módulo RS485

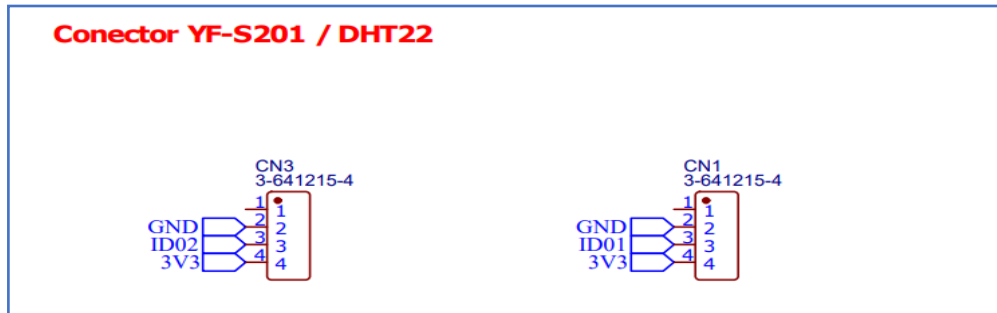


En cuanto a los sensores, se instalaron dos modelos principales: el sensor de flujo YF-S201, encargado de medir el caudal de agua, y el sensor DHT22, utilizado para registrar en tiempo real la temperatura y humedad ambiental. Ambos dispositivos fueron conectados directamente al microcontrolador ESP32, responsable del procesamiento y almacenamiento de la información para su monitoreo. El actuador principal correspondió a una electroválvula de riego, controlada mediante un relé de 12 V DC gobernado por el microcontrolador. Para proteger el circuito, el relé se implementó junto con un transistor 2N3904 y un diodo 1N4007, evitando daños ocasionados por corrientes

inversas. En la figura 41 se muestra el circuito electrónico de las borneras para el sensor de flujo y el sensor de temperatura y humedad del ambiente.

Figura 41

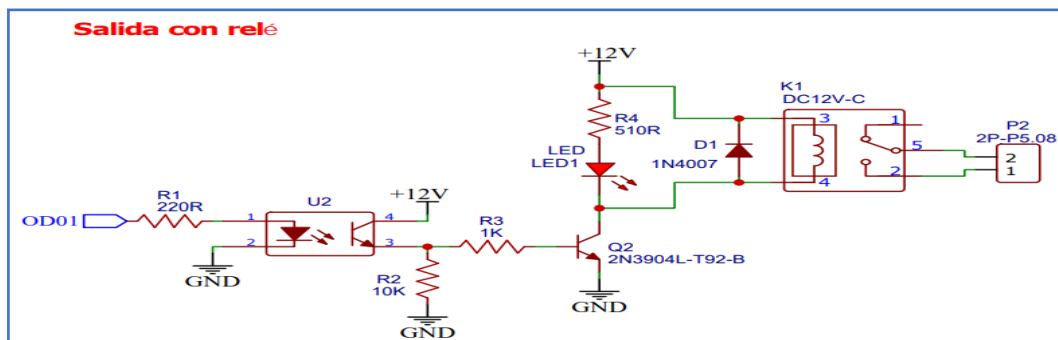
Diagrama de conector



Finalmente, se instalaron indicadores LED que indica el estado de funcionamiento del sistema, como encendido, transmisión de datos y activación del relé. Los distintos módulos y periféricos fueron interconectados mediante conectores de tipo 2P-P5.08 y *headers*, lo que facilitó el montaje, mantenimiento y posibles ampliaciones del sistema. En la figura 42 se presenta el circuito electrónico del driver para el control del relé

Figura 42

Diagrama de salida



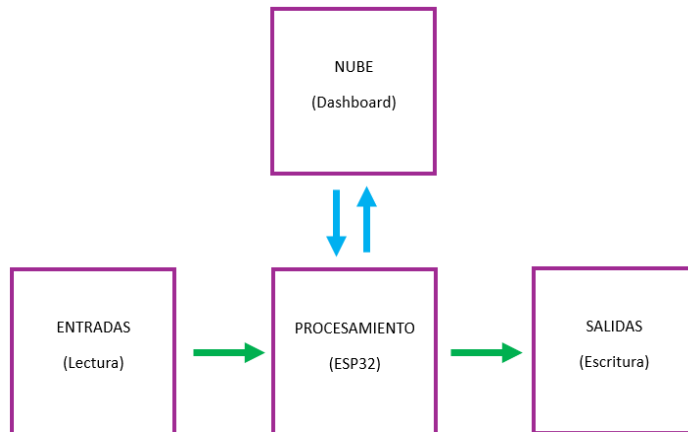
Proceso de automatización de riego

El proceso de automatización inició con la etapa de entradas, donde los sensores realizaron la lectura de las variables del sistema, como temperatura, humedad y caudal. Posteriormente, la información recopilada fue enviada al módulo de procesamiento basado en el ESP32, encargado de analizar los datos y ejecutar las acciones de control programadas. Finalmente, el sistema activó las salidas correspondientes, permitiendo la operación de dispositivos como la electroválvula. De manera simultánea, los datos procesados fueron transmitidos hacia la nube, posibilitando el monitoreo remoto y la visualización en tiempo real mediante la plataforma de supervisión. En la figura 43 se

observa la topología de automatización implementada para el sistema de riego automatizado, compuesta por las etapas de entrada, procesamiento, salida y comunicación con la nube para el monitoreo de las variables del sistema.

Figura 43

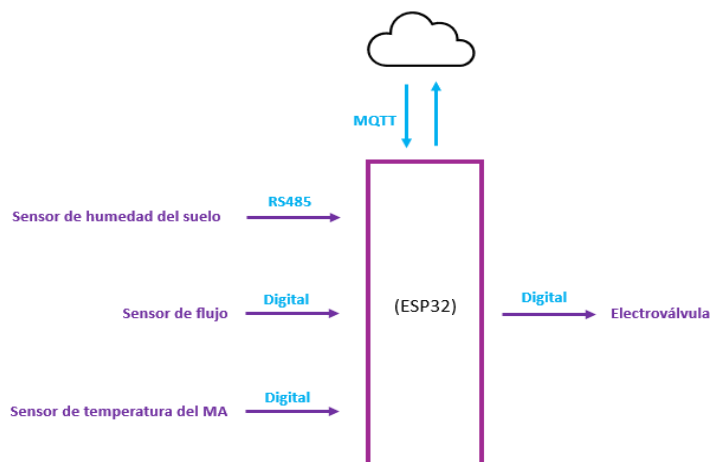
Topología de automatización



Los parámetros de temperatura, humedad y caudal fueron recopilados mediante sensores y procesados por el microcontrolador ESP32. Posteriormente, los datos fueron enviados y almacenados en la nube mediante la plataforma IoT Arduino Cloud, permitiendo su visualización y monitoreo en tiempo real, así como la descarga de registros en formato Excel para su posterior análisis. En la figura 44 se muestra la arquitectura de comunicación implementada en el sistema de riego automatizado, donde los sensores envían información al ESP32, el cual procesa y transmite los datos hacia la nube mediante el protocolo MQTT para su monitoreo en tiempo real.

Figura 44

Lectura, procesamiento y escritura de programación

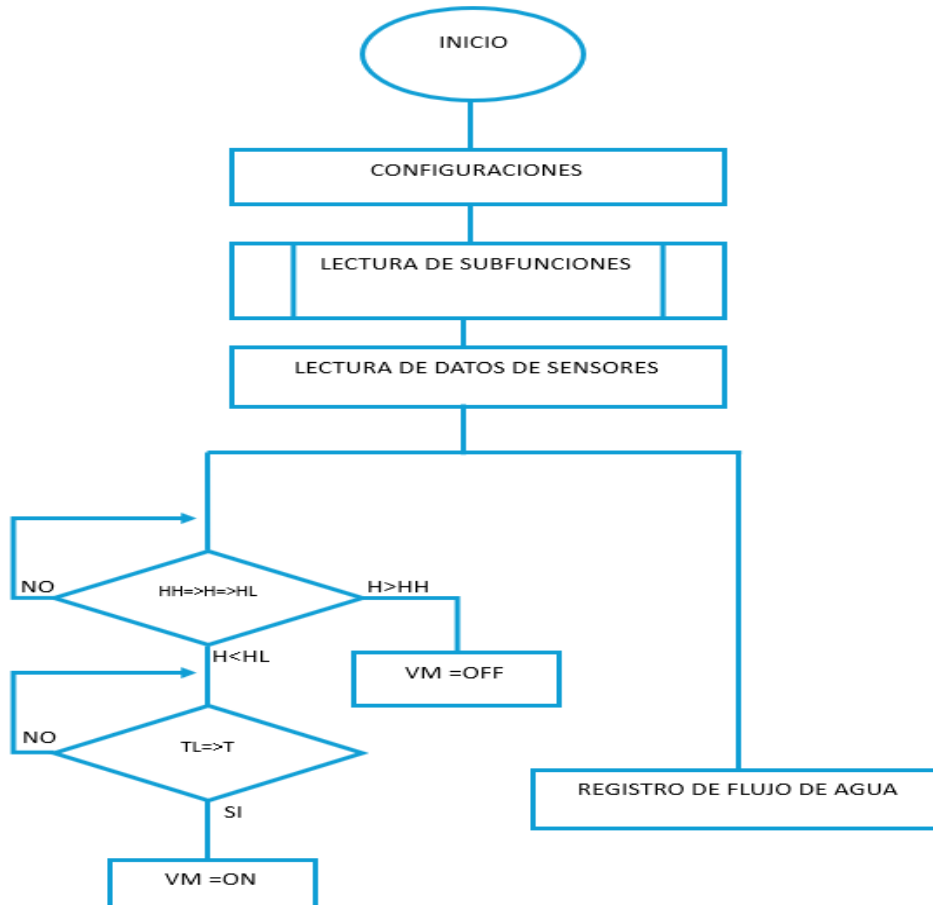


Paso 4: Programación y configuración del microcontrolador

Una vez implementada la instalación física del sistema de riego, se realizó la programación y configuración del microcontrolador encargado del funcionamiento automático. El proceso inició con la activación del sistema y la puesta en marcha de los módulos de control y comunicación. Posteriormente, se ejecutó la fase de configuración, donde se definieron las calibraciones iniciales, los límites de operación de los sensores y los parámetros de funcionamiento, incluyendo niveles de referencia hídrica, valores umbral de temperatura y la sincronización para la transmisión de datos hacia la nube. Luego, el microcontrolador ingresó a la etapa de lectura de subfunciones, encargada de habilitar los pines de entrada y salida, activar los protocolos de comunicación UART, utilizado para la transmisión y recepción serial de datos entre dispositivos, y RS485, empleado para la comunicación diferencial a largas distancias y con menor interferencia eléctrica. Asimismo, se verificó el estado de los periféricos conectados antes de iniciar la adquisición de datos. En la figura 45 se presenta el diagrama de flujo del sketch (código) del sistema.

Figura 45

Diagrama de flujo del Sketch (código)



Acto seguido, se realizó la lectura de datos de los sensores instalados. El sensor de humedad del suelo proporcionó la variable H (humedad), mientras que el sensor DHT22 registró la temperatura ambiental mediante la variable T. Asimismo, se establecieron los parámetros de referencia HH (humedad alta), HL (humedad baja) y TL (temperatura límite baja), utilizados para controlar la activación y desactivación automática del sistema de riego según las condiciones registradas ambientales registradas.

Paso 5: Configuración de la plataforma IoT (Internet de las cosas)

Con estos datos, el programa ejecutó el bloque de decisión para el control de la humedad del suelo. Si el valor de H se encontraba dentro del rango permitido ($HL \leq H \leq HH$), el sistema continuaba funcionando normalmente. Si H superaba el límite HH (humedad alta), la electroválvula de riego se desactivaba (VM = OFF) para evitar el exceso de agua. En cambio, si H descendía por debajo de HL (humedad baja), el sistema evaluaba la temperatura ambiental registrada por el sensor DHT22 para determinar la activación del riego. En la figura 46 se muestran los códigos utilizados para la transmisión y gestión de datos en la plataforma IoT.

Figura 46

Códigos para la nube

```

//%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-----DATOS PARA CLOUD-----%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
// copiar datos para cloud
temperatura = temperature;
humedad = humidity;          //Calibrar con un medidor patron (1 variable de calibración)
flujo = flowRate_Lh;
//flujototal = totalFlow;
flujototal = (totalFlow-(totalFlow*0.420845)); // Calibrar--valor promedio 0.420845 -----
am_temp = temp_ma;
am_humedad = h;
valve1 = Valve;
//%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

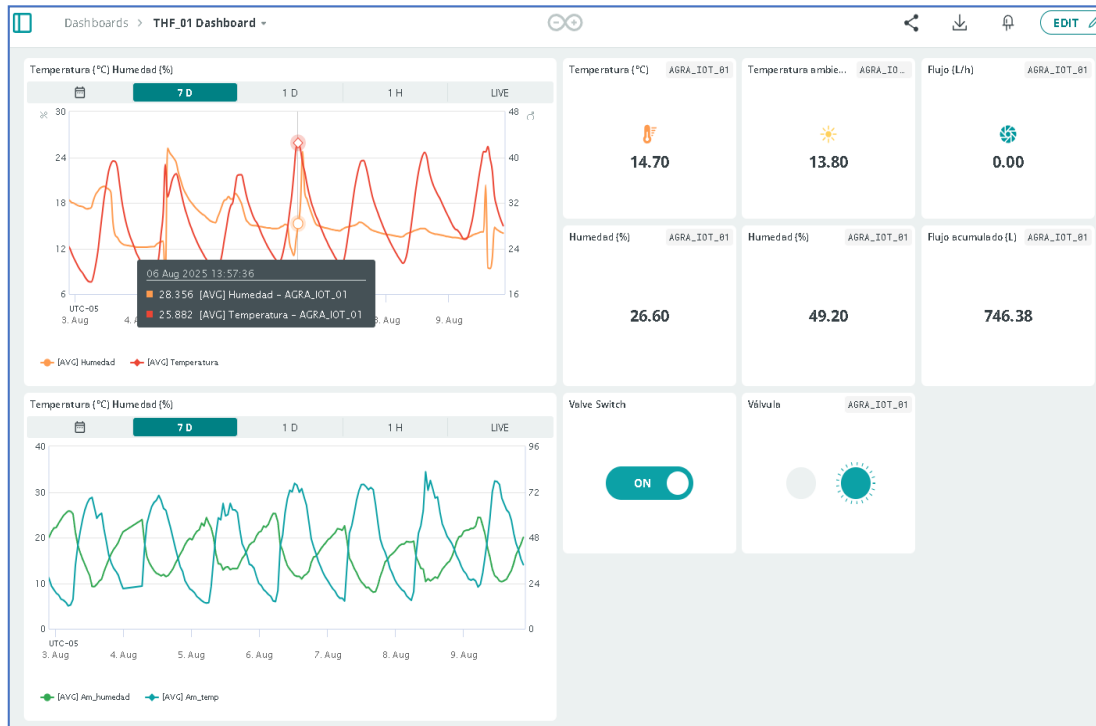
El segundo bloque de decisión correspondió al control de la temperatura. En esta etapa, cuando el valor de H era menor que HL (humedad baja), el sistema evaluaba la condición $TL \geq T$. Si la temperatura registrada (T) era menor o igual al valor límite establecido (TL), la electroválvula se activaba (VM = ON) para restablecer la humedad del suelo. En caso contrario, si la temperatura superaba el umbral definido, la válvula permanecía desactivada y el riego no se ejecutaba, favoreciendo el uso eficiente del agua y la protección del sistema.

En figura 47 se muestran las pruebas iniciales de la interfaz de monitoreo en la nube mediante la plataforma IoT Arduino Cloud del sistema de riego automatizado,

donde se visualizaron en tiempo real las variables registradas por los sensores y el estado operativo de la electroválvula

Figura 47

Pruebas iniciales del Interfaz de monitoreo IoT Arduino Cloud



Independientemente de la decisión tomada, el programa incluyó un módulo de registro del flujo de agua, en el cual se almacenaron de manera sistemática los valores de caudal, estado de la válvula y condiciones de operación al momento de cada ciclo. Este registro digital permitió llevar un control histórico del funcionamiento del sistema y evaluar posteriormente su desempeño.

Finalmente, el proceso ingresa en un bucle continuo, que reinició la lectura de sensores y repitió las decisiones de control de manera indefinida, garantizando el funcionamiento autónomo y en tiempo real del sistema de riego. De forma complementaria, se desarrollaron procedimientos de calibración de los sensores, con el fin de asegurar lecturas confiables y corregir posibles desviaciones respecto a valores de referencia.

Calibración del sensor de humedad y flujo de agua

La tabla 71 muestra el proceso de calibración del sensor de humedad del suelo, comparando sus lecturas directas con valores patrón obtenidos mediante un instrumento industrial de referencia. Los registros mostraron correspondencias muy cercanas entre ambos dispositivos; por ejemplo, cuando el sensor indicó 10 % el patrón

arrojó 9 %, y cuando el sensor marcó 15 % el patrón registró 14 %. A partir de estas comparaciones se trazó una curva de correlación con R^2 de 0,9998, lo que confirma una precisión casi perfecta. Una vez calibrado, el sensor fue instalado a una profundidad de 0.20 m. El monitoreo se realiza mediante el instrumento industrial y el aplicativo IoT Remote (figura 48). Los datos de calibración completos se presentan en el Anexo C.

Figura 48

Calibración del sensor de humedad



La tabla 72 muestra el proceso de calibración del sensor de flujo de agua, el cual se llevó a cabo mediante pruebas de volumen controlado. El procedimiento consistió en hacer pasar cantidades conocidas de agua a través del sensor y comparar el volumen real medido por el instrumento patrón con el volumen registrado por el dispositivo. Los ensayos se realizaron en un rango que abarcó desde 0,50 litros hasta 1,30 litros, repitiendo las mediciones en distintos puntos para cubrir el rango de operación del sistema de riego. Los resultados mostraron que el sensor presentaba una tendencia a sobreestimar el volumen real; por ejemplo, con 0,50 litros de patrón el sensor midió 0,88 litros, y con 1,30 litros de patrón registró 2,21 litros. Para corregir este comportamiento se aplicó una ecuación de compensación que resta al valor medido una fracción proporcional del mismo, logrando así que la lectura del sensor se aproxime al valor real del caudal. A partir de esta corrección se construyó una curva de calibración que obtuvo un R^2 de 0,9973, confirmando que el sensor es metrológicamente estable y ofrece una trazabilidad directa respecto al patrón de medida (figura 49). Los datos de calibración completos se presentan en el Anexo C.

Figura 49

Calibración del sensor de flujo



Paso 6: Operación y monitoreo en campo

Durante la fase de operación se puso en marcha el sistema de riego automatizado y se estableció un protocolo riguroso de monitoreo en campo que garantizó la continuidad operacional, la calidad de los datos recopilados y la seguridad del equipo. Al iniciar cada ciclo de campo se verificó el estado energético del sistema: se comprobó la tensión de la batería de 7 Ah, la corriente de carga proveniente del panel solar de 100 W y la presencia de la alimentación de 12 V en la alimentación principal; estos controles se registraron en la bitácora diaria puesto que la autonomía estimada (7,49 horas con consumo promedio de 0,935 A y 11.22 W) condicionaba la programación de riegos nocturnos y las ventanas de menor irradiación. Se monitorizó además la corriente máxima y los picos registrados (consumo total nominal 1,65 A, 19,8 W) para detectar eventuales sobrecargas o fallos en actuadores que pudieran acelerar la descarga de la batería.

El funcionamiento normal del sistema se ejecutó mediante el bucle de control previamente programado en el ESP32: adquisición periódica de sensores, evaluación de condiciones (niveles H vs. HH y HL; comparación de temperatura T con el umbral TL), decisión sobre la apertura o cierre de la electroválvula y registro del evento. Se configuró un intervalo de adquisición que balanceó resolución y consumo energético, se adoptó un muestreo de referencia de cinco minutos durante las horas activas, y se registraron en la nube, mediante Arduino IoT Cloud, las variables críticas con marca de tiempo: humedad de suelo (lectura corregida por la curva de calibración), caudal instantáneo y volumen acumulado (registrado por el sensor YF-S201), estado del relé/electroválvula, temperatura ambiente, tensión de batería y corriente de carga. Estos

registros fueron exportables en formato CSV para análisis posteriores y se almacenaron con políticas de retención diaria y respaldos semanales locales para evitar pérdidas por fallos de comunicación. En la figura 50 se realiza la verificación eléctrica del sistema de riego automatizado mediante el uso de un multímetro para comprobar el correcto funcionamiento de las conexiones y componentes eléctricos.

Figura 50

Verificación eléctrica del sistema de riego



El monitoreo remoto se realizó mediante un dashboard en Arduino Cloud, donde se visualizaron en tiempo real las variables como humedad y temperatura del suelo, humedad y temperatura del ambiente caudal, volumen aplicado y acumulado, estado de la electroválvula. Asimismo, se configuraron alertas automáticas ante fallos de comunicación, bajo nivel de batería y anomalías en el caudal y demás variables.

Se efectuaron inspecciones periódicas del sistema, incluyendo revisión del panel, filtros, emisores, conexiones eléctricas y funcionamiento de las electroválvulas. Además, todas las actividades de mantenimiento fueron registradas en bitácoras para evaluar el desempeño operativo del sistema. La calidad de los datos fue controlada mediante rutinas de validación que descartaron lecturas fuera de rango y detectaron interferencias. Las mediciones de humedad y caudal fueron verificadas mediante pruebas gravimétricas y colectas volumétricas para asegurar la precisión de los sensores. El monitoreo también consideró la relación entre los eventos de riego y la respuesta agronómica del cultivo, comparando el volumen aplicado con la demanda hídrica estimada. Las diferencias detectadas permitieron identificar problemas hidráulicos, fugas o errores de programación. Se implementaron protocolos de contingencia para garantizar la operación del sistema ante fallos de conectividad o del ESP32, activándose un modo seguro y permitiendo el riego manual mediante válvulas

de bypass y controles locales. El sistema fotovoltaico fue monitoreado continuamente mediante el registro de corriente de carga y producción energética del panel solar, evaluando el estado de la batería y aplicando medidas de ahorro energético cuando se detectaban bajos niveles de carga.

Finalmente, todos los datos operativos, eventos y mantenimientos fueron integrados en reportes diarios, semanales y mensuales, también recalculan indicadores hidráulicos y respaldar la evaluación comparativa de la eficiencia hídrica y el rendimiento de grano de quinua.

Proceso 3: Implementación del riego por goteo manual

Paso 7: Instalación del sistema de riego manual

Como se explicó anteriormente, el sistema de riego manual fue instalado siguiendo los planos de diseño y los resultados del modelamiento hidráulico. Se implementó el cabezal de maniobra con llave de paso, filtro, regulador de presión y caudalímetro calibrado, garantizando el control adecuado del caudal y la presión. Asimismo, las tuberías principales y laterales fueron colocadas respetando las pendientes y separaciones establecidas para el cultivo de quinua, incorporándose válvulas de purga y puntos de lavado para facilitar el mantenimiento. Antes de su operación se realizaron pruebas hidroestáticas y de funcionamiento para verificar fugas, caudales y presiones, asegurando la eficiencia del sistema. Finalmente, cada evento de riego fue registrado en el cuaderno de campo con su fotografía correspondiente. En la figura 51 se observa la completa instalación del sistema de riego por goteo manual y automatizado.

Figura 51

Sistema de riego manual y automático instalado



Paso 8: Operación del sistema manual y automatizado

La operación del sistema de riego manual se realizó de acuerdo con el modelamiento agronómico y las etapas fenológicas del cultivo de quinua, siguiendo procedimientos estandarizados para garantizar la comparabilidad con el sistema automatizado. Se controló el caudal mediante el caudalímetro, verificándose el funcionamiento de los emisores y registrándose las horas de riego, volúmenes aplicados y observaciones de campo. Asimismo, se realizaron mediciones gravimétricas antes y después del riego para evaluar la efectividad del agua aplicada y optimizar el uso sostenible del recurso hídrico.

Las inspecciones diarias y los ensayos de uniformidad hidráulica permitieron detectar y corregir oportunamente pérdidas de presión o taponamientos. Finalmente, todos los eventos de riego, mantenimiento e incidencias fueron registrados en el cuaderno de campo para garantizar un adecuado seguimiento y facilitar la comparación técnica entre el sistema manual y el sistema automatizado.

Verificación de coeficiente de uniformidad:

Para el coeficiente de uniformidad se utilizó la fórmula de Keller y Karmeli (1974):

$$CU = \frac{q_{25}}{q_m} \times 100$$

CU = Es el coeficiente de uniformidad del riego evaluado en el campo, expresado en porcentaje (%).

q_{25%} = Promedio del 25% de los menores valores de agua recolectada

q_{m%} = Promedio de todos los valores de agua recolectada en el sistema.

En la tabla 37 se presentan los datos obtenidos en la prueba de uniformidad del sistema de riego manual implementado en la parcela bajo estudio.

Tabla 37

Cálculo de coeficiente de uniformidad – parcela manual

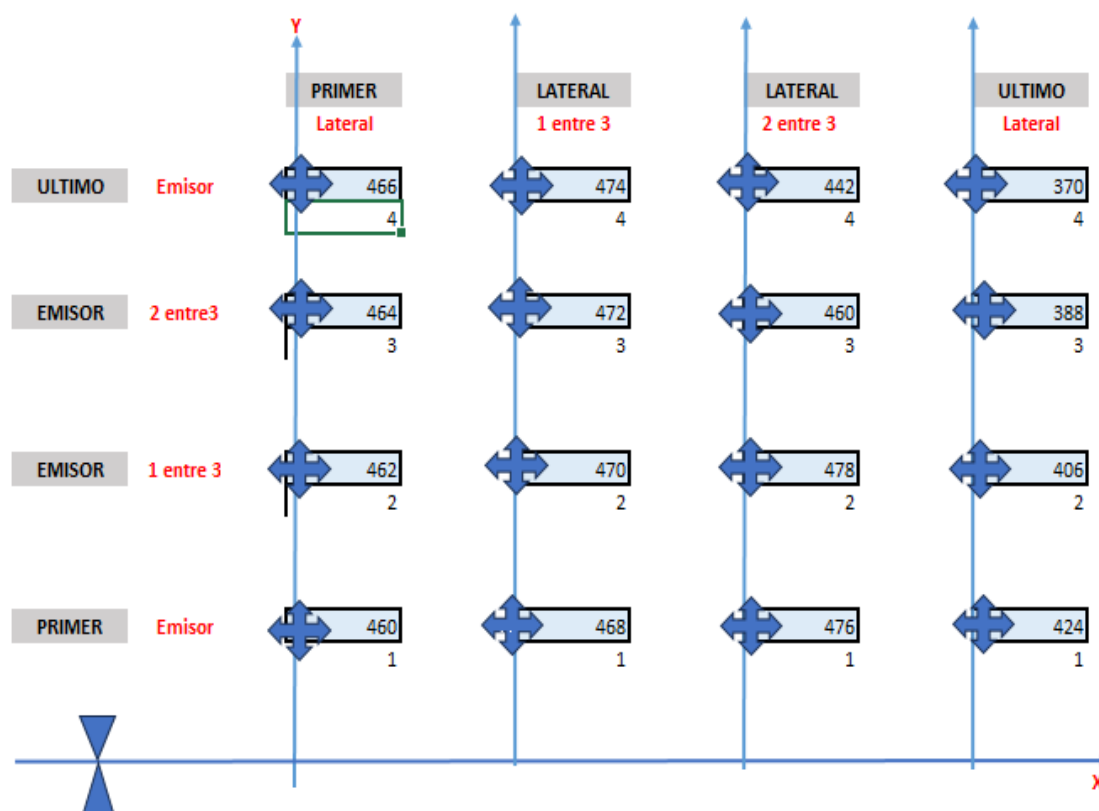
Cálculo de la prueba de uniformidad de caudales (l/h) del riego por goteo con control manual			
Duración	10 min		
X	Y	Valor (ml)	Q(L/h)
1	1	460	2.76
1	2	462	2.772
1	3	464	2.784
1	4	466	2.796

2	1	468	2.808
2	2	470	2.82
2	3	472	2.832
2	4	474	2.844
3	1	476	2.856
3	2	478	2.868
3	3	460	2.76
3	4	442	2.652
4	1	424	2.544
4	2	406	2.436
4	3	388	2.328
4	4	370	2.22

En la figura 52 se muestra el esquema de evaluación del coeficiente de uniformidad correspondiente a la parcela con riego manual, donde se realizaron mediciones del caudal en diferentes emisores ubicados en los laterales iniciales, intermedios y finales del sistema de riego.

Figura 52

Esquema del coeficiente de uniformidad – parcela manual



Teniéndose así la siguiente resolución:

$$q_{m\%} = \text{promedio de valores} = 2.6925 \text{ L/h.}$$

$q_{25\%}$ = Promedio del 25% de los menores valores de agua recolectada = 2.3820

Reemplazando:

$$CU = \frac{q_{25}}{q_m} \times 100 = \frac{2.3820}{2.6925} \times 100 = 88.47\%$$

Un CU = 88.5% indica muy buena uniformidad de aplicación en la muestra analizada. En la práctica, valores por encima del 80% se consideran buenos; entre 70–80% aceptables; por debajo de 70% indican uniformidad pobre (estas bandas son criterios operativos comunes).

En la tabla 38 se presentan los datos obtenidos en la prueba de uniformidad del sistema de riego automatizado implementado en la parcela bajo estudio.

Tabla 38

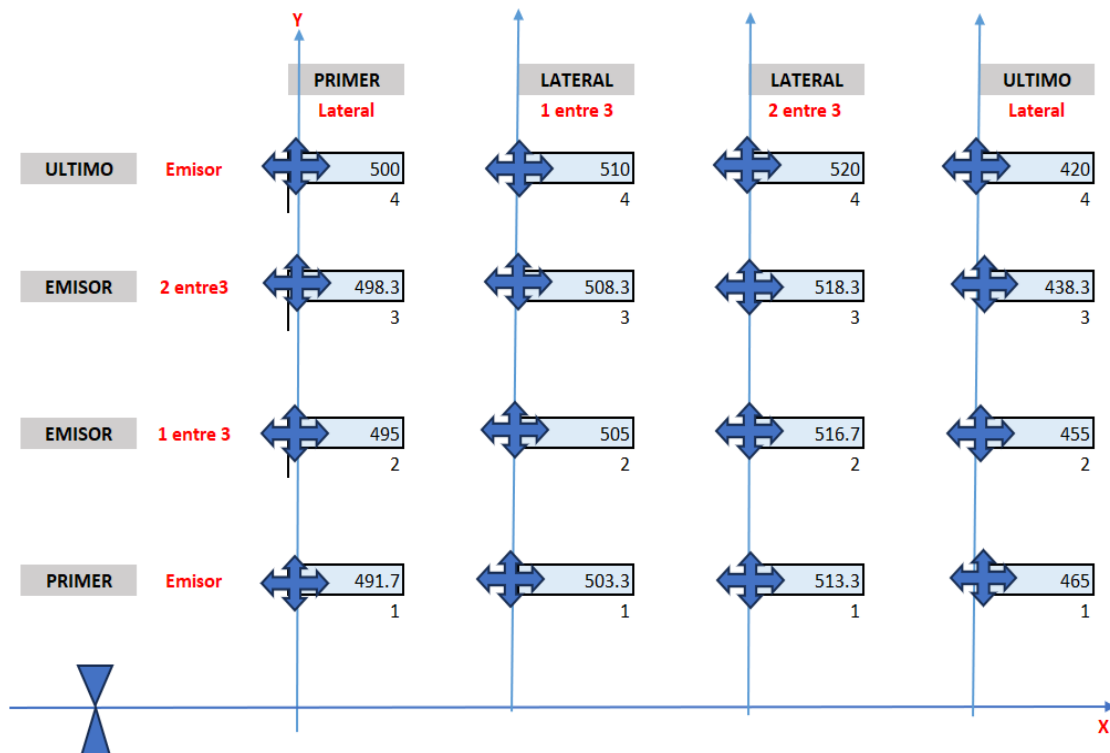
Cálculo de coeficiente de uniformidad – parcela automatizada

Cálculo de la prueba de uniformidad de caudales (l/h) del riego por goteo con control automatizado			
Duración	10 min		
X	Y	Valor (ml)	Q(L/h)
1	1	491.7	2.950
1	2	495.0	2.970
1	3	498.3	2.990
1	4	500.0	3.000
2	1	503.3	3.020
2	2	505.0	3.030
2	3	508.3	3.050
2	4	510.0	3.060
3	1	513.3	3.080
3	2	516.7	3.100
3	3	518.3	3.110
3	4	520.0	3.120
4	1	465.0	2.790
4	2	455.0	2.730
4	3	438.3	2.630
4	4	420.0	2.520

En la figura 53 se muestra el esquema de evaluación del coeficiente de uniformidad correspondiente a la parcela con riego automatizado, donde se realizaron mediciones de caudal en emisores ubicados en los laterales iniciales, intermedios y finales del sistema, con la finalidad de evaluar la distribución uniforme del agua aplicada.

Figura 53

Esquema del coeficiente de uniformidad – parcela automatizada



Teniéndose así la siguiente resolución:

$$q_{m\%} = \text{promedio de valores} = 2.9531 \text{ L/h.}$$

$$q_{25\%} = \text{Promedio del 25\% de los menores valores de agua recolectada} = 2.6675$$

Reemplazando:

$$CU = \frac{q_{25}}{q_m} \times 100 = \frac{2.6675}{2.9468} \times 100 = 90.52\%$$

En la tabla 39 se presenta la oferta de caudal inicial real obtenida para el sistema de riego implementado en la parcela de estudio.

Tabla 39

Oferta de caudal Inicial real

Velocidad de descenso	7.0035705	m/s
Qto	0.0035508	m ³ /s
	3.5508103	l/s
Qreq	1.7754051	l/s
Qr	2.4855672	l/s

Nota. Qto = caudal total calculado/ofertado. Qreq = caudal requerido. Qr = caudal real.

En la figura 54 se muestra la toma de datos realizada para el cálculo del coeficiente de uniformidad del sistema de riego implementado en la parcela de estudio.

Figura 54

Toma de datos para cálculo de coeficiente de uniformidad



Manejo agronómico

Una vez preparado, demarcado y estacado el terreno en las dos parcelas experimentales correspondientes al sistema de riego manual y al sistema de riego automatizado, actividades que también formaron parte del manejo agronómico del cultivo, y culminada la implementación de ambos sistemas de riego descrita previamente, se procedió a ejecutar las labores agronómicas, iniciándose con el proceso de fertilización.

Fertilización

El esquema de fertilización se estableció en función del análisis químico del suelo y de los requerimientos nutricionales del cultivo. Se aplicó en dos etapas: en primer lugar, se incorporó manualmente guano de isla a chorro continuo, con una dosis de 2.5 t/ha y una composición de 12N–12P–2.5K, directamente en la base de los surcos. En segundo lugar, se realizó una aplicación complementaria del fertilizante Molimax Papa Sierra con composición 15N–25P–15K + 2MgO + 3S. Se empleó una fórmula de fertilización de 120 kg N/ha, 80 kg P₂O₅/ha y 90 kg K₂O/ha, recomendada para la sierra peruana según el manual completo del cultivo de Quinua Salcedo INIA (Reg. N.º 077-2010-INIA). Ambas aplicaciones se efectuaron en dos momentos: el 20 de agosto y el 25 de setiembre de 2025, en las dos parcelas experimentales. Adicionalmente, se aplicó

el bioestimulante Biozyme TF, de origen natural, en dos oportunidades: el 12 y el 24 de octubre de 2025, a una dosis de 500ml/Cil, durante las fases fenológicas de ramificación e inicio de panojamiento.

Siembra

La siembra de la variedad de quinua Salcedo INIA se realizó el 20 de agosto de 2025 de forma manual mediante el método de chorro continuo, con una distancia de 0.80 m entre surcos, surcos de 15 m de longitud, una densidad de siembra de 15 kg ha⁻¹ y aproximadamente 20 plantas por metro lineal. Cada sistema de riego (manual y automatizado) estuvo conformado por cuatro surcos. Previamente, la semilla fue tratada con Vitavax 300 polvo mojable, en una dosis de 150 g por cada 15 kg de semilla, para prevenir enfermedades causadas por hongos del suelo.

Riego

El abastecimiento de agua se desarrolló mediante un sistema de riego tecnificado por goteo, utilizando mangueras de HDPE con emisores espaciados a 0.20 m y una descarga nominal de 0.2 L/h por emisor. El manejo del riego se dividió en dos modalidades: un sistema automatizado, que comprendió un total de 26 riegos programados en función del umbral hídrico y demanda hídrica del cultivo, y un sistema manual, que incluyó 22 riegos.

Control de malezas

Durante todo el ciclo del cultivo, la aplicación del sistema de riego por goteo contribuyó a mantener una baja incidencia de malezas en las parcelas, lo cual favoreció el desarrollo adecuado de las plantas y el buen desempeño del sistema

Raleo

El raleo se realizó aproximadamente a los 36 días después de la siembra, previo a la labor de aporque. En esta actividad se eliminaron las plantas de menor vigor, conservando únicamente las más desarrolladas hasta alcanzar una densidad de aproximadamente 20 plantas por metro lineal.

Aporque

El aporque se efectuó cuando las plantas alcanzaron una altura entre 25 y 30 cm, con el objetivo de mejorar su estabilidad y promover un adecuado desarrollo radicular. Esta labor se realizó con precaución para evitar daños en las plantas o el enterramiento del sistema de riego por goteo. Asimismo, durante esta actividad se incorporó la segunda dosis de fertilizante nitrogenado, contribuyendo al fortalecimiento

del enraizamiento y la estabilidad del cultivo. Esta práctica se realizó en dos fechas: el 25 de setiembre y el 15 de octubre de 2025.

Control fitosanitario

El manejo fitosanitario en las dos parcelas experimentales de 48 m² cada una se llevó a cabo siguiendo un cronograma basado en recomendaciones técnicas por hectárea. Para el control preventivo de insectos, se realizaron dos aplicaciones del insecticida biológico Biokaranya (extracto de ají), los días 29 de septiembre y 12 de octubre de 2025, a una dosis de 1 L/cil Posteriormente, el 24 de octubre de 2025 se aplicó sulfato de cobre a razón de 1 kg/cil para una hectarea, con el fin de reducir la incidencia del mildiú causado por (*Peronospora farinosa*). Finalmente, el 4 de noviembre de 2025 se aplicó Biospore 6.4 % PM a una dosis de 1 kg/cil para el control de la plaga “kona kona” (*Eurysacca melanocampta*), especialmente durante la etapa de panojamiento, en la cual genera daños directos en la formación y llenado del grano.

En la figura 55 se muestra el monitoreo fitosanitario del cultivo para el control de plagas e insectos en las parcelas experimentales.

Figura 55

Monitoreo fitosanitario del cultivo



Proceso 4: Toma de datos vegetativos y de rendimiento

Paso 9: Monitoreo de variables vegetativas

El monitoreo de las variables vegetativas se realizó en la etapa de madurez fisiológica del cultivo de quinua, con el propósito de evaluar el efecto del manejo hídrico aplicado en los sistemas de riego automatizado y manual sobre el desarrollo del cultivo.

Para ello, se efectuó la medición comparativa de indicadores morfológicos relacionados con el crecimiento y la respuesta del cultivo bajo las condiciones de riego establecidas.

Se seleccionaron 10 plantas sanas por tratamiento en parcelas representativas durante la madurez fisiológica, analizando los datos reales de campo mediante ANOVA de un factor y la prueba Post-Hoc de Diferencia Significativa Honesta de Tukey (HSD, $\alpha = 0.05$).

Las variables vegetativas evaluadas incluyeron:

- Altura de planta (cm)
- Longitud de panoja (cm)
- Diámetro de panoja (cm)

En la figura 56 se muestra la medida de las variables morfológicas de la panoja en campo.

Figura 56

Medición de del diámetro de panoja en el cultivo de quinua



Paso 10: Evaluación de rendimiento de grano

Se procedió a la evaluación del rendimiento de grano siguiendo un protocolo estandarizado para asegurar comparabilidad entre los tratamientos (riego por goteo manual y riego por goteo automatizado). A continuación, se describieron en pasado las actividades realizadas y las fórmulas usadas para obtener los rendimientos corregidos.

Muestreo y cosecha

La madurez fisiológica se identificó por la firmeza del grano al presionarlo con la uña, alcanzada a los 157 días después de la siembra, el 25 de enero de 2026. Verificado el estado fenológico, cada unidad experimental fue cosechada de forma manual e independiente con hoz o segadera. Durante la cosecha, se delimitó en cada parcela el área de muestreo, seleccionando 4 surcos con 1 metro lineal cada uno, y se extrajeron 10 plantas individuales para evaluar variables morfológicas y peso de grano por planta. Las muestras fueron etiquetadas y transportadas al punto de procesamiento, donde las panojas se dejaron secar al ambiente hasta alcanzar aproximadamente 12%-14% de humedad. En figura 57 se muestra de los granos de quinua etiquetados.

Figura 57

Muestras de grano de quinua etiquetadas para la evaluación de rendimiento



Trilla, limpieza y pesado bruto

Seguidamente, se realizaron las operaciones de trilla, venteado y pesado utilizando una balanza digital calibrada. La biomasa cosechada de cada parcela fue trillada para separar el grano de la paja, y posteriormente el grano fue limpiado para eliminar materiales extraños como ramas, piedras e impurezas. Luego, se registró el peso húmedo del grano obtenido por parcela, denominado W_{medido} , expresado en gramos (g) o kilogramos (kg). Asimismo, el contenido de humedad fue determinado en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Foliar de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, aplicando la corrección correspondiente para el cálculo preciso del rendimiento de grano de la variedad Salcedo INIA, expresado en kg/ha. En la figura 58 se presenta la preparación y el pesaje de las muestras en base húmeda antes de ser introducidas en la estufa de laboratorio para determinar su porcentaje de humedad.

Figura 58

Determinación del peso y registro de datos del grano en laboratorio



Secado y corrección a humedad estándar

Se determinó la humedad del grano muestreado (m en %), mediante horno de secado a estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se corrigió el peso del grano a una humedad de referencia m_r aplicando la fórmula:

$$W_{\text{corr}} = W_{\text{medido}} \times \frac{100 - m}{100 - m_r}$$

Donde:

- W_{corr} = peso corregido del grano a la humedad de referencia (kg),
- W_{medido} = peso medido del grano (kg),
- m = humedad medida del grano (%),
- m_r = humedad de referencia (%).

Humedad de referencia: 12.5% (INIA, 2005)

La figura 59 muestra el secado de muestras de grano de quinua a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ para determinar el porcentaje de humedad.

Figura 59

Proceso de secado de las muestras de grano de quinua en estufa de laboratorio



Cálculo del rendimiento por parcela (kg·ha⁻¹)

Se convirtió el peso corregido del grano de cada parcela a rendimiento por hectárea usando:

$$R = \frac{W_{\text{corr}}}{A_{\text{parcela}}} \times 10\,000$$

Donde:

- R = rendimiento por parcela expresado en kg·ha⁻¹
- W_{corr} = peso corregido del grano en kg
- A_{parcela} = área de la parcela en m²
- 10 000 = factor para convertir m² a ha

Proceso 5: Evaluación integral del sistema

Paso 11: Comparación de eficiencia hídrica

La eficiencia en el uso del agua (EUA) se determinará comparando la cantidad total de agua aplicada en cada sistema con el rendimiento de grano obtenido al finalizar la campaña. Para ello, en cada parcela tanto en el sistema automatizado como en el tradicional, se registrará el volumen total de agua suministrado durante todo el ciclo del cultivo mediante el flujómetro instalado en el cabezal de riego, el cual permitirá obtener mediciones precisas por evento y por parcela. Estos volúmenes se acumularán y se expresarán en milímetros de lámina de agua aplicada (mm ha⁻¹).

$$EUA = \frac{R}{A}$$

Donde:

EUA = Eficiencia en el uso del agua (kg·m⁻³)

R = Rendimiento de grano (kg·ha⁻¹)

A = Volumen total de agua aplicada (m³·ha⁻¹)

De esta forma, se comparará la eficiencia hídrica entre el riego automatizado y el riego manual, identificando cuál sistema aprovecha de manera más efectiva el recurso hídrico en función del rendimiento alcanzado. Adicionalmente, se evaluarán las variaciones en la uniformidad de aplicación y la distribución de humedad en el suelo como variables complementarias al análisis de eficiencia.

Paso 12: Análisis financiero

El análisis económico se realizó con el propósito de comparar la viabilidad financiera del riego por goteo manual y del riego por goteo automatizado mediante

energía fotovoltaica en el cultivo de quinua. Para ello, se recopilaron todos los costos directos e indirectos generados durante el ciclo productivo, considerando mano de obra, mantenimiento, energía, materiales, servicios, costos logísticos y costos de instalación de cada sistema. Con esta información se determinaron los costos totales asociados a cada tratamiento.

Posteriormente, se realizó un análisis económico mediante el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), considerando un horizonte de evaluación de cinco años y una tasa de descuento del 10 %. Para el cálculo del VAN, se consideró como inversión inicial el costo de instalación de cada sistema de riego, mientras que los flujos netos anuales se estimaron a partir de los beneficios económicos generados por la producción del cultivo y de los costos totales anuales correspondientes a cada tratamiento. El VAN se determinó mediante la siguiente expresión:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FN_t}{(1+i)^t} - I_0$$

Donde:

- VAN = Valor Actual Neto
- FN_t = Flujo neto en el periodo t
- i = tasa de descuento (10%)
- t = periodo de evaluación
- I_0 = inversión inicial
- n = número de años evaluados

Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) permitió estimar el nivel de rentabilidad de cada alternativa de riego, expresado en porcentaje, considerando la relación entre la inversión inicial y los flujos netos proyectados durante el periodo de evaluación. La TIR se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FN_t}{(1+TIR)^t} - I_0$$

Donde:

- TIR = Tasa Interna de Retorno
- FN_t = Flujo neto en el periodo t

- I_0 = inversión inicial
- t = periodo de evaluación
- n = número de años evaluados

Cuando el VAN resultó positivo y la TIR superó la tasa de descuento establecida, el sistema fue considerado económicamente viable.

Finalmente, se realizó una comparación entre ambos tratamientos con la finalidad de identificar cuál presentó mejores condiciones de rentabilidad y sostenibilidad económica, considerando los costos operativos, costos energéticos, productividad del cultivo y eficiencia del sistema de riego. De esta manera, el análisis económico permitió determinar la viabilidad financiera de la automatización frente al sistema tradicional de riego manual.

Paso 13: Evaluación final y recomendaciones

Después de obtener y analizar los resultados correspondientes al rendimiento de grano de quinua, la eficiencia en el uso del agua y rentabilidad económica, se realizó una evaluación comparativa integral entre el sistema de riego por goteo manual y el sistema de riego por goteo automatizado mediante energía fotovoltaica. Para ello, se compararon los valores obtenidos de rendimiento de grano, volumen de agua aplicado, eficiencia en el uso del agua, costos de inversión inicial, costos operativos y rentabilidad económica mediante los indicadores Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).

Posteriormente, se analizaron las ventajas y limitaciones de cada sistema de riego en función de los resultados obtenidos durante el periodo de evaluación. En el caso del sistema automatizado, se verificó el funcionamiento de los sensores, la electroválvula, el controlador IoT y el sistema fotovoltaico, evaluando su contribución al control y monitoreo del riego. Asimismo, se analizaron aspectos relacionados con la reducción de la mano de obra requerida para el riego y el comportamiento operativo del sistema.

Finalmente, con base en los resultados comparativos obtenidos, se formularon recomendaciones técnicas, operativas y económicas orientadas a mejorar la implementación de sistemas de riego en el cultivo de quinua, considerando criterios de eficiencia en el uso del agua, sostenibilidad energética y viabilidad económica bajo condiciones similares a las del Centro Experimental Canaán, Ayacucho.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Rendimiento del grano de quinua bajo riego manual y automatizado

3.1.1. Manejo inicial de la quinua

El manejo agronómico del cultivo de quinua (variedad salcedo INIA se desarrolló en un área de 118.5 m², iniciando con la preparación mecanizada del suelo y la instalación de parcelas con distanciamientos de 0.80 m entre surcos. La siembra manual se estableció a una densidad de 15 kg/ha, bajo un sistema de riego por goteo en modalidades manual y automatizada. Durante el ciclo fenológico, se aplicó una fertilización mixta, labores culturales esenciales y un manejo fitosanitario preventivo. La cosecha se ejecutó a los 157 días en madurez fisiológica, concluyendo con las etapas de trilla, secado en estufa y pesaje analítico en laboratorio para evaluar los parámetros de rendimiento del grano.

En la tabla 40 se presenta el monitoreo de las fases fenológicas del cultivo de quinua bajo los sistemas de riego por goteo manual y automatizado durante el periodo experimental.

Tabla 40

Monitoreo de fase fenológicas en el experimento para ambos sistemas

Fecha	Fase	DDS acumulado
20/08/2025	Siembra	0
21/08/2025-27/08/2025	Emergencia	7
28/08/2025-08/09/2025	2 hojas cotiledones	19
09/09/2025-18/09/2025	2 hojas verdaderas	29
19/09/2025-28/09/2025	4 hojas verdaderas	39
29/09/2025-09/10/2025	6 hojas verdaderas	50

Fecha	Fase	DDS acumulado
10/10/2025-19/10/2025	Ramificación	60
20/10/2025-30/10/2025	Inicio de panojamiento	69
31/10/2025-07/11/2025	Panojamiento	77
08/11/2025-12/11/2025	Inicio de floración	82
13/11/2025-20/11/2025	Floración	90
21/11/2025-04/12/2025	Inicio de grano lechoso	104
05/12/2025-25/12/2025	Grano pastoso	125
26/12/2025-20/01/2026	Madurez fisiológica	153
25/01/2026	Cosecha	157

En ambos tratamientos se registró un ciclo total de 157 días después de la siembra (DDS), alcanzándose la madurez fisiológica a los 153 DDS. Del mismo modo, las diferentes etapas de desarrollo, desde la emergencia a los 7 DDS hasta el llenado de grano, ocurrieron en los mismos periodos para ambos sistemas de riego. Estos resultados muestran que la implementación del riego automatizado no modificó la duración ni la secuencia de las fases fenológicas del cultivo de quinua.

Evaluación morfológica del cultivo en el riego automático y manual

Las variables morfológicas (altura de planta, longitud y diámetro de panoja) fueron evaluadas en 10 plantas por tratamiento y analizadas mediante ANOVA de un factor y la prueba de Tukey (HSD), considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Se planteó como hipótesis nula (H_0) la ausencia de diferencias significativas entre los sistemas de riego automatizado y manual, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) estableció la existencia de diferencias significativas. Valores de p inferiores a 0.05 indicaron un efecto significativo del tipo de riego sobre la variable evaluada.

Evaluación morfológica en el cultivo en el riego automático

En la tabla 41 se presentan los resultados de la evaluación de 10 plantas bajo el sistema de riego automatizado. Se obtuvieron valores promedio de 210.2 cm para la altura de planta, 83.2 cm para la longitud de panoja y 23.1 cm para el diámetro de panoja. Asimismo, el peso promedio de grano húmedo fue de 57.158 g, mientras que el peso seco alcanzó 51.739 g, registrándose un contenido de humedad de 10.35 %.

Tabla 41

Análisis morfológico del cultivo en el riego automático

#Planta	Altura de la planta (cm)	Long. De Pnja (cm)	Diámetro de la Pnja (cm)
1	214	91	27

#Planta	Altura de la planta (cm)	Long. De Pnja (cm)	Diámetro de la Pnja (cm)
2	229	94	20
3	205	78	21
4	186	87	20
5	192	82	19
6	199	74	25
7	231	85	20
8	223	78	29
9	225	82	22
10	198	81	28
PROMEDIO	210.2	83.2	23.1

Evaluación morfológica en el cultivo en el riego manual

En la tabla 42 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de 10 plantas seleccionadas como muestra representativa del sistema de riego tradicional. Se registraron valores promedio de 201.6 cm para la altura de planta, 75.5 cm para la longitud de panoja y 21.5 cm para el diámetro de panoja. Asimismo, el peso promedio de grano húmedo fue de 47.842 g, mientras que el peso seco alcanzó 43.348 g, con un contenido de humedad de 10.40 %.

Tabla 42

Análisis morfológico del cultivo en el riego tradicional

#Planta	Altura de la planta (cm)	Long. De Pnja (cm)	Diámetro de la Pnja (cm)
1	227	72	21
2	198	83	19
3	180	76	19
4	198	82	20
5	189	89	25
6	201	80	22
7	193	63	21
8	209	59	27
9	211	81	22
10	210	70	19
PROMEDIO	201.6	75.5	21.5

Evaluación Agro-Morfológica (ANOVA y Prueba de Tukey)

Como se observa en la tabla 43, la altura promedio de planta fue de 210.20 cm en el sistema de riego automatizado y de 201.60 cm en el riego manual. No obstante, el análisis estadístico no evidenció diferencias significativas entre ambos tratamientos ($F = 1.6699$; $p = 0.2126$), por lo que el tipo de riego no influyó significativamente en esta variable. En cuanto a la longitud de la panoja, el sistema automatizado presentó una media de 83.20 cm, superior a los 75.50 cm registrados en el riego manual, mostrando

diferencias significativas ($F = 4.6640$; $p = 0.0445$), resultado confirmado mediante la prueba de Tukey HSD (Diferencia Honestamente Significativa). Este incremento en la longitud de panoja podría favorecer un mayor potencial productivo del cultivo. Por otro lado, el diámetro de la panoja alcanzó valores promedio de 23.10 cm y 21.50 cm para los sistemas automatizado y manual, respectivamente; sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas ($F = 1.1913$; $p = 0.2895$).

Tabla 43

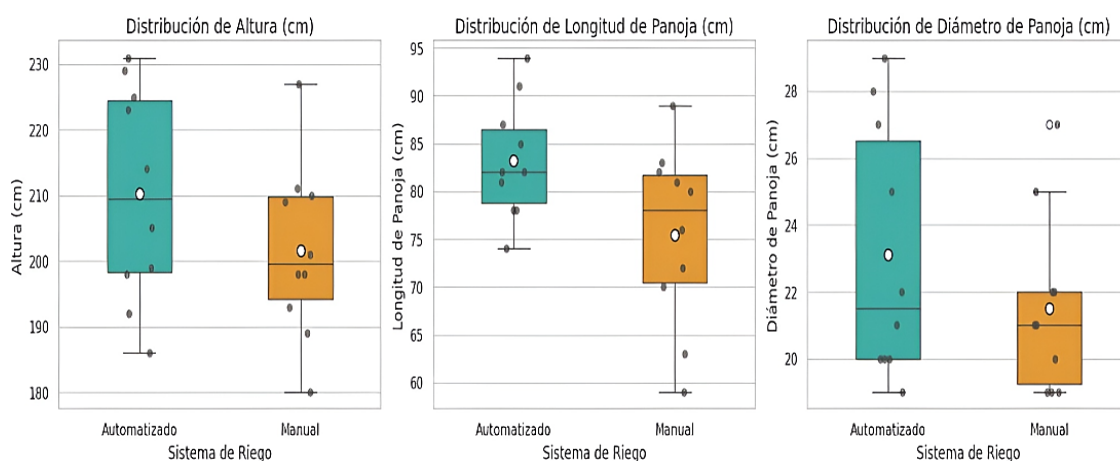
Matriz Inferencial de Varianza (ANOVA) y Comparaciones de Tukey ($\alpha = 0.05$)

Variable Morfológica	Media Auto.	Media Man.	Diferencia	F	p-valor	Decisión Tukey/ANOVA
Altura de planta (cm)	210.20	201.60	+8.60	1.6699	0.2126	No Rechaza H_0
Longitud de Panoja (cm)	83.20	75.50	+7.70	4.6640	0.0445	Rechaza H_0
Diámetro de Panoja (cm)	23.10	21.50	+1.60	1.1913	0.2895	No Rechaza H_0

En la figura 60 se presenta la distribución de la altura de planta, longitud y diámetro de panoja bajo los sistemas de riego automatizado y manual, observándose mayores valores en el sistema automatizado, principalmente en la longitud de panoja.

Figura 60

Análisis morfológico del cultivo por tratamiento de riego



3.1.2. Rendimiento del grano de quinua en el riego automático

En la tabla 44 se presentan los resultados de la evaluación por metro lineal realizada en cuatro surcos de muestreo del sistema de riego automatizado, considerando un promedio de 20 plantas por metro lineal. Se registró un contenido de

humedad promedio del grano de 14.12 % y una producción total de 27.73 kg de grano húmedo en un área evaluada de 48 m². Con estos datos, se estimó un rendimiento preliminar de 5777.08 kg/ha, el cual debe ajustarse según el porcentaje de humedad para obtener el rendimiento comercial final.

Tabla 44

Resultado de rendimiento por metro lineal en el riego automático con peso húmedo

Nr. Surco	P.Húm. (g)	P.Seco (g)	% Hum.	Área (m ²)	Long. (m)	Nr. Surcos	P.Grano (kg)	Rend. (kg/ha)
1	515.91	453.86	13.67	48	15	4	27.73	5777.08
2	462.97	410.27	12.85					
3	381.74	331.98	14.99					
4	488.30	424.69	14.98					
Prom.	462.23	405.20	14.12					5777.08

3.1.3. Rendimiento del grano de quinua en el riego tradicional

En la tabla 45 se presentan los resultados de la evaluación por metro lineal realizada en cuatro surcos de muestreo del sistema de riego manual, considerando un promedio de 20 plantas por metro lineal. Se obtuvo un contenido de humedad promedio del grano de 14.45 % y una producción total de 26.57 kg de grano húmedo en un área evaluada de 48 m². Con estos datos, se estimó un rendimiento preliminar de 5535.42 kg/ha, el cual requiere ser ajustado según el porcentaje de humedad para determinar el rendimiento comercial final.

Tabla 45

Resultados de muestras para el rendimiento en riego tradicional con peso húmedo

Nr. Surco	P.Húm. (g)	P.Seco (g)	% Hum.	Área (m ²)	Long. (m)	Nr. Surcos	P.Grano (kg)	Rend. (kg/ha)
1	494.17	437.37	12.99	48	15	4	26.57	5535.42
2	381.17	331.43	15.01					
3	384.60	332.61	15.63					
4	511.60	448.12	14.17					
Prom.	442.89	387.38	14.45					5535.42

3.1.4. Comparación de rendimiento de grano de quinua

En la tabla 46 se muestra que el sistema de riego automatizado demostró un desempeño superior en el cultivo de quinua al alcanzar un rendimiento de 5670.83 kg/ha, superando en 258.33 kg/ha (4.77%) al riego manual tradicional (5412.50 kg/ha). Esta diferencia a favor de la automatización se sustentó en un mayor peso corregido del grano por parcela (27.22 kg frente a 25.98 kg), tras estandarizar técnicamente la humedad del grano al 12.50% de referencia comercial según la norma INIA (2005).

Tabla 46*Rendimiento de quinua con riego tradicional vs automatizado*

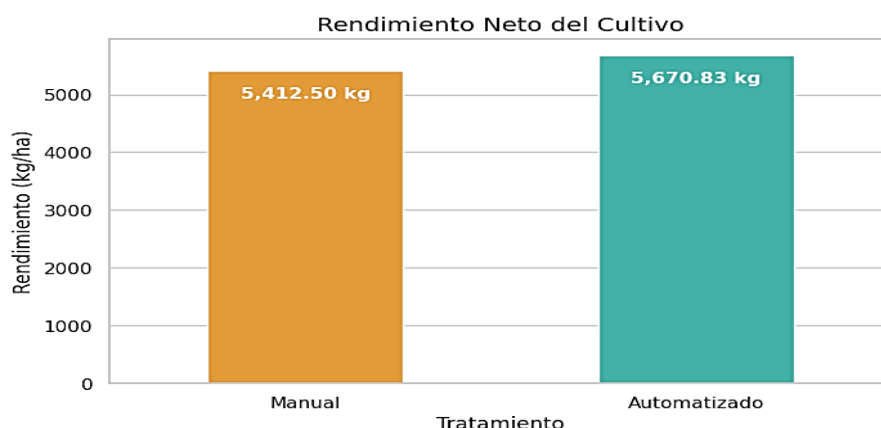
Parcela / Tratamiento	Humedad medida del grano	Humedad de referencia (INIA 2005)	Peso medido del grano (kg)	Peso corregido (kg)	Área de parcela (m ²)	Rendimiento kg/ha
Riego Manual	14.45%	12.50%	26.57	25.98	48	5412.50
Riego Automatizado	14.12%	12.50%	27.73	27.22	48	5670.83

De acuerdo con los datos de la tabla 47, el riego por goteo automatizado alcanzó un rendimiento de 5,670.83 kg/ha, superior a los 5,412.50 kg/ha obtenidos con el riego manual. Esta diferencia representó un incremento de 258.33 kg/ha, equivalente al 4.77 % en la producción de quinua.

Tabla 47*Análisis de rendimiento de grano del cultivo de quinua*

Variable Evaluada	Riego Manual	Riego Auto.	Variación Absoluta	Variación Porcentual
Rendimiento del grano de quinua (kg/ha)	5,412.50	5,670.83	+258.33	+4.77%

Estos números demuestran rigurosamente que el control automatizado supera al manejo de riego manual tradicional al optimizar el rendimiento específico de este cultivo como se muestran en la figura 61.

Figura 61*Comparación del rendimiento de grano de quinua entre ambos sistemas*

3.2. Eficiencia en el uso del agua en sistemas de riego

Durante la campaña agrícola agosto a diciembre 2025, el sistema de riego automatizado realizó 26 aplicaciones de agua frente a las 22 del sistema manual, logrando una distribución más continua y uniforme del suelo.

Eventos meteorológicos durante la campaña agrícola

Los datos meteorológicos registrados por la estación automática de INIA Canaán, como temperatura (°C), precipitación acumulada (Rain), intensidad de lluvia (Rain Rate), radiación solar (Solar Rad.) y energía solar (Solar Energy), influyeron directamente en la programación del riego, ya que los eventos de lluvia redujeron la necesidad de aplicación hídrica en ambos sistemas. El sistema automatizado fue el más sensible a estas variaciones, al condicionar su funcionamiento a la ocurrencia de precipitaciones, lo que le permitió adaptarse dinámicamente a las condiciones reales del campo y contribuir a su mayor eficiencia productiva. En la tabla 48 se muestra los datos meteorológicos más representativas durante la campaña agrícola.

Tabla 48

Datos meteorológicos más resaltantes de estación cercana

Date	Time	Temp Out	Rain	Rain Rate	Solar Rad.	Solar Energy
3/09/2025	05:00	11	0.8	2.4	0	0
3/09/2025	06:00	9.9	1.6	5.8	0	0
7/09/2025	18:00	14	2.2	8.8	1	0.09
7/09/2025	19:00	13.3	0.6	1.2	0	0
20/09/2025	16:00	20.1	2.6	6.7	316	27.18
20/09/2025	17:00	19.5	1.4	2	24	2.06
29/09/2025	18:00	16.1	1.2	1.4	5	0.43
29/09/2025	22:00	12.1	0.7	1.1	0	0
29/09/2025	23:00	11.3	0.9	1.2	0	0
1/10/2025	00:00	12.5	0.4	1	0	0
1/10/2025	01:00	12.4	0.4	0.8	0	0
1/10/2025	16:00	17.4	0.4	0.5	136	11.7
4/10/2025	13:00	19.9	0.4	0.9	203	17.46
8/10/2025	16:00	20.1	2.6	6.7	316	27.18
8/10/2025	17:00	19.5	1.4	2	24	2.06
11/10/2025	18:00	14.4	0.4	0.8	2	0.17
11/10/2025	21:00	12.1	0	1	0	0
14/10/2025	17:00	14.4	1	1.2	27	2.32
14/10/2025	18:00	14.8	1.2	1.4	14	1.2
14/10/2025	21:00	13.1	0.6	0.8	0	0
19/10/2025	01:00	11.4	0.8	0.8	0	0

29/10/2025	18:00	15.3	1	1.6	11	0.95
29/10/2025	19:00	14.9	1.2	1.2	0	0
29/10/2025	20:00	14.1	0.6	0.8	0	0
31/10/2025	17:00	15.4	0.6	1.8	27	2.32
31/10/2025	18:00	17	1	2.6	71	6.11
31/10/2025	23:00	12.8	0.8	1	0	0
6/11/2025	21:00	14.3	1.1	4.1	0	0
26/11/2025	01:00	14.9	0.4	1.2	0	0
26/11/2025	02:00	14.2	0.4	1.2	0	0
26/11/2025	03:00	14.2	0.2	0.8	0	0
26/11/2025	04:00	14.1	0.2	0.8	0	0
26/11/2025	05:00	13.4	0	0	0	0
26/11/2025	06:00	13.7	0.2	0.8	0	0
26/11/2025	19:00	12.9	0.4	1.2	0	0
26/11/2025	20:00	12.1	0.4	1.2	0	0
26/11/2025	21:00	13.1	0.4	1.2	0	0
26/11/2025	22:00	11.7	0.4	1.2	0	0
26/11/2025	23:00	11.6	0.2	0.8	0	0
27/11/2025	00:00	12.1	0.2	0.8	0	0
27/11/2025	01:00	11.1	0.2	0.8	0	0
27/11/2025	03:00	10.9	0.2	0.8	0	0
27/11/2025	05:00	9.7	0.2	0.8	0	0
27/11/2025	07:00	9.4	0.2	0.8	17	1.46
28/11/2025	00:00	13.4	0.2	0.8	0	0
10/12/2025	00:00	12.9	0.8	0.8	0	0
10/12/2025	01:00	12.4	0.8	0.8	0	0
10/12/2025	02:00	11.9	0.8	1	0	0
10/12/2025	03:00	11.6	1	1	0	0
10/12/2025	04:00	11.6	0.8	0.8	0	0
10/12/2025	05:00	11.3	0.8	0.8	0	0
16/12/2025	17:00	15.4	0.6	1.8	27	2.32
16/12/2025	18:00	17	1	2.6	71	6.11
16/12/2025	23:00	12.8	0.8	1	0	0
23/12/2025	06:00	11.6	0.2	0.8	0	0
23/12/2025	09:00	15.3	0.2	0.8	264	22.71
23/12/2025	11:00	17.8	0.2	0.8	577	49.63
23/12/2025	12:00	20.2	0.2	0.8	996	85.67
23/12/2025	14:00	23.5	0.4	1	1026	88.25
23/12/2025	16:00	25.6	0.2	0.8	431	37.07
23/12/2025	18:00	18.1	0.2	0.8	28	2.41
23/12/2025	20:00	19.4	0.2	0.8	0	0
23/12/2025	21:00	19.1	0.2	0.8	0	0
23/12/2025	22:00	17.9	0.2	0.8	0	0
4/01/2026	22:00	14.3	1.1	4.1	0	0
4/01/2026	23:00	13.6	0.6	1.2	0	0

5/01/2026	00:00	12.8	0.4	0.8	0	0
5/01/2026	01:00	13	0.2	0.4	0	0
5/01/2026	02:00	12.6	0.4	0.8	0	0
5/01/2026	03:00	12.5	0.2	0.4	0	0
5/01/2026	04:00	12.2	0.2	0.4	0	0
5/01/2026	05:00	11.9	0.4	0.8	0	0
5/01/2026	06:00	11.8	0.2	0.4	0	0
5/01/2026	07:00	11.7	0.2	0.4	0	0
5/01/2026	08:00	12.1	0.2	0.4	17	1.46
5/01/2026	09:00	12.4	0.2	0.4	110	9.46
5/01/2026	10:00	15.2	0.2	0.4	405	34.83
5/01/2026	11:00	16.8	0.2	0.4	500	43.01
5/01/2026	12:00	18.4	0.2	0.4	693	59.61
5/01/2026	13:00	20.2	0.2	0.4	931	80.08
5/01/2026	14:00	21.2	0.2	0.4	1014	87.22
5/01/2026	15:00	22.4	0.2	0.4	994	85.5
5/01/2026	16:00	23.3	0.2	0.4	903	77.67
5/01/2026	17:00	24.8	0.2	0.4	774	66.57
5/01/2026	18:00	24.9	0.2	0.4	556	47.82
5/01/2026	20:00	15.3	0.2	0.4	5	0.43
5/01/2026	21:00	13.7	0.2	0.4	0	0
5/01/2026	22:00	15.8	0.2	0.4	0	0
6/01/2026	00:00	12.7	0.4	0.8	0	0
6/01/2026	01:00	13.1	0.2	0.4	0	0
6/01/2026	02:00	12.7	0.2	0.4	0	0
6/01/2026	03:00	11.9	0.2	0.4	0	0
6/01/2026	04:00	12	0.2	0.4	0	0
6/01/2026	05:00	12	0.2	0.4	0	0
6/01/2026	07:00	11.6	0.2	0.4	0	0
6/01/2026	10:00	15.3	0.2	0.4	264	22.71
6/01/2026	12:00	17.8	0.2	0.4	577	49.63
6/01/2026	13:00	20.2	0.2	0.4	996	85.67
6/01/2026	15:00	23.5	0.4	0.8	1026	88.25
6/01/2026	17:00	25.6	0.2	0.4	431	37.07
6/01/2026	19:00	18.1	0.2	0.4	28	2.41
6/01/2026	21:00	19.4	0.2	0.4	0	0
6/01/2026	22:00	19.1	0.2	0.4	0	0
6/01/2026	23:00	17.9	0.2	0.4	0	0
7/01/2026	00:00	17.3	0.2	0.4	0	0
7/01/2026	03:00	15.7	0.2	0.4	0	0
7/01/2026	06:00	13.7	0.2	0.4	0	0
7/01/2026	10:00	15.6	0.2	0.4	173	14.88
7/01/2026	15:00	19.6	0.2	0.4	404	34.75
7/01/2026	21:00	14.4	0.2	0.4	0	0
8/01/2026	05:00	10.8	0.2	0.4	0	0

10/01/2026	20:00	12.2	2.4	3.8	0	0
10/01/2026	22:00	12.5	0.2	0.8	0	0
10/01/2026	23:00	13.5	0.2	0.8	0	0
15/01/2026	20:00	12.2	1.2	2.8	0	0
15/01/2026	22:00	12.5	0.2	0.8	0	0
15/01/2026	23:00	13.5	0.2	0.8	0	0
21/01/2026	01:00	14.9	0.4	1.2	0	0
21/01/2026	02:00	14.2	0.4	1.2	0	0
21/01/2026	03:00	14.2	0.2	0.8	0	0
21/01/2026	04:00	14.1	0.2	0.8	0	0
21/01/2026	06:00	13.7	0.2	0.8	0	0
21/01/2026	19:00	12.9	0.5	1.3	0	0
21/01/2026	20:00	12.1	0.5	1.3	0	0
21/01/2026	21:00	13.1	0.5	1.3	0	0
21/01/2026	22:00	11.7	0.5	1.3	0	0
22/01/2026	23:00	11.6	0.2	0.8	0	0
22/01/2026	00:00	12.1	0.2	0.8	0	0
22/01/2026	01:00	11.1	0.2	0.8	0	0
22/01/2026	03:00	10.9	0.2	0.8	0	0
22/01/2026	05:00	9.7	0.4	1.2	0	0
22/01/2026	07:00	9.4	0.2	0.8	17	1.46

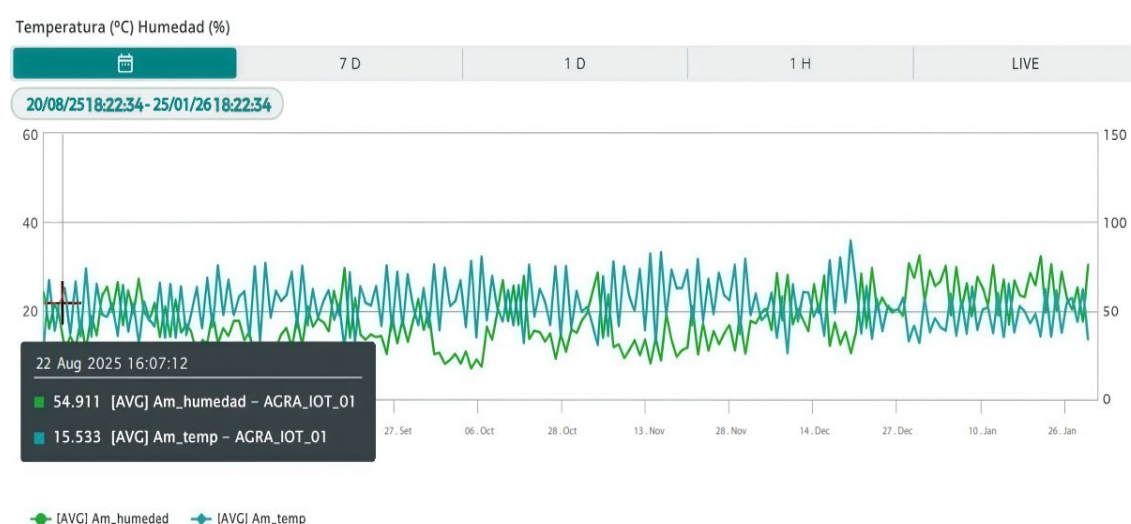
Durante la campaña agrícola agosto a diciembre 2025, el análisis de los registros pluviométricos evidenció la presencia de precipitaciones de diversa intensidad a lo largo de todo el periodo. Entre los eventos más representativos se registraron precipitaciones de 2.6 mm los días 20/09/2025 y 08/10/2025, así como un evento de 2.4 mm el 10/01/2026. Adicionalmente, se registraron lluvias de menor intensidad, entre 0.2 y 1.2 mm, durante el 26 y 27 de noviembre, el 10 de diciembre de 2025 y diversos días de enero de 2026. Aunque estas precipitaciones fueron ligeras, contribuyeron a mantener la humedad del suelo y aportaron agua disponible para el cultivo, reduciendo en ciertos momentos la necesidad de aplicación hídrica. En cuanto al manejo del riego, el sistema automatizado aprovechó la ocurrencia de lluvias para suspender temporalmente los riegos programados, evitando la sobreaplicación de agua y favoreciendo un uso más eficiente del recurso hídrico. En ese sentido, el sistema manual dependió del criterio del operador, lo que pudo generar variaciones en la frecuencia y oportunidad del suministro. El sistema automatizado operó además con umbrales de humedad variables según las 13 fases fenológicas del cultivo, tomando como referencia la capacidad de campo (30.65 %) y el punto de marchitez permanente (16.06 %), siendo más estricto en las etapas críticas de floración y llenado de grano, lo que le permitió lograr un control hídrico más preciso y eficiente.

Monitoreo de las variables agroclimáticas en el sistema automatizado

La figura 62 presenta el monitoreo ambiental continuo del sistema automatizado entre el 20/08/2025 y el 25/01/2026, registrando la temperatura ambiente (línea celeste) y la humedad relativa (línea verde). La temperatura osciló entre 12.4 °C y 21.1 °C con un promedio de 18.0 °C, alcanzando sus máximas en diciembre 2025 y enero 2026 (20.6–21.1 °C) durante la etapa reproductiva del cultivo, y su mínima absoluta (12.4 °C) en enero 2026. La humedad relativa fluctuó entre 20.8 % y 72.0 % con un promedio de 44.8 %, siendo más alta en enero 2026 (promedio 56.3 %, máxima 72.0 %) por la época lluviosa, y más baja en diciembre 2025 (promedio 36.4 %, mínima 20.8 %), evidenciando la capacidad del sistema para monitorear en tiempo real las variaciones climáticas vinculadas a la demanda hídrica del cultivo.

Figura 62

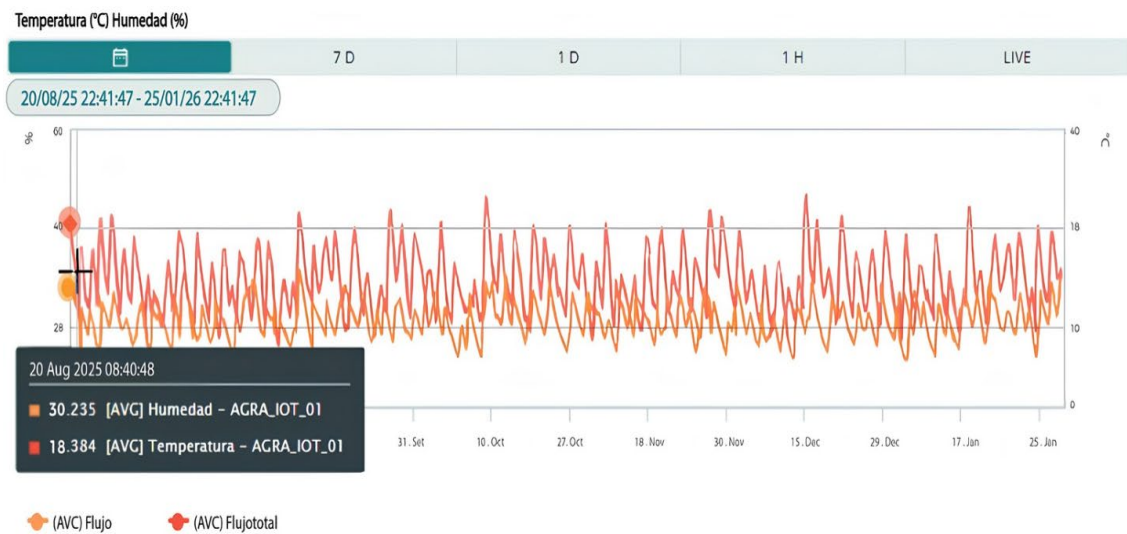
Datos de sensores de ambiente - Temperatura y humedad



La figura 63 presenta el monitoreo continuo de la humedad del suelo entre el 20/08/2025 y el 25/01/2026, registrando simultáneamente la humedad del suelo en % (línea anaranjada) y la temperatura del suelo en °C (línea roja). La humedad osciló entre 24.40 % y 30.60 % con un promedio de 27.98 %, manteniéndose dentro del rango útil definido por el PMP (16.06 %) y la CC (30.65 %), con valores más altos en agosto y septiembre 2025 (29.36 % y 28.89 %, etapas iniciales con $p = 0.30-0.35$) y más bajos en enero 2026 (promedio 24.98 %, mínima 24.40 %), en madurez y cosecha ($p = 0.55$). La temperatura del suelo se mantuvo estable entre 16.3 °C y 18.9 °C (promedio 17.4 °C), con máximas en diciembre 2025 (18.9 °C) y mínimas en septiembre 2025 (16.3 °C), evidenciando condiciones térmicas adecuadas para el desarrollo radicular durante toda la campaña.

Figura 63

Datos de sensores de suelo - Temperatura y humedad



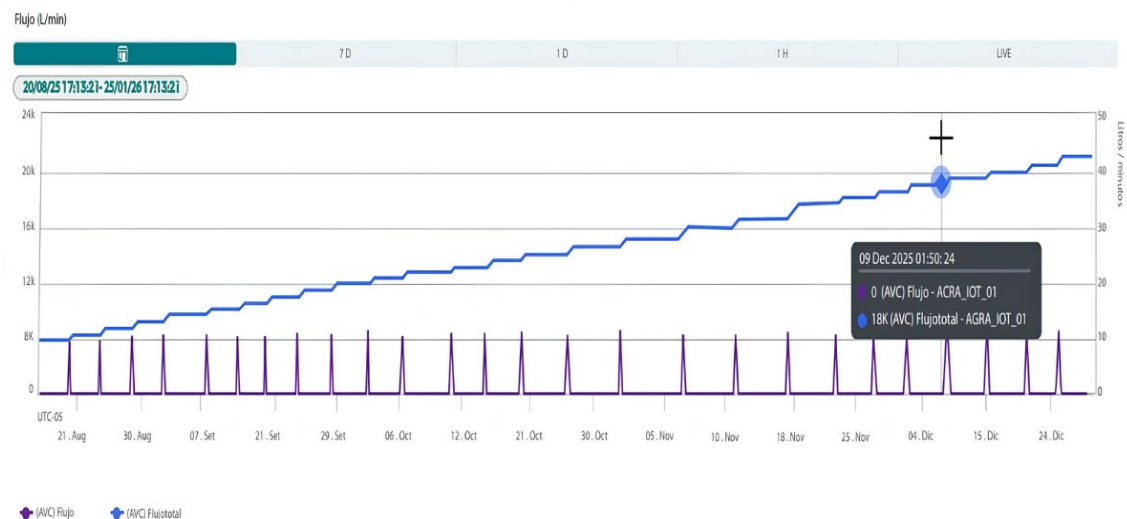
Monitoreo del consumo hídrico del riego automatizado y manual

Monitoreo del consumo hídrico del riego automatizado

La figura 64 presenta el monitoreo del flujómetro del sistema automatizado entre el 20/08/2025 y el 25/01/2026, mostrando el flujo instantáneo en L/min (picos morados) y el flujo total acumulado en litros (línea azul ascendente). El sistema registró 26 eventos de riego con un flujo promedio de 10.847 L/min (rango: 10.386–11.370 L/min) y tiempos de riego por evento de entre 75.9 y 85.4 min (promedio 79.6 min), activándose automáticamente al descender la humedad del suelo al umbral de cada etapa fenológica. El volumen total acumulado al cierre de la campaña fue de 22,452.22 L.

Figura 64

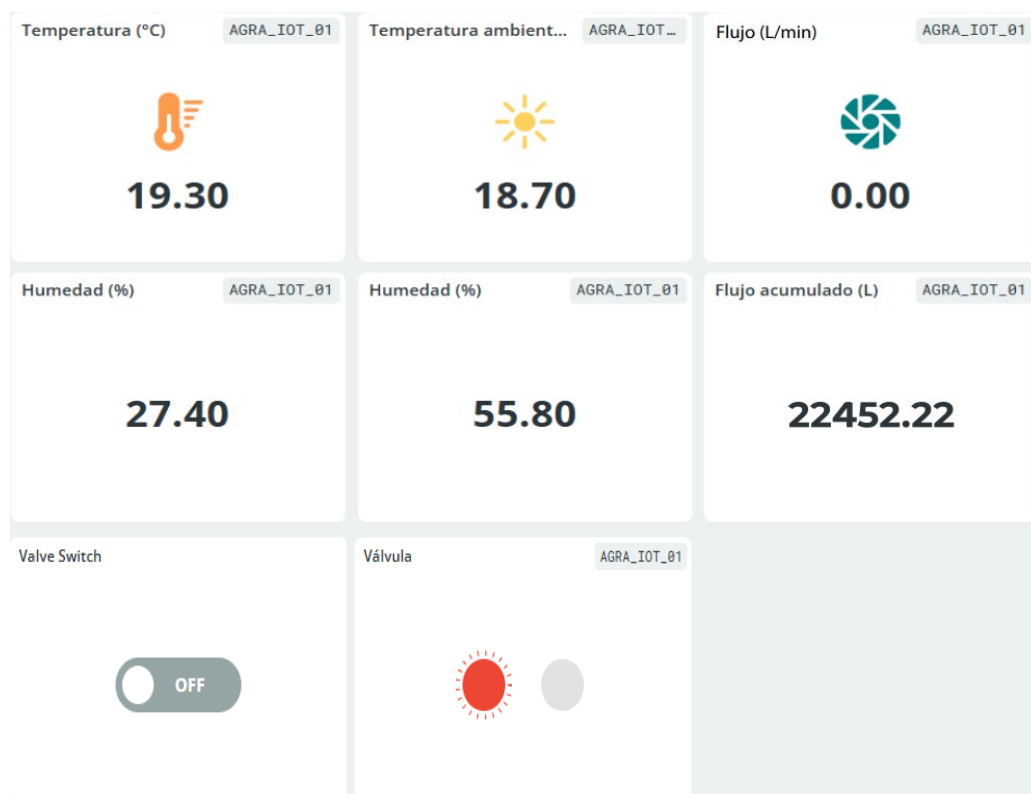
Datos de flujómetro en panel de control - Sistema automatizado



La figura 65 presenta el panel de control digital del sistema automatizado al cierre de la campaña, registrando en tiempo real una temperatura de suelo de 19.30 °C, temperatura ambiente de 18.70 °C, humedad de suelo de 27.40 % y humedad ambiental de 55.80 %, condiciones térmicas e hídricas adecuadas para el cultivo, con un flujo acumulado total de 22,452.22 L y la válvula en estado OFF, confirmando la conclusión del ciclo de riego y evidenciando la capacidad del sistema para monitorear y controlar el riego de forma continua y precisa.

Figura 65

Última toma de datos en sensores y flujómetro para sistema automatizado



Monitoreo del consumo hídrico del riego manual

La figura 66 presenta el monitoreo del flujómetro del sistema de riego manual entre el 20/08/2025 y el 25/01/2026, mostrando el flujo instantáneo en L/min (picos anaranjados) y el flujo total acumulado en litros (línea morada ascendente). El sistema registró 22 eventos de riego con un flujo promedio de 12.034 L/min (rango: 11.580 - 12.634 L/min) y tiempos de riego por evento de entre 104.8 y 120.8 min (promedio 112.0 min), notablemente mayores al no contar con un criterio automatizado de apagado, resultando en un volumen total acumulado de 29,637.41 L, significativamente superior al del sistema automatizado (22,452.22 L), lo que evidencia un mayor consumo hídrico por la ausencia de control preciso.

Figura 66

Datos de flujómetro en panel de control - Sistema tradicional



La figura 67 presenta el registro final del flujómetro del sistema de riego tradicional al cierre de la campaña agrícola, donde se registró un flujo acumulado total de 29,637.41 L y un flujo instantáneo de 0.00 L/min, confirmando que el sistema había concluido su ciclo de riego, y evidenciando que el sistema tradicional consumió aproximadamente 7,185 L más que el sistema automatizado (22,452.22 L), lo que refleja su menor eficiencia hídrica al no contar con un criterio automatizado de apagado.

Figura 67

Última toma de datos en sensores y flujómetro para sistema tradicional



Análisis comparativo de la eficiencia en el uso del agua del riego automatizado y manual

La tabla 49 se muestra el volumen de agua aplicado en las parcelas experimentales de 48 m², el riego manual utilizó 29,837 m³ y el sistema automatizado 22,452 m³. Al escalar a hectárea, el riego manual demandó 6,174.4 m³/ha y el automatizado 4,677.5 m³/ha. Respecto a la eficiencia en el uso del agua, el riego manual obtuvo 0.88 kg/m³ frente a 1.21 kg/m³ del sistema automatizado.

Tabla 49*Eficiencia en el uso de agua para ambos sistemas*

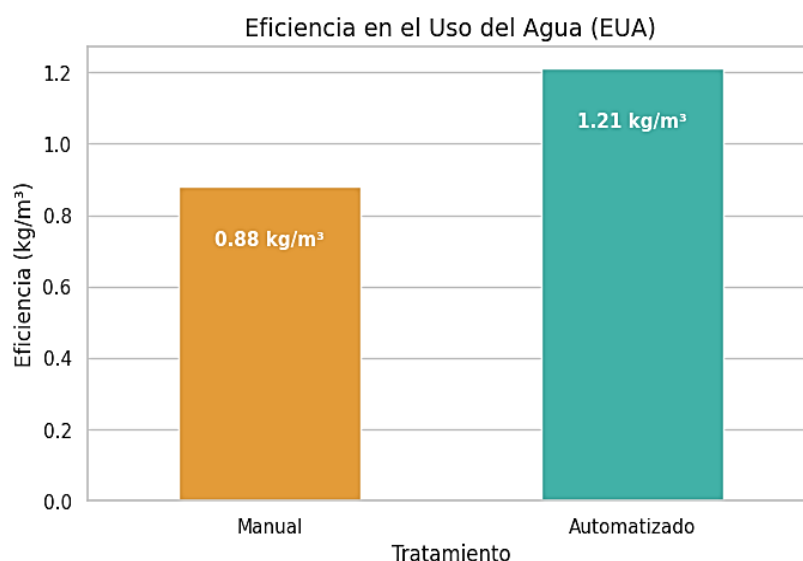
Tratamiento	Volumen total de agua aplicado (m ³)	Área regada (m ²)	Lámina total aplicada (mm)	Volumen total de agua aplicado (m ³ /ha)	Rendimiento (kg/ha)	Eficiencia en uso del agua (kg/m ³)
Riego Manual	29,637	48	617.44	6174.4	5412.50	0.88
Riego Automatizado	22,452	48	467.75	4677.5	5670.83	1.21

La tabla 50 evidencia que el sistema automatizado redujo el volumen hídrico en -1,496.90 m³/ha respecto al manual (6,174.40 vs 4,677.50 m³/ha), con una reducción de 24.24 %, y mejoró la eficiencia de uso del agua en +0.33 kg/m³, equivalente al 37.50 %, pasando de 0.88 a 1.21 kg/m³, logrando mayor producción de quinua con menos agua aplicada.

Tabla 50*Análisis comparativo en la eficiencia en el uso del agua en ambos sistemas*

Variable Evaluada	Riego Manual	Riego Auto.	Variación Absoluta	Variación Porcentual
Volumen de Agua Aplicado (m ³)	6,174.40	4,677.50	-1,496.90	-24.24%
Eficiencia Hídrica (kg/m ³)	0.88	1.21	+0.33	+37.50%

En la figura 68 muestra la comparación de eficiencia en el uso del agua en ambos sistemas.

Figura 68*Comparación de eficiencia del uso de agua entre ambos sistemas*

3.3. Análisis financiero de VAN y TIR de los sistemas de riego en el cultivo de quinua

A continuación, se presenta el análisis financiero de VAN y TIR de los sistemas de riego en el cultivo de quinua, con el objetivo de evaluar la viabilidad económica y el ahorro generado por cada sistema.

Costos totales a nivel experimental

La tabla 51 muestra que el costo total de mano de obra del sistema manual fue de S/ 471.40, siendo los riegos la actividad de mayor carga laboral con S/ 246.40, seguidos de trilla y limpieza (S/ 40.00), cosecha (S/ 30.00) y pesado/embolsado (S/ 30.00), mientras que preparación del terreno, siembra, incorporación de insumos y control fitosanitario aportaron entre S/ 10.00 y S/ 20.00, reflejando que la intervención manual continua durante los riegos concentra la mayor demanda laboral de todo el ciclo productivo.

Tabla 51

Costos de mano de obra para riego tradicional

Mano de obra para riego (horas y costo)	Riego Manual (S/.)
Arado mecánico	15
Rastrado mecánico	15
Trazado y surcado manual	15
Siembra	10
Incorporación de guano de isla y Molimax	10
Primer raleo/aporque	20
Segundo raleo/aporque	20
Riegos	246.4
Control fitosanitario (aplicaciones)	20
Cosecha	30
Trilla y limpieza	40
Pesado/embolsado	30
Total	471.4

La tabla 52 muestra que el costo total de mano de obra del sistema automatizado fue de S/ 225.00, inferior en S/ 246.40 al sistema manual (S/ 471.40), diferencia concentrada en la actividad de riegos, que registró S/ 0.00 al operar de forma autónoma mediante sensores y control electrónico, eliminando completamente la intervención manual durante toda la campaña. El resto de actividades como trilla y limpieza (S/ 40.00), cosecha (S/ 30.00), pesado/embolsado (S/ 30.00), deshierbo/aporque (S/ 20.00

cada uno) y control fitosanitario (S/ 20.00) mantuvieron costos similares en ambos sistemas.

Tabla 52

Costos de mano de obra para riego automatizado

Mano de obra para riego (horas y costo)	Riego Automatizado (S/.)
Arado mecánico	15
Rastrado mecánico	15
Trazado y surcado manual	15
Siembra	10
Incorporación de guano de isla y Molimax	10
Primer deshierbo/aporque	20
Segundo deshierbo/aporque	20
Riegos	0
Control fitosanitario (aplicaciones)	20
Cosecha	30
Trilla y limpieza	40
Pesado/embolsado	30
Total	225

La tabla 53 muestra que el costo de mantenimiento del sistema manual fue de S/ 63.00, con las actividades de mayor costo concentradas en limpieza de goteros (S/ 15.00), limpieza de filtro (S/ 15.00), limpieza del tanque (S/ 10.00) y corrección de fugas (S/ 8.00), correspondiendo a intervenciones básicas de limpieza y ajustes mecánicos hidráulicos.

Tabla 53

Costos de mantenimiento para riego tradicional

Mantenimiento del sistema	Riego Manual (S/.)
Limpieza de goteros	15
Limpieza de tuberías	5
Revisión de uniones	5
Ajuste de válvulas manuales	5
Corrección de pequeñas fugas	8
Limpieza de filtro	15

Mantenimiento del sistema	Riego Manual (S/.)
Limpieza de tanque de agua	10
Total	63

La tabla 54 muestra que el costo de mantenimiento del sistema automatizado ascendió a S/ 89.00, superando al sistema manual debido a actividades adicionales como calibración de sensores, revisión de electroválvulas, ajuste de cableado y revisión del panel y batería, distribuidas entre componentes hidráulicos y electrónicos.

Tabla 54

Costos de mantenimiento para riego automatizado

Mantenimiento del sistema	Riego Automático (S/.)
Limpieza de goteros	15
Limpieza de tuberías	5
Limpieza y calibración de sensores	5
Revisión de electroválvula	5
Revisión de conexiones eléctricas	8
Ajuste de cableado	8
Limpieza de tanque de agua	10
Revisión del panel y batería	10
Limpieza de filtro	15
Reinicio o ajuste del sistema si falla	8
Total	89

La tabla 55 presenta los costos de instalación inicial de ambos sistemas de riego. El sistema manual tuvo un costo total de S/ 1,777.12 frente a S/ 1,934.62 del automatizado, con una diferencia de S/ 157.50 entre ambos. La mayor parte de las partidas son idénticas en ambos sistemas, como materiales hidráulicos (S/ 649.50), electrónica principal (S/ 155.50), mano de obra de instalación eléctrica y electrónica (S/ 465.00), mano de obra hidráulica (S/ 175.00) y consumibles (S/ 33.60), dado que comparten la misma infraestructura física y configuración base. La diferencia de costo se concentra en la categoría de sensores y actuadores, que pasó de S/ 25.00 en el sistema manual a S/ 182.50 en el automatizado, debido a la incorporación del sensor de humedad y temperatura RS-485 (S/ 115.00), el sensor digital AM2301 (S/ 25.00) y la válvula solenoide de 12V (S/ 17.50), componentes necesarios para el monitoreo y control automático del riego, lo que justifica la inversión adicional frente a los beneficios en eficiencia hídrica obtenidos.

Tabla 55

Costos de instalación para ambos sistemas

Costo de instalación inicial	Und	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	Riego Manual (S/.)	Riego Automatizado (S/.)
Materiales hidráulicos					649.5	649.5
Tubería PVC 1" c/rosca - 5m	m	12	6.4	76.8	38.4	38.4
Tubería PVC 1/2" c/rosca - 5m	m	2	3	6	3	3
Manguera HDPE 1"	m	16	0.45	7.2	3.6	3.6
Manguera HDPE 1/2"	m	124	0.75	93	46.5	46.5
Codo 90° PVC 1"	und	6	5	30	15	15
Tee PVC 1"	und	2	7	14	7	7
Tee rosca macho HDPE 1"	und	2	13	26	13	13
Adaptador rosco macho 1" HDPE	und	2	8	16	8	8
Kit de goteros 2 l/h	und	600	0.33	198	99	99
Caño de jardín	und	1	12	12	6	6
Tanque de almacenamiento 1100 L Rotoplas +Kit de accesorios	und	1	680	680	340	340
Tapón de 1" HDPE	und	2	4	8	4	4
Abrazaderas de 1/2"	und	8	1	8	4	4
Miniválvulas de 1/2"	und	8	3	24	12	12
Válvulas de 1"	und	3	9	27	13.5	13.5
Bushing PVC 1" a 3/4"	und	4	3	12	6	6
Pegamento Celeste 4 onzas Oatey	und	2	6	12	6	6
Teflón	und	4	1	4	2	2
Filtro de agua Azud de 1"	und	1	45	45	22.5	22.5
Energía y control (permanente)					122.6	122.6
Panel solar 100 Watts	und	1	170	170	42.5	42.5
Controlador de carga Full Max LT2024-10A	und	1	180	180	45.0	45.0

Costo de instalación inicial	Und	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	Riego Manual (S/.)	Riego Automatizado (S/.)
Batería 7Ah	und	1	95	95	23.8	23.8
Cable de 12 AWG para panel solar, bateria y control de carga	m	4	1	4	1.0	1.0
Cables estaño de 4 hilos 20 AWG para sensores	m	9	2.5	22.5	5.6	5.6
Cable de 16 AWG GPT para caja de control	m	4	1	4	1.0	1.0
Regulador STEP DOWN 5A	und	1	15	15	3.8	3.8
Sensores y actuadores					25	182.5
Sensor de humedad y temperatura RS-485	und	1	115	115	-	115
Sensor de humedad y temperatura digital AM2301	und	1	25	25	-	25
Sensor de flujo de agua YF-S201	und	2	25	50	25	25
Válvula solenoide para agua 12V	und	1	35	35	-	17.5
Electrónica principal					155.5	155.5
Módulo De Wifi Con Esp32-cam Antena 2.4g	und	2	65	130	65	65
Módulo Transceptor Rs485 Pcb	und	2	9	18	9	9
Relay 12V - 10A Negro	und	3	2	6	3	3
Circuito integrado optoacoplador	und	2	1	2	1	1
tarjeta de regulación de voltaje de 12V a 5V	und	1	10	10	5	5
Placa Impresa 70*50 - Color Verde	und	2	3	6	3	3
Módem Zte Libre Mf920v 4g Wifi Color Negro + cable USB	und	1	139	139	69.5	69.5
Protección de caja de control y sensores					26.82	26.8
Caja de paso 30×25×8cm	und	1	28	28	14	14
Prensaestopa 1/2"	und	4	1.8	7.2	3.6	3.6
Prensaestopa 3/4"	und	1	2	2	1	1
Manguera corrugada 1/2"	m	11.2	1.2	13.44	6.72	6.72
Manguera corrugada 3/4"	m	2	1.5	3	1.5	1.5
Estructura de la base del tanque de agua de 1.70x1.70x3m					63.8	63.8
Rollizos de 4x4x3m altura	und	6	10	60	30	30
Cuartones de 3x2x1.7m costado	und	4	5	20	10	10

Costo de instalación inicial	Und	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	Riego Manual (S/.)	Riego Automatizado (S/.)
Cuartones de 3x2x1.7m techo	und	8	5	40	20	20
Clavo de 4"	kg	1	6	6	3	3
Clavo de 3"	kg	0.5	3	1.5	0.75	0.75
Estructura del panel y caja de protección metálico					35.3	35.3
Angulo A36 1X1X2.0(25X25X2.0MM) AA	und	3.62	3.1	11.2	5.6	5.6
Platina A36 1/8X1 "X6M AA	und	2.61	2.7	7.0	3.5	3.5
Bisagras en 3/8X2 " de 2 alas (100)	und	2	1	2	1.0	1.0
Tuerca y pernos de 1/2 "	und	8	0.5	4	2.0	2.0
Disco de corte 4-1/2"(25) NORTON	und	2	4	8	4.0	4.0
Abrazadera metal C/2 orejas de 3 "	und	3	7	21	10.5	10.5
Electrodo 6011P 3/32" Indura	kg	0.5	15	7.5	3.8	3.8
Rollizo de 3x3x5m	und	1	10	10	5.0	5.0
Mano de obra de la estructural del panel y caja de protección					25	25
Construcción del soporte del panel solar y caja de protección de 30x25x8	Jornal	1	50	50	25	25
Mano de obra de instalación eléctrica y electrónica					465	465
Construcción del circuito eléctrico	Jornal	1	350	350	175	175
Programación del sistema automatizado	Jornal	1	300	300	150	150
Instalación del panel, batería y control de energía	Jornal	2	50	100	50	50
Instalación de caseta de control y cajas de protección	Jornal	1	180	180	90	90
Mano de obra de instalación hidráulica					175	175
Instalación de tubería y accesorios hidráulicos	Jornal	3	50	150	75	75
Instalación del tanque elevado	Jornal	4	50	200	100	100
Costos de consumibles de Instalación					33.6	33.61
Instalación de armadura de panel					5	5

Costo de instalación inicial	Und	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	Riego Manual (S/.)	Riego Automatizado (S/.)
Bisagras en 3/8X2" 2 a las (100)	Und	2	1	2	1	1
Disco de corte 4-1/2 " 25) NORTON	Und	2	4	8	4	4
Consumibles de instalación eléctrica					28.6	28.6
Terminal, Conector, Bornera 10A	Und	1	3	3	1.5	1.5
Espadín hembra 40 pines	Und	3	1	3	1.5	1.5
Resistencias 1k – 1/2W	Und	4	0.04	0.16	0.1	0.1
Resistencia 10k – 1/2W	Und	2	0.04	0.08	0.0	0.0
Resistencia 330Ω – 1/2W	Und	2	0.04	0.08	0.0	0.0
Pasta para soldar 20 g (chica, azul)	Und	1	8	8	4.0	4.0
Soldadura de 50 g – 0.8 mm	Und	2	15	30	15.0	15.0
Transistor NPN	Und	3	0.3	0.9	0.5	0.5
Condensador 100 µF – 35 V	Und	2	0.2	0.4	0.2	0.2
Diodo 1N4007	Und	2	0.1	0.2	0.1	0.1
Bornera Verde De 4 Pines	und	1	0.6	0.6	0.3	0.3
Bornera Verde De 2 Pines	und	7	0.6	4.2	2.1	2.1
Led color rojo	und	2	0.3	0.6	0.3	0.3
Bornera flotante	und	1	3	3	1.5	1.5
Conector Molex 4 Pin Chico	und	3	1	3	1.5	1.5
Total					1777.12	1934.62

En la tabla 56 se presentan los otros costos asociados a la implementación y operación de los sistemas de riego manual y automatizado, agrupados en costos de servicio, costos logísticos, materiales de campo y materiales agrícolas. El costo total fue de S/ 126.60 para el sistema manual y S/ 62.60 para el sistema automatizado, lo que representa una reducción aproximada del 51 %. Esta diferencia se

debe principalmente a los costos logísticos, ya que el sistema manual requirió 48 desplazamientos al área experimental (S/ 96.00), mientras que el sistema automatizado demandó únicamente 16 visitas (S/ 32.00), gracias al monitoreo y control remoto del sistema.

Asimismo, se consideraron los costos correspondientes a materiales de campo y materiales agrícolas, tales como fertilizantes, semilla, insumos biológicos y materiales de muestreo. Estos costos fueron equivalentes en ambos tratamientos debido a que las condiciones agronómicas, las labores de cultivo y los requerimientos de insumos se mantuvieron constantes durante el desarrollo de la investigación.

Tabla 56

Otros costos de ambos sistemas

Otros costos	Und	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	Riego Manual (S/.)	Riego automatizado (S/.)
Costo logístico					96	32
Movilidad	viaje	48	2	96	96	0
	viaje	16	2	32	0	32
Costos de materiales e insumos de campo					8.05	8.05
Cuadernos de campo	und	1	10	10	5	5
Bolsas de muestreo de suelo	und	3	0.1	0.3	0.15	0.15
Bolsa de muestreo de grano de quinua	und	28	0.1	2.8	1.4	1.4
Rafia	und	2	1	2	1	1
Botella descartable de 2L para muestreo de agua	und	1	1	1	0.5	0.5
Costos de materiales agrícolas					22.6	22.6
Molimax Papa Sierra(15N*-25P-15K+2MgO+3S), dosis de 5 sacos /ha	kg	3.4	2.5	8.5	4.25	4.25
Guano de isla (12N*-12P-2.5K), dosis de 2.5 tn/ha	kg	24	1.4	33.6	16.8	16.8
Semilla de quinua (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.)	g	144	0.01	1.4	0.7	0.7
Vitavax 300 de 200g	g	1.44	0.2	0.3	0.2	0.2
Biokaranya de 1 litro/cil 200 litros-ha	ml	9.6	0.1	0.6	0.3	0.3
Biozyme de 1/4 litro/cil/ha	ml	2.4	0.1	0.3	0.1	0.1

Otros costos	Und	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	Riego Manual (S/.)	Riego automatizado (S/.)
Biospore de 1 kg/ha	g	4.8	0.1	0.3	0.2	0.2
Sulfato de cobre de 1 kg/ ha	g	4.8	0.02	0.1	0.1	0.1
Total					206.6	142.6

En la tabla 57 se observa los costos de servicio que incluyeron la suscripción a Arduino Cloud, el servicio de internet, los análisis de laboratorio de suelo, agua y grano de quinua, así como el alquiler de equipos y herramientas de apoyo para la ejecución y seguimiento del experimento.

Tabla 57

Costos de servicio

Costo de servicio	Und	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total	Riego Manual (S/.)	Riego automatizado (S/.)
Arduino Cloud	mes	5	24.71	123.55	61.8	61.8
Internet mensual	mes	5	30	150	75	75
Laboratorio análisis suelo y agua	und	1	270	270	135	135
Alquiler de Multímetro	unid	1	50	50	25	25
Nivel de burbuja	unid	1	5	5	2.5	2.5
Taladro inalámbrico con brocas	unid	1	10	10	5	5
Laboratorio Análisis físico del grano de quinua	unid	1	40	40	20	20
Total					324.275	324.275

Costos de tarifa eléctrica del sistema del riego automático

Las tablas 58 a 62 presentan el consumo energético teórico del sistema automatizado bajo tarifa eléctrica convencional BT5, dado que en el estudio operó con energía solar fotovoltaica. La tabla 57 muestra que el controlador IoT consumió 20.4 W y 1.7 A en máxima demanda, reduciéndose a 15.6 W y 1.3 A sin activación de electroválvula, mientras que la electroválvula aportó 4.8 W y 0.4 A únicamente durante los eventos de riego. El mayor consumo se concentró en el controlador y sensores por su operación continua, mientras que la electroválvula contribuyó de forma puntual, evidenciando una demanda energética baja y compatible con el uso de energía fotovoltaica. El consumo se hizo de acuerdo al perfil de carga que se encuentra en la tabla 35.

Tabla 58

Consumo general de energía en los sistemas

Consumo general de energía a partir del perfil de carga		
Consumo de potencia del sistema de control	20.4	Watts
Consumo de corriente en máxima demanda	1.7	Amperios
Consumo de corriente sin la electroválvula activada	1.3	Amperios
Consumo potencia sin la electroválvula activada	15.6	Watts
Consumo de corriente de electroválvula durante tiempo de riego total	0.4	Amperios
Consumo de potencia de electroválvula durante tiempo de riego total	4.8	Watts

La tabla 59 muestra que el controlador IoT, incluyendo sensores y sin considerar la electroválvula, presentó un consumo de 0.0156 kW, equivalente a 0.3744 kW.h diarios en operación continua de 24 horas y 11.232 kW.h mensuales, evidenciando una demanda energética reducida y alta eficiencia del controlador, lo que refuerza la viabilidad del uso de energía solar fotovoltaica en zonas rurales con acceso limitado a electricidad convencional.

Tabla 59

Cálculo de consumo de energía del controlador IoT

Cálculo de consumo de energía del controlador IoT		
Consumo de la tarjeta de control incluido sensores sin la electroválvula	15.6	Watts
Convertimos a kW	0.0156	kW
Calculamos consumo de energía en un día (24 horas)	0.3744	kW.h
Calculamos consumo en un mes (30 días)	11.232	kW.h

La tabla 60 muestra que, bajo una tarifa eléctrica de 0.8606 PEN/kW.h, el costo mensual del controlador IoT en operación continua ascendería a S/ 9.67, evidenciando un gasto eléctrico bajo que no representaría una carga significativa dentro de la estructura de costos del sistema automatizado, incluso en un escenario de conexión a red eléctrica convencional. La misma tabla presenta el consumo de la electroválvula, cuyo aporte energético es puntual al activarse únicamente durante los eventos de riego.

Tabla 60

Cálculo de tarifa en un mes

Cálculo de tarifa en un mes		
El costo de cada kW de consumo varía según la zona y tipo de tarifa.		
para este cálculo tomamos el costo de 1 kW. según la tarifa BT5, 0.86 PEN por cada 1kW	0.8606	PEN
Tarifa a pagar por 30 días de consumo (11.232kW/h)	9.666259	PEN
Asumiendo que la tarjeta de control va a trabajar 24 horas al día, en un mes se deberá pagar:	9.666259	PEN

La tabla 61 muestra que la electroválvula permaneció activa 34.51 horas en total durante los 26 eventos de riego, con un consumo energético de 0.165648 kW.h, considerablemente menor al del controlador por su funcionamiento intermitente y limitado a los periodos de riego, y presenta el cálculo de la tarifa correspondiente a dicho consumo.

Tabla 61

Consumo de electroválvula

Consumo de electroválvula		
Según el registro la electroválvula permaneció activado durante	34.51	horas
Consumo de la electroválvula	4.8	Watts
Convertimos a kW	0.0048	kW
Calculamos consumo total de la electroválvula (durante los 26 riegos)	0.165648	kW.h

La tabla 62 muestra que el costo energético de la electroválvula fue de S/ 0.14 durante todo el periodo, y el costo combinado del sistema (controlador + electroválvula) alcanzó S/ 9.81 mensuales y S/ 51.66 para todo el experimento, valores que evidencian un bajo costo operativo. La implementación de energía fotovoltaica en el estudio permitió eliminar este costo por completo, incrementando la sostenibilidad del sistema y reduciendo su dependencia de fuentes externas de energía, lo que resulta especialmente relevante en contextos rurales con acceso limitado a electricidad.

Tabla 62*Cálculo de tarifa de la electroválvula*

Cálculo de tarifa de la electroválvula		
El costo de cada kW.h de consumo varía según la zona y tipo de tarifa.		
para este cálculo tomamos el costo de 1 kW.h según la tarifa BT5, 0.86 PEN por cada 1kW.h	0.8606	PEN
Tarifa a pagar por 30 días de consumo (0.165648kW.h)	0.142557	PEN
El costo de electricidad consumido por la electroválvula en todo el proyecto se debe pagar	0.142557	PEN
Total, a pagar por todo el sistema en un mes	9.808816	PEN
Total, a pagar por todo el sistema en todo el periodo de funcionamiento (20/08/2025 - 25/01/2026)	51.65976	PEN

Resumen de costos totales anuales

La tabla 63 muestra que el costo total del sistema manual fue de S/ 1,971.00 frente a S/ 1,402.00 del automatizado, con una reducción de 28.9 %. La principal diferencia se concentra en la mano de obra de riego, que pasó de S/ 471.00 a S/ 225.00, una disminución de 52 % al eliminar la intervención manual. El sistema automatizado presentó mayor costo de mantenimiento (S/ 89.00 vs S/ 63.00) por sus componentes electrónicos, mientras que los costos de servicios fueron iguales en ambos sistemas (S/ 324.00). Para la evaluación económica se consideraron dos campañas anuales, dado que el ciclo productivo de la quinua tiene una duración aproximada de 160 días.

Tabla 63*Resumen de costo total anual para ambos sistemas*

Concepto	Riego Manual (S/.)	Riego Automatizado (S/.)
Mano de obra para riego (horas y costo)	471	225
Energía utilizada (electricidad/solar)	0	0
Mantenimiento del sistema	63	89
Otros costos	127	63
Costos servicios	324	324
Campañas al año	2	2
Costo total anual (S/.)	1971	1402

La tabla 64 muestra los costos de inversión inicial entre el sistema de riego manual y el sistema de riego automatizado. Se observa que el sistema de riego manual presenta una inversión total de S/ 1777, mientras que el sistema automatizado alcanza una inversión de S/ 1935. Esto indica que el sistema automatizado requiere una mayor inversión inicial, con una diferencia de S/ 158 respecto al sistema manual, debido principalmente a la incorporación de equipos tecnológicos y componentes electrónicos necesarios para su funcionamiento automático.

Tabla 64

costos de inversión inicial

Concepto	Riego Manual (S/.)	Riego Automatizado (S/.)
Inversión inicial	1777	1935

Para el escalamiento de los costos desde la parcela experimental de 48 m² hasta una hectárea, no se empleó una extrapolación lineal directa basada únicamente en el área cultivada. En su lugar, se utilizaron factores de ajuste obtenidos a partir de las relaciones observadas entre los diferentes componentes de costo de los sistemas de riego manual y automatizado durante la fase experimental.

Esta metodología permite representar de manera más realista el comportamiento de los costos a escala productiva, considerando que algunos componentes, como la inversión inicial, el mantenimiento y los servicios, no crecen proporcionalmente con el área de cultivo.

Los factores de escalamiento fueron calculados a partir de las razones entre costos de mano de obra, costos de mantenimiento, inversión inicial y otros costos asociados a cada sistema. De esta manera, se preservan las proporciones económicas observadas experimentalmente y se evita sobreestimar o subestimar costos que presentan economías de escala. Los factores obtenidos se muestran en la tabla 65 y fueron utilizados como base para la estimación económica de una hectárea de cultivo de quinua bajo ambos sistemas de riego.

Tabla 65

Factores de escalamiento utilizados para la estimación de costos a una hectárea

Concepto	Descripción	Valor
Mano de obra	Costo mano de obra Riego automático/ Costo mano de obra Riego manual	0.48

Concepto	Descripción	Valor
Mantenimiento	Mantenimiento Riego automático/Mantenimiento Riego manual	1.41
Mantenimiento	Mant. Riego manual / Costo mano de obra Riego manual	0.13
Inversión inicial	Inversión Riego Manual / Costo mano de obra Riego manual	3.77
Inversión inicial	Inversión Riego Automático/ Inversión Riego Manual	1.09
Otros costos (Riego manual)	Otros costos (Riego manual) / Costo mano de obra Riego manual	0.27
Otros costos (Riego automático)	Otros costos (Riego automático) / Costo mano de obra Riego automático	0.28

Nota: Para efectos del escalamiento, el costo de mano de obra corresponde únicamente a los costos directos asociados a la operación, principalmente mano de obra. Los costos de mantenimiento, inversión inicial, servicios y otros costos fueron estimados mediante factores de escalamiento independientes.

Escalamiento de costos a una hectárea

Una vez definidos los factores de escalamiento, se procedió a estimar los costos para una hectárea de cultivo de quinua bajo los sistemas de riego manual y automatizado.

La metodología empleada consideró que el escalamiento de costos no sigue una relación lineal con el área cultivada, debido a que componentes como la inversión inicial, el mantenimiento, los servicios y otros costos operativos presentan comportamientos distintos al incremento de superficie. Por ello, se aplicaron los factores de escalamiento obtenidos a partir de los resultados experimentales y de información técnica de referencia.

Para la estimación de los costos de mano de obra se tomó como referencia el costo de producción de quinua reportado por AGROIDEAS (2020), equivalente a aproximadamente S/ 5,997 por hectárea y por campaña. Considerando que dicho valor incluye el uso de maquinaria agrícola, se adoptó un criterio conservador para representar condiciones de operación predominantemente manuales, obteniéndose un costo de referencia de S/ 11,994 por hectárea y por año. A partir de este valor y aplicando la reducción del 52 % en la intervención de mano de obra observada experimentalmente, se estimó el costo correspondiente al sistema de riego automatizado.

Asimismo, los costos de mantenimiento, inversión inicial y otros costos fueron calculados utilizando los factores de escalamiento definidos previamente, mientras que los costos de servicio se mantuvieron constantes debido a que corresponden principalmente al uso de software y plataformas de monitoreo cuyo costo no depende directamente del área cultivada. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 66.

Tabla 66

Escalamiento de costos para una hectárea de cultivo de quinua mediante la aplicación de factores de escalamiento.

Concepto	Riego Manual (S/.)	Riego Automatizado (S/.)	Observaciones
Costos de mano de obra (horas y costo)	11,994	5,725	Valor estimado utilizando como referencia costos de producción de quinua reportados por AGROIDEAS (2020) y aplicando la reducción experimental de mano de obra observada en el sistema automatizado.
Energía utilizada (electricidad/solar)	0	0	Se considera el uso de energía solar para ambos sistemas.
Mantenimiento del sistema	1,603	2,264	Estimado mediante la aplicación de factores de escalamiento
Costos de instalación inicial	45,216	49,223	Estimado mediante la aplicación de factores de escalamiento.
Otros costos	3,221	1,593	Estimado mediante la aplicación de factores de escalamiento.
Costos de servicio (software)	324	324	Corresponde a servicios independientes del área cultivada.
Costo por campaña	17,143	9,907	-
Campañas por año	2	2	-
Costo Total (S/.)	34285	19813	-

Es importante precisar que los factores de escalamiento asociados al costo de mano de obra fueron calculados considerando únicamente los costos directos de operación, principalmente la mano de obra requerida. Los costos de mantenimiento, inversión inicial, servicios y otros costos fueron tratados de manera independiente mediante factores específicos de escalamiento, debido a que presentan comportamientos distintos respecto al incremento del área cultivada.

Parámetros financieros base

En la tabla 67 se presentan los parámetros financieros utilizados para la evaluación económica de los sistemas de riego manual y automatizado a una escala de una hectárea de cultivo de quinua. Los resultados muestran que el sistema automatizado alcanzó un mayor rendimiento de grano de quinua, con 5,670.83 kg/ha frente a 5,412.50 kg/ha obtenidos mediante el sistema manual. Considerando un precio de mercado de S/ 7.50 por kilogramo y dos campañas agrícolas por año, el ingreso anual estimado fue de S/ 85,062 para el sistema automatizado y S/ 81,188 para el sistema manual.

Asimismo, se nos da una diferencia en los costos totales anuales, los cuales ascendieron a S/ 34,285 para el sistema manual y a S/ 19,813 para el sistema automatizado, representando una reducción aproximada del 42.2%. Esta disminución se atribuye principalmente a la menor demanda de mano de obra y a la optimización de las actividades de operación logradas mediante la automatización del riego. Como consecuencia, el flujo neto anual del sistema automatizado alcanzó S/ 65,249, superando en un 39.1% al flujo neto anual del sistema manual, estimado en S/ 46,902.

Por otro lado, la inversión inicial requerida para implementar el sistema automatizado fue de S/ 49,223, ligeramente superior a la del sistema manual, estimada en S/ 45,216. Finalmente, ambos sistemas fueron evaluados utilizando una tasa de descuento del 10% según el Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP) y un horizonte de evaluación de cinco años, parámetros comúnmente empleados en estudios de viabilidad económica para proyectos agrícolas.

Tabla 67

Resumen de ingresos, costos y flujo neto anual por sistema de riego

Parámetros	Sistema de riego manual	Sistema de riego automatizado
Rendimiento de grano de quinua (kg/ha)	5412.50	5670.83
Campañas al año	2.00	2.00
Precio de quinua en el mercado (S./kg)	7.5	7.5
Ingreso anual (S/.) = Rend. × Precio	81188	85062
Costo total anual (S/.)	34285	19813
Flujo neto anual (S/.) = Ingreso – Costo	46902	65249
Inversión inicial (S/.)	45216	49223
Tasa de descuento	10%	10%
Horizonte de evaluación (años)	5	5

En la tabla 68 se presenta el flujo de caja proyectado para los sistemas de riego manual y automatizado durante el horizonte de evaluación de cinco años. En el año 0 se registró la inversión inicial requerida para la implementación de cada sistema, correspondiente a un egreso de S/ 45,216 para el sistema de riego manual y de S/ 49,223 para el sistema de riego automatizado.

A partir del primer año de operación y hasta el quinto año, ambos sistemas generaron flujos netos anuales constantes, estimados en S/ 46,902 para el sistema manual y S/ 65,249 para el sistema automatizado. Estos valores corresponden a la diferencia entre los ingresos anuales obtenidos por la producción de quinua y los costos operativos anuales asociados a cada alternativa de riego. El mayor flujo neto del sistema automatizado se explica por la combinación de un mayor rendimiento del grano de quinua y una reducción significativa de los costos operativos, principalmente aquellos relacionados con la mano de obra para riego.

La constancia de los flujos netos a lo largo del período de evaluación responde al supuesto de condiciones productivas estables, manteniendo constantes el rendimiento del cultivo, el precio de venta de la quinua y los costos operativos durante los cinco años analizados. Estos flujos de caja constituyen la base para la determinación de los indicadores financieros, tales como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), empleando una tasa de descuento del 10 %.

Tabla 68

Tabla de flujo de caja económico

Flujo de caja	Sistema de	Sistema de
Año	riego	riego
	manual	automatizado
0	-45216	-49223
1	46902	65249
2	46902	65249
3	46902	65249
4	46902	65249
5	46902	65249

Desarrollo del VAN para ambos sistemas

El Valor Actual Neto (VAN) se determinó descontando los flujos netos anuales proyectados mediante una tasa de descuento del 10% y restando la inversión inicial correspondiente a cada alternativa de riego. Este indicador permite determinar el valor generado por el proyecto durante el horizonte de evaluación, expresado en términos monetarios actuales.

Para el sistema de riego manual se consideró una inversión inicial de S/ 45,216 y flujos netos anuales de S/ 46,902 durante cinco años. Aplicando el descuento financiero correspondiente se obtuvo un VAN de S/ 132,580.

Para el sistema de riego automatizado se consideró una inversión inicial de S/ 49,223 y flujos netos anuales de S/ 65,249 durante cinco años. Como resultado se obtuvo un VAN de S/ 198,123.

En ambos casos el VAN resultó positivo, lo que indica que los beneficios generados por los proyectos superan la inversión realizada y el costo de oportunidad representado por la tasa de descuento del 10%, demostrando la viabilidad económica de ambas alternativas.

Para el sistema de riego manual

$$\text{VAN} = -45,216 + 46,902/(1.10)^1 + 46,902/(1.10)^2 + 46,902/(1.10)^3 + 46,902/(1.10)^4 + 46,902/(1.10)^5$$

$$\text{VAN manual} = \text{S/ } 132,580$$

Para el sistema de riego automático

$$\text{VAN} = -49,223 + 65,249/(1.10)^1 + 65,249/(1.10)^2 + 65,249/(1.10)^3 + 65,249/(1.10)^4 + 65,249/(1.10)^5$$

$$\text{VAN Automatizado} = \text{S/ } 198,123$$

Desarrollo del TIR para ambos sistemas

La Tasa Interna de Retorno (TIR) se calculó a partir de los flujos de caja proyectados para cada sistema, determinando la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto sea igual a cero. Este indicador permite evaluar la rentabilidad relativa de cada alternativa de inversión.

Para el sistema de riego manual, considerando una inversión inicial de S/ 45,216 y flujos netos anuales de S/ 46,902, se obtuvo una TIR de 101%. Por su parte, para el sistema de riego automatizado, con una inversión inicial de S/ 49,223 y flujos netos anuales de S/ 65,249, se obtuvo una TIR de 131%.

Ambas tasas son considerablemente superiores a la tasa de descuento utilizada en la evaluación (10%), lo que confirma que tanto el sistema de riego manual como el automatizado constituyen alternativas económicamente rentables. Sin embargo, el sistema automatizado presenta una rentabilidad superior, reflejada en una mayor TIR y

una mayor capacidad de generación de beneficios económicos a lo largo del horizonte de evaluación.

Para el sistema de riego manual

$$0 = -45,216 + 46,902/(1+TIR)^1 + 46,902/(1+TIR)^2 + 46,902/(1+TIR)^3 + 46,902/(1+TIR)^4 + 46,902/(1+TIR)^5$$

$$TIR \text{ Manual} = 101\%$$

Para el sistema de riego automático

$$0 = -49,223 + 65,249/(1+TIR)^1 + 65,249/(1+TIR)^2 + 65,249/(1+TIR)^3 + 65,249/(1+TIR)^4 + 65,249/(1+TIR)^5$$

$$TIR \text{ Automatizado} = 131\%$$

Resultado del análisis económico y viabilidad financiera

La tabla 69 presenta los indicadores financieros obtenidos para ambos sistemas de riego evaluados, considerando una tasa de descuento del 10% y un horizonte de evaluación de cinco años.

Tabla 69

Tabla de resultado del análisis financiero (VAN y TIR)

Indicador	Riego Manual	Riego Automatizado
VAN (S/.)	132580	198123
TIR (%)	101%	131%

La tabla 70 presenta los indicadores financieros obtenidos para ambos sistemas de riego. El sistema de riego manual alcanzó un VAN de S/ 132,580 y una TIR de 101%, mientras que el sistema de riego automatizado obtuvo un VAN de S/ 198,123 y una TIR de 131%. En cuanto a los costos operativos, el sistema automatizado presenta un costo total anual de S/ 19,813, lo que representa una reducción de S/ 14,472 (-42.22%) respecto al sistema manual (S/ 34,285), explicada principalmente por la menor demanda de mano de obra para la aplicación del agua. Respecto a la inversión inicial, el sistema automatizado requiere S/ 49,223 frente a S/ 45,216 del sistema manual, con una diferencia de S/ 4,007 (+8.86%), la cual resulta marginal considerando los beneficios económicos generados durante el horizonte de evaluación.

Los resultados evidencian que ambas alternativas son económicamente viables, dado que presentan VAN positivos y TIR superiores a la tasa de descuento del 10%. No obstante, el sistema automatizado muestra un mejor desempeño financiero, generando un VAN superior en S/ 65,543 (+49.44%) respecto al sistema manual, con una TIR de 131% frente al 101% del manual, diferencia de 29.52 puntos porcentuales que confirma su mayor eficiencia financiera y recuperación más acelerada de la inversión. Este resultado se explica principalmente por la combinación de un mayor rendimiento del cultivo y una reducción considerable de los costos operativos anuales.

Por lo tanto, desde el punto de vista financiero, el sistema de riego automatizado constituye la alternativa más atractiva para el cultivo de quinua a escala de una hectárea, ya que permite maximizar los beneficios económicos durante el horizonte de evaluación, además de reducir la dependencia de mano de obra y mejorar la eficiencia en la gestión del recurso hídrico.

Tabla 70

Indicadores de Rentabilidad y Viabilidad Financiera Comparada

Indicador Financiero	Riego Manual	Riego Auto.	Variación Absoluta	Variación Porcentual
Costo Total Anual (S/.)	34,285	19,813	-14,472.18	-42.22%
Inversión Inicial (S/.)	45,216	49,223	+4,007.33	+8.86%
Valor Actual Neto (VAN) (S/.)	132,580	198,123	+65,543.00	+49.44%
Tasa Interna de Retorno (TIR)	101%	131%	+29.52%	--

3.4. Discusión de resultados

3.4.1. Rendimiento de grano de quinua bajo riego manual y automatizado

El incremento del 4.77 % en el rendimiento de grano de quinua a favor del sistema automatizado (5,670.83 kg/ha frente a 5,412.50 kg/ha) coincide con lo reportado por Bustamante y Chugá (2022), quienes señalaron que la implementación de sistemas de riego inteligente basados en IoT incrementa la productividad agrícola en comparación con sistemas tradicionales, atribuible a una mayor precisión en la aplicación del agua que permite satisfacer de manera más eficiente los requerimientos hídricos del cultivo durante sus diferentes etapas fenológicas. En la misma línea, Loaiza et al. (2015)

indicaron que la automatización del riego optimiza la distribución del agua y mejora la oportunidad de aplicación, reduciendo la intervención manual y favoreciendo el desarrollo del cultivo, planteamiento que respalda los resultados obtenidos, ya que el sistema automatizado permitió una programación más precisa de los riegos, evitando situaciones de déficit o exceso hídrico. Desde el punto de vista morfológico, la longitud de panoja presentó diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos ($F = 4.6640$; $p = 0.0445$), confirmada mediante la prueba de Tukey HSD, lo que indica que el suministro controlado de agua favoreció el desarrollo reproductivo de la quinua variedad Salcedo INIA.

Cabe destacar que ambos rendimientos obtenidos superan lo reportado por Porras (2015), quien encontró rendimientos de grano de quinua de unos 3,519.3 kg/ha en riego por exudación y 1,587.9 kg/ha en riego por goteo convencional en quinua variedad INIA 431-Altiplano, lo que sugiere que la implementación del riego por goteo con control automático en las condiciones de Canaán, Ayacucho, permite alcanzar niveles productivos superiores a los sistemas de riego localizado sin automatización. Asimismo, los rendimientos de ambos tratamientos superan el valor reportado por Quispe (2024), quien en el mismo Centro Experimental Canaán registró un rendimiento máximo de 4,028.96 kg/ha con una densidad de 125,000 plantas/ha bajo condiciones de riego convencional, lo que indica que la tecnificación hídrica mediante riego por goteo, independientemente del tipo de control, contribuye a incrementar la productividad del cultivo de quinua respecto a sistemas de manejo tradicional sin tecnificación hídrica. Estos hallazgos constituyen evidencia favorable a la hipótesis planteada en la presente investigación.

3.4.2. Eficiencia en el uso del agua en sistemas de riego

La mayor eficiencia en el uso del agua del sistema automatizado ($EUA = 1.21 \text{ kg/m}^3$) en comparación con el sistema manual ($EUA = 0.88 \text{ kg/m}^3$), representando una mejora del 37.5 %, se explica por un menor volumen aplicado de 22,452 m³ en la parcela experimental (4,677.5 m³/ha), un 24.2 % menos que el sistema manual con 29,637 m³ (6,174.4 m³/ha), logrando al mismo tiempo un mayor rendimiento (5,670.83 kg/ha frente a 5,412.50 kg/ha). Este comportamiento indicó que la automatización permitió una gestión más precisa del riego, ajustándose a las necesidades hídricas reales del cultivo y reduciendo pérdidas innecesarias de agua. Estos resultados coinciden con lo reportado por Bustamante y Chugá (2022), quienes señalaron que los sistemas de riego automatizados basados en tecnologías IoT optimizan el uso del agua mediante un mejor control de la frecuencia y duración del riego, logrando incrementos de hasta 54 % en

productividad y eficiencia. De manera similar, Acero (2021) encontró que la automatización permitió reducir el consumo de agua en un 21.25 % en comparación con sistemas manuales, tendencia confirmada en la presente investigación con una reducción del 24.2 % en el volumen aplicado.

Asimismo, Loaiza et al. (2015) indicaron que la automatización contribuye a disminuir las pérdidas de agua por evaporación y por aplicaciones excesivas debido al control más preciso del sistema, planteamiento que coincide con los resultados obtenidos, ya que el riego automatizado realizó 26 eventos de riego frente a 22 del sistema manual, aplicando un menor volumen total de agua en la parcela experimental (22,452 m³ frente a 29,637 m³), pero con mayor precisión y oportunidad. En la misma línea, Días et al. (2024) destacaron que el uso de tecnologías IoT facilita el monitoreo en tiempo real y mejora la eficiencia hídrica del cultivo, aspecto que se evidenció en el presente estudio mediante el monitoreo continuo de la humedad del suelo, el caudal y la temperatura, lo que permitió activar el riego únicamente cuando el cultivo lo requería. Por otro lado, Porras (2015) reportó eficiencias en el uso del agua de 2.2 kg/m³ en exudación y 0.9 kg/m³ en goteo para la quinua variedad INIA 431-Altiplano; los valores obtenidos en la presente investigación (1.21 kg/m³ para riego automatizado y 0.88 kg/m³ para riego manual) confirman que la eficiencia del riego por goteo puede incrementarse mediante la incorporación de sistemas de control automático, superando ligeramente los valores reportados para el goteo convencional. Lo anterior constituye evidencia adicional que apoya la hipótesis de superioridad del sistema automatizado frente al sistema manual.

3.4.3. Análisis financiero de VAN y TIR de los sistemas de riego en el cultivo de quinua

El VAN positivo de ambos sistemas (S/ 198,123 para el automatizado y S/ 132,580 para el manual) indica que ambas alternativas generan beneficios económicos superiores a la inversión realizada, considerando una tasa de descuento del 10 % y un horizonte de evaluación de cinco años. La diferencia de S/ 65,543 en el VAN a favor del sistema automatizado se explica principalmente por la reducción de los costos de mano de obra (S/ 5,725 frente a S/ 11,994) y los mayores flujos netos anuales generados (S/ 65,249 frente a S/ 46,902). Este comportamiento coincide con lo reportado por Zeña (2022), quien, al comparar técnica y económicamente sistemas fotovoltaico y eólico para riego tecnificado en el distrito de Zaña, determinó que el sistema fotovoltaico presenta un VAN positivo y una TIR superior al 10 %, confirmando que las inversiones en

tecnologías de riego eficiente generan beneficios económicos superiores a la inversión realizada cuando se evalúan en horizontes de mediano plazo.

En cuanto a la Tasa Interna de Retorno, el sistema automatizado obtuvo una TIR de 131 %, superior a la del sistema manual con 101 %, ambas considerablemente por encima de la tasa de descuento del 10 %, lo que confirma la viabilidad económica de ambas alternativas de inversión. Sin embargo, la mayor TIR del sistema automatizado refleja que, pese a su mayor inversión inicial (S/ 49,223 frente a S/ 45,216), los mayores flujos netos anuales generados (S/ 65,249 frente a S/ 46,902) compensan ampliamente dicha inversión. En este sentido, Campos (2018) obtuvo resultados similares al implementar un sistema de riego por goteo con energía solar fotovoltaica en el Fundo Huertas, distrito de Sayán, donde el sistema optimizó el riego, redujo el consumo de combustible y mejoró la eficiencia energética, incrementando el rendimiento del cultivo. Ello evidencia que, cuando la tecnología seleccionada reduce la dependencia de insumos costosos y optimiza el uso del recurso hídrico, los flujos netos anuales se incrementan y la TIR supera con amplitud la tasa de descuento, confirmando la rentabilidad de la inversión a lo largo del horizonte de evaluación de cinco años. Estos resultados refuerzan la hipótesis planteada, demostrando que el sistema automatizado constituye una alternativa superior al sistema manual desde una perspectiva económica y financiera.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- 1-** El sistema de riego por goteo automatizado alcanzó un rendimiento promedio de grano de quinua de 5,670.83 kg/ha, superior al obtenido con el sistema manual (5,412.50 kg/ha), registrando un incremento de 258.33 kg/ha equivalente al 4.77 %. Asimismo, la longitud de panoja presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($F = 4.6640$; $p = 0.0445$), evidenciando que el suministro controlado de agua favoreció el desarrollo reproductivo del cultivo.
- 2-** El sistema de riego automatizado presentó una eficiencia en el uso del agua de 1.21 kg/m³, superior a la obtenida con el sistema manual (0.88 kg/m³), representando una mejora de 37.5 %. Además, logró un mayor rendimiento utilizando un menor volumen de agua aplicada (4,677.5 m³/ha frente a 6,174.4 m³/ha), demostrando una utilización más eficiente del recurso hídrico.
- 3-** El sistema de riego automatizado obtuvo un VAN de S/ 198,123 y una TIR de 131 %, valores superiores a los registrados por el sistema manual (VAN de S/ 132,580 y TIR de 101 %). Los mayores flujos netos generados, la reducción de los costos de mano de obra y la ausencia de costos energéticos permitieron compensar la mayor inversión inicial, evidenciando una mayor rentabilidad económica del sistema automatizado.
- 4-** El sistema de riego por goteo automatizado mediante energía fotovoltaica superó al sistema manual en rendimiento de grano, eficiencia en el uso del agua y rentabilidad económica. El incremento de 4.77 % en la producción, la mejora de 37.5 % en la eficiencia hídrica y los mayores indicadores financieros (VAN y TIR) confirmaron su

superior desempeño bajo las condiciones evaluadas en el Centro Experimental Canaán, Ayacucho.

4.2. Recomendaciones

- 1- Implementar el sistema de riego por goteo automatizado en el cultivo de quinua variedad Salcedo INIA en zonas con condiciones agroecológicas similares a las del Centro Experimental Canaán, Ayacucho, debido a su efecto favorable sobre el rendimiento de grano. Asimismo, complementar su uso con un adecuado manejo agronómico que incluya fertilización balanceada, control fitosanitario y densidad de siembra apropiada para maximizar su desempeño productivo.
- 2- Incorporar sensores de humedad del suelo y sistemas de monitoreo en tiempo real en los programas de riego automatizado, con el fin de optimizar la aplicación del agua y mejorar la eficiencia hídrica del cultivo. Además, promover la capacitación de los productores en la operación y mantenimiento de estas tecnologías para garantizar su funcionamiento adecuado y sostenibilidad.
- 3- Evaluar el sistema de riego automatizado con energía fotovoltaica a escala comercial, considerando superficies mayores de cultivo, con el propósito de validar los indicadores económicos obtenidos y determinar con mayor precisión los costos reales de instalación, operación y mantenimiento. Asimismo, promover mecanismos de financiamiento que faciliten su adopción por parte de pequeños y medianos productores.
- 4- Desarrollar investigaciones complementarias en diferentes campañas agrícolas, variedades de quinua y condiciones agroecológicas de la región Ayacucho, con la finalidad de validar la consistencia de los resultados obtenidos y ampliar la aplicabilidad del sistema de riego automatizado. Además, evaluar aspectos relacionados con la uniformidad de riego, la presión de operación y el desempeño del sistema fotovoltaico en condiciones de mayor escala.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero, C. (2021). "Implementación de un sistema de Internet de las Cosas para optimizar la gestión del agua en la agricultura de la región Tacna. *Lamchipa, Enrique*.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (1998). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (1st ed.). FAO.
- Acosta, M., y John, G. (2020). *Implementación de un prototipo para automatización de riegos*.
- Bedoya, M., y Ángeles, V. (2017). Comparación de métodos para estimar pérdidas localizadas en riego por goteo. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(4), 117–125.
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-07>
- Berón, M., Montejano, G., y Albornoz, M. (2017). *Interfaz gráfica de usuario: el usuario como protagonista del diseño* (SEDECI, Ed.).
- Blair, E. (2017). *Riego por goteo: Teoría y práctica* (Biblioteca Venezuela).
- Bustamente, D., y Chugá, M. (2022). *Diseño e implementación de un sistema de riego inteligente y monitoreo de variables edafológicas y meteorológicas activado por IOT*.
- Castaño, S. (2023). *Medición de Caudal con sensor YF-S201*. SAICAC MECATRÓNICA.
- Campos, P. (2018). Proyecto de riego por goteo utilizando energía solar para cultivo de flores para exportación en el Fundo Huertas, distrito de Sayán, provincia de Huaura, departamento de Lima [Universidad Pedro Ruiz Gallo].
<https://hdl.handle.net/20.500.12893/2606>
- Ccoyllar, Kevin, Zarabia, A., y Lozano, A. (2021). *Vulnerabilidad de la quinua (Chenopodium quinoa Willd.) a eventos de estrés ambiental en las regiones altas de los Andes peruanos* [Universidad Continental].
<https://doi.org/https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.063>
- Días, J., Salcedo, D., Mercado, T., Quiñonez, Y., & Mejía, A. (2024). *Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual y su aplicación mediante un prototipo*.
- Díaz, E., Palacio, J., Páez, J., y Simanca, F. (2023). *La agricultura de precisión y herramientas TIC de apoyo* (Ediciones UCC).
- Estuiez, B. (2025). Sensor analógico de humedad del suelo, dispositivo con salida RS485. *Slíctetex Electronics*.

- Férrandez, E., y Ordoñez, J. (2021). *Desarrollo de una arquitectura Cloud Computing para comunicar dos estaciones del sistema de producción modular utilizando el protocolo MQTT*. Universidad Politécnica Salesiana.
- García, J., Huahuachampi, J., y Soto, L. (2017). Determinación de la demanda hídrica del cultivo de quinua QML01 (*Chenopodium Quinoa Willd*) en la Molina. *ALICIA*, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.21704/ac.v78i2.1057>
- Gómez, L., y Aguilar, E. (2016). *Guía de cultivo de la quinua* (Universidad Nacional Agraria La Molina, Ed.; FAO).
- Heble, S., Kumar, A., Prasad, K. V. V. D., Samirana, S., Rajalakshmi, P., & Desai, U. B. (2018). Una red IoT de bajo consumo para la agricultura inteligente. *4.º Foro Mundial IEEE Sobre Internet de Las Cosas (WF-IoT), 2018*, 609–614. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2018.8355152>
- Huanca, V. (2024). *Implementación de un sistema inalámbrico utilizando el Internet de las cosas para el monitoreo del cultivo de papas en el Fundo Huaylacucho en el Departamento de Ayacucho*.
- INIA. (2013). *Quinua Salcedo INIA* (INIA).
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Howitt, R. E., Janssen, S., Keating, B. A., Munoz-Carpena, R., Porter, C. H., Rosenzweig, C., y Wheeler, T. R. (2017). Hacia una nueva generación de datos, modelos y productos de conocimiento de sistemas agrícolas. *Sistemas Agrícolas*, 155, 269–288. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.021>
- Keller, J., y Karmeli, D. (1974). Parámetros de diseño de riego por goteo. *Transacciones de La Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas*, 1–7. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNAAA949.pdf
- Lazo, P., y Coronel, J. (2022). *Diseño e implementación de un sistema de Adquisición y gestión remota de información de equipos impresores industriales mediante el uso de la red celular*.
- Loaiza, R., Espinosa, L., y Jiménez, A. (2015). Automatización de sistemas de riego. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1–10. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/530>
- Lozano, R. (2020). *Medir temperatura y humedad DHT21 ASAIR*. Taloelectronics.

- Maier, A., Agudo, A., y Vagapov, Y. (2017). *Análisis comparativo e implementación práctica del módulo de microcontrolador ESP32 para el Internet de las Cosas*. 143–148. <https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926>
- Mateu, W. (2023). *Tuberosas y granos andinos*.
- Méndez, J., y Cuervo, R. (2013). *Energía solar fotovoltaica* (Fundación Cofemetal).
- Mora, S. (2015). Entiendo de Internet de las cosas. *Investiga TEC*.
- Morales, R., Ruiz, G., y Lopez, S. (2021). Impacto de automatización de riego: Caso de estudio. *SciELO*, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.13053/cys-24-2-3412>
- Mujica, A., Jacobsen, S., Izquierdo, J., & Pierre, J. (2001). *Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.): Ancestral cultivo andino, alimento del presente y el futuro*.
- Porras, Z. (2015). *Evaluación del sistema de riego por goteo y exudación en el cultivo de quinoa (Chenopodium quinoa Willd) en el INIA - La Molina*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Quispe, J. (2024). *Densidad de plantas en el rendimiento de tres variedades de Chenopodium quinoa Willd. Canaán 2750 msnm - Ayacucho, 2021*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- Rajendrakumar, S., Parvati, V. K., y Rajashekarappa. (2018). Un Sistema de Riego Eficiente para la Agricultura. *Conferencia Internacional 2018 Sobre Comunicación, Computación e Internet de Las Cosas (IC3IoT)*, 132–136. <https://doi.org/10.1109/IC3IoT.2018.8668206>
- Sushanth, G., y Sujatha, S. (2018). Sistema de Agricultura Inteligente Basado en IoT. *Conferencia Internacional 2018 Sobre Comunicaciones Inalámbricas, Procesamiento de Señales y Redes (WiSPNET)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2018.8538702>
- Tineo, A., Cabrera, C., y Fernández, S. (2021). Niveles y granulometría de diatomita en el rendimiento de tomate, en secano. Ayacucho, 2020. *Investigación*, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.51440/unsch.revistainvestigacion.29.1.2021.285>
- Valverde, A., Vargas, G., García, M., y Días, J. (2022). Impacto de la implementación del sistema de riego con energía solar en cultivos de limón. *SciELO*, 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.22335/rict.v14i2.1571>
- Zeña, B. (2022). *Análisis tecno económico comparativo entre una minicentral fotovoltaica y eólica para abastecimiento de un sistema de riego tecnificado* [Universidad Señor de Sipán]. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/10148>

ANEXOS

Anexos A

PANEL FOTOGRAFICO

Fotografía 1

Preparación de terreno en el área experimental



Fotografía 2

Instalación eléctrica e hidráulica en el área experimental



Fotografía 3

Calibración del sensor de humedad



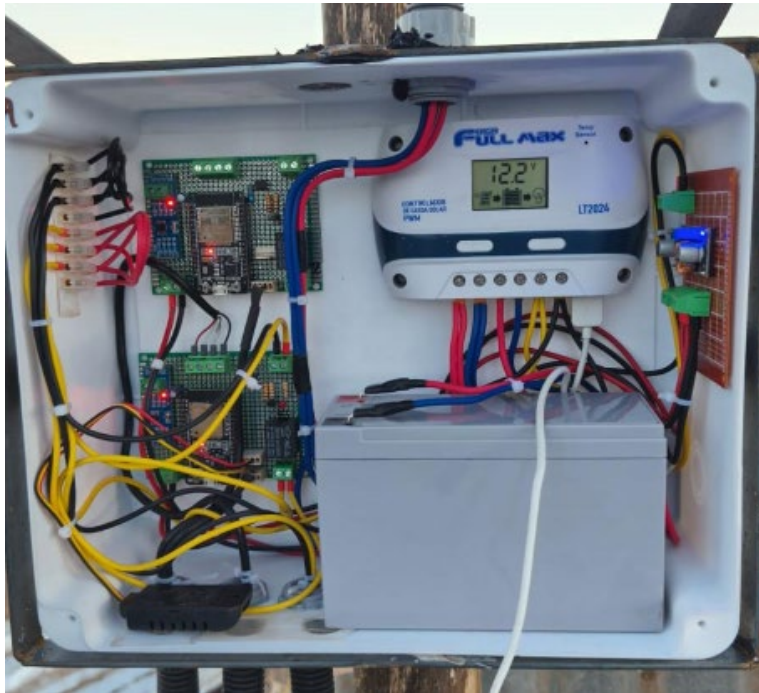
Fotografía 4

Implementación del sistema de riego manual y automático



Fotografía 5

Instalación eléctrica de la caja de control



Fotografía 6

Monitoreo eléctrico de los equipos



Fotografía 7

Crecimiento vegetativo del cultivo de quinua en ambas parcelas experimentales



Fotografía 8

Aporque respectivo del cultivo de quinua de variedad Salcedo INIA



Fotografía 9

Aporque respectivo del cultivo de quinua de variedad Salcedo INIA



Fotografía 10

Evaluación fitosanitaria del cultivo



Fotografía 11

Evaluación del crecimiento fenológico del cultivo



Fotografía 12

Evaluación del tamaño de la planta, diámetro de panoja y altura de panoja de las muestras individuales de la planta



Fotografía 13

Verificación y recomendación del asesor



Fotografía 14

Cosecha de quinua



Fotografía 15

Traslado de las muestras de cada surco para su respectivo trillado



Fotografía 16

Pesado de grano húmedo



Fotografía 17

Colocación de muestras a la estufa



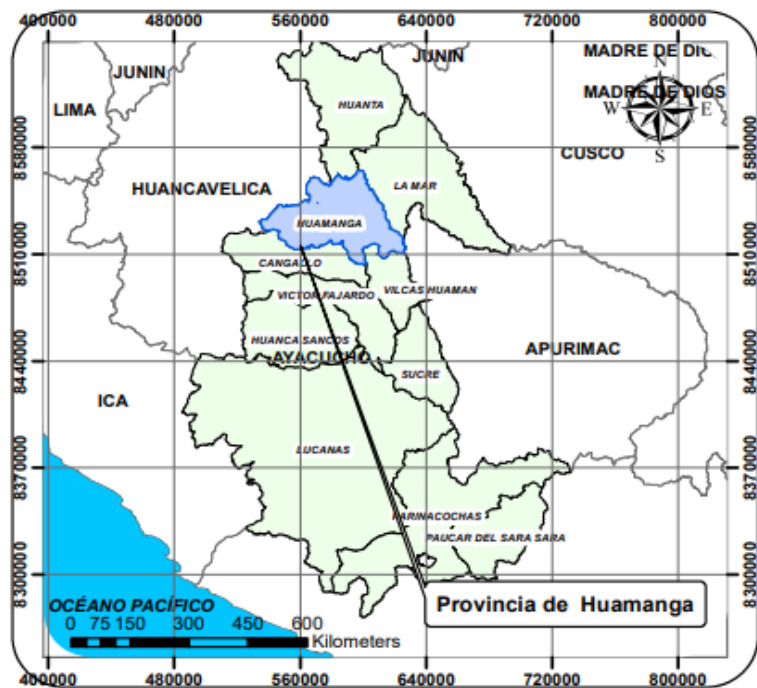
Anexos B

PLANO DE UBICACIÓN Y LOCALIZACIÓN

MAPA DEPARTAMENTAL



MAPA PROVINCIAL



MAPA DEL PROYECTO



MAPA DISTRITAL



LEYENDA

- DISTRITOS
- DISTRITO A.A.C.D.
- OCEANO
- PROVINCIAS
- DEPARTAMENTOS

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA	
PLANO	UBICACIÓN Y LOCALIZACIÓN	
PROYECTO	ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RIEGO POR GOTEO MANUAL Y AUTOMATIZADO EN EL CULTIVO DE QUINUA (<i>CHENOPodium QUINOA</i> WILLD.) EN CANNÁN, AYACUCHO - 2025	
ESTUDIANTE	RIVERA HUAMANCUSI LUIS ALBERTO	
UBICACIÓN DEPARTAMENTO : AYACUCHO PROVINCIA : HUAMANGA DISTRITO : ANDRÉS AVELINO .C.D	SISTEMA DE COORDENADAS PROYECCIÓN : UTM ZONA : 18 SUR COORDENADAS : UTM 84 ESCALA : 1:250,000	LAMINA P-01

Anexos C

CALIBRACIÓN DE

SENSORES DE

HUMEDAD Y FLUJO DE

AGUA

A) CALIBRACIÓN DE SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO

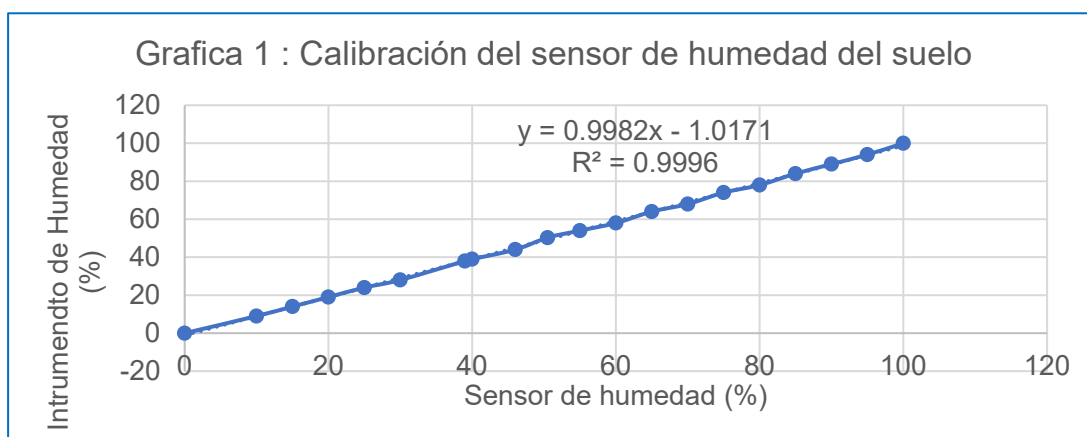
La tabla 71 muestra el proceso de calibración de un sensor de humedad del suelo, comparando sus lecturas frente a un instrumento patrón (referencia).

Tabla 71

Calibración del sensor de humedad del suelo

Sensor (%)	Patrón (%)
0	0
10	9
15	14
20	19
25	24
30	28
39	38
40	39
46	44
50.5	50.3
55	54
60	58
65	64
70	68
75	74
80	78
85	84
90	89
95	94
100	100

En la gráfica 1 el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9996$) evidenció una alta correlación entre las lecturas del sensor y el instrumento patrón, indicando una elevada precisión y confiabilidad para el monitoreo de la humedad del suelo.



B) CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE FLUJO DE AGUA

La tabla 72 muestra el proceso de calibración de un sensor de flujo de agua, comparando sus lecturas frente a un instrumento patrón (referencia) y se tomó esta ecuación de compensación.

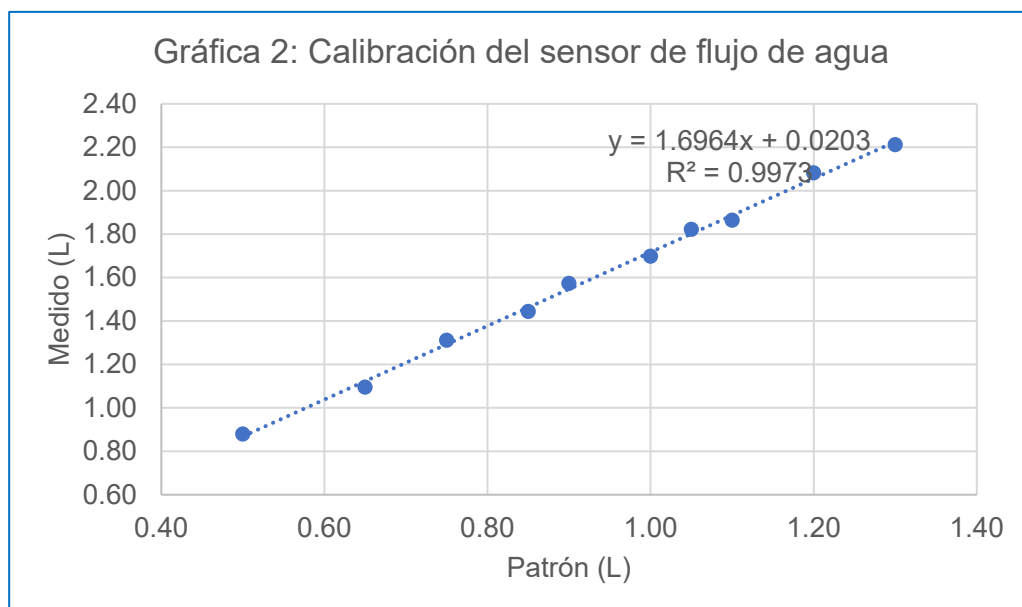
$$\text{Corrección} = \text{Medido} - (\text{Medido} \times 0.42045)$$

Tabla 72

Calibración del sensor de flujo de agua

Ítem	Patrón (L)	Medido (L)	Diferencia (L)	Corrección (L)
1	0.50	0.88	0.38	0.51
2	0.65	1.10	0.45	0.63
3	0.75	1.31	0.56	0.76
4	0.85	1.44	0.59	0.84
5	0.90	1.57	0.67	0.91
6	1.00	1.70	0.70	0.98
7	1.05	1.82	0.77	1.06
8	1.10	1.86	0.76	1.08
9	1.20	2.08	0.88	1.21
10	1.30	2.21	0.91	1.28

En la gráfica 2 el sensor de flujo presentó una alta linealidad respecto al instrumento patrón, reflejada en un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9973$. Este resultado indica que las mediciones corregidas reproducen adecuadamente los valores de referencia, permitiendo su utilización confiable en el monitoreo del volumen de agua aplicado.



Anexos D

ESTADO FENOLÓGICO

DEL CULTIVO Y

ACTIVIDAD REALIZADAS

A) PANEL FOTOGRÁFICO DE ESTADOS FENOLOGICOS DE QUINUA - RIEGO AUTOMATIZADO



Emergencia



2 a 4 hojas verdaderas



6 hojas verdaderas



Ramificación



Inicio de panojamiento- Panojamiento



Inicio de floración- Floración



Grano lechoso- Grano pastoso



Madurez Fisiológica

B) PANEL FOTOGRÁFICO DE ESTADOS FENOLÓGICOS DE QUINUA – RIEGO MANUAL



Emergencia



2 a 4 hojas verdaderas



6 hojas verdaderas



Ramificación



Inicio de panojamiento- Panojamiento



Inicio de floración- Floración



Grano lechoso- Grano pastoso



Madurez Fisiológica

C) ACTIVIDADES REALIZADAS PARA CADA SISTEMA DE RIEGO

Actividades Realizadas			
Fecha	AUTOMATICO	Fecha	MANUAL
18/07/2025	Muestreo y análisis de Suelo	18/07/2025	Muestreo y análisis de Suelo
19/07/2025	Arado del campo agrícola	19/07/2025	Arado del campo agrícola
15/08/2025	Nivelación del campo agrícola	15/08/2025	Nivelación del campo agrícola
17/08/2025	Instalación hidráulica: manguera HDPE: goteros Autocompensante, @0.20 cm, Ø 16mm, Q= 2l/h, etc.	17/08/2025	Instalación hidráulica: manguera HDPE: goteros Autocompensante, @0.20 cm, Ø 16mm, Q= 2l/h, etc.
18/08/2025	Instalación eléctrica: control eléctrico, y panel solar, etc.	20/08/2025	Fertilización de fondo en una dosificación de 120N* -80P -90K, Siembra y primer riego
20/08/2025	Fertilización de fondo en una dosificación de 120N* -80P -90K, Siembra y primer riego.	26/08/2025	Segundo riego
24/08/2025	Segundo riego	2/09/2025	Tercer riego
29/08/2025	Tercer riego	10/09/2025	Cuarto riego
2/09/2025	Cuarto riego	18/09/2025	Quinto riego
9/09/2025	Quinto riego	25/09/2025	Primer raleo, control de malezas, segunda fertilización y primer aporque a 25-30cm de altura de planta.

16/09/2025	Sexto riego	26/09/2025	Sexto riego
20/09/2025	Séptimo riego	29/09/2025	Primera aplicación de aplicación de insecticida biológico agrícola: biokaranya (extracto de ají) para reducir incidencia de plagas como trips, pulgones etc.
24/09/2025	Octavo riego	4/10/2025	Séptimo riego
25/09/2025	Primer raleo, control de malezas, segunda fertilización y primer aporque a 25-30cm de altura de planta	11/10/2025	Octavo riego
28/09/2025	Noveno riego	12/10/2025	Segunda aplicación de aplicación de insecticida biológico agrícola: biokaranya (extracto de ají) para reducir la incidencia de plagas como Kona kona (<i>Eurásica melanicampta</i>) y primera aplicación de Biozyme TF (bioestimulante y fitorregulador de crecimiento de origen natural).
29/09/2025	Primera aplicación de aplicación de insecticida biológico agrícola: biokaranya (extracto de ají) para reducir la incidencia de plagas como trips, pulgones etc.	15/10/2025	Segundo aporque
1/10/2025	Decimo riego	18/10/2025	Noveno riego
7/10/2025	Decimo primer riego	24/10/2025	Aplicación de fungicida a base de sulfato de cobre, con la finalidad de reducir la incidencia del mildiú (<i>Peronospora farinosa</i>) en el cultivo y segunda aplicación de Biozyme TF (bioestimulante y fitorregulador de crecimiento de origen natural) .

11/10/2025	Décimo segundo riego	25/10/2025	Decimo riego
12/10/2025	Segunda aplicación de aplicación de insecticida biológico agrícola: biokaranya (extracto de ají) para reducir la incidencia de plagas como kona kona (<i>Eurisacca melanicaempta</i>) y primera aplicación de Biozyme TF (bioestimulante y fitoregulator de crecimiento de origen natural).	31/10/2025	Decimo primer riego
15/10/2025	Segundo aporque	4/11/2025	Aplicación de insecticida BIOSPORE 6.4°/° PM
16/10/2025	Décimo tercero riego	6/11/2025	Décimo segundo riego
20/10/2025	Décimo cuarto riego	11/11/2025	Décimo tercero riego
24/10/2025	Aplicación de fungicida a base de sulfato de cobre, con la finalidad de reducir la incidencia del mildiú (<i>Peronospora farinosa</i>) en el cultivo y segunda aplicación de Biozyme TF (bioestimulante y fitoregulator de crecimiento de origen natural).	15/11/2025	Décimo cuarto riego
27/10/2025	Décimo quinto riego	19/11/2025	Décimo quinto riego
3/11/2025	Décimo sexto riego	23/11/2025	Décimo sexto riego
4/11/2025	Aplicación de insecticida BIOSPORE 6.4°/° PM	27/11/2025	Décimo séptimo riego
7/11/2025	Décimo séptimo riego	1/12/2025	Décimo octavo riego

11/11/2025	Décimo octavo riego	7/12/2025	Decimo noveno riego
17/11/2025	Decimo noveno riego	13/12/2025	Vigésimo riego
21/11/2025	Vigésimo riego	19/12/2025	Vigésimo primer riego
27/11/2025	Vigésimo primer riego	25/12/2025	Vigésimo segundo riego
1/12/2025	Vigésimo segundo riego	25/01/2026	Cosecha
8/12/2025	Vigésimo tercer riego		
16/12/2025	Vigésimo cuarto riego		
21/12/2025	Vigésimo quinto riego		
25/12/2025	Vigésimo sexto riego		
25/01/2026	Cosecha		

Anexos E

RESULTADO DE

ANÁLISIS DE

LABORATORIO

A) RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUA



MULTISERVICIOS AGROLAB

INGENIEROS TRABAJANDO POR UN AGRO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

ASESORÍA Y CAPACITACIÓN EN:

- EVALUACIÓN Y MUESTREO DE SUELOS. - INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS AGRÍCOLA.
- USO, MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS. - ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL.
- AGRICULTURA SUSTENTABLE.

ANÁLISIS DE AGUA

1150986

SOLICITANTE: Sr. Luis Alberto Rivera Huamancusi

PROYECTO: Análisis comparativo del riego por goteo con control manual y automatizado en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) en Canaán-Ayacucho, 2025.

REGIÓN: Ayacucho

PROVINCIA: Huamanga

DISTRITO: Andrés Bello Cáceres Domégaray

FUENTE: Reservorio del C.E. Canaán

ALTITUD: 2779 m.s.n.m.

COORDENADAS: 586212E; 8544052N

FECHA DE INGRESO: 08-07-25

FECHA DE RESULTADOS: 18-07-25

Nº Laboratorio	A01467
Nº Campo	Reservorio del C.E. Canaán
pH	6.89
C.E. (µS/cm)	157.00
CATIONES (meq/l)	
Calcio	0.73
Magnesio	0.33
Potasio	0.09
Sodio	0.45
Suma de Cationes (meq/l)	1.60
ANIONES (meq/l)	
Nitratos	0.00
Carbonatos	0.00
Bicarbonatos	1.07
Cloruros	0.44
Sulfatos	0.06
Suma de Aniones (meq/l)	1.57
Na (%)	28.13
Boro (ppm)	0.00
RAS	0.62
Sales Solubles Totales (ppm)	100.48
Dureza (G.H.F.)	5.30
CLASIFICACIÓN	C1-S1*

(*) Se trata de agua de salinidad baja, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad. El contenido de sodio es bajo, no obstante, es bueno considerar a los cultivos muy sensibles al sodio. No existe riesgo de obturación de emisores, al tratarse de agua muy blanda. Ningún riesgo de daño, en el uso por aspersión.



18-07-2025

Ph.D. Marhlén Cerda Gómez
Responsable de Laboratorio

Urb. Mariscal Cáceres Mz. "G-12" - Ayacucho / 966938028 - 966631889

982781298 agrolab107@gmail.com

B) ANÁLISIS FÍSICO DE SUELOS



MULTISERVICIOS AGROLAB

INGENIEROS TRABAJANDO POR UN AGRO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

ASESORÍA Y CAPACITACIÓN EN:

- EVALUACIÓN Y MUESTREO DE SUELOS. - INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS AGRÍCOLA.
- USO, MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS. - ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL.
- AGRICULTURA SUSTENTABLE.

ANÁLISIS FÍSICO DE SUELOS

1351005

SOLICITANTE: Sr. Luis Alberto Rivera Huamancusi

PROYECTO: Análisis comparativo del riego por goteo con control manual y automatizado en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) en Canán-Ayacucho, 2025.

REGIÓN: Ayacucho

PROVINCIA: Huamanga

DISTRITO: Andrés Bello Cáceres Dornegaray

PARCELA: Centro experimental Canán

ALTITUD: 2745 m.s.n.m.

COORDENADAS: 586351 E: 8544179N

FECHA DE INGRESO: 08-07-25

FECHA DE RESULTADOS: 18-07-25

Nº Laboratorio	AS 112033
Nº Campo	Parcela 04
Capacidad de campo (%)	30.65
Punto de marchites (%)	16.06
Densidad aparente (g.cc ⁻¹)	1.16
Arena (%)	32
Limo (%)	21
Arcilla (%)	47
Clase Textural	Arcilloso



Ph.D. Marhleni Celda Gómez
Responsable de Laboratorio

C) ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS



MULTISERVICIOS AGROLAB

INGENIEROS TRABAJANDO POR UN AGRO SOSTENIBLE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

ASESORÍA Y CAPACITACIÓN EN:

- EVALUACIÓN Y MUESTREO DE SUELOS.
- INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS AGRÍCOLA.
- USO, MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS.
- ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL
- AGRICULTURA SUSTENTABLE.

Solicitante	Sr. Luis Alberto Rivera Huamancusi				Fecha	18/07/2025	
Proyecto	Análisis comparativo del riego por goteo con control manual y automatizado en el cultivo de quinua (Chenopodium quinoa Willd) en Canaán-Ayacucho. 2025.						
Departamento	Ayacucho	Provincia:	Huamanga	Distrito:	Andrés B. Cáceres Dorregaray	Localidad	Canaán
			Altitud (m.s.n.m.)	2745	Superficie:	Coordenadas: 586351E; 8544179N	
Código de muestra	13910	Referencia de Campo:	C.E. Canaán	Cultivo anterior:	Cultivo actual:		

Parámetro	Resultado	Unidad	Clasificación
1 pH (1:1)	7.43	Unidad pH	Ligeramente alcalino
2 Conductividad (1:1)	0.45	dS m. ⁻¹	No salino
3 Carbonatos	0.55	%	Muy bajo
4 Materia orgánica	2.68	%	Medio
5 Fósforo disponible	29.14	ppm	Muy Alto
6 Potasio disponible	267	ppm	Muy Alto
7 Nitrógeno total	0.12	%	Medio
8 C.I.C.	28.89	Cmol (+).kg ⁻¹	Alto
10 Ca ⁺⁺	21.54	Cmol (+).kg ⁻¹	Alto
11 Mg ⁺⁺	5.24	Cmol (+).kg ⁻¹	Alto
12 K ⁺	1.64	Cmol (+).kg ⁻¹	Alto
13 Na ⁺	0.45	Cmol (+).kg ⁻¹	Bajo
14 Al ⁺⁺⁺ + H ⁺	0.00	Cmol (+).kg ⁻¹	Muy bajo
15 Saturación de bases	100	%	Alto

Clase textural	Arena	%	50	Clase	Fr.Ar.A.
Limo	%	25			
Arcilla	%	25			

Relaciones catiónicas	Parámetro	Resultado	Valoración
Ca / K	13.17	Deficiencia de Calcio	
Ca / Mg	4.11	Deficiencia de Calcio	
Mg / K	3.20	Deficiencia de Potasio	
(Ca + Mg + K) / Al			

18/07/2025

Ph.D. Maribel Cárdena Gómez
Responsable de Laboratorio

A = arena, A.Fr = Arena franca; Fr.A. = Franco arenoso; Fr = Franco; Fr.L = Franco limoso; L = Limoso; FrArA = Franco arcillo arenoso; FrAr = Franco arcilloso; FrArL = Franco arcillo limoso; ArA = Arcillo arenoso; ArL = Arcillo limoso; Ar = Arcilloso.

Urb. Mariscal Cáceres Mz. "G-12" - Ayacucho / 966938028 - 966631889 / 982781298 agrolab107@gmail.com

D) Análisis físico de grano de quinua



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

LABORATORIO DE SUELOS Y ANALISIS FOLIAR

Jr. Abraham Valdelomar N° 249 – Telf. 966942996

Ayacucho – Perú

“Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia”

Región : Ayacucho HR: 001
Provincia : Huamanga
Distrito : Andrés A. Cáceres Dorregaray
Localidad : Canaán Bajo
Proyecto : “TESIS” : Análisis comparativo del riego por goteo manual y automatizado en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en Canaán, Ayacucho-2025.
Muestra : Granos de Quinua
Solicitante : Sr. Luis Alberto Rivera Huamancusi

ANALISIS FÍSICO

PESO DE GRANOS DE QUINUA POR PLANTA

PARCELA 1				PARCELA 2			
CLAVE	P. H. (g)	P. S. (g)	%HUMEDAD	CLAVE	P. H. (g)	P. S. (g)	%HUMEDAD
T1-N01	50.87	46.50	9.40	T2-N01	53.23	49.09	8.43
T1-N02	68.54	61.54	11.37	T2-N02	52.72	47.79	10.32
T1-N03	48.15	43.52	10.64	T2-N03	48.31	43.90	10.05
T1-N04	46.81	42.08	11.24	T2-N04	53.13	47.99	10.71
T1-N05	49.17	45.31	8.52	T2-N05	60.28	54.21	11.20
T1-N06	81.88	73.88	10.83	T2-N06	37.16	33.37	11.36
T1-N07	68.21	61.15	11.55	T2-N07	54.51	49.46	10.21
T1-N08	43.25	39.88	8.45	T2-N08	41.24	37.26	10.68
T1-N09	43.43	39.25	10.65	T2-N09	41.39	37.26	11.08
T1-N10	71.27	64.28	10.87	T2-N10	36.45	33.15	9.95
PESO DE GRANOS DE QUINUA POR METRO LINEAL							
PARCELA 1				PARCELA 2			
CLAVE	P. H. (g)	P. S. (g)	%HUMEDAD	CLAVE	P. H. (g)	P. S. (g)	%HUMEDAD
T1-S1 19	515.91	453.86	13.67	T2-S1 20	494.17	437.37	12.99
T1-S2 20	462.97	410.27	12.85	T2-S2 21	381.17	331.43	15.01
T1-S3 21	381.74	331.98	14.99	T2-S3 21	384.60	332.61	15.63
T1-S4 20	488.30	424.69	14.98	T2-S4 18	511.60	448.12	14.17

Ayacucho, 26 de Enero del 2026

LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS
PLANTA, AGUAS Y FERTILIZANTES
RESPONSABLE
Juan B. Girón Molina
C.I.P. 77120

Anexos F

FICHA TÉCNICA DEL SENSOR DE HUMEDAD

A) SENSORES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DE SUELO

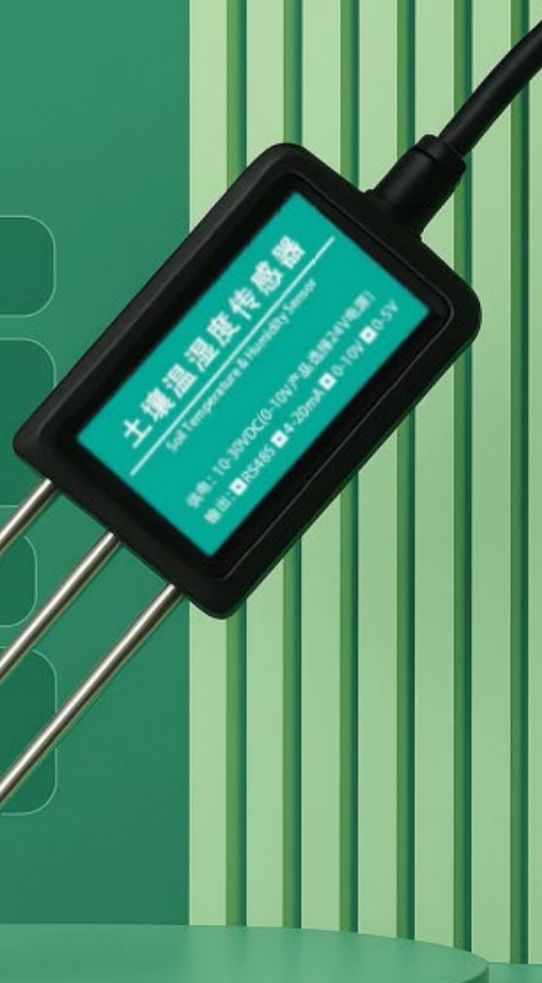
SENSORES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL SUELO

Medición precisa

*Excelente
intercambiabilidad*

Respuesta rápido

*Resistencia
a la corrosión*



Estables y confiables

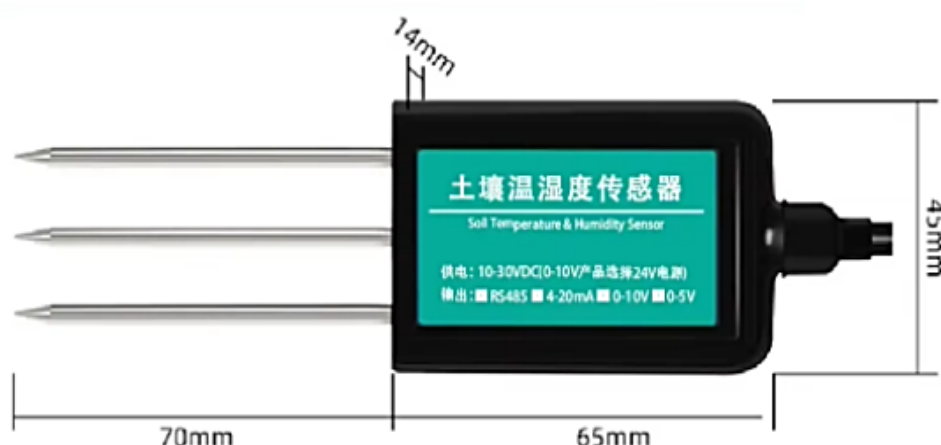


Protección IP68



Sellado con resina epòxica

PARÁMETROS DEL PRODUCTO



RS 485		
	Contenido volumetrico de agua en el suelo ; Temperatura del suelo	
Unidad de medida	% (m³/m³); °C	
Rango de humedad	0 ~ 100% (se puede elegir 30%, 50%, etc. o personalizar cualquier rango)	
Rango de temperatura	De -40 ~ 80°C (otros rangos arbitrarios pueden personalizarse)	
Precisión de medición	0 ~ 50% (rango de humedad) ±2% (m³/m³); ±0.2°C	
Rango de trabajo	De -30°C ~ 70°C	
Señal de salida	A: Señal de voltaje (0 ~ 2V, 0 ~ 5V, 0 ~ 10V, elegir una de las tres)	
	B: 4 ~ 20mA (bucle de corriente)	
	C: RS485 (protocolo estándar Modbus-RTU, dirección por defecto: 01)	
Voltaje de alimentación	4.5 ~ 30V DC	
Tiempo de estabilización	< 1 segundo	
Tiempo de respuesta	< 1 segundo	
Tipo analógico		
Fuente de alimentación DC (por defecto)	DC 10 ~ 30V	
Consumo máximo de energía:	Salida de corriente: 0.4W (alimentación 12V DC)	
	Salida de voltaje: 0.3W (alimentación 12V DC)	
Temperatura de operación	De -40°C ~ +60°C	
Tolerancia del chip interno	85°C	
Parámetros de temperatura del suelo:	Rango	De -40 ~ 80°C
	Precisión	±0.5°C
Parámetros de humedad del suelo:	Rango	0 ~ 100%
	Precisión	±2% dentro de 0-50% (suelo arcilloso, 30%, 25°C) ±3% dentro de 50-100% (suelo arcilloso, 60%, 25°C)
Nivel de protección	IP68	
Material de la sonda	Electrodo especial anticorrosión	
Material de sellado	Resina epóxica ignífuga negra	
Longitud de cable por defecto	2 m (se puede personalizar bajo pedido)	
Dimensiones	45*15*23 mm	
Señal de salida	Corriente	4 ~ 20mA
	Voltaje	0 ~ 5V / 0 ~ 10V
Capacidad de carga	Corriente	≤ 600Ω
	Voltaje	resistencia de salida ≤ 250Ω

IP68 a prueba de agua y polvo

Relleno al vacío a alta temperatura entre la sonda y el cuerpo con resina epoxi, eficazmente impermeable



Sonda de acero inoxidable 316L

Sonda de acero inoxidable, resistente a la corrosión por óxido y sal, adecuada para una variedad de suelos.



CÓMO UTILIZAR



Método de Prueba Rápida

Seleccione un sitio de medición adecuado, evite piedras y objetos duros similares, cree una capa superficial del suelo de acuerdo con la profundidad de medición requerida, mantenga la holgura original del suelo debajo, sujete el sensor firmemente, insértelo verticalmente en el suelo, no lo agite de lado a lado al insertarlo, y se recomienda promediarlo varias veces en un pequeño rango de puntos de medición.

Método de Medición Enterrada

Excavación vertical con un diámetro de pozo de más de 20 cm, profundidad según las necesidades de medición, la aguja de acero del sensor en el pozo, el pozo se llenará y compactará para garantizar que la aguja de acero y el suelo estén en estrecho contacto con el sensor para estabilizarse durante un período de tiempo, puede realizar mediciones y registros continuos a largo plazo



Estables y confiables



Pratección IP68



Sellado con resina epòxica

ALCANCE DE APLICACIÓN



Es adecuado para riego agrícola con ahorro de agua, invernaderos, flores y hortalizas, medición rápida del suelo, experimentos científicos y otros campos que necesitan medir la temperatura y la humedad del suelo.



Anexos G

MONITOREO DEL RIEGO

MANUAL Y

AUTOMATIZADO

A) MONITOREO DE RIEGO EN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO

RIEGO AUTOMATICO														
Días	Etapas Fenológica	T. Amb. (°C)	H. R. Amb. (%)	H. suelo (%)	C.C (%)	P.M (%)	T. suelo (°C)	Est. de electroválvula, UR=CC-[(CC-PM) x p]	ENCENDIDO ≤ H% (abre EV)	APAGADO ≥ H% (cierra EV)	Fundamento (FAO 56, Cuadro 22)	F. automático (L/min)	F.A automático (L)	T. Riego (min)
2025-08-20	Siembra	17.5	43.6	30.50	30.65	16.06	17.5	Abta.→Cda.	26.27	30.65	p=0.30 - sin raíz, suelo húmedo para germinar	10.81	877.7	81.2
2025-08-21	Emergencia	17.6	48.2	30.45	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.30 - raíz <2 cm, plántula muy sensible al déficit		877.7	
2025-08-22	Emergencia	17.4	45.3	29.03	30.65	16.06	17.4	Cda.			p=0.30 - raíz <2 cm, plántula muy sensible al déficit		877.7	
2025-08-23	Emergencia	16.4	53.8	27.77	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.30 - raíz <2 cm, plántula muy sensible al déficit		877.7	
2025-08-24	Emergencia	17.2	48.6	30.50	30.65	16.06	17.9	Abta.→Cda.	26.27	30.65	p=0.30 - raíz <2 cm, plántula muy sensible al déficit	11.017	1775.6	81.5
2025-08-25	Emergencia	18.1	45.2	30.39	30.65	16.06	17.7	Cda.			p=0.30 - raíz <2 cm, plántula muy sensible al déficit		1775.6	
2025-08-26	Emergencia	16.7	52.2	29.18	30.65	16.06	17.7	Cda.			p=0.30 - raíz <2 cm, plántula muy sensible al déficit		1775.6	
2025-08-27	Emergencia	17.5	48.0	27.90	30.65	16.06	18.0	Cda.			p=0.30 - raíz <2 cm, plántula muy sensible al déficit		1775.6	
2025-08-28	2 hojas cotiledones	17.1	43.5	26.74	30.65	16.06	17.9	Cda.			p=0.35 - plántula frágil, raíz 2-5 cm		1775.6	
2025-08-29	2 hojas cotiledones	16.5	42.0	30.52	30.65	16.06	16.7	Abta.→Cda.	25.54	30.65	p=0.35 - plántula frágil, raíz 2-5 cm	10.474	2616.6	80.3
2025-08-30	2 hojas cotiledones	16.3	35.8	30.47	30.65	16.06	16.5	Cda.			p=0.35 - plántula frágil, raíz 2-5 cm		2616.6	
2025-08-31	2 hojas cotiledones	17.6	40.2	28.88	30.65	16.06	16.7	Cda.			p=0.35 -plántula frágil, raíz 2-5 cm		2616.6	
2025-09-01	2 hojas cotiledones	17.5	40.7	27.25	30.65	16.06	16.7	Cda.			p=0.35 - plántula frágil, raíz 2-5 cm		2616.6	
2025-09-02	2 hojas cotiledones	17.3	40.3	30.57	30.65	16.06	16.3	Abta.→Cda.	25.54	30.65	p=0.35 -plántula frágil, raíz 2-5 cm	10.667	3458.1	78.9
2025-09-03	2 hojas cotiledones	13.5	60.7	30.48	30.65	16.06	16.3	Cda.			p=0.35 - plántula frágil, raíz 2-5 cm		3458.1	
2025-09-04	2 hojas cotiledones	15.8	51.4	29.59	30.65	16.06	16.3	Cda.			p=0.35 - plántula frágil, raíz 2-5 cm		3458.1	
2025-09-05	2 hojas cotiledones	15.8	42.7	28.95	30.65	16.06	16.6	Cda.			p=0.35 - plántula frágil, raíz 2-5 cm		3458.1	
2025-09-06	2 hojas cotiledones	14.7	56.0	28.13	30.65	16.06	16.6	Cda.			p=0.35 - plántula frágil, raíz 2-5 cm		3458.1	
2025-09-07	2 hojas cotiledones	17.5	50.6	27.27	30.65	16.06	16.8	Cda.			p=0.35 - plántula frágil, raíz 2-5 cm		3458.1	

2025-09-08	2 hojas cotiledones	18.0	46.9	26.44	30.65	16.06	16.8	Cda.			p=0.35 - plántula frágil, raíz 2-5 cm		3458.1	
2025-09-09	2 hojas verdaderas	15.1	49.3	30.46	30.65	16.06	17.2	Abta.→Cda.	25.54	30.65	p=0.35 - raíz 5-10 cm, alta sensibilidad hídrica	10.808	4326.0	80.3
2025-09-10	2 hojas verdaderas	15.8	44.1	30.39	30.65	16.06	16.9	Cda.			p=0.35 - raíz 5-10 cm, alta sensibilidad hídrica		4326.0	
2025-09-11	2 hojas verdaderas	15.9	43.2	29.51	30.65	16.06	17.0	Cda.			p=0.35 - raíz 5-10 cm, alta sensibilidad hídrica		4326.0	
2025-09-12	2 hojas verdaderas	16.4	40.6	28.86	30.65	16.06	17.1	Cda.			p=0.35 - raíz 5-10 cm, alta sensibilidad hídrica		4326.0	
2025-09-13	2 hojas verdaderas	18.5	38.8	28.02	30.65	16.06	17.1	Cda.			p=0.35 - raíz 5-10 cm, alta sensibilidad hídrica		4326.0	
2025-09-14	2 hojas verdaderas	16.9	41.4	27.26	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.35 - raíz 5-10 cm, alta sensibilidad hídrica		4326.0	
2025-09-15	2 hojas verdaderas	18.1	40.9	26.44	30.65	16.06	17.4	Cda.			p=0.35 - raíz 5-10 cm, alta sensibilidad hídrica		4326.0	
2025-09-16	2 hojas verdaderas	18.4	40.0	30.52	30.65	16.06	16.8	Abta.→Cda.	25.54	30.65	p=0.35 - raíz 5-10 cm, alta sensibilidad hídrica	11.37	5193.4	76.3
2025-09-17	2 hojas verdaderas	18.1	34.2	30.40	30.65	16.06	16.6	Cda.			p=0.35 - raíz 5-10 cm, alta sensibilidad hídrica		5193.4	
2025-09-18	2 hojas verdaderas	18.7	41.0	28.58	30.65	16.06	16.6	Cda.			p=0.35 - raíz 5-10 cm, alta sensibilidad hídrica		5193.4	
2025-09-19	4 hojas verdaderas	18.3	40.3	26.81	30.65	16.06	16.9	Cda.			p=0.40 - raíz en expansión, crecimiento activo		5193.4	
2025-09-20	4 hojas verdaderas	19.7	40.3	30.51	30.65	16.06	17.7	Abta.→Cda.	24.81	30.65	p=0.40 - raíz en expansión, crecimiento activo	11.182	6061.1	77.6
2025-09-21	4 hojas verdaderas	19.2	43.6	30.40	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.40 - raíz en expansión, crecimiento activo		6061.1	
2025-09-22	4 hojas verdaderas	19.6	37.3	28.62	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.40 - raíz en expansión, crecimiento activo		6061.1	
2025-09-23	4 hojas verdaderas	17.6	42.1	26.68	30.65	16.06	17.8	Cda.			p=0.40 - raíz en expansión, crecimiento activo		6061.1	
2025-09-24	4 hojas verdaderas	17.3	42.0	30.57	30.65	16.06	17.1	Abta.→Cda.	24.81	30.65	p=0.40 - raíz en expansión, crecimiento activo	10.781	6928.9	80.5
2025-09-25	4 hojas verdaderas	17.0	42.6	30.50	30.65	16.06	16.8	Cda.			p=0.40 - raíz en expansión, crecimiento activo		6928.9	
2025-09-26	4 hojas verdaderas	16.6	47.1	28.57	30.65	16.06	17.0	Cda.			p=0.40 - raíz en expansión, crecimiento activo		6928.9	
2025-09-27	4 hojas verdaderas	17.0	43.3	26.67	30.65	16.06	16.8	Cda.			p=0.40 - raíz en expansión, crecimiento activo		6928.9	
2025-09-28	4 hojas verdaderas	17.0	42.7	30.56	30.65	16.06	17.5	Abta.→Cda.	24.81	30.65	p=0.40 - raíz en expansión, crecimiento activo	11.024	7796.5	78.7
2025-09-29	6 hojas verdaderas	18.1	44.1	30.47	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.45 - planta robusta, raíz >15 cm		7796.5	
2025-09-30	6 hojas verdaderas	17.4	54.1	27.30	30.65	16.06	17.4	Cda.			p=0.45 - planta robusta, raíz >15 cm		7796.5	
2025-10-01	6 hojas verdaderas	17.3	58.0	30.57	30.65	16.06	17.4	Abta.→Cda.	24.08	30.65	p=0.45 - planta robusta, raíz >15 cm	10.885	8663.9	79.7

2025-10-02	6 hojas verdaderas	17.5	52.9	30.50	30.65	16.06	17.1	Cda.			p=0.45 - planta robusta, raíz >15 cm		8663.9	
2025-10-03	6 hojas verdaderas	16.4	55.4	29.28	30.65	16.06	17.2	Cda.			p=0.45 - planta robusta, raíz >15 cm		8663.9	
2025-10-04	6 hojas verdaderas	18.0	49.8	28.03	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.45 - planta robusta, raíz >15 cm		8663.9	
2025-10-05	6 hojas verdaderas	18.5	40.5	26.70	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.45 - planta robusta, raíz >15 cm		8663.9	
2025-10-06	6 hojas verdaderas	17.9	40.6	25.56	30.65	16.06	17.4	Cda.			p=0.45 - planta robusta, raíz >15 cm		8663.9	
2025-10-07	6 hojas verdaderas	18.9	47.6	30.58	30.65	16.06	17.4	Abta.→Cda.	24.08	30.65	p=0.45 - planta robusta, raíz >15 cm	10.573	9531.9	82.1
2025-10-08	6 hojas verdaderas	17.6	53.3	30.50	30.65	16.06	17.1	Cda.			p=0.45 - planta robusta, raíz >15 cm		9531.9	
2025-10-09	6 hojas verdaderas	16.3	53.2	28.21	30.65	16.06	17.2	Cda.			p=0.45 - planta robusta, raíz >15 cm		9531.9	
2025-10-10	Ramificación	17.2	58.3	25.88	30.65	16.06	17.2	Cda.			p=0.50 - planta establecida		9531.9	
2025-10-11	Ramificación	18.9	55.2	30.50	30.65	16.06	17.5	Abta.→Cda.	23.35	30.65	p=0.50 - planta establecida	10.626	10356.5	77.6
2025-10-12	Ramificación	17.7	49.9	30.39	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.50 - planta establecida,		10356.5	
2025-10-13	Ramificación	17.3	45.2	28.62	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.50 - planta establecida		10356.5	
2025-10-14	Ramificación	18.0	55.6	26.86	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.50 - planta establecida		10356.5	
2025-10-15	Ramificación	16.8	54.1	25.20	30.65	16.06	17.4	Cda.			p=0.50 - planta establecida		10356.5	
2025-10-16	Ramificación	18.0	44.1	30.56	30.65	16.06	17.6	Abta.→Cda.	23.35	30.65	p=0.50 - planta establecida	10.57	11180.9	78
2025-10-17	Ramificación	18.6	45.2	30.50	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.50 - planta establecida		11180.9	
2025-10-18	Ramificación	17.7	47.8	28.50	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.50 - planta establecida		11180.9	
2025-10-19	Ramificación	17.8	60.9	26.31	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.50 - planta establecida		11180.9	
2025-10-20	Inicio panojamiento	17.4	52.5	30.50	30.65	16.06	17.8	Abta.→Cda.	24.08	30.65	p=0.45 - inicio etapa crítica reproductiva	10.811	12005.7	76.3
2025-10-21	Inicio panojamiento	19.1	46.4	30.42	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.45 - inicio etapa crítica reproductiva		12005.7	
2025-10-22	Inicio panojamiento	18.2	43.0	29.39	30.65	16.06	17.7	Cda.			p=0.45 - inicio etapa crítica reproductiva		12005.7	
2025-10-23	Inicio panojamiento	18.4	45.1	28.32	30.65	16.06	17.7	Cda.			p=0.45 - inicio etapa crítica reproductiva		12005.7	
2025-10-24	Inicio panojamiento	18.7	40.8	27.29	30.65	16.06	17.8	Cda.			p=0.45 - inicio etapa crítica reproductiva		12005.7	
2025-10-25	Inicio panojamiento	18.9	48.6	26.33	30.65	16.06	18.1	Cda.			p=0.45 - inicio etapa crítica reproductiva		12005.7	

2025-10-26	Inicio panojamiento	17.9	50.8	25.25	30.65	16.06	18.2	Cda.			p=0.45 - inicio etapa crítica reproductiva		12005.7	
2025-10-27	Inicio panojamiento	19.7	48.0	30.51	30.65	16.06	17.5	Abta.→Cda.	24.08	30.65	p=0.45 - inicio etapa crítica reproductiva	10.873	12830.9	75.9
2025-10-28	Inicio panojamiento	19.1	41.9	30.40	30.65	16.06	17.2	Cda.			p=0.45 - inicio etapa crítica reproductiva		12830.9	
2025-10-29	Panojamiento	18.0	51.1	29.36	30.65	16.06	17.2	Cda.			p=0.43 - formación de panícula, déficit reduce granos		12830.9	
2025-10-30	Panojamiento	18.2	44.4	28.53	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.43 - formación de panícula, déficit reduce granos		12830.9	
2025-10-31	Panojamiento	19.5	43.3	27.45	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.43 - formación de panícula, déficit reduce granos		12830.9	
2025-11-01	Panojamiento	17.5	51.7	26.38	30.65	16.06	17.7	Cda.			p=0.43 - formación de panícula, déficit reduce granos		12830.9	
2025-11-02	Panojamiento	19.8	44.7	25.38	30.65	16.06	17.9	Cda.			p=0.43 - formación de panícula, déficit reduce granos		12830.9	
2025-11-03	Panojamiento	18.6	39.1	30.58	30.65	16.06	17.2	Abta.→Cda.	24.38	30.65	p=0.43 - formación de panícula, déficit reduce granos	10.386	13717.8	85.4
2025-11-04	Panojamiento	17.6	28.2	30.49	30.65	16.06	17.1	Cda.			p=0.43 - formación de panícula, déficit reduce granos		13717.8	
2025-11-05	Panojamiento	19.7	32.0	28.59	30.65	16.06	17.2	Cda.			p=0.43 - formación de panícula, déficit reduce granos		13717.8	
2025-11-06	Inicio de floración	18.9	43.8	26.64	30.65	16.06	17.2	Cda.			p=0.41 - estrés reduce set de flores		13717.8	
2025-11-07	Inicio de floración	18.3	56.3	30.54	30.65	16.06	17.0	Abta.→Cda.	24.67	30.65	p=0.41 - estrés reduce set de flores	11.099	14604.6	79.9
2025-11-08	Inicio de floración	18.6	50.9	30.42	30.65	16.06	16.8	Cda.			p=0.41 - estrés reduce set de flores		14604.6	
2025-11-09	Inicio de floración	17.2	51.3	28.69	30.65	16.06	16.9	Cda.			p=0.41 - estrés reduce set de flores		14604.6	
2025-11-10	Inicio de floración	17.0	49.7	26.84	30.65	16.06	16.9	Cda.			p=0.41 - estrés reduce set de flores		14604.6	
2025-11-11	Floración	18.0	43.7	30.60	30.65	16.06	18.0	Abta.→Cda.	24.81	30.65	p=0.40 - etapa más crítica	10.843	15515.3	84
2025-11-12	Floración	17.8	37.4	30.50	30.65	16.06	17.7	Cda.			p=0.40 - etapa más crítica		15515.3	
2025-11-13	Floración	19.0	40.0	29.40	30.65	16.06	17.7	Cda.			p=0.40 - etapa más crítica		15515.3	
2025-11-14	Floración	17.6	28.0	28.24	30.65	16.06	17.9	Cda.			p=0.40 - etapa más crítica		15515.3	
2025-11-15	Floración	18.3	31.2	27.20	30.65	16.06	18.0	Cda.			p=0.40 - etapa más crítica		15515.3	
2025-11-16	Floración	20.5	38.1	25.99	30.65	16.06	18.1	Cda.			p=0.40 - etapa más crítica		15515.3	
2025-11-17	Floración	18.7	38.2	30.53	30.65	16.06	17.4	Abta.→Cda.	24.81	30.65	p=0.40 - etapa más crítica	10.792	16367.8	79
2025-11-18	Floración	17.6	42.1	30.45	30.65	16.06	17.2	Cda.			p=0.40 - etapa más crítica		16367.8	

2025-11-19	Inicio grano lechoso	18.8	25.9	28.47	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.45 - llenado activo de grano		16367.8	
2025-11-20	Inicio grano lechoso	19.0	24.8	26.28	30.65	16.06	17.4	Cda.			p=0.45 - llenado activo de grano		16367.8	
2025-11-21	Inicio grano lechoso	19.0	30.0	30.52	30.65	16.06	16.9	Abta.→Cda.	24.08	30.65	p=0.45 - llenado activo de grano	10.751	17267.6	83.7
2025-11-22	Inicio grano lechoso	19.4	37.0	30.46	30.65	16.06	16.8	Cda.			p=0.45 - llenado activo de grano		17267.6	
2025-11-23	Inicio grano lechoso	20.0	37.9	29.30	30.65	16.06	17.0	Cda.			p=0.45 - llenado activo de grano		17267.6	
2025-11-24	Inicio grano lechoso	18.6	45.3	27.94	30.65	16.06	17.0	Cda.			p=0.45 - llenado activo de grano		17267.6	
2025-11-25	Inicio grano lechoso	19.5	41.0	26.77	30.65	16.06	17.0	Cda.			p=0.45 - llenado activo de grano		17267.6	
2025-11-26	Inicio grano lechoso	18.2	54.5	25.53	30.65	16.06	17.1	Cda.			p=0.45 - llenado activo de grano		17267.6	
2025-11-27	Inicio grano lechoso	18.0	51.4	30.58	30.65	16.06	17.4	Abta.→Cda.	24.08	30.65	p=0.45 - llenado activo de grano	11.231	18168.3	80.2
2025-11-28	Inicio grano lechoso	18.3	38.4	30.48	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.45 - llenado activo de grano		18168.3	
2025-11-29	Inicio grano lechoso	20.6	35.7	28.45	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.45 - llenado activo de grano		18168.3	
2025-11-30	Inicio grano lechoso	18.8	29.6	26.31	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.45 - llenado activo de grano		18168.3	
2025-12-01	Inicio grano lechoso	19.7	40.0	30.60	30.65	16.06	17.4	Abta.→Cda.	24.08	30.65	p=0.45 - llenado activo de grano	10.786	19068.9	83.5
2025-12-02	Inicio grano lechoso	19.8	39.2	30.53	30.65	16.06	17.1	Cda.			p=0.45 - llenado activo de grano		19068.9	
2025-12-03	Grano pastoso	18.6	47.5	29.43	30.65	16.06	17.2	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19068.9	
2025-12-04	Grano pastoso	20.0	34.7	28.23	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19068.9	
2025-12-05	Grano pastoso	19.6	20.8	27.03	30.65	16.06	17.4	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19068.9	
2025-12-06	Grano pastoso	20.3	22.7	25.74	30.65	16.06	17.7	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19068.9	
2025-12-07	Grano pastoso	19.6	22.4	24.50	30.65	16.06	17.9	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19068.9	
2025-12-08	Grano pastoso	19.9	22.1	30.47	30.65	16.06	17.6	Abta.→Cda.	23.35	30.65	p=0.50 - demanda hídrica decreciente	10.788	19914.6	78.4
2025-12-09	Grano pastoso	20.2	37.7	30.35	30.65	16.06	17.4	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19914.6	
2025-12-10	Grano pastoso	17.3	57.4	29.36	30.65	16.06	17.6	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19914.6	
2025-12-11	Grano pastoso	19.3	52.8	28.28	30.65	16.06	17.6	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19914.6	
2025-12-12	Grano pastoso	19.0	45.6	27.43	30.65	16.06	17.7	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19914.6	

2025-12-13	Grano pastoso	19.5	36.1	26.44	30.65	16.06	17.8	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19914.6	
2025-12-14	Grano pastoso	19.7	26.0	25.32	30.65	16.06	17.9	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19914.6	
2025-12-15	Grano pastoso	19.7	31.9	24.40	30.65	16.06	17.7	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		19914.6	
2025-12-16	Grano pastoso	17.9	38.6	30.52	30.65	16.06	16.6	Abta.→Cda.	23.35	30.65	p=0.50 - demanda hídrica decreciente	11.013	20760.4	76.8
2025-12-17	Grano pastoso	17.1	52.1	30.45	30.65	16.06	16.4	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		20760.4	
2025-12-18	Grano pastoso	16.5	54.6	28.70	30.65	16.06	16.6	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		20760.4	
2025-12-19	Grano pastoso	19.4	41.1	26.93	30.65	16.06	16.8	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		20760.4	
2025-12-20	Grano pastoso	19.7	24.7	25.27	30.65	16.06	16.9	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		20760.4	
2025-12-21	Grano pastoso	20.1	27.0	30.49	30.65	16.06	17.4	Abta.→Cda.	23.35	30.65	p=0.50 - demanda hídrica decreciente	10.833	21606.4	78.1
2025-12-22	Grano pastoso	20.6	25.4	30.43	30.65	16.06	17.1	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		21606.4	
2025-12-23	Grano pastoso	20.2	29.3	27.96	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.50 - demanda hídrica decreciente		21606.4	
2025-12-24	Madurez fisiológica	19.6	35.3	25.33	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		21606.4	
2025-12-25	Madurez fisiológica	19.8	29.8	30.53	30.65	16.06	18.6	Abta.→Cda.	22.63	30.65	p=0.55 - tolera estrés	11.029	22452.2	76.7
2025-12-26	Madurez fisiológica	18.9	39.7	30.44	30.65	16.06	18.3	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2025-12-27	Madurez fisiológica	17.6	31.6	24.62	30.65	16.06	18.5	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2025-12-28	Madurez fisiológica	18.8	39.4	24.72	30.65	16.06	18.9	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2025-12-29	Madurez fisiológica	18.7	41.6	24.84	30.65	16.06	18.7	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2025-12-30	Madurez fisiológica	19.0	34.6	25.09	30.65	16.06	18.1	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2025-12-31	Madurez fisiológica	19.0	46.7	24.73	30.65	16.06	18.8	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-01	Madurez fisiológica	18.9	46.9	24.72	30.65	16.06	18.3	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-02	Madurez fisiológica	16.1	56.9	24.57	30.65	16.06	17.6	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-03	Madurez fisiológica	17.6	50.5	25.13	30.65	16.06	16.7	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-04	Madurez fisiológica	18.7	46.0	24.73	30.65	16.06	17.8	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-05	Madurez fisiológica	15.5	58.4	25.41	30.65	16.06	18.1	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	

2026-01-06	Madurez fisiológica	19.3	46.8	25.36	30.65	16.06	17.8	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-07	Madurez fisiológica	21.1	38.9	24.57	30.65	16.06	18.1	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-08	Madurez fisiológica	19.4	44.7	24.74	30.65	16.06	18.4	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-09	Madurez fisiológica	16.1	56.8	25.17	30.65	16.06	18.7	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-10	Madurez fisiológica	16.4	60.8	24.71	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-11	Madurez fisiológica	16.7	50.5	24.63	30.65	16.06	16.9	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-12	Madurez fisiológica	18.0	51.1	25.44	30.65	16.06	17.9	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-13	Madurez fisiológica	12.4	72.0	25.07	30.65	16.06	16.3	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-14	Madurez fisiológica	16.2	64.7	24.97	30.65	16.06	16.3	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-15	Madurez fisiológica	14.2	64.1	25.28	30.65	16.06	16.4	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-16	Madurez fisiológica	17.3	57.9	25.31	30.65	16.06	16.5	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-17	Madurez fisiológica	16.4	59.1	24.69	30.65	16.06	16.7	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-18	Madurez fisiológica	17.9	58.3	24.60	30.65	16.06	17.3	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-19	Madurez fisiológica	18.0	57.7	24.93	30.65	16.06	17.2	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-20	Madurez fisiológica	16.7	61.1	24.92	30.65	16.06	17.2	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-21	Cosecha	19.3	50.5	24.97	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-22	Cosecha	16.7	61.2	25.23	30.65	16.06	17.5	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-23	Cosecha	15.5	66.6	25.17	30.65	16.06	17.4	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-24	Cosecha	17.0	64.6	25.48	30.65	16.06	17.7	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
2026-01-25	Cosecha	18.4	61.5	24.60	30.65	16.06	17.9	Cda.			p=0.55 - tolera estrés		22452.2	
Prom.		18.0	44.8	28.0	30.65	16.06	17.4	26 riegos	24.45	30.65		10.85	13733.1	79.64
Máx.		21.1	72.0	30.6	30.65	16.06	18.9		26.27	30.65		11.37	22452.2	85.4
Mín.		12.4	20.8	24.4	30.65	16.06	16.3		22.63	30.65		10.386	877.72	75.9
TIEMPO DE RIEGO TOTAL													Min	2071
													Horas	34.51

B) Monitoreo de riego en sistema de riego manual

RIEGO TRADICIONAL			
Días	F. Tradicional (L/min)	F. A Tradicional (L)	T. Riego (min)
20/08/2025	12.029	1366.61	113.6
21/08/2025		1366.61	
22/08/2025		1366.61	
23/08/2025		1366.61	
24/08/2025		1366.61	
25/08/2025		1366.61	
26/08/2025	12.022	2763.69	116.2
27/08/2025		2763.69	
28/08/2025		2763.69	
29/08/2025		2763.69	
30/08/2025		2763.69	
31/08/2025		2763.69	
1/09/2025		2763.69	
2/09/2025	12.4	4073.25	105.6
3/09/2025		4073.25	
4/09/2025		4073.25	
5/09/2025		4073.25	
6/09/2025		4073.25	
7/09/2025		4073.25	
8/09/2025		4073.25	
9/09/2025		4073.25	
10/09/2025	11.979	5424.6	112.8
11/09/2025		5424.6	
12/09/2025		5424.6	
13/09/2025		5424.6	
14/09/2025		5424.6	
15/09/2025		5424.6	
16/09/2025		5424.6	
17/09/2025		5424.6	
18/09/2025	11.7	6774.9	115.4
19/09/2025		6774.9	
20/09/2025		6774.9	
21/09/2025		6774.9	
22/09/2025		6774.9	
23/09/2025		6774.9	
24/09/2025		6774.9	
25/09/2025		6774.9	

26/09/2025	11.58	8125.25	116.6
27/09/2025		8125.25	
28/09/2025		8125.25	
29/09/2025		8125.25	
30/09/2025		8125.25	
1/10/2025		8125.25	
2/10/2025		8125.25	
3/10/2025		8125.25	
4/10/2025	12.019	9476.3	112.4
5/10/2025		9476.3	
6/10/2025		9476.3	
7/10/2025		9476.3	
8/10/2025		9476.3	
9/10/2025		9476.3	
10/10/2025		9476.3	
11/10/2025	11.678	10759.83	109.9
12/10/2025		10759.83	
13/10/2025		10759.83	
14/10/2025		10759.83	
15/10/2025		10759.83	
16/10/2025		10759.83	
17/10/2025		10759.83	
18/10/2025	12.25	12043.74	104.8
19/10/2025		12043.74	
20/10/2025		12043.74	
21/10/2025		12043.74	
22/10/2025		12043.74	
23/10/2025		12043.74	
24/10/2025		12043.74	
25/10/2025	12.093	13328.13	106.2
26/10/2025		13328.13	
27/10/2025		13328.13	
28/10/2025		13328.13	
29/10/2025		13328.13	
30/10/2025		13328.13	
31/10/2025	11.896	14708.19	116
1/11/2025		14708.19	
2/11/2025		14708.19	
3/11/2025		14708.19	
4/11/2025		14708.19	
5/11/2025		14708.19	
6/11/2025	11.782	16089.16	117.2
7/11/2025		16089.16	
8/11/2025		16089.16	

9/11/2025		16089.16	
10/11/2025		16089.16	
11/11/2025	11.976	17507.24	118.4
12/11/2025		17507.24	
13/11/2025		17507.24	
14/11/2025		17507.24	
15/11/2025	12.197	18835.61	108.9
16/11/2025		18835.61	
17/11/2025		18835.61	
18/11/2025		18835.61	
19/11/2025	12.286	20163.84	108.1
20/11/2025		20163.84	
21/11/2025		20163.84	
22/11/2025		20163.84	
23/11/2025	11.602	21565.48	120.8
24/11/2025		21565.48	
25/11/2025		21565.48	
26/11/2025		21565.48	
27/11/2025	12.634	22966.71	110.9
28/11/2025		22966.71	
29/11/2025		22966.71	
30/11/2025		22966.71	
1/12/2025	11.785	24368.07	118.9
2/12/2025		24368.07	
3/12/2025		24368.07	
4/12/2025		24368.07	
5/12/2025		24368.07	
6/12/2025		24368.07	
7/12/2025	11.606	25685.47	113.5
8/12/2025		25685.47	
9/12/2025		25685.47	
10/12/2025		25685.47	
11/12/2025		25685.47	
12/12/2025		25685.47	
13/12/2025	12.517	27002.37	105.2
14/12/2025		27002.37	
15/12/2025		27002.37	
16/12/2025		27002.37	
17/12/2025		27002.37	
18/12/2025		27002.37	
19/12/2025	12.405	28319.9	106.2
20/12/2025		28319.9	
21/12/2025		28319.9	
22/12/2025		28319.9	

23/12/2025		28319.9	
24/12/2025		28319.9	
25/12/2025	12.312	29637.4	107
26/12/2025		29637.4	
27/12/2025		29637.4	
28/12/2025		29637.4	
29/12/2025		29637.4	
30/12/2025		29637.4	
31/12/2025		29637.4	
1/01/2026		29637.4	
2/01/2026		29637.4	
3/01/2026		29637.4	
4/01/2026		29637.4	
5/01/2026		29637.4	
6/01/2026		29637.4	
7/01/2026		29637.4	
8/01/2026		29637.4	
9/01/2026		29637.4	
10/01/2026		29637.4	
11/01/2026		29637.4	
12/01/2026		29637.4	
13/01/2026		29637.4	
14/01/2026		29637.4	
15/01/2026		29637.4	
16/01/2026		29637.4	
17/01/2026		29637.4	
18/01/2026		29637.4	
19/01/2026		29637.4	
20/01/2026		29637.4	
21/01/2026		29637.4	
22/01/2026		29637.4	
23/01/2026		29637.4	
24/01/2026		29637.4	
25/01/2026		29637.4	
Prom.	12.03	29637.4	112.0
Máx.	12.63	29637.4	120.8
Mín.	11.58	1366.61	104.8

Anexos H

RECIBO DE LUZ

A) RECIBO DE LUZ PARA EL CÁLCULO EL CÁLCULO TARIFARIO

RECIBO N° S751-19008458
Ayacucho, Huamanga - Ayacucho/

Para consultas su código es: **65606146**
RIVERA CANCHO, TEODORO
Jr. CESAR VALLEJO s/n Cent AYACUCHO

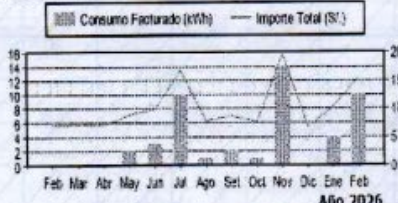
Febrero-2026
1462 - 60483 - 2550



Electrocentro
EMPRESA REGIONAL DE SERVICIO PÚBLICO DE
ELECTRICIDAD DE CENTRO S.A.
Of. Principal: Jr. Amazonas 641 - Huancayo
Av. Del Deporte N° 400 - Ayacucho
R.U.C. 20129646099

DATOS DEL SUMINISTRO DE CONSUMO

Tensión y SED	220 V - BT / D-400121
Sist. Eléctrico	SE0060 AYACUCHO (ST2)
Tipo de Conexión	Monofásica-Aérea(C1.1)
Opción Tarifaria	BT5B - Residencial
Medidor N°	000000028157516 - Electrón.
Hilos	3
Lectura Anterior	4.00 (24/01/2026)
Lectura Actual	14.00 (21/02/2026)
Diferencia de Lectura	10.00
Factor	1.0000
Consumo	10.00 kWh
Cons. Prom.(6 meses)	3.67 kWh
Potencia Contratada	0.85 kW.
Inicio Contrato	25/06/2010
Término Contrato	24/06/2026
Fecha Emisión	24/02/2026



Consumo Facturado (kWh) — Importe Total (S/.)

Feb Mar Abr May Jun Jul Ago Set Oct Nov Dic Ene Feb
Año 2026

Importe 2 Últimos Meses Facturados	
Dic - 2025 S/ 6.70	Ene - 2026 S/ 10.30

IMPORTES FACTURADOS

Recibo por Consumo del 25/01/2026 al 21/02/2026	
Cargo Fijo	3.51
Cargo por Reposición y Mantenimiento	1.35
Ene.Activa(S/ 0.8506 x 10.0000 kWh)	8.61
Alumbrado Público (Alícuota : S/ 0.7940)	0.79
Interés Compensatorio	0.02
SUB TOTAL	14.28
Imp. Gral. a las Ventas	2.57
Cargo Energía Ley MCTER 30458	-1.24
Saldo por redondeo	-0.02
Diferencia de redondeo	0.01
Aporte Ley Nro. 28749 0.0110	0.11
Compensación según NTCSE-Tensión	-0.01
TOTAL RECIBO DE FEBRERO-2026	15.70
Aporte FOSE(Ley N° 27510) S/ 0.31	

FECHA DE VENCIMIENTO 12/03/2026

TOTAL A PAGAR S/ *****15.70

¡Felicidades! Eres un potencial Beneficiario FISE. Consulta a través de los canales digitales u oficinas de atención al cliente. Si tu evaluación es conforme podrás ser un beneficiario FISE

RECIBO N° S751-19008458 **Febrero-2026**
Suministro: 65606146 RIVERA CANCHO, TEODORO
Ayacucho, Huamanga - Ayacucho/
1462 - 60483 - 2550 / 24/02/2026 / 12/03/2026
TOTAL A PAGAR S/ *****15.70





Electrocentro
R.U.C. 20129646099

¿PERDISTE TU RECIBO? Descárgalo en:
<https://www.electrocentro.com.pe/mirecibo>

Anexos I

INFORME DE ENTREGA

DE DATOS

CLIMATOLÓGICOS

A) INFORME DE DATOS DE CLIMA DE LA ESTACIÓN AUTOMÁTICA METEOROLÓGICA



PERÚ Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

Instituto Nacional
de Innovación Agraria

Dirección de Supervisión y Monitoreo en
las Estaciones Experimentales Agrarias



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

INFORME DE ENTREGA DE DATOS CLIMATOLÓGICOS

Dirigido a:

Ing. Percy Colos Ayala
Director de la Estación Experimental Agraria Canaán - INIA

Asunto: Entrega de datos climatológicos solicitados

Fecha: 25/03/2026

1. Antecedentes

En respuesta a la solicitud de información climatológica realizada por Luis Alberto Rivera Huamancusi con DNI 70869048, El Proyecto de Suelos y Aguas dispone de una estación meteorológica de uso exclusivo para investigación, ubicada en la Estación Experimental Agraria Canaán - INIA, la cual permite el registro continuo y sistemático de variables climatológicas.

2. Fuente de los datos

Los datos fueron obtenidos mediante la estación meteorológica automática Davis Vantage Pro2, fabricada por Davis Instruments, la cual registra de manera continua variables como temperatura, humedad relativa, precipitación, radiación solar, velocidad y dirección del viento.

3. Periodo y cobertura de los datos

El conjunto de datos entregado corresponde al periodo del 20 de agosto de 2025 al 26 de enero de 2026, con registros diarios y horarios según lo disponible en la estación, garantizando una resolución adecuada para análisis precisos.

4. Entrega de información

Se adjunta a este informe un archivo en Word con los datos climatológicos, organizados por mes, así como un enlace que permite acceder a los registros obtenidos cada 15 minutos, facilitando su consulta y análisis en tiempo casi real.

LINK:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Q7JOgTdxefgNK7EKb6KpluhWH_QjPZnT/edit?gid=1893566093#gid=1893566093

Conclusión

El Proyecto de Suelos y Aguas entrega los datos solicitados correspondientes al periodo del 20 de agosto de 2025 al 26 de enero de 2026, cumpliendo con la solicitud del usuario y contribuyendo al fortalecimiento de la investigación agroclimática de la estación.

Atentamente,

Leivi Tatiana Condori Ataupillco
Proyecto de Suelos y Aguas – INIA



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

Instituto Nacional
de Innovación Agraria

Dirección de Supervisión y Monitoreo en
las Estaciones Experimentales Agrarias

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

ANEXO

Etiquetas de fila	Máx. de Temp	Mín. de Temp2	Suma de Hum	Suma de Rain	Suma de Rad.	Suma de ET
Ene	27.7	10.3	43148	44.6	209516	109.08
Ago	25.5	7.7	15524	8.4	85218	50.82
Set	28.7	7.9	36914	21.4	231812	132.21
Oct	27.2	8.8	43352	50.6	262143	143.95
Nov	28.1	7.9	32750	17	247095	159.71
Dic	29.8	7.9	29648	21	271691	177.53
Total general	29.8	7.7	201336	163	1307475	773.3

Anexos J

SKETCH (CÓDIGO) DEL SISTEMA

A) SKETCH (CÓDIGO) DEL SISTEMA

1. Comentario IoT Cloud y variables

```
/*
  Sketch generated by the Arduino IoT Cloud Thing "Untitled"
  https://create.arduino.cc/cloud/things/e1302acb-b80d-4f26-ad76-
e311b3b3ef35

  Arduino IoT Cloud Variables description
  The following variables are automatically generated and updated
  when changes are made to the Thing

  float am_humedad;
  float am_temp;
  float flujo;
  float flujototal;
  float humedad;
  float temperatura;
  bool valvel;

  Variables which are marked as READ/WRITE in the Cloud Thing will also
  have
  functions which are called when their values are changed from the
  Dashboard.
*/
```

2. Cabecera del proyecto

```
/******
/*  PROYECTO: TH_CLOUD
*/
/*  DESCRIPCIÓN: Lectura de Temperatura y humedad por RS485, flujo y
*/
/*                control de electroválvulas.
*/
/*  AUTOR: Luis Rivera H.
*/
/*  FECHA: 03/07/25
*/
/*  CONEXIONES:
*/
/*                MAX485_DE --> 13 ESP32
*/
/*                MAX485_RE --> 14 ESP32
*/
/*                MAX485_DI --> 17 ESP32
*/
/*                MAX485_RO --> 16 ESP32
*/
/*                YF-S201  --> 19 ESP32
*/
/*                OUT_Hum_LOW --> 23 ESP32
*/
/*                DHT22    -->  4 ESP32
*/
/*                OLED I2C DATA --> 21 ESP32
*/
/*                OLED I2C SCL  --> 22 ESP32
*/
/******
```

3. Bibliotecas (#include)

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <HardwareSerial.h>
#include <EEPROM.h>
#include "DHT.h"
```

```
#include "thingProperties.h"
```

4. Configuración OLED y Pines

```
// Configuración OLED
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define OLED_RESET -1
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);

//-----Configuración pulsos-----

// Pines
#define FLOW_SENSOR_PIN 19 // Sensor YF-S201
#define SAVE_BUTTON_PIN 36 // Botón guardar registros
#define NAV_BUTTON_PIN 34 // Botón navegar registros

#define Valve 23 // salida para activar la válvula

/////-----humedad de medio ambiente-----
#define DHTPIN 4 // Pin donde está conectado el sensor GPIO4 ESP32

// #define DHTTYPE DHT11 // Descomentar si se usa el DHT 11
#define DHTTYPE DHT22 // Sensor DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```

5. Umbrales de humedad y parámetros del sensor

```
// -----Umbrales de humedad-----
#define Humedad_baja 23 // Humedad mínima para activar válvula -->
configurar
#define Humedad_alta 31 // Humedad máxima para desactivar válvula -->
configurar
//-----

// -----Parámetros sensor-----
const float FACTOR_K = 7.5; // 7.5 pulsos litro/min
const long DEBOUNCE_DELAY = 300; // ms antirrebote
const long STORE_INTERVAL = 1000; // Almacenar cada 1 segundo
//-----
```

6. Variables globales y EEPROM

```
// Variables de flujo
volatile unsigned long pulseCount = 0;

float flowRate_Lh = 0.0;
float totalFlow = 0.0;

long dt = 0; // variación de tiempo por cada bucle
long t0 = 0; // millis() del bucle anterior

unsigned long lastTime = 0;
unsigned long lastStoreTime = 0;
```

```

// Almacenamiento EEPROM
#define EEPROM_SIZE      128
#define MAX_SAVED        10

// Direcciones EEPROM
#define TOTAL_FLOW_ADDR  64  // 4 bytes (float)
#define SAVED_COUNT_ADDR 68  // 1 byte (int)
#define SAVED_DATA_ADDR  72  // 10*4 bytes (float[10])

float savedFlows[10];
int currentIndex = 0;
int savedCount   = 0;

bool showingSaved    = false;
unsigned long lastButtonPress = 0;
bool saveFeedback    = false;
unsigned long feedbackStartTime = 0;

```

7. Interrupción de flujo (ISR) y validación

```

void IRAM_ATTR pulseCounter() {
    pulseCount++;
}

bool isValidFloat(float value) {
    return !isnan(value) && isfinite(value);
}

```

8. Configuración RS485 / MAX485

```

// Configuración MAX485 (ESP32)
#define MAX485_DE 13  // Pin de habilitación de transmisión
#define MAX485_RE 14  // Pin de habilitación de recepción
#define MAX485_DI 17  // Pin de datos de entrada (TX del ESP32)
#define MAX485_RO 16  // Pin de datos de salida (RX del ESP32)

// Comando Modbus para leer temperatura y humedad
byte tempCommand[] = {0x01, 0x03, 0x00, 0x01, 0x00, 0x01, 0xD5, 0xCA};
// Temperatura (reg 0x0001)
byte humCommand[]  = {0x01, 0x03, 0x00, 0x00, 0x00, 0x01, 0x84, 0x0A};
// Humedad (reg 0x0000)

// Configuración UART2 del ESP32 para RS485
HardwareSerial rs485(2); // Usar UART2 (pines RX2=16, TX2=17)

float temperature, humidity;

```

9. setup()

```

void setup() {
    dht.begin();
    t0 = millis();

    // Inicializar EEPROM
    EEPROM.begin(EEPROM_SIZE);

    /* Borra (*) para borrar la memoria — descomentar solo para resetear
    for(int i = 0; i < EEPROM_SIZE; i++) { EEPROM.write(i, 0xFF); }
    */

    // Cargar con protección NaN
    EEPROM.get(TOTAL_FLOW_ADDR, totalFlow);
}

```

```

if (!isValidFloat(totalFlow)) {
    totalFlow = 0.0;
    EEPROM.put(TOTAL_FLOW_ADDR, totalFlow);
}

savedCount = EEPROM.read(SAVED_COUNT_ADDR);
if (savedCount < 0 || savedCount > 10) savedCount = 0;

for (int i = 0; i < savedCount; i++) {
    EEPROM.get(SAVED_DATA_ADDR + (i * 4), savedFlows[i]);
    if (!isValidFloat(savedFlows[i])) savedFlows[i] = 0.0;
}

Serial.begin(4800); // Monitor serial a 4800 baudios
rs485.begin(4800, SERIAL_8N1, MAX485_RO, MAX485_DI);

// Configurar interrupción
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(FLOW_SENSOR_PIN), pulseCounter,
RISING);

// Configurar pines
pinMode(MAX485_DE, OUTPUT);
pinMode(MAX485_RE, OUTPUT);
pinMode(FLOW_SENSOR_PIN, INPUT_PULLUP);
pinMode(SAVE_BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP);
pinMode(NAV_BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP);
pinMode(Valve, OUTPUT);
digitalWrite(MAX485_DE, LOW);
digitalWrite(MAX485_RE, LOW);

delay(1500);

// Conectar a Arduino IoT Cloud
initProperties();
ArduinoCloud.begin(ArduinoIoTPreferredConnection);
setDebugMessageLevel(2);
ArduinoCloud.printDebugInfo();

// Inicializar OLED
Wire.begin(21, 22);
if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
    Serial.println("Error OLED");
    while (true);
}
display.clearDisplay();
display.setTextSize(1);
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
display.setCursor(0, 0);
display.println("Sistema iniciado");
display.print("Total cargado: ");
display.print(totalFlow, 3);
display.display();
delay(1000);
}

```

10. loop()

```

void loop() {
    ArduinoCloud.update();

    float h = dht.readHumidity(); // Leemos la Humedad

```



```

float temp_ma = dht.readTemperature(); // Leemos la temperatura en °C
unsigned long currentMillis = millis();

// Calcular flujo cada segundo
if (currentMillis - lastTime >= 1000) {
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(FLOW_SENSOR_PIN));
    flowRate_Lh = (pulseCount) / FACTOR_K;
    dt = millis() - t0; // calculamos la variación de tiempo
    t0 = millis();
    totalFlow = totalFlow + (flowRate_Lh / 60) * (dt / 1000); //
    volumen(L)=caudal(L/s)*tiempo(s)
    pulseCount = 0;
    lastTime = currentMillis;
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(FLOW_SENSOR_PIN), pulseCounter,
RISING);
}

// Almacenar total acumulado periódicamente
if (currentMillis - lastStoreTime >= STORE_INTERVAL) {
    storeTotalFlow();
    lastStoreTime = currentMillis;
}

handleButtons(); // Manejar botones
updateDisplay(); // Actualizar pantalla

temperature = readSensor(tempCommand, sizeof(tempCommand));
humidity     = readSensor(humCommand, sizeof(humCommand));

// Copiar datos para Cloud
temperatura = temperature;
humedad     = humidity;
flujo       = flowRate_Lh;
flujototal  = (totalFlow - (totalFlow * 0.42045)); // Calibrar - valor
promedio
am_temp     = temp_ma;
am_humedad  = h;
valve1      = Valve;

// Mostrar en monitor serial
Serial.print("Humedad "); Serial.print(h); Serial.print("
%t");
Serial.print("Temperatura: "); Serial.print(temp_ma);
Serial.print(" *C ");
Serial.print("Caudal: "); Serial.print(flowRate_Lh, 2);
Serial.print("L/m");
Serial.print("Litros Total: "); Serial.print(flujototal, 2);
Serial.print(" L ");
Serial.print("Temperatura: "); Serial.print(temperature, 2);
Serial.print(" °C | Humedad: ");
Serial.print(humidity, 2); Serial.println(" %");

// Control de válvula según humedad del suelo
if (humedad <= Humedad_baja) digitalWrite(Valve, HIGH);
else if (humedad >= Humedad_alta) digitalWrite(Valve, LOW);

Serial.print("Proyecto1 Listo: ");
delay(1000);
}

```

11. store Total Flow () y save Current Data ()

```
void storeTotalFlow() {
    EEPROM.put(TOTAL_FLOW_ADDR, totalFlow);
    if (EEPROM.commit()) {
        Serial.print("Total almacenado: ");
        Serial.println(totalFlow, 3);
    }
}

void saveCurrentData() {
    if (savedCount < MAX_SAVED) {
        savedFlows[savedCount] = totalFlow;
        EEPROM.put(SAVED_DATA_ADDR + (savedCount * sizeof(float)),
totalFlow);
        savedCount++;
        EEPROM.write(SAVED_COUNT_ADDR, savedCount);
        if (EEPROM.commit()) {
            Serial.print("Registro guardado (");
            Serial.print(savedCount);
            Serial.print("): ");
            Serial.println(totalFlow, 3);
            saveFeedback      = true;
            feedbackStartTime = millis();
            showingSaved      = true;
            currentIndex       = savedCount - 1;
        }
    }
}
```

12. handle Buttons ()

```
void handleButtons() {
    unsigned long currentMillis = millis();

    // Botón Guardar (crear nuevo registro)
    if (digitalRead(SAVE_BUTTON_PIN) == LOW &&
        currentMillis - lastButtonPress > DEBOUNCE_DELAY) {
        lastButtonPress = currentMillis;
        saveCurrentData();
    }

    // Botón Navegar (entre registros)
    if (digitalRead(NAV_BUTTON_PIN) == LOW &&
        currentMillis - lastButtonPress > DEBOUNCE_DELAY) {
        lastButtonPress = currentMillis;
        if (savedCount > 0) {
            showingSaved = true;
            currentIndex = (currentIndex + 1) % savedCount;
        }
    }

    // Ocultar feedback después de 2 segundos
    if (saveFeedback && currentMillis - feedbackStartTime > 2000) {
        saveFeedback = false;
    }
}
```

13. update Display ()

```
void updateDisplay() {
    display.clearDisplay();
}
```

```

// Línea 1: Flujo actual
display.setCursor(0, 0);
display.print("Flujo: "); display.print(flowRate_Lh, 1);
display.print(" L/h");

// Línea 2: Flujo total acumulado
display.setCursor(0, 13);
display.print("Total: "); display.print(totalFlow, 3);
display.print(" L");

// Línea 3: Número de registro
display.setCursor(0, 26);
display.print("Registro: ");
display.print(currentIndex + 1);
display.print("/"); display.print(savedCount);

// Línea 4: Valor del registro actual
display.setCursor(0, 39);
if (showingSaved && savedCount > 0) {
    display.print("Valor: "); display.print(savedFlows[currentIndex],
3); display.print(" L");
} else {
    display.print("Valor: --");
}

// Línea 5: Feedback o instrucciones
display.setCursor(0, 52);
if (saveFeedback) {
    display.print(">> REGISTRO GUARDADO <<");
} else {
    display.print("G:Guardar N:Nav");
}
display.display();
}

```

14. Read sensor () y Modbus RTU

```

float readSensor(byte *command, byte size) {
    // Habilitar transmisión
    digitalWrite(MAX485_DE, HIGH);
    digitalWrite(MAX485_RE, HIGH);
    delay(1);

    // Enviar comando Modbus
    for (byte i = 0; i < size; i++) {
        rs485.write(command[i]);
    }
    rs485.flush();

    // Habilitar recepción
    digitalWrite(MAX485_DE, LOW);
    digitalWrite(MAX485_RE, LOW);
    delay(10);

    // Leer respuesta (7 bytes: addr+func+byteCount+2data+2CRC)
    byte response[7];
    byte i = 0;
    unsigned long startTime = millis();

    while ((millis() - startTime) < 500 && i < 7) { // Timeout 500ms
        if (rs485.available()) {

```

```

        response[i] = rs485.read();
        i++;
    }

    // Procesar respuesta
    if (i >= 7) {
        int16_t rawValue = (response[3] << 8) | response[4];
        return rawValue / 10.0; // Ajuste de escala según sensor
    }
    return -99.9; // Valor de error
}

```

15. Callbacks Arduino IoT Cloud

```

/* Since Valve is READ_WRITE variable, onValveChange() is
   executed every time a new value is received from IoT Cloud. */
void onValveChange() {
    // Add your code here to act upon Valve change
}

/* Since Valvel is READ_WRITE variable, onValvelChange() is
   executed every time a new value is received from IoT Cloud. */
void onValvelChange() {
    if (valvel == true)
        digitalWrite(Valve, HIGH);
    else
        digitalWrite(Valve, LOW);
    // Add your code here to act upon Valvel change
}

```

Anexos K

RESULTADOS

PRINCIPALES DE

MODELAMIENTO

AGRONÓMICO



GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO
GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA
RED HIDROMETEOROLOGICA-OPEMAN



REGISTRO DE TEMPERATURA MEDIA MENSUALES °C

Estación : **INIA-CANAAN**
Codigo : 031

Latitud : 13° 10' 0.06" S
Longitud : 74° 12' 22.92" W
Altitud : 2735 msnm

Dpto : AYACUCHO
Prov : HUAMANGA
Dist : ANDRES A.C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2013	17.3	17.4	17.6	17.4	16.5	15.9	14.8	15.9	17.4	17.8	18.4	17.0
2014	17.4	17.9	17.1	17.1	17.0	16.5	15.8	16.4	16.9	17.7	18.9	18.2
2015	17.0	17.6	17.6	17.4	17.6	15.9	15.4	16.7	18.1	18.2	18.9	17.8
2016	19.1	18.1	17.7	18.3	17.2	16.0	15.5	17.2	18.1	18.2	18.8	18.3
2017	17.2	17.0	17.1	17.1	16.7	16.4	15.2	17.1	18.0	18.2	18.7	18.1
2018	18.4	17.5	17.4	17.1	16.4	15.4	15.4	15.8	18.0	18.0	19.2	17.9
2019	18.4	17.1	17.4	17.2	16.6	15.9	15.7	16.0	17.3	18.0	18.5	17.8
2020	17.7	18.0	17.8	16.9	16.8	16.5	16.2	17.0	17.0	17.3	19.1	18.0
2021	17.6	17.5	17.0	16.8	15.9	16.0	15.6	17.1	17.6	19.1	18.3	18.3
2022	17.5	17.1	16.8	16.5	16.1	15.4	15.8	16.7	18.2	19.1	19.2	18.1
2023	17.1	16.8	17.0	17.5	16.7	15.7	16.4	17.3	18.2	19.3	19.2	18.6
2024	18.3	18.0	17.9	17.8	17.7	15.9	16.1	17.4	17.9	18.7	18.6	17.9
MEDIA	17.7	17.5	17.4	17.2	16.8	15.9	15.6	16.7	17.7	18.3	18.8	18.0

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Gobierno Regional de Ayacucho



GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO
GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA
RED HIDROMETEOROLOGICA-OPEMAN



REGISTRO DE TEMPERATURAS MINIMAS MENSUALES °C

Estación : INIA-CANAAN

Codigo :031

Latitud : 13° 10' 0.06" S

Longitud : 74° 12' 22.92" W

Altitud : 2735 msnm

Dpto: AYACUCHO

Prov: HUAMANGA

Dist: ANDRES A.C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2013	6.6	10.0	7.2	6.8	5.8	4.8	4.4	4.8	6.2	8.0	8.0	8.2
2014	7.6	9.0	8.2	7.2	6.0	4.6	4.4	4.2	6.0	7.8	8.4	9.0
2015	7.2	8.2	6.6	7.8	5.4	4.2	3.0	6.0	6.8	6.8	7.2	8.8
2016	9.0	9.0	6.4	7.2	5.6	4.6	4.0	5.8	8.0	6.2	7.0	5.2
2017	9.0	8.6	8.8	6.2	7.8	5.6	4.0	5.2	8.8	6.0	4.8	6.2
2018	8.4	9.8	7.0	7.6	5.4	3.7	4.2	5.6	6.4	7.4	9.2	6.6
2019	10.2	8.2	9.2	5.8	5.4	3.6	3.0	3.8	7.0	6.6	8.8	9.6
2020	7.4	9.0	7.6	6.3	5.4	5.2	5.0	3.8	6.6	7.4	8.0	9.6
2021	7.4	6.8	8.2	7.6	5.3	6.2	4.0	5.0	8.0	8.4	8.8	8.8
2022	8.4	9.2	6.4	4.2	3.4	2.4	4.6	4.6	7.8	5.6	7.8	7.4
2023	8.2	9.2	8.2	7.2	6.8	4.6	5.2	4.4	8.2	9.0	9.0	8.8
2024	8.4	7.0	9.2	7.2	6.8	3.2	3.0	6.0	7.2	8.4	9.2	8.8
MIN	6.6	6.8	6.4	4.2	3.4	2.4	3.0	3.8	6.0	5.6	4.8	5.2

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Gobierno Regional de Ayacucho



GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO
GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA
RED HIDROMETEOROLOGICA-OPEMAN



REGISTRO DE TEMPERATURAS MAXIMAS MENSUALES °C

Estación : INIA-CANAAN

Código :031

Latitud : 13° 10' 0.06" S

Longitud : 74° 12' 22.92" W

Altitud : 2735 msnm

Dpto: AYACUCHO

Prov: HUAMANGA

Dist: ANDRES A.C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2013	25.8	25.4	26.6	27.8	28.2	25.4	25.0	28.0	27.6	28.4	28.6	28.0
2014	27.8	27.2	28.2	27.0	27.0	27.8	26.0	27.0	28.2	28.4	29.8	28.8
2015	28.2	28.2	27.4	27.2	28.8	27.2	27.8	29.2	28.0	29.4	30.6	28.8
2016	30.0	27.0	29.4	29.0	28.4	27.2	27.0	28.4	29.2	29.2	30.0	29.6
2017	26.2	27.0	25.0	26.4	26.4	26.2	26.6	27.2	28.2	31.4	30.2	31.2
2018	27.4	26.2	26.4	26.6	26.4	25.8	28.2	26.0	28.6	28.6	30.4	29.8
2019	29.6	25.0	25.6	28.2	27.0	29.0	28.2	27.6	29.8	28.0	28.2	27.4
2020	27.6	27.2	28.0	27.4	26.8	27.4	29.6	27.4	27.4	29.6	29.8	30.2
2021	26.6	26.2	25.2	25.8	26.0	26.2	26.4	27.4	27.2	30.6	30.2	28.6
2022	28.2	27.0	25.4	27.2	26.8	26.6	27.2	27.8	29.0	29.8	30.2	29.6
2023	28.2	26.0	26.6	29.6	27.0	26.2	27.6	30.0	29.0	30.4	29.8	28.6
2024	28.0	28.6	27.0	27.6	28.2	26.8	26.4	28.4	28.6	29.6	29.6	28.0
MAX	30.0	28.6	29.4	29.6	28.8	29.0	29.6	30.0	29.8	31.4	30.6	31.2

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Gobierno Regional de Ayacucho



GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO
GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA
RED HIDROMETEOROLOGICA-OPEMAN



REGISTRO DE HUMEDAD RELATIVA MENSUAL %

Estación : **INIA-CANAAN**
Código : 031

Latitud : 13° 10' 0.06" S
Longitud : 74° 12' 22.92" W
Altitud : 2735 msnm

Dpto: AYACUCHO
Prov: HUAMANGA
Dist: ANDRES A.C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2013	82.1	83.9	82.3	75.0	75.6	74.2	76.0	71.1	67.8	74.1	71.5	79.8
2014	81.7	82.3	84.4	78.0	75.2	72.5	73.6	70.5	79.3	72.4	69.9	81.7
2015	82.6	85.7	87.1	85.1	80.9	82.3	81.0	80.0	76.9	80.8	81.0	85.8
2016	81.5	89.7	88.5	85.1	80.6	84.1	82.5	81.6	78.0	79.6	77.0	81.8
2017	87.9	85.5	89.7	85.2	34.3	83.4	85.1	78.3	75.5	78.1	81.2	81.9
2018	79.9	80.3	81.1	79.6	83.6	81.3	77.8	80.1	75.2	82.0	77.0	78.1
2019	83.4	87.9	89.0	85.9	84.7	82.8	82.4	79.5	81.1	78.8	80.3	84.3
2020	83.6	84.6	83.7	79.6	81.3	81.2	80.3	79.5	81.2	83.4	81.2	86.1
2021	88.6	88.5	90.0	89.9	88.4	86.6	85.1	84.1	77.9	76.0	78.1	79.8
2022	84.6	87.8	89.1	87.4	82.5	81.0	77.9	78.4	76.5	73.1	74.6	80.2
2023	83.9	89.0	87.5	83.7	83.9	79.8	77.8	76.3	77.2	78.0	79.9	84.3
2024	86.1	85.5	88.8	85.7	81.9	81.2	78.9	78.8	78.8	78.2	80.5	83.6
PROM	83.8	85.9	86.8	83.4	77.7	80.9	79.9	78.2	77.1	77.9	77.7	82.3
Max	88.6	89.7	90.0	89.9	88.4	86.6	85.1	84.1	81.2	83.4	81.2	86.1
Min	79.9	80.3	81.1	75.0	34.3	72.5	73.6	70.5	67.8	72.4	69.9	78.1

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Gobierno Regional de Ayacucho



GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO
GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA
RED HIDROMETEOROLOGICA



REGISTRO DE VELOCIDAD DE VIENTO MENSUAL m/s

Estación : **INIA-CANAAN**
Código :031

Latitud : 13° 10' 0.06" S
Longitud : 74° 12' 22.92" W
Altitud : 2735 msnm

Dpto: AYACUCHO
Prov: HUAMANGA
Dist: ANDRES A.C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2011	1.9	1.5	1.0	1.5	1.7	1.6	1.6	1.8	2.1	2.3	2.4	2.2
2012	1.9	1.5	1.0	1.5	1.7	1.6	1.6	1.8	2.1	2.3	2.4	2.2
2013	1.9	1.9	2.0	1.9	1.9	2.2	2.0	1.8	2.3	2.2	2.8	2.0
2014	2.1	1.8	1.8	1.8	1.5	1.6	1.4	1.6	1.5	1.8	2.3	2.2
2015	2.4	2.0	2.4	2.1	2.5	1.8	1.7	2.3	2.2	2.0	2.4	2.0
2016	2.4	2.0	1.9	2.3	1.7	1.7	1.4	1.9	2.4	2.5	2.2	2.2
2017	2.2	1.8	2.4	2.0	1.9	1.7	1.9	1.8	1.9	2.6	3.0	2.3
2018	2.3	1.9	1.8	1.6	1.7	1.4	1.6	2.2	1.7	2.1	2.0	2.6
2019	2.1	2.5	1.8	1.7	1.5	1.3	1.7	1.4	1.8	2.4	2.9	2.2
2020	1.9	2.1	2.0	1.8	1.8	1.5	1.8	1.7	1.9	2.1	2.2	2.7
2021	2.0	2.7	2.3	1.9	1.8	1.6	1.4	1.9	1.9	3.1	2.4	2.6
2022	1.8	1.7	1.3	1.1	1.1	1.2	0.8	1.2	1.5	2.7	2.6	2.6
MEDIA	2.1	2.0	1.8	1.8	1.7	1.6	1.6	1.8	1.9	2.3	2.5	2.3

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Gobierno Regional de Ayacucho



GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO
GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA
RED HIDROMETEOROLOGICA



REGISTRO DE PRECIPITACIONES MENSUALES (mm)

Estación : **INIA-CANAAN**
Código : 031

Latitud : 13° 10' 0.06" S
Longitud : 74° 12' 22.92" W
Altitud : 2735 msnm

Dpto: AYACUCHO
Prov: HUAMANGA
Dist: ANDRES A.C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2011	124.8	191.6	134.3	46.6	14.1	0.3	12.0	0.9	37.0	49.3	67.3	61.0	739.2
2012	53.1	153.9	110.7	74.3	2.4	10.7	2.4	2.1	28.7	27.2	54.7	152.7	672.9
2013	99.4	108.8	70.6	13.9	19.3	2.8	8.4	34.5	14.9	51.7	60.1	127.7	612.1
2014	117.2	71.0	118.9	31.4	15.2	0.0	4.2	3.1	53.5	22.6	36.7	54.9	528.7
2015	178.2	116.6	62.8	11.7	5.6	0.0	6.6	18.6	8.6	32.6	31.8	105.4	578.5
2016	33.1	152.9	33.3	30.7	9.8	0.0	7.9	5.3	8.4	34.7	26.6	51.4	394.1
2017	109.4	125.5	103.7	44.2	15.8	0.0	11.8	9.8	12.6	34.3	19.8	77.4	564.3
2018	88.8	87.0	74.9	30.3	23.8	7.0	19.1	27.0	14.4	61.6	44.7	69.6	548.2
2019	79.2	138.9	121.0	34.9	4.8	0.5	14.6	0.0	4.7	26.0	42.5	138.3	605.4
2020	56.7	61.4	63.6	15.7	13.5	0.0	0.0	3.0	18.6	16.9	12.2	74.7	336.3
2021	88.8	82.9	98.9	137.7	11.8	1.4	3.4	3.4	1.6	24.3	36.8	32.2	523.2
2022	107.6	97.3	120.5	37.2	1.7	3.8	1.1	7.4	13.3	0.9	29.7	73.0	493.5
2023	121.8	159.2	67.3	24.6	25.8	0.0	0.0	1.2	17.4	26.0	42.8	93.0	579.1
2024	80.1	157.8	194.6	21.0	43.3	17.8	0.0	2.1	9.6	29.6	93.3	82.8	732.0
MEDIA	95.6	121.8	98.2	39.6	14.8	3.2	6.5	8.5	17.4	31.3	42.8	85.3	564.8
Max	178.2	191.6	194.6	137.7	43.3	17.8	19.1	34.5	53.5	61.6	93.3	152.7	739.2
Min	33.1	61.4	33.3	11.7	1.7	0.0	0.0	0.0	1.6	0.9	12.2	32.2	336.3
PE 75% USDA	69.3	76.7	60.7	21.1	6.6	-	1.4	2.1	8.7	23.7	28.8	56.8	-

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Gobierno Regional de Ayacucho

B) CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION DE REFERENCIA (ET_o)

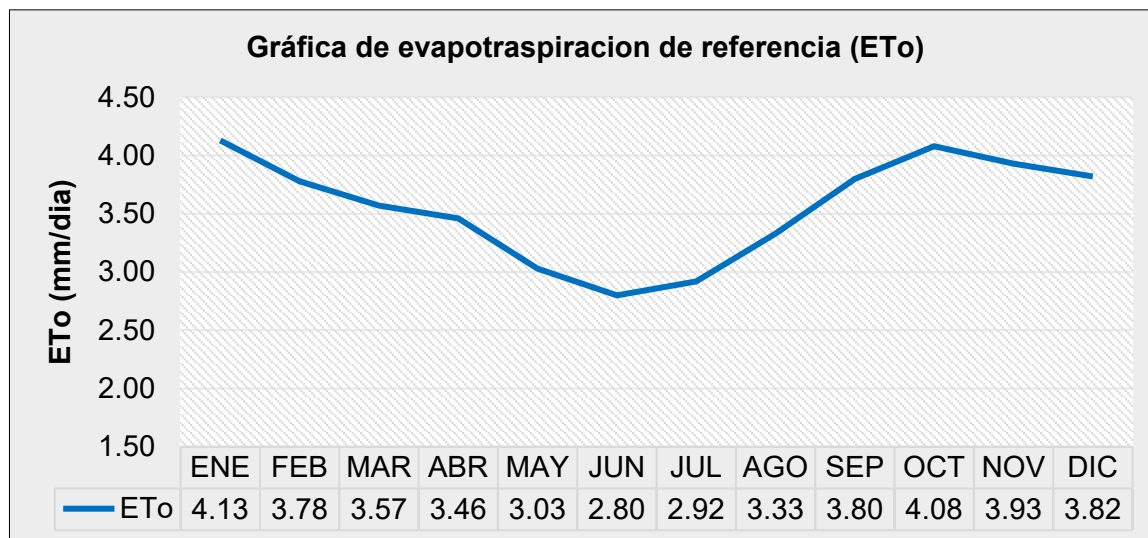
ESTACIÓN HIDROMETEREOLOGICA								
Departamento: Ayacucho		Provincia: Huamanga		Estación: INIA-CANAAN				
Latitud: : 13° 10' 0.06" S		Longitud: : 74° 12' 22.92" W		Altitud: 2735		m.s.n.m		
Meses	Días	Temp. Mínima	Temp. Máxima	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ET _o
		°C	°C	%	m/s	N	MJ/m²/día	mm/día
Enero	31	6.6	30	84	2.1	6.77	20.90	4.13
Febrero	28	6.8	28.6	86	2.0	5.87	19.30	3.78
Marzo	31	6.4	29.4	87	1.8	5.74	18.20	3.57
Abril	30	4.2	29.6	83	1.8	7.24	18.80	3.46
Mayo	31	3.4	28.8	78	1.7	8.08	18.00	3.03
Junio	30	2.4	29	81	1.6	8.50	17.40	2.80
Julio	31	3	29.6	80	1.6	8.46	17.80	2.92
Agosto	31	3.8	30	78	1.8	8.22	19.20	3.33
Septiembre	30	6	29.8	77	1.9	7.88	20.70	3.80
Octubre	31	5.6	31.4	78	2.3	7.21	21.00	4.08
Noviembre	30	4.8	30.6	78	2.5	6.33	20.00	3.93
Diciembre	31	5.2	31.2	82	2.3	5.68	19.10	3.82
Promedio		4.9	29.8	81	2	7	19.2	3.55

Fuente: CLIMWAT 2.0 for CROPWAT VERSION 8.0

C) EVAPOTRASPIRACION DE REFERENCIA (ET_o) Y PRECIPITACIÓN EFECTIVA (PE)

ET _o	MESES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
mm/día	4.13	3.78	3.57	3.46	3.03	2.80	2.92	3.33	3.80	4.08	3.93	3.82
mm/mes	128.0	105.8	110.7	103.8	93.9	84.0	90.5	103.2	114.0	126.5	117.9	118.4

Fuente: CROPWAT VERSION 8.0



Fuente: CROPWAT VERSION 8.0

PRECIPITACIÓN EFECTIVA (PE)

MESES	Precipit. Total	Precipit. Efectiva
	(mm)	(mm)
ENE	95.6	52.5
FEB	121.8	73.4
MAR	98.2	54.6
ABR	39.6	13.8
MAY	14.8	0.0
JUN	3.2	0.0
JUL	6.5	0.0
AGO	8.5	0.0
SEP	17.4	0.4
OCT	31.3	8.8
NOV	42.8	15.7
DIC	85.3	44.2
TOTAL	565.0	263.4

Fuente: Metodología Cálculo PE - Metodología de Cálculo FAO - AGLW, Software Cropwat Version 8.0

ETAPA DE GERMINACIÓN

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	36.1%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	2.04	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	25.20	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.38%	29.4%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	2.40	mm/día

Frecuencia de riego	5.00	días
Lámina de riego recogida	25.20	mm/riego
Tiempo de riego	2.02	horas
Tiempo de riego	120.97	minutos

ETAPA DE EMERGENCIA

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	35.2%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	3.98	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	24.57	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.51%	29.6%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	4.68	mm/día

Frecuencia de riego	6.00	días
Lámina de riego recogida	24.57	mm/riego
Tiempo de riego	1.97	horas
Tiempo de riego	117.96	minutos

ETAPA DE 2 HOJAS COTILEDONES

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	36.0%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	2.85	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	25.13	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.40%	29.5%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	3.35	mm/día

Frecuencia de riego	7.00	días
Lámina de riego recogida	25.13	mm/riego
Tiempo de riego	2.01	horas
Tiempo de riego	120.60	minutos

ETAPA DE 2 HOJAS VERDADERAS

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	33.7%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	2.97	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	23.55	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.73%	29.8%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	3.49	mm/día

Frecuencia de riego	8.00	días
Lámina de riego recogida	23.55	mm/riego
Tiempo de riego	1.88	horas
Tiempo de riego	113.03	minutos

ETAPA DE 4 HOJAS VERDADERAS

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	34.8%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	3.44	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	24.29	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.57%	29.7%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	4.05	mm/día

Frecuencia de riego	8.00	días
Lámina de riego recogida	24.29	mm/riego
Tiempo de riego	1.94	horas
Tiempo de riego	116.58	minutos

ETAPA DE INICIO DE PANOJAMIENTO

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	33.1%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	3.74	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	23.09	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.83%	30.0%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	4.40	mm/día

Frecuencia de riego	7.00	días
Lámina de riego recogida	23.09	mm/riego
Tiempo de riego	1.85	horas
Tiempo de riego	110.82	minutos

ETAPA DE PANOJAMIENTO

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	35.6%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	4.69	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	24.82	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.46%	29.5%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	5.51	mm/día

Frecuencia de riego	6.00	días
Lámina de riego recogida	24.82	mm/riego
Tiempo de riego	1.99	horas
Tiempo de riego	119.13	minutos

ETAPA DE INICIO DE FLORACIÓN

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	36.5%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	5.78	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	25.48	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.32%	29.4%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	6.80	mm/día

Frecuencia de riego	5.00	días
Lámina de riego recogida	25.48	mm/riego
Tiempo de riego	2.04	horas
Tiempo de riego	122.31	minutos

ETAPA DE FLORACIÓN O ANTESIS I

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	32.8%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	6.48	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	22.90	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.86%	30.0%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	7.63	mm/día

Frecuencia de riego	4.00	días
Lámina de riego recogida	22.90	mm/riego
Tiempo de riego	1.83	horas
Tiempo de riego	109.91	minutos

ETAPA DE FLORACIÓN O ANTESIS II

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	34.2%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	6.77	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	23.88	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.66%	29.8%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	7.96	mm/día

Frecuencia de riego	4.00	días
Lámina de riego recogida	23.88	mm/riego
Tiempo de riego	1.91	horas
Tiempo de riego	114.61	minutos

ETAPA DE INICIO DE GRANO

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	36.1%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	7.14	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	25.20	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.38%	29.4%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada)	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	8.40	mm/día

Frecuencia de riego	4.00	días
Lámina de riego recogida	25.20	mm/riego
Tiempo de riego	2.02	horas
Tiempo de riego	120.97	minutos

ETAPA DE FIN DE GRANO LECHOSO

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	36.3%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	5.73	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	25.31	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.36%	29.4%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada)	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	6.75	mm/día

Frecuencia de riego	5.00	días
Lámina de riego recogida	25.31	mm/riego
Tiempo de riego	2.02	horas
Tiempo de riego	121.47	minutos

ETAPA DE GRANO PASTOSO

SUELOS		
ASPECTO	DATOS	UND
CC	30.65%	%HG
PMP	16.06%	%HG
Densidad	1.16	g/cm3
Profundidad efectiva de raíz	300	mm
TAW	43.77%	%
% Agotamiento (LARA) (TAW)	33.9%	%

RIEGO		
ASPECTO	DATOS	UND
Esp laterales	0.8	m
Esp emisores	0.2	m
Caudal por gotero	2	l/h
Presión de operación	2.5	mca

AMBIENTE		
ASPECTO	DATOS	UND
Área	0.0048	ha
Horas disponibles	12	ha
Demanda hídrica de diseño	4.47	mm/día
Eficiencia esperada	85%	%
Textura	Arcilloso	-

RESULTADOS

Lámina de llenada de suelos	69.81	mm
Lámina de reposición	23.67	mm

Referencia de humedad	%HG	%HV
CC	30.65%	35.6%
Momento de riego	25.70%	29.8%
PMP	16.06%	18.6%

% PAR (porcentaje de área regada	138%	%
Precipitación	12.5	mm/h
Demanda hídrica bruta	5.26	mm/día

Frecuencia de riego	6.00	días
Lámina de riego recogida	23.67	mm/riego
Tiempo de riego	1.89	horas
Tiempo de riego	113.60	minutos

**UNSC****FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS**

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. LUIS ALBERTO RIVERA HUAMANCUSI

R.D. N° 230-2026-UNSCH-FCA-D

En la ciudad de Ayacucho, a los diez días del mes de junio del año dos mil veintiséis, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el Dr. Lurquín Marino Zambrano Ochoa, Mtro. Carlos Augusto Castañeda Esquen como asesor, Ing. Eduardo Pacori Quispe y el Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Análisis comparativo del riego por goteo manual y automatizado en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en Canaán, Ayacucho - 2025**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola, presentado por el Bachiller **LUIS ALBERTO RIVERA HUAMANCUSI**.

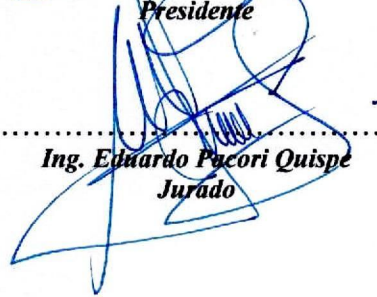
El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invito a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberacion y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Dr. Lurquín Marino Zambrano Ochoa	16	16	16	16
Mtro. Carlos Augusto Castañeda Esquen	18	17	18	18
Ing. Eduardo Pacori Quispe	17	17	17	17
Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla	16	16	16	16
PROMEDIO GENERAL				17

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.


.....
Dr. Lurquín Marino Zambrano Ochoa
Presidente


.....
Mtro. Carlos Augusto Castañeda Esquen
Asesor


.....
Ing. Eduardo Pacori Quispe
Jurado


.....
Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla
Jurado


.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por **R.D N° 213-2025-UNSCH-FCA-CF**; hace constar que el trabajo titulado;

Análisis comparativo del riego por goteo manual y automatizado en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) en Canaán, Ayacucho-2025

Autor : Luis Alberto Rivera Huamancusi
Asesor : Carlos Augusto Castañeda Esquen

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de tesis, aprobando mediante de RCU 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de diez **(10%)** de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajo estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con identificador de la entrega: 2985151233

Ayacucho, 17 de junio de 2026

Atentamente,



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias

Prof. Dr. Eleazar Chuchon Angulo

Análisis comparativo del riego por goteo manual y automatizado en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en Canaán, Ayacucho – 2025

por Luis Alberto RIVERA HUAMANCUSI

Fecha de entrega: 17-jun-2026 04:34p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2985151233

Nombre del archivo: Borrador.pdf (14.97M)

Total de palabras: 52324

Total de caracteres: 257698

Análisis comparativo del riego por goteo manual y automatizado en el cultivo de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) en Canaán, Ayacucho - 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	8%	3%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsch.edu.pe	2%
	Fuente de Internet	
2	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	2%
	Trabajo del estudiante	
3	Submitted to Universidad Tecnica De Ambato- Direccion de Investigacion y Desarrollo , DIDE	1%
	Trabajo del estudiante	
4	doczz.es	<1%
	Fuente de Internet	
5	hdl.handle.net	<1%
	Fuente de Internet	
6	uvadoc.uva.es	<1%
	Fuente de Internet	
7	repositorio.upt.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	dspace.ups.edu.ec	<1%
	Fuente de Internet	
9	1library.co	<1%
	Fuente de Internet	
10	repositorio.unp.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
11	repositorio.unap.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
12	repositorio.inia.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
13	core.ac.uk	<1%
	Fuente de Internet	
14	docslide.us	<1%
	Fuente de Internet	

15	www.revistas.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.upa.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	idoc.tips Fuente de Internet	<1 %
18	dspace.unica.cu Fuente de Internet	<1 %
19	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
20	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
21	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
23	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
24	Chirinos Ortiz, Teófilo. "Efecto de la dosis de riego en el consumo y eficiencia del uso del agua de un ecotipo local de quinua (<i>Chenopodium Quinoa</i> Willd) en lisímetros de drenaje en la Comunidad de Ccaje – Juli – Chucuito – Puno, campaña 2015 - 2016", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru) Publicación	<1 %
25	Submitted to Fundacion Universitaria Juan de Castellanos Trabajo del estudiante	<1 %
26	dokumen.pub Fuente de Internet	<1 %
27	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %
28	fr.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
29	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

<1 %

30 repositorio.unicauca.edu.co:8080

Fuente de Internet

<1 %

31 Ladino Moreno, Edgar Orlando. "Estimación y Localización de Fugas en Sistemas de Distribución de Agua a Través de Algoritmos de Optimización Combinatoria", Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

Publicación

<1 %

32 Submitted to Universidad Estatal Amazonica-

Trabajo del estudiante

<1 %

33 es.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

34 naylampmechatronics.com

Fuente de Internet

<1 %

35 repositorio.umsa.bo

Fuente de Internet

<1 %

36 Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

<1 %

37 tesis.pucp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

38 Submitted to Escuela Politecnica Nacional

Trabajo del estudiante

<1 %

39 Submitted to Universidad Rey Juan Carlos

Trabajo del estudiante

<1 %

40 www.studysmarter.es

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Análisis comparativo del riego por goteo manual y automatizado en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en Canaán, Ayacucho – 2025

Comparative analysis of manual and automated drip irrigation in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivation in Canaán, Ayacucho – 2025

Luis Alberto Rivera Huamancusi¹

luis.rivera.21@unsch.edu.pe

Carlos Augusto Castañeda Esquen¹

carlos.castaneda@unsch.edu.pe

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar comparativamente la eficiencia del riego por goteo manual y automatizado mediante energía fotovoltaica en el cultivo de quinua en el Centro Experimental Canaán, Ayacucho. La metodología consistió en un diseño experimental de enfoque cuantitativo, evaluando el rendimiento de grano de la variedad Salcedo INIA, la eficiencia en el uso del agua y la rentabilidad financiera de ambos sistemas de riego. Los resultados mostraron que el sistema automatizado alcanzó un rendimiento de 5,670.83 kg/ha, superior a los 5,412.50 kg/ha obtenidos con el sistema manual, representando un incremento del 4.77 %. Asimismo, la eficiencia en el uso del agua fue de 1.21 kg/m³ en el sistema automatizado y de 0.88 kg/m³ en el manual, evidenciando una mejora del 37.5 %, con volúmenes de agua aplicados de 4,677.5 m³/ha y 6,174.4 m³/ha, respectivamente. En el análisis financiero, aunque el sistema automatizado requirió una mayor inversión inicial de S/ 49,223 frente a S/ 45,216 del sistema manual, presentó mejores indicadores financieros, alcanzando un Valor Actual Neto (VAN) de S/ 198,123 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 131 %, mientras que el sistema manual obtuvo un VAN de S/ 132,580 y una TIR de 101 %. En conclusión, el riego automatizado mediante energía fotovoltaica mejoró el rendimiento del grano de cultivo y la eficiencia hídrica, constituyéndose como la alternativa más rentable y sostenible a mediano y largo plazo para la producción de quinua.

Palabras clave: riego por goteo, automatización, energía fotovoltaica, eficiencia hídrica, rendimiento de grano, análisis financiero.

ABSTRACT

The objective of this study was to comparatively analyze the efficiency of manual and automated drip irrigation using photovoltaic energy in quinoa cultivation at the Canaán Experimental Center, Ayacucho. The methodology consisted of an experimental design with a quantitative approach, evaluating the grain yield of the Salcedo INIA variety, water use efficiency, and the financial profitability of both irrigation systems. The results showed that the automated system achieved a yield of 5,670.83 kg/ha, which was superior to the 5,412.50 kg/ha obtained with the manual system, representing an increase of 4.77%. Furthermore, water use efficiency was 1.21 kg/m³ in the automated system and 0.88 kg/m³ in the manual system, demonstrating a 37.5% improvement, with applied water volumes of 4,677.5 m³/ha and 6,174.4 m³/ha, respectively. In the financial analysis, although the automated system required a higher initial investment of S/ 49,223 compared to S/ 45,216 for the manual system, it presented better financial indicators, reaching a Net Present Value (NPV) of S/ 198,123 and an Internal Rate of Return (IRR) of 131%, while the manual system obtained an NPV of S/ 132,580 and an IRR of 101%. In conclusion, automated irrigation using photovoltaic energy improved crop grain yield and water efficiency, proving to be the most profitable and sustainable alternative in the medium and long term for quinoa production.

Keywords: drip irrigation, irrigation automation, photovoltaic energy, water use efficiency, grain yield, financial analysis

INTRODUCCIÓN

La agricultura consume alrededor del 85% del agua dulce disponible a nivel mundial, y se prevé que este porcentaje continúe siendo predominante debido al incremento de la población y a la mayor demanda de alimentos. Por ello, resulta necesario implementar nuevas estrategias que permitan aprovechar este recurso hídrico de forma más responsable (Sushanth y Sujatha, 2018).

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo de gran importancia en el ámbito agrícola debido a su alto valor nutricional y su capacidad de adaptación a diferentes condiciones agroecológicas (Ccoyllar et al., 2021). Sin embargo, su rendimiento puede verse afectado por la escasez y la ineficiencia en el uso del agua, especialmente en zonas áridas o semiáridas como la región de Ayacucho (Tineo et al., 2021).

Los sistemas de riego tradicionales dependen de un operador para suministrar agua a los cultivos; sin embargo, presentan la desventaja de que no permiten determinar con precisión cuándo la planta realmente necesita riego y, además, demandan un alto consumo de mano de obra para su funcionamiento (Rajendrakumar et al., 2018).

En cambio, los sistemas de riego automatizados aplican estrategias clave para optimizar el uso del agua y disminuir la necesidad de trabajo manual. Por ello, según (Heble et al., 2018), es fundamental que la implementación de estas tecnologías sea de bajo costo, de modo que resulten accesibles para los agricultores.

En este contexto, el centro experimental de Canaán, en Ayacucho, se presenta como un escenario adecuado para hacer una comparativa al implementar el riego por goteo automatizado y riego manual.

La implementación de tecnologías que combinen el uso de energía solar y la automatización del riego por goteo tiene el potencial de reducir el consumo de agua y aumentar la eficiencia energética, aspectos críticos en regiones donde estos recursos son limitados (Valverde et al., 2022).

En este sentido, la automatización del riego por goteo mediante energía fotovoltaica representa una alternativa sostenible y eficiente frente a los métodos tradicionales de riego, al optimizar el uso del agua y reducir la dependencia de fuentes energéticas convencionales. Por ello, la presente investigación tiene como finalidad analizar comparativamente el riego por

goteo con control manual y automatizado mediante energía fotovoltaica en el cultivo de quinua, evaluando el rendimiento del cultivo, la eficiencia hídrica y el análisis financiero en el Centro Experimental Canaán, Ayacucho. Asimismo, busca promover el uso de energías renovables y tecnologías innovadoras en el sector agrícola, contribuyendo al fortalecimiento de la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas de producción en Ayacucho y en otras regiones con características similares.

MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Materiales

a) *Materiales electrónicos y de control*

- Microcontrolador ESP32-WROOM-32
- Módulo de comunicación RS485 (MAX485)
- Sensores de flujo YF-S201
- Sensor de humedad de suelo - RS485
- Sensor de temperatura y humedad DHT22
- Relé de control de 5V/10A
- Electroválvula de 12V DC
- Transistor 2N3904
- Diodo 1N4007
- Resistencias (220 Ω , 510 Ω , 1k Ω , 10k Ω)
- Capacitor electrolítico de 10 μ F
- Placa PCB (para montaje final)
- Conectores tipo 2P-P5.08
- Headers macho/hembra

b) Materiales de energía y alimentación

- Panel solar de 100 W
- Controlador de carga solar de 10 A
- Batería de 12V – 7 Ah
- Regulador de tensión LM2596 (step-down)
- Cables eléctricos (12 AWG, 14 AWG GPTE, 18 AWG GPTE)
- Conectores MC4 para panel solar
- Caja de protección para batería y controlador
- Fusibles de protección (10 A, 20 A)
- Porta-fusibles

c) Materiales hidráulicos y de riego

- Tubos PVC de ½" y 1"
- Mangueras de polietileno de ½" y 1"
- Góteros autocompensados
- Cinta de riego por goteo
- Conectores de manguera (T, L, codos, uniones rectas)
- Válvulas manuales de paso
- Filtros de malla para agua
- Adaptadores para electroválvula
- Tanque de almacenamiento de agua (1100 L)
- Abrazaderas industriales

d) Materiales agrícolas

- Semillas de quinua de variedad Salcedo INIA
- Fertilizantes de aplicación básica
- Insumos fitosanitarios (biofertilizantes, bioinsecticidas)
- Herramientas agrícolas manuales (azadón, pico, rastrillo)

- Regla graduada y cinta métrica
- Estacas de madera para delimitación de parcelas
- Cuerda para marcación de surcos
- Bolsas de muestreo de grano
- Marcadores permanentes

e) Materiales de instalación y medición

- Alicates universales
- Pinzas de corte
- Destornilladores planos y de cruz
- Taladro inalámbrico con brocas
- Multímetro digital
- Cinta aislante
- Cinta de teflón
- Cinta métrica
- Nivel de burbuja
- Guantes de seguridad
- Lentes de protección

f) Herramientas y software

- Arduino IDE
- Librerías para ESP32, DHT22, RS485 y YF-S201
- Plataforma Arduino IoT Cloud
- Microsoft Excel (procesamiento de datos)

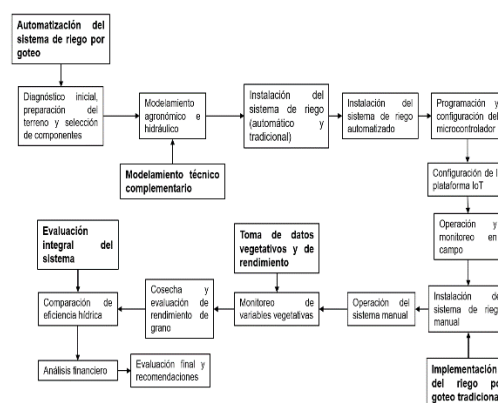
2.2 Metodología

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo donde resume las etapas del estudio que se realizaron, comprendiendo la implementación de los sistemas de riego automatizado y manual, el monitoreo del cultivo mediante la evaluación de variables agronómicas, rendimiento de grano del

cultivo, la eficiencia en el uso del agua y, finalmente, en análisis financiero para determinar la viabilidad de ambas alternativas en el cultivo de quinua de variedad Salcedo INIA.

Figura 1

Diagrama de flujo del procedimiento



2.2.1 Diagnóstico inicial, preparación de terreno y selección de componentes.

Se caracterizó el área experimental mediante análisis de suelo, agua y evaluación del sistema hidráulico disponible. El suelo presentó textura franco arcillo arenoso y condiciones adecuadas para el cultivo, mientras que el agua fue clasificada como C1-S1, apta para riego presurizado. Posteriormente, se efectuó la preparación del terreno mediante arado, rastreado y nivelación. Finalmente, se seleccionaron e instalaron los componentes hidráulicos, electrónicos y fotovoltaicos requeridos para los sistemas de riego por goteo manual y

automatizado. En la tabla 1 se muestra la selección de componentes de los sistemas de riego manual y automatizado.

Tabla 1

Selección de componentes

Parámetro	T1: Manual	T2: Automatizado
Sistema	Goteo manual	Goteo + IoT + sensores
Energía	Panel solar 100 W	Panel solar 100 W
Control	Operario	Microcontrolador ESP32 + modulo RS485
Área (m²)	48	48

Nota. Condiciones agronómicas iguales en ambos tratamientos.

2.2.2 Modelamiento agronómico e hidráulico

Se realizó el modelamiento agronómico para estimar los requerimientos hídricos de la quinua mediante la determinación de la ETo, Kc y ETc, definiendo la frecuencia, lámina y tiempo de riego para cada etapa fenológica. Asimismo, se efectuó el modelamiento hidráulico en WaterCAD V.24 para verificar el desempeño del sistema de riego, considerando caudales de diseño y pérdidas de carga mediante la ecuación de Hazen-Williams.

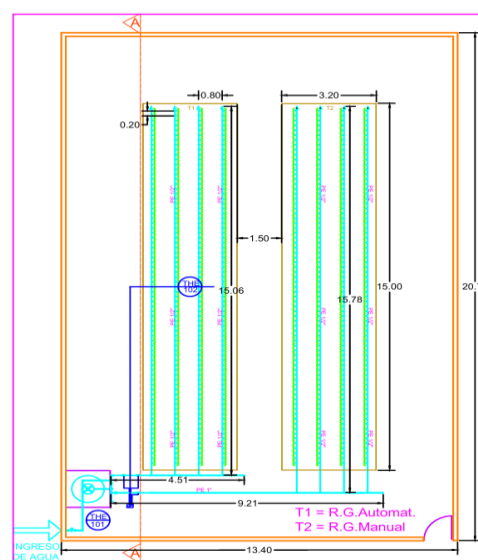
2.2.3 Instalación del sistema de riego manual y automatizado

El sistema de riego incluyó una red hidráulica compuesta por tanque elevado, tuberías, válvulas y goteros autocompensados de 2 L/h para las

parcelas automatizada y convencional. El sistema automatizado integró un ESP32, sensores de humedad y temperatura del suelo y ambiente, caudalímetro, electroválvula, sistema fotovoltaico y la plataforma Arduino IoT Cloud, permitiendo el riego automático en función de los umbrales de humedad del suelo definidos para cada etapa fenológica de la quinua. En la figura 2 se muestra el plano de los sistemas de riego.

Figura 2

Plano del sistema de riego



a) Diagrama de conexiones

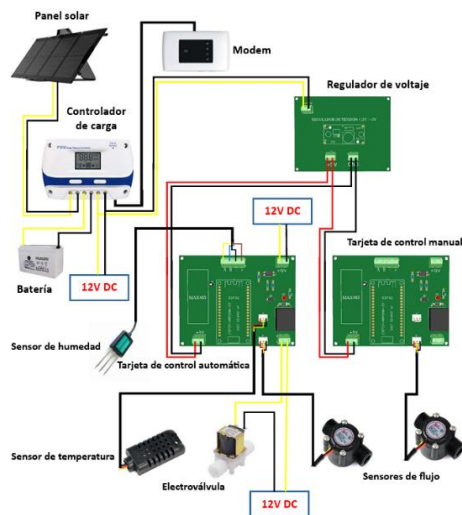
Se realizó el dimensionamiento del sistema fotovoltaico y la configuración del sistema de control automatizado, verificándose la compatibilidad entre el consumo energético de los componentes electrónicos y la capacidad del panel solar instalado.

Asimismo, se determinó una autonomía aproximada de siete horas de operación con una batería, integrando sensores de humedad del suelo, temperatura ambiental, sensores de flujo y una electroválvula para el monitoreo y control del riego.

En la figura 3 se muestra las conexiones correspondientes del riego manual y automatizado.

Figura 3

Diagrama de conexiones



Se realizó la instalación de los sistemas de riego por goteo manual y automatizado conforme a los planos de diseño y al modelamiento hidráulico establecido como se muestra en la figura 4. Posteriormente, se efectuaron pruebas de funcionamiento para verificar la ausencia de fugas y garantizar el adecuado desempeño hidráulico de ambos sistemas antes de su puesta en operación.

Figura 4

Sistema de riego manual y automático instalado



2.2.4 Operación del sistema manual y automatizado

a) Calibración del sensor de flujo y humedad

Como se observa en la figura 5 se realizó la calibración de los sensores de humedad del suelo y flujo de agua mediante la comparación de sus lecturas con instrumentos patrón de referencia.

Los resultados evidenciaron una alta precisión y confiabilidad, obteniéndose un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9998 para el sensor de humedad temperatura de suelo y 0,9973 para el sensor de flujo, confirmando su adecuada precisión para el monitoreo y control del sistema de riego automatizado.

Figura 5

Calibración del sensor de humedad



b) Coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad (CU) se calculó según la metodología de Keller y Karmeli (1974), utilizando la relación entre el caudal promedio del 25 % de los emisores de menor descarga y el caudal medio total:

$$CU = \frac{q_{25}}{q_m} \times 100$$

CU = Es el coeficiente de uniformidad del riego evaluado en el campo, expresado en porcentaje (%).

q_{25%} = Promedio del 25% de los menores valores de agua recolectada.

q_m = Promedio de todos los valores de agua recolectada en el sistema.

Como se observa en la figura 6 el proceso de medición del coeficiente de uniformidad, donde se obtuvieron valores de 90,52 % para el sistema automatizado y 88,47 % para el sistema manual, correspondientes a las categorías "Excelente" y "Bueno", respectivamente.

Figura 6

Toma de datos para cálculo de coeficiente de uniformidad



c) Manejo agronómico

Se realizó el manejo agronómico del cultivo de quinua mediante labores de fertilización, siembra, riego y manejo fitosanitario en ambos tratamientos. La fertilización se estableció de acuerdo con el análisis químico del suelo y los requerimientos nutricionales del cultivo, complementándose con la aplicación de bioestimulantes. La siembra de la variedad Salcedo INIA se efectuó manualmente bajo densidades recomendadas para la zona de estudio. El riego se aplicó mediante sistemas por goteo manual y automatizado, programados según la demanda hídrica del cultivo. Asimismo, se ejecutaron labores de control de malezas, raleo, aporque y manejo fitosanitario para garantizar un adecuado desarrollo y productividad del cultivo.

2.2.5 Toma de datos vegetativos y rendimiento

a) Datos vegetativos

Las variables vegetativas se evaluaron durante la madurez fisiológica de la quinua. Se seleccionaron 10 plantas por tratamiento y se midieron la altura de planta, la longitud de panoja y el diámetro de panoja. Los datos obtenidos fueron analizados mediante

ANOVA de un factor y la prueba de Tukey (HSD, $\alpha = 0,05$).

En la figura 7 se muestra la toma de datos de las variables morfológicas teniendo en cuenta la herramienta de medición un flexo.

Figura 7

Toma de datos de las variables morfológicas



b) Evaluación de rendimiento de grano

El rendimiento de grano se evaluó en la madurez fisiológica del cultivo mediante la cosecha manual de cada unidad experimental. Se seleccionaron 4 surcos de 1 m lineal por parcela y 10 plantas para la evaluación de variables morfológicas. Las muestras fueron secadas, trilladas, limpiadas y pesadas. Posteriormente, se determinó el contenido de humedad en laboratorio y se corrigió el peso del grano para estimar el rendimiento en kg/ha.

c) Secado y corrección a humedad estándar

La humedad del grano (%) se determinó mediante el método de secado en estufa a 105 °C. Posteriormente, el peso del grano fue corregido a una humedad de referencia para el cálculo del rendimiento.

$$W_{\text{corr}} = W_{\text{medido}} \times \frac{100 - m}{100 - m_r}$$

Donde:

W_{corr} = peso corregido del grano a la humedad de referencia (kg),

W_{medido} = peso medido del grano (kg),

m = humedad medida del grano (%),

m_r = humedad de referencia (%).

Humedad de referencia: 12.5% (INIA, 2005)

d) Cálculo del rendimiento por parcela (kg·ha⁻¹)

Se convirtió el peso corregido del grano de cada parcela a rendimiento por hectárea usando:

$$R = \frac{W_{\text{corr}}}{A_{\text{parcela}}} \times 10\,000$$

Donde:

R = rendimiento por parcela expresado en kg·ha⁻¹

W_{corr} = peso corregido del grano en kg

A_{parcela} = área de la parcela en m²

10 000 = factor para convertir m² a ha

2.2.6 Comparación de la eficiencia hídrica

La eficiencia en el uso del agua (EUA) se calculó como la relación entre el rendimiento de grano y el volumen total de agua aplicada durante el ciclo del cultivo, registrado mediante un flujómetro instalado en el sistema de riego. La EUA se expresó en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ y se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$EUA = \frac{R}{A}$$

Donde:

EUA = Eficiencia en el uso del agua ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

R = Rendimiento de grano ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

A = Volumen total de agua aplicada ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)

2.1.1 Análisis financiero

El análisis económico se realizó para comparar la viabilidad financiera de los sistemas de riego manual y automatizado. Se determinaron los costos totales de cada tratamiento considerando instalación, operación y mantenimiento. Posteriormente, se evaluó la rentabilidad mediante el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), utilizando un horizonte de evaluación de cinco años y una tasa de descuento del 10 %. El

VAN se determinó mediante la siguiente expresión:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FN_t}{(1+i)^t} - I_0$$

Donde:

VAN = Valor Actual Neto

FN_t = Flujo neto en el periodo t

i = tasa de descuento (10%)

t = periodo de evaluación

I₀ = inversión inicial

n = número de años evaluados

La rentabilidad de cada sistema de riego se evaluó mediante la Tasa Interna de Retorno (TIR), considerando la inversión inicial y los flujos netos proyectados durante el periodo de evaluación, según la siguiente ecuación:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FN_t}{(1+TIR)^t} - I_0$$

Donde:

TIR = Tasa Interna de Retorno

FN_t = Flujo neto en el periodo t

I₀ = inversión inicial

t = periodo de evaluación

n = número de años evaluados

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Manejo inicial de la quinua

La quinua variedad Salcedo INIA se cultivó en un área de 118,5 m² bajo sistemas de riego por goteo manual y automatizado. Se realizó un manejo agronómico convencional durante el ciclo del cultivo y la cosecha se efectuó a los 157 días después de la siembra, en madurez fisiológica.

Posteriormente, el grano fue trillado, secado y pesado para la evaluación del rendimiento.

a) Evaluación morfológica del cultivo de quinua en el riego automatizado y manual

El análisis estadístico (ANOVA y prueba de Tukey, $\alpha = 0.05$) mostró que el riego automatizado presentó mayores valores en las variables morfológicas evaluadas; sin embargo, solo la longitud de panoja presentó diferencias significativas ($p = 0.0445$). Por tanto, para esta variable se rechazó la hipótesis nula (H_0 : no existen diferencias entre los sistemas de riego) y se aceptó la hipótesis alternativa (H_1 : existen diferencias entre los sistemas de riego). Los resultados mostrados en la Tabla 2 sugieren que la automatización del riego favorece el desarrollo de la

panoja debido a una aplicación más uniforme del agua y a una mejor disponibilidad hídrica para las plantas durante su crecimiento.

Tabla 2.

ANOVA y Tukey ($\alpha = 0.05$) – variables morfológicas

Variable	Auto.	Man.	F	p	H ₀
Alt. planta (cm)	210.2	201.6	1.670	0.213	No rec.
Long. panoja (cm)	83.2	75.5	4.664	0.045*	Rech.
Diám. panoja (cm)	23.1	21.5	1.191	0.290	No rec.

Nota. * $p < 0.05$. Auto. =Automatizado; Man. =Manual; Rech.=Rechaza H_0 .

3.1.2 Rendimiento del grano de quinua en el riego manual y automatizado.

De acuerdo con los datos de la tabla 3, el riego por goteo automatizado alcanzó un rendimiento de 5,670.83 kg/ha, superior a los 5,412.50 kg/ha obtenidos con el riego manual.

Tabla 3

Rendimiento de grano (corregido a 12.5 % HR)

Tratamiento	Peso medido (kg)	Peso correg. (kg)	Rendim. (kg/ha)
T1 – Manual	26.57	25.98	5,412.50
T2 – Automat.	27.73	27.22	5,670.83
+Variación	—	—	+258.33 (+4.77 %)

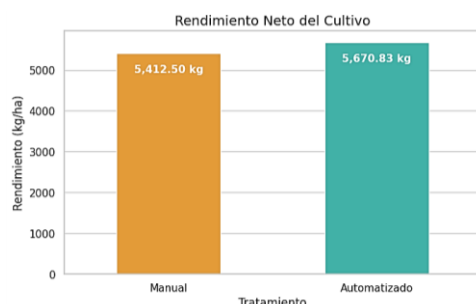
Nota. Área por parcela = 48 m². Humedad referencia: 12.5 % (INIA, 2005).

En la figura 8 también se observa un incremento de 258.33 kg/ha, equivalente al 4.77 % en la producción

de quinua a favor del riego automatizado.

Figura 8

Comparación del rendimiento de grano de quinua entre ambos sistemas



3.1.3 Eficiencia en el uso del agua en sistemas de riego

El sistema automatizado realizó 26 eventos de riego (tiempo total: 34.51 h) aplicando 22,452 L en la parcela de 48 m². El sistema manual aplicó 29,637 L en 22 eventos (41.13 h). A escala de hectárea, el automatizado aplicó 4,677.5 m³/ha y el manual 6,174.4 m³/ha (ahorro de 24.24 %). En la tabla 4 también evidencia una eficiencia en el uso del agua de 37.50 % a favor del riego por goteo automatizado.

Tabla 4

Análisis comparativo de eficiencia en el uso del agua.

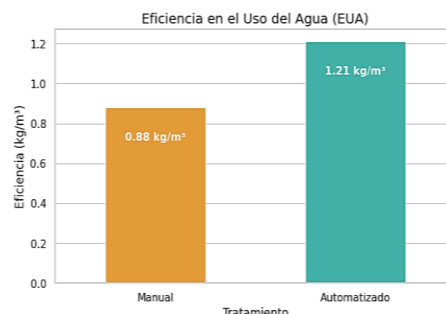
Variable	T1 Manual	T2 Auto.	Variación
Vol. aplicado (m ³ /ha)	6,174.4	4,677.5	-24.24 %
Rendimiento (kg/ha)	5,412.50	5,670.83	+4.77 %
EUA (kg/m ³)	0.88	1.21	+37.50 %

Nota. EUA = Eficiencia en el Uso del Agua.

En la figura 9 se observa una ligera ventaja con para el riego automatizado.

Figura 9

Comparación de eficiencia en el uso del agua entre ambos sistemas



3.1.4 Análisis financiero de VAN y TIR de los sistemas de riego en el cultivo de quinua

En la tabla 5 en el análisis se realizó a escala de 1 ha, 2 campañas/año, tasa de descuento 10 %, horizonte 5 años, precio de quinua S/ 7.50/kg. Los factores de escalamiento se obtuvieron de la relación entre costos experimentales y los de referencia de producción de quinua (AGROIDEAS, 2020).

Tabla 5

Resumen de ingresos, costos y flujo neto anual por sistema de riego

Parámetros	Sistema de riego manual	Sistema de riego automatizado
Rendimiento de grano de quinua (kg/ha)	5412.50	5670.83
Campañas al año	2.00	2.00
Precio de quinua en el mercado (S/./kg)	7.5	7.5
Ingreso anual (S/.) = Rend. × Precio	81188	85062
Costo total anual (S/.)	34285	19813
Flujo neto anual (S/.) = Ingreso - Costo	46902	65249
Inversión inicial (S/.)	45216	49223
Tasa de descuento	10%	10%
Horizonte de evaluación (años)	5	5

Nota. Tasa descuento 10 % (MIDAGRI/MEF). Precio quinua: S/ 7.50/kg. 2 campañas/año.

En la tabla 6 se muestra los flujos de caja proyectados que evidenciaron que el sistema de riego automatizado generó mayores beneficios económicos durante el horizonte de evaluación de cinco años, registrando flujos netos anuales de S/ 65,249, superiores a los S/ 46,902 obtenidos con el sistema manual, pese a requerir una inversión inicial ligeramente mayor.

Asimismo, ambos sistemas resultaron financieramente viables al presentar VAN positivos y TIR superiores a la tasa de descuento del 10%. Sin embargo, el sistema automatizado mostró un mejor desempeño financiero, alcanzando un VAN de S/ 198,123 y una TIR de 131%, frente al VAN de S/ 132,580 y la TIR de 101% del sistema manual, lo que evidencia una mayor rentabilidad y una recuperación más rápida de la inversión, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6

Flujo de caja económico (S/.)

Año	T1 Manual	T2 Auto.
0	-45,216	-49,223
1	+46,902	+65,249
2	+46,902	+65,249
3	+46,902	+65,249
4	+46,902	+65,249
5	+46,902	+65,249
VAN	S/ 132,580	S/ 198,123
TIR	101 %	131 %

Nota. Flujos constantes asumiendo condiciones productivas estables.

3.2 Discusiones

3.2.1. Rendimiento de grano de quinua bajo riego manual y automatizado

El incremento del 4.77 % en el rendimiento de grano de quinua a favor del sistema automatizado (5,670.83 kg/ha frente a 5,412.50 kg/ha) coincide con lo reportado por Bustamante y Chugá (2022), quienes señalaron que la implementación de sistemas de riego inteligente basados en IoT incrementa la productividad agrícola en comparación con sistemas tradicionales, atribuible a una mayor precisión en la aplicación del agua que permite satisfacer de manera más eficiente los requerimientos hídricos del cultivo durante sus diferentes etapas fenológicas. En la misma línea, Loaiza et al. (2015) indicaron que la automatización del riego optimiza la distribución del agua y mejora la oportunidad de aplicación, reduciendo la intervención manual y favoreciendo el desarrollo del cultivo, planteamiento que respalda los resultados obtenidos, ya que el sistema automatizado permitió una programación más precisa de los riegos, evitando situaciones de déficit o exceso hídrico. Desde el punto de vista morfológico, la longitud de panoja presentó diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos ($F = 4.6640$; $p = 0.0445$),

confirmada mediante la prueba de Tukey HSD, lo que indica que el suministro controlado de agua favoreció el desarrollo reproductivo de la quinua variedad Salcedo INIA.

Cabe destacar que ambos rendimientos obtenidos superan lo reportado por Porras (2015), quien encontró rendimientos de grano de quinua de unos 3,519.3 kg/ha en riego por exudación y 1,587.9 kg/ha en riego por goteo convencional en quinua variedad INIA 431-Altiplano, lo que sugiere que la implementación del riego por goteo con control automático en las condiciones de Canaán, Ayacucho, permite alcanzar niveles productivos superiores a los sistemas de riego localizado sin automatización. Asimismo, los rendimientos de ambos tratamientos superan el valor reportado por Quispe (2024), quien en el mismo Centro Experimental Canaán registró un rendimiento máximo de 4,028.96 kg/ha con una densidad de 125,000 plantas/ha bajo condiciones de riego convencional, lo que indica que la tecnificación hídrica mediante riego por goteo, independientemente del tipo de control, contribuye a incrementar la productividad del cultivo de quinua respecto a sistemas de manejo tradicional sin tecnificación hídrica. Estos hallazgos constituyen evidencia favorable a la hipótesis planteada en la presente investigación.

3.2.2. *Uso del agua en sistemas de riego*

La mayor eficiencia en el uso del agua del sistema automatizado ($EUA = 1.21 \text{ kg/m}^3$) en comparación con el sistema manual ($EUA = 0.88 \text{ kg/m}^3$), representando una mejora del 37.5 %, se explica por un menor volumen aplicado de 22,452 m^3 en la parcela experimental (4,677.5 m^3/ha), un 24.2 % menos que el sistema manual con 29,637 m^3 (6,174.4 m^3/ha), logrando al mismo tiempo un mayor rendimiento (5,670.83 kg/ha frente a 5,412.50 kg/ha). Este comportamiento indicó que la automatización permitió una gestión más precisa del riego, ajustándose a las necesidades hídricas reales del cultivo y reduciendo pérdidas innecesarias de agua. Estos resultados coinciden con lo reportado por Bustamante y Chugá (2022), quienes señalaron que los sistemas de riego automatizados basados en tecnologías IoT optimizan el uso del agua mediante un mejor control de la frecuencia y duración del riego, logrando incrementos de hasta 54 % en productividad y eficiencia. De manera similar, Acero (2021) encontró que la automatización permitió reducir el consumo de agua en un 21.25 % en comparación con sistemas manuales, tendencia confirmada en la presente

investigación con una reducción del 24.2 % en el volumen aplicado.

Asimismo, Loaiza et al. (2015) indicaron que la automatización contribuye a disminuir las pérdidas de agua por evaporación y por aplicaciones excesivas debido al control más preciso del sistema, planteamiento que coincide con los resultados obtenidos, ya que el riego automatizado realizó 26 eventos de riego frente a 22 del sistema manual, aplicando un menor volumen total de agua en la parcela experimental (22,452 m³ frente a 29,637 m³), pero con mayor precisión y oportunidad. En la misma línea, Días et al. (2024) destacaron que el uso de tecnologías IoT facilita el monitoreo en tiempo real y mejora la eficiencia hídrica del cultivo, aspecto que se evidenció en el presente estudio mediante el monitoreo continuo de la humedad del suelo, el caudal y la temperatura, lo que permitió activar el riego únicamente cuando el cultivo lo requería. Por otro lado, Porras (2015) reportó eficiencias en el uso del agua de 2.2 kg/m³ en exudación y 0.9 kg/m³ en goteo para la quinua variedad INIA 431-Altiplano; los valores obtenidos en la presente investigación (1.21 kg/m³ para riego automatizado y 0.88 kg/m³ para riego manual) confirman que la eficiencia del riego por goteo puede incrementarse mediante la

incorporación de sistemas de control automático, superando ligeramente los valores reportados para el goteo convencional. Lo anterior constituye evidencia adicional que apoya la hipótesis de superioridad del sistema automatizado frente al sistema manual.

3.2.3. Análisis financiero de VAN y TIR de los sistemas de riego en el cultivo de quinua

El VAN positivo de ambos sistemas (S/ 198,123 para el automatizado y S/ 132,580 para el manual) indica que ambas alternativas generan beneficios económicos superiores a la inversión realizada, considerando una tasa de descuento del 10 % y un horizonte de evaluación de cinco años. La diferencia de S/ 65,543 en el VAN a favor del sistema automatizado se explica principalmente por la reducción de los costos de mano de obra (S/ 5,725 frente a S/ 11,994) y los mayores flujos netos anuales generados (S/ 65,249 frente a S/ 46,902). Este comportamiento coincide con lo reportado por Zeña (2022), quien, al comparar técnica y económicamente sistemas fotovoltaico y eólico para riego tecnificado en el distrito de Zaña, determinó que el sistema fotovoltaico presenta un VAN positivo y una TIR superior al 10 %, confirmando que las inversiones en tecnologías de riego

eficiente generan beneficios económicos superiores a la inversión realizada cuando se evalúan en horizontes de mediano plazo.

En cuanto a la Tasa Interna de Retorno, el sistema automatizado obtuvo una TIR de 131 %, superior a la del sistema manual con 101 %, ambas considerablemente por encima de la tasa de descuento del 10 %, lo que confirma la viabilidad económica de ambas alternativas de inversión. Sin embargo, la mayor TIR del sistema automatizado refleja que, pese a su mayor inversión inicial (S/ 49,223 frente a S/ 45,216), los mayores flujos netos anuales generados (S/ 65,249 frente a S/ 46,902) compensan ampliamente dicha inversión. En este sentido, Campos (2018) obtuvo resultados similares al implementar un sistema de riego por goteo con energía solar fotovoltaica en el Fundo Huertas, distrito de Sayán, donde el sistema optimizó el riego, redujo el consumo de combustible y mejoró la eficiencia energética, incrementando el rendimiento del cultivo. Ello evidencia que, cuando la tecnología seleccionada reduce la dependencia de insumos costosos y optimiza el uso del recurso hídrico, los flujos netos anuales se incrementan y la TIR supera con amplitud la tasa de descuento, confirmando la rentabilidad

de la inversión a lo largo del horizonte de evaluación de cinco años. Estos resultados refuerzan la hipótesis planteada, demostrando que el sistema automatizado constituye una alternativa superior al sistema manual desde una perspectiva económica y financiera.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El sistema de riego por goteo automatizado alcanzó un rendimiento promedio de grano de quinua de 5,670.83 kg/ha, superior al obtenido con el sistema manual (5,412.50 kg/ha), registrando un incremento de 258.33 kg/ha equivalente al 4.77 %. Asimismo, la longitud de panoja presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($F = 4.6640$; $p = 0.0445$), evidenciando que el suministro controlado de agua favoreció el desarrollo reproductivo del cultivo.

El sistema de riego automatizado presentó una eficiencia en el uso del agua de 1.21 kg/m³, superior a la obtenida con el sistema manual (0.88 kg/m³), representando una mejora de 37.5 %. Además, logró un mayor rendimiento utilizando un menor volumen de agua aplicada (4,677.5 m³/ha frente a 6,174.4 m³/ha),

demostrando una utilización más eficiente del recurso hídrico.

El sistema de riego automatizado obtuvo un VAN de S/ 198,123 y una TIR de 131 %, valores superiores a los registrados por el sistema manual (VAN de S/ 132,580 y TIR de 101 %). Los mayores flujos netos generados, la reducción de los costos de mano de obra y la ausencia de costos energéticos permitieron compensar la mayor inversión inicial, evidenciando una mayor rentabilidad económica del sistema automatizado.

El sistema de riego por goteo automatizado mediante energía fotovoltaica superó al sistema manual en rendimiento de grano, eficiencia en el uso del agua y rentabilidad económica. El incremento de 4.77 % en la producción, la mejora de 37.5 % en la eficiencia hídrica y los mayores indicadores financieros (VAN y TIR) confirmaron su superior desempeño bajo las condiciones evaluadas en el Centro Experimental Canaán, Ayacucho.

4.2 Recomendaciones

Implementar el sistema de riego por goteo automatizado en el cultivo de quinua variedad Salcedo INIA en zonas con condiciones agroecológicas similares a las del Centro Experimental Canaán, Ayacucho, debido a su efecto favorable sobre el rendimiento de

grano. Asimismo, complementar su uso con un adecuado manejo agronómico que incluya fertilización balanceada, control fitosanitario y densidad de siembra apropiada para maximizar su desempeño productivo.

Incorporar sensores de humedad del suelo y sistemas de monitoreo en tiempo real en los programas de riego automatizado, con el fin de optimizar la aplicación del agua y mejorar la eficiencia hídrica del cultivo. Además, promover la capacitación de los productores en la operación y mantenimiento de estas tecnologías para garantizar su funcionamiento adecuado y sostenibilidad.

Evaluar el sistema de riego automatizado con energía fotovoltaica a escala comercial, considerando superficies mayores de cultivo, con el propósito de validar los indicadores económicos obtenidos y determinar con mayor precisión los costos reales de instalación, operación y mantenimiento. Asimismo, promover mecanismos de financiamiento que faciliten su adopción por parte de pequeños y medianos productores.

Desarrollar investigaciones complementarias en diferentes campañas agrícolas, variedades de quinua y condiciones agroecológicas de la región Ayacucho, con la finalidad de validar la consistencia de los

resultados obtenidos y ampliar la aplicabilidad del sistema de riego automatizado. Además, evaluar aspectos relacionados con la uniformidad de riego, la presión de operación y el desempeño del sistema fotovoltaico en condiciones de mayor escala.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Acero, C. (2021). "Implementación de un sistema de Internet de las Cosas para optimizar la gestión del agua en la agricultura de la región Tacna. *Lamchipa, Enrique*.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (1998). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (1st ed.). FAO.
- Acosta, M., y John, G. (2020). *Implementación de un prototipo para automatización de riegos*.
- Bedoya, M., y Ángeles, V. (2017). Comparación de métodos para estimar pérdidas localizadas en riego por goteo. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(4), 117–125.
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-07>
- Berón, M., Montejano, G., y Albornoz, M. (2017). *Interfaz gráfica de usuario: el usuario como protagonista del diseño* (SEDECI, Ed.).
- Blair, E. (2017). *Riego por goteo: Teoría y práctica* (Biblioteca Venezuela).
- Bustamente, D., y Chugá, M. (2022). *Diseño e implementación de un sistema de riego inteligente y monitoreo de variables edafológicas y meteorológicas activado por IOT*.
- Castaño, S. (2023). *Medición de Caudal con sensor YF-S201*. SAICAC MECATRÓNICA.
- Campos, P. (2018). Proyecto de riego por goteo utilizando energía solar para cultivo de flores para exportación en el Fundo Huertas, distrito de Sayán, provincia de Huaura, departamento de Lima [Universidad Pedro Ruiz Gallo].
<https://hdl.handle.net/20.500.12893/2606>
- Ccoyllar, Kevin, Zarabia, A., y Lozano, A. (2021). *Vulnerabilidad de la quinua (Chenopodium quinoa Willd.) a eventos de estrés ambiental en las regiones altas de los Andes peruanos* [Universidad Continental].
<https://doi.org/https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.063>

- Días, J., Salcedo, D., Mercado, T., Quiñonez, Y., & Mejía, A. (2024). *Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual y su aplicación mediante un prototipo*.
- Díaz, E., Palacio, J., Páez, J., y Simanca, F. (2023). *La agricultura de precisión y herramientas TIC de apoyo* (Ediciones UCC).
- Estuiez, B. (2025). Sensor analógico de humedad del suelo, dispositivo con salida RS485. *Slicetex Electronics*.
- Fernández, E., y Ordoñez, J. (2021). *Desarrollo de una arquitectura Cloud Computing para comunicar dos estaciones del sistema de producción modular utilizando el protocolo MQTT*. Universidad Politécnica Salesiana.
- García, J., Huahuachampi, J., y Soto, L. (2017). Determinación de la demanda hídrica del cultivo de quinua QML01 (*Chenopodium Quinoa Willd*) en la Molina. *ALICIA*, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.21704/ac.v78i2.1057>
- Gómez, L., y Aguilar, E. (2016). *Guía de cultivo de la quinua* (Universidad Nacional Agraria La Molina, Ed.; FAO).
- Heble, S., Kumar, A., Prasad, K. V. V. D., Samirana, S., Rajalakshmi, P., & Desai, U. B. (2018). Una red IoT de bajo consumo para la agricultura inteligente. *4.º Foro Mundial IEEE Sobre Internet de Las Cosas (WF-IoT), 2018*, 609–614. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2018.8355152>
- Huanca, V. (2024). *Implementación de un sistema inalámbrico utilizando el Internet de las cosas para el monitoreo del cultivo de papas en el Fundo Huaylacucho en el Departamento de Ayacucho*.
- INIA. (2013). *Quinua Salcedo INIA* (INIA).
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Howitt, R. E., Janssen, S., Keating, B. A., Munoz-Carpena, R., Porter, C. H., Rosenzweig, C., y Wheeler, T. R. (2017). Hacia una nueva generación de datos, modelos y productos de conocimiento de sistemas agrícolas. *Sistemas Agrícolas*, 155, 269–288. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.021>
- Keller, J., y Karmeli, D. (1974). Parámetros de diseño de riego

- por goteo. *Transacciones de La Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas*, 1–7. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNAAA949.pdf
- Lazo, P., y Coronel, J. (2022). *Diseño e implementación de un sistema de Adquisición y gestión remota de información de equipos impresores industriales mediante el uso de la red celular*.
- Loaiza, R., Espinosa, L., y Jíménes, A. (2015). Automatización de sistemas de riego. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1–10. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/530>
- Lozano, R. (2020). *Medir temperatura y humedad DHT21 ASAIR*. Taloelectronics.
- Maier, A., Agudo, A., y Vagapov, Y. (2017). *Análisis comparativo e implementación práctica del módulo de microcontrolador ESP32 para el Internet de las Cosas*. 143–148. <https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926>
- Mateu, W. (2023). *Tuberosas y granos andinos*.
- Méndez, J., y Cuervo, R. (2013). *Energía solar fotovoltaica* (Fundación Cofemetal).
- Mora, S. (2015). Entiendo de Internet de las cosas. *Investiga TEC*.
- Morales, R., Ruiz, G., y Lopez, S. (2021). Impacto de automatización de riego: Caso de estudio. *SciELO*, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.13053/cys-24-2-3412>
- Mujica, A., Jacobsen, S., Izquierdo, J., & Pierre, J. (2001). *Quinua (Chenopodium quinoa Willd.): Ancestral cultivo andino, alimento del presente y el futuro*.
- Porras, Z. (2015). *Evaluación del sistema de riego por goteo y exudación en el cultivo de quinua (Chenopodium quinoa Willd) en el INIA - La Molina*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Quispe, J. (2024). *Densidad de plantas en el rendimiento de tres variedades de Chenopodium quinoa Willd. Canaán 2750 msnm - Ayacucho, 2021*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- Rajendrakumar, S., Parvati, V. K., y Rajashekarappa. (2018). Un Sistema de Riego Eficiente para la Agricultura. *Conferencia Internacional 2018 Sobre Comunicación, Computación e Internet de Las Cosas (IC3IoT)*, 132–136.

<https://doi.org/10.1109/IC3IoT.2018.8668206>

Sushanth, G., y Sujatha, S. (2018). Sistema de Agricultura Inteligente Basado en IoT. *Conferencia Internacional 2018 Sobre Comunicaciones Inalámbricas, Procesamiento de Señales y Redes (WiSPNET)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2018.8538702>

Tineo, A., Cabrera, C., y Fernández, S. (2021). Niveles y granulometría de diatomita en el rendimiento de tomate, en seco. Ayacucho, 2020. *Investigación*, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.51440/unsch.revistainvestigacion.29.1.2021.285>

Valverde, A., Vargas, G., García, M., y Días, J. (2022). Impacto de la implementación del sistema de riego con energía solar en cultivos de limón. *SciELO*, 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.22335/rict.v14i2.1571>

Zeña, B. (2022). *Análisis técnico económico comparativo entre una minicentral fotovoltaica y eólica para abastecimiento de un sistema de riego tecnificado* [Universidad Señor de Sipán]. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/10148>